

А.М. Звягинцев, Г.М. Крученицкий

Приземная концентрация озона в окрестностях Москвы в 1991–1999 гг.

Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный Московской области

Поступила в редакцию 6.12.99 г.

Приведены результаты регулярных измерений дневной приземной концентрации озона (ПКО) на станции «Долгопрудный» (лесопарковый пригород Москвы) за 9 лет регулярных измерений начиная с марта 1991 г. Разработана прогнозная статистическая модель ПКО, основанная на регрессионной зависимости ПКО от фактического значения ПКО в предыдущий день и прогнозов температуры и влажности на следующий день. Модель объясняет более 50 % наблюдаемой дисперсии отклонений ПКО от многолетних средних. Высказано мнение, что при максимальных суточных ПКО до 60–80 млрд⁻¹ основную роль в суточном ходе ПКО играет вертикальное перемешивание воздуха; заметная роль фотохимического образования озона проявляется при более высоких ПКО. Отмечены особенности сезонного и суточного хода ПКО в центральном регионе России по сравнению с аналогичными характеристиками ПКО в Западной Европе, связанные, по-видимому, с более континентальным климатом.

В настоящее время число станций в мире (прежде всего, в США, Канаде и Западной Европе), регулярно измеряющих приземную концентрацию озона (ПКО), превышает 1000 и это связано со следующими основными факторами:

1) приземный озон является токсичным загрязнителем атмосферы, концентрация которого достаточно часто превышает предельно допустимую, и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) включила его в первую пятерку основных загрязнителей, содержание которых должно контролироваться при определении качества воздуха;

2) бурное развитие атмосферной химии в последние несколько десятилетий (и в этом большая персональная заслуга лауреата Нобелевской премии по химии 1995 г. Пола Крутцена) выявило, что озон играет ключевую роль в химических и фотохимических процессах в тропосфере, обуславливая и контролируя ее окислительную способность;

3) появились сравнительно недорогие (около 10000 USD) высокоточные, не требующие высококвалифицированного обслуживания средства его измерений, а именно ультрафиолетовые фотометры. Измерения приземного озона в отдельных пунктах проводятся достаточно давно, но надежными и пригодными для вычисления тенденций изменений ПКО они могут считаться, по-видимому, лишь с середины 1970-х гг. [1].

На территории Западной Европы с 1980-х гг. ПКО измеряет широкая сеть станций ЕМЕР [2], позднее – TOR. На территории бывшего СССР первые регулярные измерения начаты в Литве, на побережье Балтийского моря [3]. В России регулярные наблюдения приземного озона стали проводиться на кислородской базе Института физики атмосферы РАН с апреля 1979 г. [4]. Позднее регулярные комплексные измерения приземных концентраций тропосферного озона и некоторых других компонентов озонового цикла начались на TOR-станции Института оптики атмосферы в Томске, созданной по инициативе академика В.Е. Зуева в рамках общеевропейского проекта EUROTRAC [5]. С 1991 г. измерения приземного озона стали проводиться в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) Росгидромета в г. Долгопрудном, в лесопарковой зоне Москвы [6], а с 1998 г. в Полярном геофизическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты). В настоящей статье описаны результаты на-

блюдений ПКО на станции «Долгопрудный» (56° с.ш., 38° в.д.) с марта 1991 по октябрь 1999 г. и на их основе отмечены характерные особенности поведения ПКО в Центральном регионе России.

Измерения концентрации озона проведены с помощью устройства, в котором в качестве чувствительного элемента использован первичный измерительный преобразователь аэрологического озонозонда электрохимического типа [6]. Аналогичные устройства для измерений ПКО были основными на мировой озонометрической сети до середины 1980-х гг. [7]. Сначала наблюдения проводили вручную в течение суток трижды – в 8, 11 и 14 ч (здесь и далее указано местное время); с апреля 1997 г. наблюдения проводятся в автоматическом режиме с записью на компьютер: при потребности – ежедневно, в остальное время – 4 раза в сутки – в 2, 8, 11 и 14 ч. За оценку среднего в светлое время этих суток (ниже это названо дневной концентрацией) принято среднее по наблюдениям в 11 и 14 ч. Данные о других метеопараметрах атмосферы (давление, температура, ее вертикальное распределение и др.) в стандартные сроки наблюдений получены на аэрологической станции ЦАО.

