

А.М. Звягинцев¹, Т.С. Селегей², И.Н. Кузнецова³**Изменчивость приземного озона в г. Новосибирске**¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный²Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, г. Москва

Поступила в редакцию 8.11.2006 г.

Проанализированы результаты измерений приземного озона в 2003–2005 гг. в г. Новосибирске, и проведены оценки его внутрисуточной и сезонной изменчивости. Построены модели, связывающие уровни приземного озона с метеопараметрами в различные сезоны года. Наиболее существенное влияние на максимальные суточные уровни приземного озона оказывают его уровень в предыдущий день, температура (прежде всего — максимальная суточная), скорость ветра на уровне 925 гПа, минимальная суточная относительная влажность, а также уровни приземного озона, измеренные в утренние часы (примерно с 7 ч; при приближении к полудню их влияние повышается). Выявлены условия, при которых концентрации приземного озона в г. Новосибирске превышают предельно допустимые.

В соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения приземный озон входит в первую пятерку приоритетных веществ, которые необходимо измерять для определения качества атмосферного воздуха. С 2002 г. в России в системе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) в семи центрах федеральных округов, в том числе в г. Новосибирске, начаты систематические измерения приземного озона [1]. Ранее о результатах длительных измерений приземного озона в больших городах России и их пригородах сообщалось в работах [2–7]. В данной статье описаны особенности изменчивости приземного озона в г. Новосибирске по результатам измерений 2003–2005 гг., выполненных сетевым подразделением Западно-Сибирского УГМС.

Измерения приземной концентрации озона (ПКО) проведены с помощью газоанализатора озона хемилюминесцентного типа, модель 3–02 П-А производства приборостроительного предприятия «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург. Паспортная погрешность измерений — $6 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ в диапазоне концентраций $0–30 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ и 20% для больших концентраций. Пункт наблюдений находился на территории жилого массива вне зоны прямого воздействия промышленных предприятий и оживленных магистралей. Для анализа использованы концентрации озона, средние за 20 мин, а также наблюдения стандартных метеопараметров (температура, влажность, характеристики ветра и др.), выполненные сетевыми подразделениями Западно-Сибирского УГМС.

Временной ход ПКО в г. Новосибирске характеризуется значительной изменчивостью как внутри-, так и межсуточной. Сезонная изменчивость ПКО проиллюстрирована на рис. 1 ходом ее максимальных разовых (средних за 20 мин) величин в течение 2003–2005 гг. Такой же ход имеет сезонная изменчивость и среднесуточных ПКО — коэффициент кор-

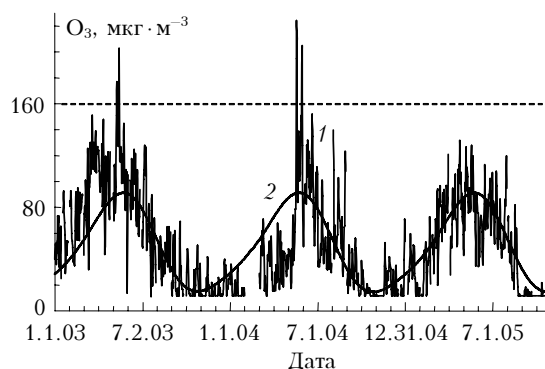


Рис. 1. Ход максимальной суточной концентрации озона в 2003–2005 гг. (1) и модельная оценка ее сезонного хода (2). Штриховой линией показан уровень предельно допустимой концентрации озона

реляции между максимальными и среднесуточными значениями ПКО за длительный срок (более 3 мес), как и в других пунктах наблюдений [8], практически всегда превышает 0,90. Наибольшие значения ПКО обычно наблюдаются в теплый период — с мая по август, наименьшие — в холодный период (с октября по февраль) и при морозящих осадках. Средний сезонный ход максимального разового значения ПКО за сутки $C_0(d)$ в $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ от юлианского дня года d может быть удовлетворительно описан в виде суммы первых трех гармоник годового хода (кривая 2 на рис. 1) по методу, описанному в работе [9]:

$$C_0(d) = 49,6 + 27,3\sin(2\pi d/365) - 25,2\cos(2\pi d/365) - 4,3\sin(4\pi d/365) + 4,1\cos(4\pi d/365). \quad (1)$$

Суточная изменчивость ПКО в г. Новосибирске проиллюстрирована на рис. 2 средним ходом в период максимальных и минимальных среднесуточных

