

А.М. Звягинцев, Г.М. Крученицкий

О СВЯЗЯХ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНЦИЙ

Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской обл.

Поступила в редакцию 3.04.98 г.

Принята к печати 30.10.98 г.

При анализе временных рядов среднемесячных приземных концентраций озона на озонметрических станциях Европы обнаружены их статистически значимые связи с рядами солнечной активности и элементов общей циркуляции атмосферы – различных параметров североатлантического колебания. Для озонметрической станции Хоенпайсенберг (Германия) отдельные вклады тренда, параметров североатлантического колебания и индекса солнечной активности в долгосрочную общую изменчивость временных рядов ПКО составляют около 0,16; 0,11 и 0,015 соответственно; еще 0,18 составляет вклад авторегрессионной составляющей.

Хорошо известно [1–3], что временной ход общего содержания озона (ОСО) и вертикального распределения озона (ВРО) в каждом отдельном пункте наблюдений количественно в заметной степени определяется многочисленными предикторами, среди которых могут быть выделены региональные (температура и геопотенциал на определенных уровнях, содержание других малых газовых составляющих, аэрозолей и т.п.) и глобальные – квазипериодические – возмущения, распространяющие свое влияние на многие тысячи километров и связанные с солнечной активностью, квазидвухлетними колебаниями (далее – КДК) зональной циркуляции в экваториальной стратосфере, параметрами климатообразующих центров действия атмосферы (в частности, североатлантического колебания [4, 5]).

Подобное разделение предикторов на региональные и глобальные при всей своей условности и упрощенности отражает существенные различия в пространственных и временных масштабах отмечаемых воздействий. Естественно также ожидать, что и для временных рядов приземной концентрации озона (ПКО), весьма чувствительной к локальным влияниям (ощутимо влияют выбросы малых газовых составляющих и аэрозолей от местных источников, а также метеопараметры в приземном слое), должна существовать зависимость от глобальных колебаний, в заметной степени обуславливающих общую циркуляцию атмосферы.

Из анализа такой зависимости можно получить дополнительные сведения о природе приземного озона и его изменчивости (например, по связям приземного озона со стратосферным), но такие зависимости практически не изучались; известны лишь исследования временных рядов тропосферного озона по данным озонзондов [6], однако качество таких измерений и полнота их временных рядов оставляют желать лучшего.

Региональные предикторы связаны с высокочастотной (частота – более 1 мес^{-1}) изменчивостью ПКО, глобальные – с низкочастотной. Если влияние региональных предикторов (в частности, температуры, влажности и др.) на ПКО обсуждается во многих работах [7, 8], то влияние глобальных предикторов количественно остается практически не исследованным [5], хотя на долгосрочную из-

менчивость ОСО их влияние достаточно хорошо изучено [2, 3]. В настоящей работе при использовании подхода, описанного в предыдущих работах [5, 8–11], проанализированы временные ряды ПКО на европейских озонметрических станциях с целью количественной оценки характеристик связи ПКО с солнечной активностью и характеристиками общей циркуляции атмосферы.

В работе использованы среднемесячные данные наблюдений ПКО с 1976 по 1995 г. на ряде станций мировой озонметрической сети [12]. Среди них выгодно выделяются временные ряды, полученные в Хоенпайсенберге и имеющие общепризнанное исключительное значение для анализа временных зависимостей параметров озонового слоя: эти ряды достаточно полны и длинные, характеризуются высоким качеством экспериментального материала, а их возможные погрешности, связанные с качеством измерений и влиянием близлежащих антропогенных загрязнителей атмосферы, достаточно хорошо проанализированы [13].