Временной ход среднемесячных дневных ПКО на станции «Долгопрудный» за период с марта 1991 по 1999 г. приведен на рис. 1.

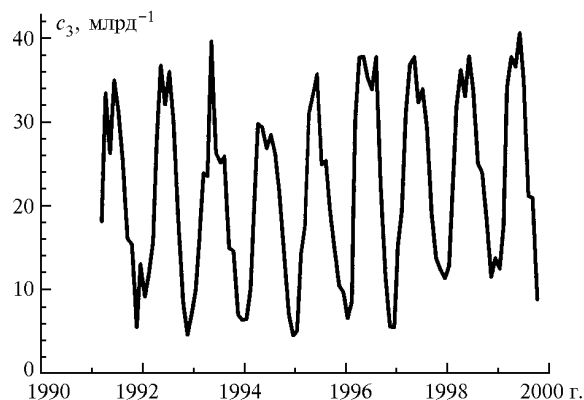


Рис. 1

Наибольшие концентрации ПКО (более 60 млрд⁻¹) обычно наблюдаются около 14 ч в период с апреля по сентябрь; наименьшие (0–2 млрд⁻¹) – осенью, в безоблачные ночи, сопровождаемые туманами, или дождливые дни со сплошной облачностью. В первом приближении временной ход ПКО хорошо описывается гармонической функцией, имеющей единственно значимую годовую гармонику, амплитуды высших гармоник на порядок меньше и статистически незначимы; наблюдаемый положительный тренд ПКО (на уровне 2%) имеет статистическую вероятность около $P = 0,95$ и связан, в первую очередь, с увеличением ПКО за последние два года в последний квартал года (когда наблюдается ее сезонный минимум).

Годовой ход ПКО (млрд⁻¹) за последние 2 года в 14 и 2 ч местного времени (когда наблюдаются суточный максимум и минимум приземного озона) $O_{зд0}(d)$ и $O_{зн0}(d)$ соответственно хорошо описывается модельными зависимостями от юлианского дня d :

$$O_{зд0}(d) = 24,1 + 14,2 \cos(6,28(d - 149)/365),$$

$$O_{зн0}(d) = 14,5 + 5,4 \cos(6,28(d - 81)/365),$$

из которых видно, что сезонный максимум ПКО ночью наблюдается вблизи времени наступления годового максимума общего содержания озона, а днем – на 2 месяца позже (но почти на месяц раньше времени годового максимума температуры).