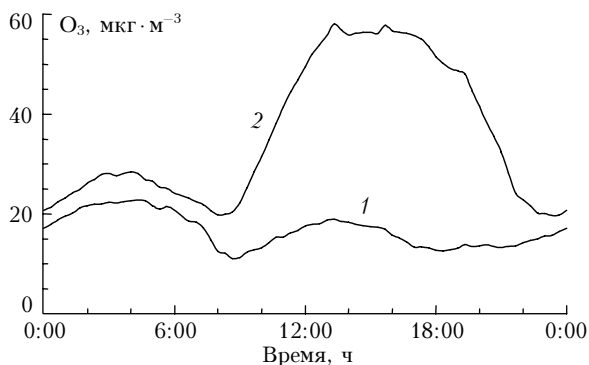


Рис. 2. Средний ход внутрисуточной концентрации озона в холодный (1; ноябрь–февраль) и теплый (2; май–август) сезоны

значений. В теплый период — с мая по август — наибольшие значения ПКО обычно наблюдаются через 2–4 ч после местного полудня; небольшой максимум проявляется также в ночное время. В холодный период (с октября по февраль) в суточном ходе озона величина максимума ночью несколько выше, чем днем; в теплый период дневной максимум заметно выше ночного. Подобные формы суточного хода ПКО характерны для больших городов [7, 10, 11], в сельских местностях средних широт Северного полушария в суточном ходе имеют место лишь один максимум в послеполуденное время и минимум в ночное перед восходом солнца.

Максимум ПКО в послеполуденное время обусловлен притоком богатого озоном воздуха из более высоких слоев пограничного слоя или свободной тропосферы вследствие усиливающегося днем вертикального перемешивания, а также фотохимического образования озона под действием солнечного излучения [5, 6, 12].

Уменьшение ПКО в теплый период при отсутствии солнечного излучения связано с ослаблением переноса озона сверху в результате вертикального перемешивания и его гибели в приземном слое в химических реакциях на поверхности земли (так называемое «сухое осаждение»), а также гомо- (например, при взаимодействии с окисью азота NO , выбрасываемой автотранспортом) и гетерофазных (на поверхности находящихся в воздухе аэрозолей) реакций в воздухе.

Особо следует отметить форму суточного хода приземного озона в холодный период, когда главный максимум озона наблюдается ночью (кривая 1 на рис. 2). Поскольку единственной реакцией образования молекулы озона является взаимодействие молекулы и атома кислорода, а атом кислорода образуется только фотохимически [4, 5], ночной максимум озона связан, по-видимому, с адвекцией озона извне, из пригородов с более чистым воздухом.

В период с раннего утра до позднего вечера из-за выбросов оксида азота автотранспортом и промышленными предприятиями озон разрушается больше, чем его поступает за счет адвекции, вертикального перемешивания и фотохимического образования. В пользу этой гипотезы свидетельствует тот факт, что в Москве сроки наступления двух суточных минимумов

озона близки к срокам наступления суточных максимумов оксида и диоксида азота [7, 11].

Как и в других пунктах наблюдений [6, 9, 13–16], меж- и внутрисуточная изменчивость ПКО в г. Новосибирске находится в сильной связи с изменчивостью метеопараметров. Это позволяет создать эмпирическую модель ПКО, которую можно использовать для целей прогнозирования, например, максимальных концентраций приземного озона. В статье исследованы количественные характеристики связей максимальных концентраций приземного озона с температурой, относительной влажностью, ветровыми параметрами на уровне 925 гПа (в работе [9] показано, что такой предиктор более информативен, чем параметры ветра у земли), уровнями озона в предыдущие сутки и утренние часы.

Методика и техника нахождения таких связей описаны в работе [9]. На первом этапе для предиктанта (максимальной ПКО) и каждого из предикторов вычисляются оценки «норм» их годового хода в виде суммы константы и трех первых гармоник годового хода (такая формула для ПКО приведена выше). Далее вычисляются «остатки» — разности между данными наблюдений и «нормами». На следующем этапе вычисляют коэффициенты регрессии «остатков» метеопараметров и значений ПКО в предыдущие сроки. Модельное значение ПКО представляет сумму «норм» и вычисленного по регрессионному уравнению «остатка».

