

А.М. Звягинцев, Г.М. Крученицкий

ОБ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА В ОКРЕСТНОСТЯХ МОСКВЫ И ЕЕ СВЯЗЯХ С МЕТЕОПАРАМЕТРАМИ

Приведены результаты регулярных измерений дневной приземной концентрации озона в г. Долгопрудном (пригород Москвы) за 5 лет регулярных измерений, начиная с марта 1991 г. В первом приближении нормальный годовой ход ПКО хорошо описывается первой гармоникой годового колебания. Остатки (разница между фактическим ходом и модельным годовым ходом) ПКО описываются регрессией по остаткам временных рядов метеопараметров, из которых важнейшими являются температура и относительная влажность в 12 ч; вторые остатки описываются авторегрессионной моделью 3-го порядка. Общая эффективность модельного приближения составляет около 0,8, из них эффективность разложения по двум важнейшим метеопараметрам – около 0,30, а авторегрессионного разложения – около 0,36, что хорошо согласуется с результатами, полученными для озонметрических станций Европы.

Приземная концентрация озона (ПКО) характеризуется высокой временной и пространственной изменчивостью [1–8], что является следствием действия динамических, радиационных и химических процессов. Наибольшая изменчивость ПКО наблюдается над континентальными районами, где в основном сосредоточены источники антропогенного загрязнения атмосферы и в большей степени, чем над океанами, действуют разнообразные динамические процессы. Считается [4, 5, 8], что в настоящее время ПКО растет со скоростью 1–3 % в год, что связывается с растущим загрязнением атмосферы. Несмотря на то, что накоплен уже достаточно большой массив экспериментальных данных, многие закономерности долговременных тенденций изменений ПКО остаются пока не ясными [4–8], в частности недостаточно обоснованы количественные оценки трендов ПКО [7] и не выявлены связи ПКО с локальными (обусловленными преимущественно выбросами предприятий и транспорта в атмосферу), региональными (с размерами, характерными для метеополей) и глобальными [9] влияющими факторами.

В [10] были опубликованы некоторые результаты измерений ПКО в течение первых 2,5 лет наблюдений в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) в окрестностях Москвы – г. Долгопрудном, расположенном примерно в 25 км к северу от центра Москвы. На основе полученных данных в [11] была разработана эмпирическая модель, количественно связывающая ПКО с метеопараметрами (приземными температурой, давлением, относительной влажностью, суточным перепадом температуры, общей облачностью, вертикальным градиентом температуры, скоростью ветра на уровне 850 мбар), измеряемыми в процессе регулярного аэрологического радиозондирования атмосферы. Настоящая работа основана на результатах регулярных измерений ПКО в г. Долгопрудном с марта 1991 г. по конец 1995 г. и посвящена выявлению закономерностей ее временного хода и связей с метеопараметрами.

Измерения концентрации озона проведены с помощью устройства, подобного измерителю, примененному в [1], в котором в качестве чувствительного элемента использован первичный измерительный преобразователь аэрологического озонзонда. Методика измерений описана в [10]. Предел обнаружения концентрации озона – 1 мкг/м^3 ; систематическая составляющая погрешности единичного измерения не превышает 10, случайная – 6 мкг/м^3 . В работе использованы результаты измерений ПКО в 11 и 14 ч по местному времени; их среднее принято за оценку среднего в дневное время суток (ниже это названо дневной концентрацией). Такие результаты измерений являются достаточно репрезентативными, поскольку известно, что средняя суточная, средняя дневная и максимальная средняя часовая концентрации озона хорошо коррелируют между собой. Данные о других метеопараметрах атмосферы (давление, температура и др.) в стандартные сроки наблюдений получены на аэрологической станции.