Достаточно длинные для анализа долгосрочной изменчивости и данные станции Нойглобсов, входящие в сеть ВАРМоN – сеть ВМО по фоновому мониторингу загрязнений воздуха. Данные для остальных станций, опубликованные в [12], в том числе для всех расположенных вне Европы, к сожалению, либо недостаточно длинные (менее 10 лет), либо имеют значительные пропуски (например, Сибтон). Эти данные использованы только для расчетов параметров годового хода ПКО (отметим также, что временное поведение ПКО на высокогорных станциях, например, на германских – Цугшпитце и Ванк, – характерно для свободной тропосферы и существенно отличается от поведения ПКО на равнинных станциях [14], в частности, по внутрисуточной изменчивости; кроме того, их ряды недостаточно длинные и поэтому в анализе не использованы). Отметим также, что если обнаружение статистически значимых связей может быть связано не с их отсутствием, а с их малозначимостью (по сравнению с погрешностями измерений или влиянием других факторов), то, напротив, их обнаружение с определенной доверительной вероятностью свидетельствует о наличии таких связей.

В качестве модели для описания временного ряда ПКО $C(m)$ принята модель, обычно используемая для описания временного хода ОСО и ВРО:

$$C(m) = Annual(m) + Trend\ m + \sum (k_i Repr_i(m)) + R(m), \quad (1)$$

где m – порядковый номер месяца, начиная с января 1976 г. (ему соответствует значение $m = 1$); $Annual(m) = C_0 + \sum [A_i \cos(2\pi i m/12) + B \sin(2\pi i m/12)]$ – нормальный годовой ход (для его удовлетворительного описания достаточно не более трех годовых гармоник [4]); $Trend$ – линейный тренд; $k_i Repr_i(m)$ – член, описывающий влияние i -го предиктора, количественно характеризуемого величиной $Repr_i(m)$; k_i – соответствующий коэффициент; $R(m)$ – остаток, который дополнительно может быть представлен в виде авторегрессионного разложения 1-го порядка:

$$R(m) = AR(1) R(m-1) + Noise(m),$$

где $AR(1)$ – коэффициент авторегрессии 1-го порядка (порядок авторегрессии обусловлен, в основном, длительностью синоптического цикла, которая в средних широтах Северного полушария составляет около 1 нед; в течение такого цикла сохраняются возникшие отклонения ПКО от климатической нормы, поэтому коэффициент авторегрессии должен быть в диапазоне от 0,2 до 0,4); $Noise(m)$ представляет собой белый шум.

В качестве возможных предикторов испытаны показатель солнечной активности – индекс $F_{10,7}$, характеристики КДК – среднемесячные значения экваториального ветра в Сингапуре на уровне 30 гПа (с учетом фазы, как это описано в [1]), индекс южного колебания, описывающий явление Эль-Ниньо/Южное колебание [2] и параметры североатлантического колебания [4, 5]. В качестве последних были использованы атмосферные давления в центрах азорского антициклона и исландского циклона, координаты этих центров, разности давлений и соответствующих координат, а также индекс североатлантического колебания (нормализованная разность атмосферных давлений в фиксированных точках – на Азорских островах и Исландии), индекс южного колебания оказались статистически незначимыми предикторами (с доверительной вероятностью $P = 0,95$) и были исключены из дальнейших расчетов. Напротив, оказалось, что ПКО в Хюенспайсенберге может быть представлено регрессионным разложением практически по всем перечисленным параметрам североатлантического колебания, причем регрессионные коэффициенты при параметрах исландского циклона и их статистическая значимость являются более весомыми, чем соответствующие величины при параметрах азорского антициклона. Как наиболее эффективные предикторы, имеющие ясный физический смысл, для дальнейших расчетов были выбраны разности $p_{AI}(m)$ атмосферных давлений в центрах азорского антициклона и исландского циклона (характеризующие интенсивность колебания) и долгот этих центров $\psi_{AI}(m)$ (характеризующие «направленность» колебания). Временные ходы этих предикторов приведены на рис. 1; они (разность давлений особенно) испытывают статистически значимые долговременные изменения и именно с ними (по крайней мере, частично) может быть связана часть наблюдаемого тренда ПКО.