Зависимости модельной максимальной суточной ПКО $C_1(d)$ и $C'_1(d)$ от метеопараметров и максимальной суточной ПКО в предыдущий день $C(d-1)$ могут быть описаны соотношениями:

$$C_1(d) = C_0(d) + 0,02 + [0,636 + 0,07\sin(2\pi d/365) + 0,091\cos(2\pi d/365)]\Delta C(d-1) + [0,92 + 0,39\sin(2\pi d/365) - 0,63\cos(2\pi d/365)]\Delta T - 0,135\cos(2\pi d/365)\Delta H, \quad (2)$$

если в число метеорологических предикторов входят только температура и относительная влажность, и

$$C'_1(d) = C_0(d) + 0,19 + [0,659 + 0,102\cos(2\pi d/365)]\Delta C(d-1) + [0,94 + 0,42\sin(2\pi d/365) - 0,82\cos(2\pi d/365)]\Delta T + 0,66\cos(2\pi d/365)\Delta v_{925}, \quad (2a)$$

если к двум перечисленным предикторам добавляются характеристики ветра на уровне 925 гПа. В выражениях (2) и (2a) $\Delta C(d-1)$, ΔT , ΔH и Δv_{925} означают «остатки» $C(d-1)$, максимальной суточной температуры ($^{\circ}\text{C}$), минимальной относительной влажности и скорости ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) на уровне 925 гПа соответственно.

Зависимость модельной максимальной суточной ПКО $C(d)$ от всех перечисленных метеопараметров, максимальной суточной ПКО в предыдущий день $C(d-1)$ и разовой ПКО в 11 ч может быть описана соотношением

$$C_2(d) = C_0(d) + 0,31 + 0,453\Delta C(d-1) + 0,512\Delta C_{11}(d) + [0,84 - 0,40\cos(2\pi d/365)]\Delta T + 4,1\cos(2\pi d/365)\Delta\cos(2\pi D/180) + 0,67\cos(2\pi d/365)\Delta v_{925}, \quad (3)$$

где $\Delta C_{11}(d)$ и $\Delta\cos(2\pi D/180)$ — «остатки» разовой ПКО в срок 11 ч и косинуса угла направления ветра D (в градусах) на уровне 925 гПа соответственно.

Коэффициенты корреляции временного ряда $C(d)$ с модельными рядами $C_1(d)$, $C'_1(d)$ и $C_2(d)$ в период 2003–2005 гг. составляют 0,88; 0,89; и 0,91 соответственно. Среднеквадратические ошибки (разности между наблюдаемыми и модельными значениями) модельных рядов $C_1(d)$, $C'_1(d)$ и $C_2(d)$ за весь сравниваемый период составили 19,5; 19,6 и 16,9 $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно при среднеквадратическом отклонении исходного ряда наблюдений $C(d)$, равном 37,2 $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. Качество отображения модельными рядами данных наблюдений проиллюстрировано на рис. 3. Соотношения (2) и (2а) могут быть использованы для прогнозирования максимальных уровней приземного озона на завтрашний день, если в качестве предикторов использовать наблюдаемый максимальный уровень озона на сегодняшний день и прогнозы метеопараметров на завтрашний день. Соотношение (3) может быть использовано для утреннего уточнения прогноза максимальных уровней приземного озона на сегодняшний день, если в качестве предикторов использовать наблюдаемый утренний уровень озона и уточненные утром прогнозы метеопараметров на сегодняшний день. Соотношение, подобное (3) и заметно уточняющее прогноз озона на сегодняшний день, может быть рассчитано при наличии данных наблюдений примерно с 7 ч.

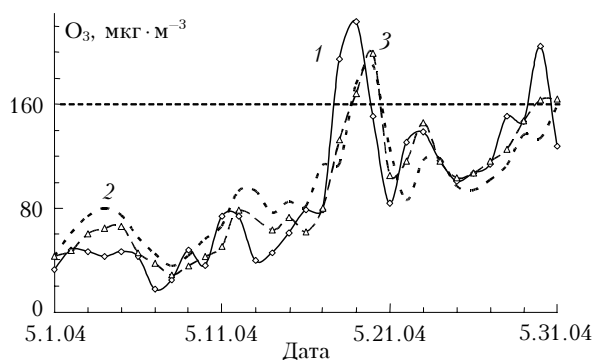


Рис. 3. Ход максимальной суточной концентрации озона в мае 2004 г. (1) и его прогнозы, сделанные в предыдущий (2) и текущий (3; 11 ч) дни. Штриховая линия — уровень предельно допустимой концентрации озона

Из рис. 1 и 3 видно, что в г. Новосибирске иногда наблюдаются эпизоды, когда разовые концентрации приземного озона превышают предельно допустимые (160 $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). Таких эпизодов в 2003 и 2004 гг. зарегистрировано по три, в 2005 г. их не наблюдалось совсем. Эпизод в мае 2004 г. наблюдался и ТОР-станцией Института оптики атмосферы СО РАН (<http://meteo.iao.ru/>) в г. Томске (15–19 мая),

отстоящей примерно на 200 км к северо-востоку от г. Новосибирска. Эпизоды сопровождались высокой температурой (до 28 °С в 2003 г. и 36 °С в 2004-м) и слабым ветром; в 2004 г. воздух в регион поступал из районов, где бушевали степные и лесные пожары. Такие условия способствуют накоплению в регионе достаточных для интенсивной фотогенерации предшественников озона, прежде всего неметановых углеводородов как естественного, так и антропогенного происхождения. Именно такая погода характерна для эпизодов возникновения опасных для здоровья концентраций озона в средних и высоких широтах Северного полушария [17].