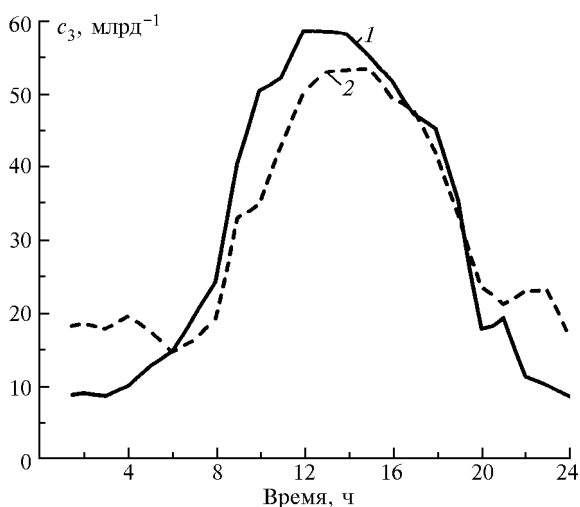


Рис. 2

Хотя по формальным признакам, принятым в мировой практике, станцию «Долгопрудный» можно отнести к «пригородным» (поскольку она находится примерно на 25 км севернее от центра большого города), однако временной ход ПКО (как суточный, так и сезонный) здесь более характерен для «сельской» станции [8]. В количественном отношении он сильно отличен от хода в центре г. Москвы [9], зато близок к ходу, наблюдаемому на звенигородской станции ИФА РАН [10], удаленной от Москвы примерно на 80 км. На рис. 2 (кривая 1) изображен усредненный суточный ход ПКО на станции «Долгопрудный» за период с 6 по 11 июня 1999 г., когда над Центральным регионом России образовалась малоподвижная область высокого давления с характерными для нее повышенной температурой, малой облачностью и слабым ветром. В этот период перепад максимальной и минимальной суточных температур

составлял до 15°C и более; при отсутствии облачности перед восходом солнца ПКО опускалась до 5 млрд⁻¹ и ниже.

Для сравнения на этом же рисунке изображен суточный ход ПКО (кривая 2), зарегистрированный в ясную погоду летом 1988 г. на леднике Федченко (38° с. ш., 72° в. д.) на высоте 3800 м [11], т.е. в районе, где нельзя ожидать заметного антропогенного загрязнения воздуха. Следует отметить, что последний пункт наблюдений можно рассматривать как «приземный», несмотря на значительную высоту над уровнем моря, поскольку он не вышшеается над уровнем почвы (на европейских станциях, возвышающихся на 2000 м над уровнем почвы, суточный ход практически отсутствует [12]).

Из схожести суточных ходов ПКО на станции «Долгопрудный» и леднике Федченко, проиллюстрированной на рис. 2, наиболее обоснованно выглядит предположение об общей природе суточной изменчивости ПКО в обоих случаях. Она, по-видимому, определяется вертикальным перемешиванием воздуха, существенно ослабленным в ночные часы и становящимся интенсивным к моменту достижения максимальных дневных температур на поверхности почвы, что должно сопровождаться заметным повышением ПКО до уровней 50–80 млрд⁻¹, характерных для свободной тропосферы. Напротив, существование значительной и почти одинаковой в обоих случаях суточной фотохимической продуктивности озона в условиях существенно различных концентраций загрязнителей атмосферы (оксидов азота, оксида углерода и углеводородов) представляется маловероятным.

Временной ряд остатков ПКО (отклонения фактических ПКО от модельных или многолетних средних) описывается линейной регрессией по временным рядам остатков метеопараметров, из которых важнейшими являются температура (или суточный перепад температуры) и относительная влажность в 14 ч; вторые остатки описываются авторегрессионной моделью 3-го порядка, в которой член 1-го порядка доминирует [13]. Общая эффективность регрессионной модели для ряда остатков составляет более 0,5, в том числе 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 [14, 15].

В соответствии с моделью ПКО, схема построения которой описана ранее [13], установлено, что прогноз дневной ПКО (млрд⁻¹) на следующий день $O_{зд}(d+1)$ может быть выражен через ее «норму» $O_{зд0}(d+1)$ и отклонения от многолетних средних прогнозов Гидрометеоцентра на следующий день по температуре $\Delta T(d+1)$ (°C) и относительной влажности $\Delta U(d+1)$ (%):

$$O_{зд}(d+1) = O_{зд0}(d+1) + A(d+1) \Delta T(d+1) + B(d+1) \Delta U(d+1) + 0,6[O_{зд}(d) - O_{зд0}(d)],$$

где

$$A(d) = 0,54 + 0,55 \cos(6,28(d - 187)/365);$$

$$B(d) = -0,14 - 0,03 \cos(6,28(d - 160)/365).$$

Спрогнозированные по этой формуле (коэффициенты в которой рассчитаны по данным 1991–1995 гг.) и фактически наблюдаемые в июле 1999 г. дневные ПКО представлены на рис. 3, из которого видно, что прогностическая формула в подавляющем большинстве случаев пра-

вильно отражает тенденцию изменения ПКО. С другой стороны, формула, основанная на статистических закономерностях, не позволяет прогнозировать резкие изменения ПКО, связанные в первую очередь с фотохимическим процессом образования приземного озона.