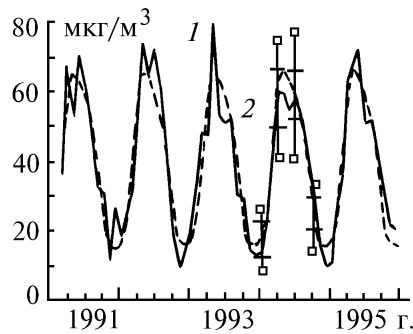


Рис. 1. Наблюдаемый ход среднемесячных значений дневной приземной концентрации озона $C(m)$ в 1991–1995 гг. в г. Долгопрудном (1) и модельный нормальный годовой ход в соответствии с уравнением (1) при учете только первой гармоники (2). На участке 1994 г. вертикальными отрезками для отдельных сезонов отмечены внутримесячные изменчивости (± 1 СКО); горизонтальными полосами на этих отрезках отмечены оценки межгодовых изменчивостей среднемесячных ПКО (± 1 СКО)

Для иллюстрации характера временного ряда ПКО на рис. 1 приведен ход среднемесячных ПКО (кривая 1) в г. Долгопрудном за рассматриваемый период; некоторые другие экспериментальные данные за более короткие промежутки времени приведены в [2, 3]. Как и везде в средних широтах Северного полушария [4, 5, 8], временной ход ПКО в г. Долгопрудном обнаруживает хорошо выраженную сезонную изменчивость. Нормальный годовой ход в г. Долгопрудном среднемесячной дневной концентрации $C_0(m)$, мкг/м³, приближенно может быть описан формулой:

$$C_0(m) = 39,3 + 26,3\cos(\pi m/6 - 3,077) + 1,7\cos(\pi m/3 + 1,69) + 2,3\cos(\pi m/2 - 0,54), \quad (1)$$

где m – порядковый месяц года (для января – 1 и т.д.).

Из уравнения (1) видно, что амплитуда 1-й гармоники примерно на порядок превышает амплитуды высших гармоник (по уровню доверительной вероятности $P = 0,8$ значимыми оказались 2-я и 3-я гармоники; но по уровню $P = 0,95$ и они незначимы).

Наблюдаемый годовой ход ПКО $C_0(d)$ в зависимости от юлианского дня d очевидным образом можно связать с нормальным годовым ходом $C_0(d)$ соотношением:

$$C_0(d) = C_0(d) + R_{C1}(d), \quad (2)$$

где $R_{C1}(d)$ – временной ряд остатков ПКО; математическое ожидание последнего равно 0, а дисперсия – минимально возможная.

Известно [3, 12, 13], что ПКО зависит от предикторов, в число важнейших из которых входят стандартные метеопараметры: температура, атмосферное давление, относительная влажность, а также солнечная радиация и др.; их количественное влияние зависит от географического расположения пункта наблюдений. Каждый из этих предикторов также имеет свой нормальный годовой ход. Ранее [10, 11] нами было показано, что наиболее информативными предикторами для ПКО в г. Долгопрудном являются приземные температура T и относительная влажность u в 12 ч местного времени. Ряд остатков ПКО $R_{C1}(d)$ может быть представлен в виде регрессии по рядам остатков этих предикторов:

$$R_{C1}(d) = A_T R_T(d) + A_u R_u(d) + R_{C2}(d), \quad (3)$$

где A_T и A_u – коэффициенты, а индексы T и u относятся к указанным температуре и влажности соответственно. Для коэффициентов получены следующие фактические значения: $A_T = 0,78 (\pm 0,54)$ мкг·м⁻³·°C⁻¹ и $A_u = -0,48 (\pm 0,20)$ мкг·м⁻³·%⁻¹ (в скобках приведены погрешности коэффициентов при доверительной вероятности $P = 0,95$).

В качестве иллюстрации выполнения уравнения (3) на рис. 2 приведен временной ход среднемесячных первых остатков ПКО, температуры и влажности на небольшом интервале времени. Хорошо видно, например, что в 1993 г. в мае повышенная ПКО была связана с повышенной температурой и пониженной влажностью, а пониженная ПКО в июне и июле – с повышенной влажностью; в 1994 г. с мая по июль пониженные значения ПКО были связаны с пониженной температурой и повышенной влажностью.