Выводы

1. На основе данных измерений 2003–2005 гг. на автоматической станции № 26 г. Новосибирска разработаны оценки внутрисуточной и сезонной изменчивости приземного озона.

2. Построены модели, связывающие уровни приземного озона с метеопараметрами в различные сезоны года. Наиболее существенное влияние на максимальные суточные уровни приземного озона оказывают его уровень в предыдущий день, температура (прежде всего — максимальная суточная), скорость ветра на уровне 925 гПа, минимальная суточная относительная влажность, а также уровни приземного озона, измеренные в утренние часы (примерно с 7 ч; при приближении к полудню их влияние повышается).

3. Отмечено, что за 3 года проведенных непрерывных измерений в г. Новосибирске 2 года наблюдались концентрации приземного озона, превышающие предельно допустимые. По-видимому, это свидетельствует о том, что проблема загрязнения воздуха озона в г. Новосибирске актуальна уже сейчас и может только обостриться с увеличением количества автотранспорта в регионе.

Авторы благодарны сотрудникам ГПУ «Мосэкомониторинг» за предоставленные данные по г. Москве.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты № 05-05-65288, 06-05-64427.

1. Обзор загрязнения окружающей природной среды в Российской Федерации за 2002 г. М.: Росгидромет, 2003. С. 5-5–5-8.
2. Бритаев А.С., Фарапонова Г.П. Особенности распределения концентрации озона в г. Москве // Атмосферный озон. Л.: Гидрометеониздат, 1987. С. 130–134.
3. Васильченко Л.А., Говорушкин Л.А., Гуцин Г.П., Елисеев А.А. Обобщенные результаты измерений озона в приземном слое в Воейково // Атмосферный озон. Л.: Гидрометеониздат, 1987. С. 139–143.
4. Белан Б.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1184–1213.
5. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Складнева Т.К. Временная динамика озона и оксидов азота в приземном слое в районе г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 9. № 12. С. 1325–1327.
6. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты

- десятилетних регулярных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 486–495.
7. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А. Закономерности изменчивости концентраций малых газовых составляющих в приземном воздухе г. Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43. № 2. С. 219–231.
 8. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 184 с.
 9. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. Об эмпирической модели приземной концентрации озона вблизи Москвы (г. Долгопрудный) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1996. Т. 32. № 1. С. 96–100.
 10. *Transboundary air pollution: Acidification, eutrophication and ground-level ozone in UK (NEGAP 2001)*. Edinburgh: СЕН, 2001. 314 p.
 11. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В., Карпов А.В., Лезина Е.А., Ульяненко А.В. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 40. № 2. С. 156–170.
 12. Демин В.И., Карпечко А.Ю., Белоглазов М.И., Кюро Е. О роли турбулентного перемешивания в формировании приземных концентраций озона на Кольском полуострове // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 5. С. 448–450.
 13. Clark T.L., Karl T.R. Application of prognostic meteorological variables to forecasts of daily maximum one-hour ozone concentrations in the northeastern United States // J. Appl. Meteorol. 1982. V. 21. N 11. P. 1662–1671.
 14. Feister U., Balzer K. Surface ozone and meteorological predictors on a subregional scale // Atmos. Environ. 1991. V. 25A. N 9. P. 1781–1790.
 15. Flaum J.B., Rao S.T., Zurbenko I.G. Moderating the influence of meteorological conditions on ambient ozone concentrations // J. Air and Waste Manag. Assoc. 1996. V. 46. N 1. P. 35–46.
 16. Bai J., Gengchen W., Mingxing W. An empirical correlation between surface O₃ and its factors // Atmos. Environ. 2005. V. 39. N 25. P. 4419–4423.
 17. Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 387–396.

A.M. Zvyagintsev, T.S. Seleguei, I.N. Kuznetsova. Surface ozone variations at Novosibirsk.

Surface ozone observations at Novosibirsk in 2003–2005 were analyzed. Its diurnal and seasonal variations were estimated. O₃ concentration empirical models were created, which were based on its statistical relationships to meteorological factors in different seasons. The most significant factors, which affect maximal daily O₃ concentrations, were found maximum O₃ concentration in the previous day, daily maximum temperature, minimum relative humidity, wind speed, and O₃ concentrations in the morning hours. The meteorological conditions, when daily O₃ concentrations become dangerous for health, were determined.