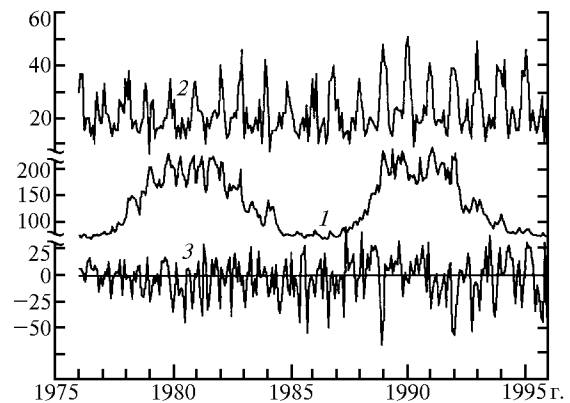


Рис. 1. Временные ходы различных параметров, использованных для регрессионного анализа: 1 – индекс солнечной активности $F_{10,7}$; 2 – разность атмосферных давлений на уровне моря между центрами азорского антициклона и исландского циклона $p_{AI}(m)$, гПа; 3 – разность между долготами центров азорского антициклона и исландского циклона $\psi_{AI}(m)$

Поскольку сами параметры североатлантического колебания испытывают годовой ход (это хорошо видно на рис. 1, особенно для разности давлений), то в качестве предикторов использованы их отклонения от оценки нормального годового хода (рассчитанные по методу наименьших квадратов):

$$\Delta p_{AI}(m) = p_{AI}(m) - C_p - \sum [A \cos(2\pi i m/12) + B \sin(2\pi i m/12)];$$

$$\Delta \psi_{AI}(m) = \psi_{AI}(m) - C_\psi - \sum [A \cos(2\pi i m/12) + B \sin(2\pi i m/12)].$$

Здесь обозначения аналогичны использованным в формуле (1). Средние значения за 1958–1995 гг. $p_{AI}(m)$ и $\psi_{AI}(m)$ составляют 21,8 гПа и $-0,3^\circ$ соответственно; их среднеквадратические отклонения – 8 гПа и $21,3^\circ$ соответственно, а среднеквадратические отклонения $\Delta p_{AI}(m)$ и $\Delta \psi_{AI}(m)$ – 6,3 гПа и $20,7^\circ$ соответственно.

Количественная характеристика воздействия каждого из влияющих факторов (или их группы), а именно его (их) доля в общей изменчивости, может быть оценена выражением [7, 8]:

$$Q = 1 - \sigma_2^2 / \sigma_1^2,$$

где σ_2^2 , σ_1^2 – дисперсии ряда после применения регрессионного разложения по данному фактору (группе факторов) и исходного ряда соответственно.

Нормальный годовой ход ПКО на европейских озонметрических станциях хорошо описывается разложением по трем первым гармоникам годового хода [11]; соответствующая эффективность Q выделения нормального годового хода составляет около 0,8 и более. Результаты определения параметров модели (вместе с соответствующими погрешностями вычисленных для уровня доверительной вероятности $P = 0,95$) для временных рядов ПКО на различных станциях представлены в таблице; вместо статистически незначимых величин проставлены прочерки. В таблице, кроме величин, обозначения которых имеются в тексте, дополнительно указаны среднеквадратические отклонения рядов $C(m)$ – σ_0 , $C(m) - Annual(m)$ – σ_r и $Noise(m)$ – σ_n .

Эффективность выделения тренда, параметров североатлантического колебания и солнечной активности в отдельности во временных рядах остатков ПКО в Хоемпайсенберге за период 1976–1995 гг. составляет около 0,16; 0,12 и 0,015 соответственно, а эффективность совокупного выделения тренда и всех названных предикторов составляет около 0,3.