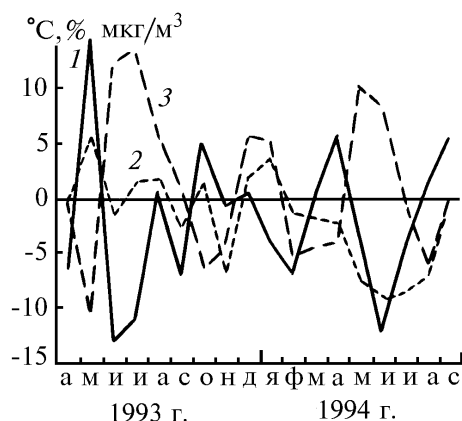


Рис. 2. Временной ход первых остатков среднемесячных ПКО (1), дневных температур (2) и относительных влажностей (3) с апреля 1993 г. по сентябрь 1994 г.

Отметим, что наблюдается значимая корреляция временных рядов остатков ПКО и общего содержания озона (ОСО), однако коэффициент корреляции небольшой (около минус 0,15), а степень взаимной когерентности на всех частотах не превышает 0,5 (аналогичные результаты получены и для Хоенпайсенберга, Германия); поэтому количественные связи ПКО и ОСО невелики и, по-видимому, обусловлены зависимостями от других погодных факторов.

Большое отличие статистики Дарбина–Уотсона для ряда вторых остатков $R_{C2}(d)$ от 2 (теоретическое значение, если члены ряда независимы) и интегрированная периодограмма спектра указывают на то, что второй остаток $R_{C2}(d)$ может быть представлен в виде авторегрессии:

$$R_{C2}(d) = \sum_{i=1}^n AR(i) R_{C2}(d-i) + R_{C3}(d), \quad (4)$$

где n – порядок авторегрессии, а третий остаток $R_{C3}(d)$ представляет собой белый шум. Об этом свидетельствуют его спектр (или интегрированная периодограмма) и статистика Дарбина–Уотсона (около 2,00). Наиболее удовлетворительным оказался 3-й порядок авторегрессии; значения соответствующих коэффициентов: $AR(1) = 0,41$, $AR(2) = 0,12$, $AR(3) = 0,11$; погрешность их определения при доверительной вероятности $P = 0,95$ составляет 0,05. Заметим, что такой же порядок авторегрессии (от 2 до 5) характерен и для метеопараметров в г. Долгопрудном, а также для ПКО на озонометрических станциях Европы и Америки [6, 13, 14].

Среднеквадратические отклонения рядов $C(d)$, $R_{C1}(d)$, $R_{C2}(d)$ и $R_{C3}(d)$ равны 24,6; 15,3; 12,8 и 10,7 $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно. Это означает, что общая эффективность модели, описываемой формулами (2)–(4), составляет (см., например, [13]):

$$Q = 1 - (10,7/24,6)^2 = 0,8.$$

Эффективности выделения как чистой авторегрессии (0,36), так и совокупности регрессии по двум метеопараметрам (температуре и влажности) и авторегрессии (0,50) хорошо совпадают с оценками, полученными для озонометрических станций Германии (ГДР) [13], что, по-видимому, свидетельствует о сходстве влияния атмосферных процессов в Германии и окрестностях Москвы на ПКО и о примерном равенстве влияний погрешностей измерений в обоих случаях.

Поскольку известно [6, 11], что поля ПКО имеют характерный размер (расстояние, на котором временные ряды двух пунктов наблюдений обнаруживают значимую кросскорреляцию) около 1000 км, была исследована кросскорреляционная функция между рядами первых остатков ПКО в г. Долгопрудном и на мировой озонометрической станции Прейла [15], Литва, находящейся на побережье Балтийского моря и удаленной от Долгопрудного примерно на 1050 км к западу. Обнаружена небольшая, но значимая корреляция между этими рядами, причем примерно такая же по величине и по временному лагу, которая существует между парами озонометрических станций Сибтон (Великобритания)–Нойглобсов (Германия) и Нойглобсов–Прейла, находящихся примерно на одной параллели и на одинаково близком расстоянии друг от друга (рис. 3).