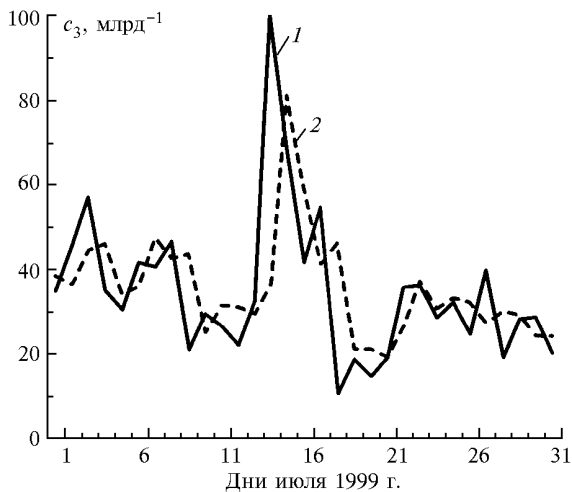


Рис. 3. Временной ход дневной приземной концентрации озона (сплошная линия) и ее прогноз (пунктирная)

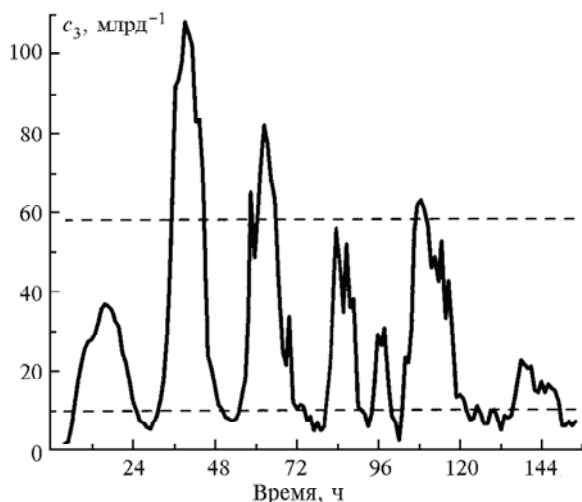


Рис. 4. Почасовой ход приземной концентрации озона, начиная с 0 ч местного времени 13 июля 1999 г. Штриховыми линиями показаны пределы (при 95%-й доверительной вероятности) изменения приземной концентрации озона для этого времени года

Такой случай за период, представленный на рис. 3, имел место 14 июля и более детально проиллюстрирован на рис. 4, где изображен почасовой ход ПКО начиная с 13 июля. 14 июля в 14 ч была зарегистрирована максимальная среднечасовая ПКО за все время наблюдений на станции «Долгопрудный» с 1991 г. – 108 млрд⁻¹ (предыдущая максимальная ПКО – 94 млрд⁻¹, наблюдалась 1 сентября 1996 г., когда, как и в описываемом случае, приземная температура превышала норму более чем на 10 °С). В последующие дни максимальная суточная ПКО понизилась, особенно после 17 июля, из-за возникшей облачности, приведшей к уменьшению УФ-облученности и выпадению дождей. Несомненно, что существенно повышенная ПКО в Московском регионе 14 июля явилась следствием сильной

загрязненности воздуха продуктами, образовавшимися при интенсивном горении лесов и торфяников на прилегающих территориях (что было вызвано сухой и жаркой погодой и, в свою очередь, явилось следствием установления мало-подвижного блокирующего антициклона над Центральным регионом России), и указывала на образование в регионе фотохимического смога типа хорошо известного «лосанжелесского». Прогнозирование anomalно высоких ПКО, по-видимому, возможно осуществлять лишь при условии проведения мониторинга не только ПКО, но и других малых газовых составляющих атмосферы (в первую очередь, оксидов азота и углеводородов), и на основе модели, предсказывающей перемещения воздушных масс и учитывающей фотохимические превращения в приземном слое.