Для подтверждения постоянства действия описанных влияний расчеты были проведены не только за общий срок наблюдений в Хоемпайсенберге (1976–1995 гг.), но и отдельно за его первую и вторую половины; результаты оказались сходными, особенно в количественной оценке влияний параметров САК. Исходный и некоторые из полученных в результате анализа временных рядов ПКО приведены на рис. 2. Отметим, что остаток $R(m)$, временной ход которого описывается кривой 3 на рис. 2, вероятно, может быть дополнительно представлен разложением по локальным предикторам (в частности, по приземной температуре и влажности [10]), что должно привести к дополнительному уменьшению дисперсии остаточного временного ряда еще, возможно, до 2 раз [7, 10], однако проведение этого

разложения требует привлечения временных рядов указанных метеопараметров и выходит за рамки настоящей работы.

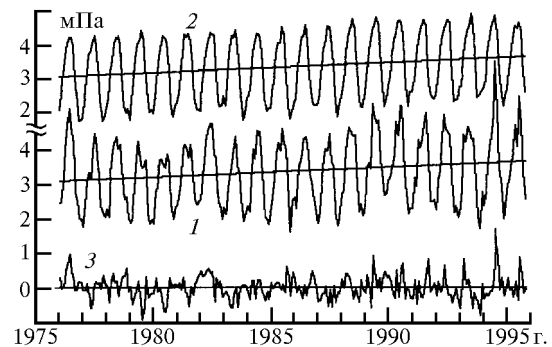


Рис. 2. Временной ход среднемесячных ПКО, мПа, в Хоемпайсенберге: 1 – данные наблюдений; 2 – регрессионное представление по формуле (1); 3 – остаток: разница между кривыми 1 и 2. Вдоль кривых 1 и 2 проведены прямые, соответствующие сумме $(C_0 + Trend\ m)$ из формулы (1)

Параметры моделей для временных рядов среднемесячных ПКО

Параметр	Станция					
	Хоемпайсенберг	Аркона	Нойглобсов	Сибтон	Прейла	Долгопрудный
	Германия			Великобритания	Литва	Россия
Северная широта	47°48'	54°41'	53°09'	51°30'	55°20'	55°45'
Восточная долгота	11°01'	13°26'	13°02'	00°07'	21°13'	37°34'
Период	1976–1995	1988–1990	1978–1991	1987–1989	1987–1994	1991–1996
C_0 , мПа	$3,07 \pm 0,10$	$1,56 \pm 0,68$	$1,4 \pm 0,14$	$2,08 \pm 0,33$	$2,08 \pm 0,16$	$1,99 \pm 0,13$
σ_0 , мПа	0,936	0,931	0,771	0,852	0,912	1,002
A_1 , мПа	$-1,20 \pm 0,07$	$-1,22 \pm 0,19$	$-0,78 \pm 0,10$	$-1,09 \pm 0,15$	$-1,16 \pm 0,12$	$-1,33 \pm 0,19$
B_1 , мПа	$-0,04 \pm 0,07$	$-0,05 \pm 0,19$	$0,20 \pm 0,10$	$0,30 \pm 0,16$	$-0,22 \pm 0,12$	$0,14 \pm 0,19$
A_2 , мПа	$-0,03 \pm 0,07$	$0,01 \pm 0,19$	$-0,05 \pm 0,10$	$-0,10 \pm 0,15$	–	–
B_2 , мПа	$0,12 \pm 0,07$	$-0,20 \pm 0,19$	$-0,06 \pm 0,10$	$-0,21 \pm 0,16$	–	–
A_3 , мПа	$0,14 \pm 0,07$	–	$0,10 \pm 0,10$	–	$0,14 \pm 0,12$	–
B_3 , мПа	$0,03 \pm 0,07$	–	$0,06 \pm 0,10$	–	$0,02 \pm 0,12$	–
σ_r , мПа	0,358	0,387	0,452	0,299	0,374	0,384
Trend, мПа·год ⁻¹	$0,029 \pm 0,009$		$0,064 \pm 0,019$		$0,069 \pm 0,033$	
$k_{F10,7} \cdot 10^{22}$, мПа·Вт ⁻¹ ·м ⁻² ·Гц	$(9,2 \pm 8,8) \cdot 10^{-4}$		$(12 \pm 13) \cdot 10^{-4}$		$(19 \pm 15) \cdot 10^{-4}$	
$k_{\Delta pAr}$, мПа/гПа	$0,080 \pm 0,53$		–		–	
$k_{\Delta wAr}$, мПа/град	$0,047 \pm 0,024$		–		–	
AR(1)	$0,033 \pm 0,016$		$0,043 \pm 0,014$		$0,021 \pm 0,020$	
σ_n , мПа	0,338		0,394		0,347	