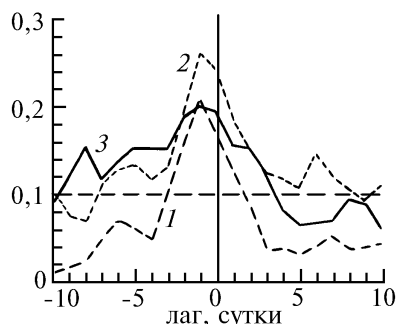


Рис. 3. Кросскорреляционные функции для временных рядов остатков ПКО на различных парах станций: 1 – Сибтон – Нойглобсов (удаление $L = 666$ км; данные 1987–1990 гг.); 2 – Нойглобсов – Прейла ($L = 840$ км; 1988–1990 гг.) и 3 – Прейла – Долгопрудный ($L = 1035$ км; 1991–1993 гг.). Пунктирной линией обозначен уровень значимости при $P = 0,95$

Указанная кросскорреляция свидетельствует как об удовлетворительном качестве изменений на всех упомянутых станциях, так и о том, что ПКО в окрестностях Москвы в заметной степени определяется общими для всех станций синоптическими процессами. По-видимому, это также свидетельствует о преимущественном перемещении полей приземного озона с запада на восток со скоростью около $5\text{--}10^\circ$ в сутки.

Таким образом, во временном ходе ПКО в г. Долгопрудном за пятилетний период был отчетливо выявлен нормальный годовой ход, в первом приближении описываемый первой гармоникой годового колебания. Остатки (разница между фактическим ходом и нормальным годовым ходом) ПКО хорошо описываются регрессией по остаткам временных рядов метеопараметров, из которых важнейшими являются температура и относительная влажность в 12 ч; вторые остатки описываются авторегрессионной моделью 3-го порядка. Общая эффективность модельного приближения составляет около 0,8, из них эффективность разложения по двум важнейшим метеопараметрам – около 0,30, а авторегрессионного разложения – около 0,36, что хорошо согласуется с результатами, полученными для озонметрических станций Европы [13].

1. Васильченко Л. А., Гущин Г. П. // Труды ГГО. 1983. Вып. 456. С. 19–27.
2. Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Зуев В. В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1085–1092.
3. Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32 (в печати)
4. Janach E. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94D. N 15. P. 18289–18295.
5. Logan J. A. // J. Geophys. Res. 1985. V. 90D. N 6. P. 10463–10482.
6. Logan J. A. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94D. N 6. P. 8511–8532.
7. Low P. S., Kelly P. M., Davies T. D. // Proc. Quadr. Ozone Symposium. 1992. P. 3–6.
8. Oltmans S. J., Levi H. II. // Atmos. Environ. 1994. V. 28. N 1. P. 9–24.
9. Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36.
10. Звягинцев А. М. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1995. Т. 31. N 1. С. 115–119.
11. Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32. N 1. С. 96–100.
12. Clark T. L., Karl T. R. // J. Appl. Meteorol. 1982. V. 21. N 11. P. 1662–1671.
13. Feister U., Balzer K. // Atmos. Environ. 1991. V. 25A. N 9. P. 1781–1790.
14. Bottenheim J. W., Sirios A., Brice K. A. et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99D. N 3. P. 5333–5352.
15. Ozone Data for the World // Downsview–Ontario: Canad. Environ. Service/WMO, 1974–1995.

Центральная аэрологическая обсерватория,
г. Долгопрудный Московской обл.

Поступила в редакцию
2 апреля 1996 г.

A. M. Zvyagintsev, G. M. Kruchenitsky. On Variability of Surface Ozone in Moscow Environs and its Relations with Meteorological Parameters.

The basic results of 5-year surface ozone regular measurements in Dolgoprudny (Moscow suburb) since 1991 are reported. The first approximation of normal (seasonalized) surface ozone series is well described by the first harmonic of annual oscillation. The residue (the difference between actual and normal series) is described by regression of meteorological parameters series in which the temperature and the relative humidity at noon are the most important; the second residue is described by the 3rd order autoregression. The total quality of this regression model is about 0,8; the quality of regression in terms of the temperature and the relative humidity is about 0,3; and the quality of autoregression is about 0,36; these values agree well with those of the European ozonometric stations.