По сравнению с ходом ПКО, наблюдаемым на «сельских» станциях Западной Европы [8], на станции «Долгопрудный» наблюдаются следующие особенности временного хода ПКО: 1) большее отношение максимальных и минимальных ПКО в течение года; 2) большее отношение максимальных и минимальных ПКО в течение суток; 3) меньшие абсолютные значения ПКО. Несомненно, что эти особенности связаны с климатическими различиями России и Западной Европы, в первую очередь, с температурными, обусловленными более континентальным положением Центрального региона России, с различиями в растительном покрове (который в условиях России способствует, по-видимому, большему разрушению озона у земной поверхности) и, возможно, в уровне загрязненности приземного слоя. Случаи существенного накопления приземного озона выше уровня 60–80 млрд⁻¹, которое могло бы указывать на образование фотохимического смога, в России наблюдаются значительно реже. С другой стороны, большинство характеристик ПКО в Центральном регионе России обнаруживают явные связи с аналогичными характеристиками, наблюдаемыми в Западной Европе, в частности, аналогичны зависимости от приземной температуры и отклонений ПКО от «нормы» в предыдущие дни (а также, по-видимому, от солнечной облученности). Заметна связь ПКО на станции «Долгопрудный» с ПКО на станции Прейла, расположенной на расстоянии 1000 км к западу на Балтийском побережье Литвы, на которой, в свою очередь, наблюдаются аналогичные связи со станциями Германии и Швеции.

1. Kley D., Volz A., Mülheims F. // Tropospheric Ozone – Regional and Global Scale Interactions. NATO ASI Series C. 1988. V. 227. P. 63–72.
2. EMEP/CCC Report 3/89. Ozone measurements January 1985 – December 1985. Report No.1 (by Feister U., Pedersen U.) // GDR-Normay. 1989. 136 p.
3. Girgzdiene R. // Proc. XVIII Quadrennial Ozone symposium, L'Aquila, Italy. 1996. P. 371–374.
4. Еланский Н.Ф., Сенюк И.А. // Изв. РАН. Сер. ФАО. Т. 31. № 2. С. 251–259.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1085–1092.
6. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1267–1271.
7. Oltmans S.J., Komhyr W.D. // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N. D4. P. 5229–5236.
8. EMEP/CCC-Report 4/95. Ozone measurements 1990–1992 (by Hjellbrekke A.-G.) // Kjeller, Normay: NILU. 1995. 90 p.
9. Еланский Н.Ф., Смирнова О.И. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1997. Т. 33. № 5. С. 597–611.
10. Кадышев Е.А., Еланский Н.Ф. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1993. Т. 29. № 3. С. 346–352.
11. Ивлев Л.С., Челибанов В.П., Шургалова И.К. // Атмосферный озон. М.: Гидрометеониздат, 1990. С. 105–108.

12. *Scheel H.E., Sladkovic R., Brunke E.G. et al. // Proc. Quadr. Ozone Symp. 1992. P. 11–14.*
13. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1996. Т. 32. № 1. С. 96–100.*
14. *Feister U., Balzer K. // Atmos. Environ. 1991. V. 25A. N. 9. P. 1781–1790.*
15. *Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 10–13.*

A.M. Zvyagintsev, G.M. Kruchenitsky. Surface ozone in Moscow environs in 1991–1999.

The basic results of 9-year surface ozone regular measurements in Dolgoprudny (Moscow forest-park suburb) since March 1991 are reported. The forecasting statistical model based on autoregression and dependence on forecasts of temperature and humidity is developed. The model is able to explain more than 50 % of dispersion of surface ozone residual from «norms» (means for many years). It is supposed that if maximal surface ozone concentration is less than 60–80 ppb, the vertical mixing and the transport of ozone from the free troposphere into the boundary layer is dominant in diurnal variation of surface ozone; the higher surface ozone concentrations are associated with photochemical generation of ozone during daytime. Peculiarities of seasonal and diurnal surface ozone variations in the Central region of the Russian european part as compared with the same ones in the West Europe are marked; they seem to be associated with more continental climate in Russia.