Примечания: 1. Все погрешности приведены с 95%-й доверительной вероятностью (по уровню 2σ). 2. Проверка означает статистическую незначимость величины. 3. Отсутствие значения – данная величина не вычислялась.

Полученные в настоящей работе результаты указывают на:

1) существование положительного тренда приземного озона в Европе за весь период регулярных измерений с 1970-х гг. примерно на 1% в год, что подтверждает результаты более ранних исследований [3, 15];

2) вероятное (с $P = 0,95$) влияние на приземный озон солнечной активности, значимое практически на всех европейских озонметрических станциях, что подтверждает выводы, сделанные в [5];

3) существенное влияние на приземный озон в Европе, как и на ОСО [16], североатлантического колебания (которое может, в частности, быть обусловлено его воздействием на погодные условия [4]). При количественном описании временного хода приземной концентрации озона в Европе это влияние необходимо учитывать, так как параметры североатлантического колебания испытывают климатические изменения [16] и не исключено, что именно с ними может быть связана часть наблюдаемого тренда.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 96–05–66003).

1. Кадыгрова Т.Н., Крученицкий Г.М. // Известия АН. Сер. ФАО. 1995. Т. 31. № 1. С. 62–68.
2. Zerefos C.S., Bais A.F., Ziomas T.C. et al. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D5. P. 10135–10144.
3. Scientific assessment of ozone depletion: 1994 // WMO Ozone Rep. 37. Geneva. 1995.
4. Бюллетень: Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие. Обнинск: Гидрометцентр СССР – ВНИГ-МИ–МЦД. 1991.
5. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Метеорология и гидрология. 1996. № 7. С. 72–77.
6. Logan J.A. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № D12. P. 25553–25585.
7. Feister U., Balzer K. // Atmos. Environ. 1991. V. 25A. N 9. P. 1781–1790.
8. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Известия АН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32. № 1. С. 96–100.
9. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. Т. 36. N 2. С. 163–166.
10. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 9. С. 1267–1271.
11. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Известия АН. Сер. ФАО. 1997. Т. 33. № 1. С. 104–113.
12. Ozone Data for the World. Canad. Environ. Service / WMO. Downsview–Ontario. 1974–1994.
13. Low P.S., Davies T.D., Kelly P.M. et al. // Atmos. Environ. 1991. V. 25A. N 2. P. 511–515.
14. Reiter R., Sladkovic R., Kanter H.-J. // Meteorol. Atmos. Phys. 1987. V. 37. № 1. P. 27–47.
15. Staehelin J., Thudium J., Buehler R. et al. // Atmos. Environ. 1994. V. 28. N 1. P. 75–87.
16. Бекорюков В.И., Бугаева И.В., Захаров Г.П. и др. // Известия АН. Сер. ФАО. 1995. Т. 31. № 1. С. 41–45.

A.M. Zvyagintsev and G.M. Kruchenitsky. On the Relationships of Long-Term Surface Ozone Variability with Solar Activity and Atmospheric Global Circulation Parameters at European Ozonometric Stations.

Time series of monthly average surface ozone concentrations at European stations were analysed together with series of solar activity (F10.7) and the Northern-Atlantic oscillations. At most stations the long-term surface ozone variabilities due to trend, the North Atlantic oscillations, and solar activity were estimated as statistically significant; e.g., for Hohenpeissenberg, Germany, their separate contributions to surface ozone total variations were 0.16, 0.11, and 0.015, respectively; the autoregression contribution was 0.18.