

И.Ю. Шальгина¹, И.Н. Кузнецова¹, М.И. Нахаев¹,
Е.А. Лезина², А.М. Звягинцев³

О прогнозировании приземного озона в большом городе (на примере Москвы)

¹ ГУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России»,

² Государственное природоохранное учреждение «Мосэкомониторинг», г. Москва

³ ГУ «Центральная аэрологическая обсерватория», г. Долгопрудный

Поступила в редакцию 12.12.2006 г.

По данным непрерывных измерений на сети «Мосэкомониторинг» исследовалась изменчивость малых газовых примесей на территории большого города, что позволило получить новые представления о неоднородности поля малых газовых примесей, в том числе приземного озона. Впервые для четырех типов городских территорий, различающихся уровнем техногенной нагрузки, разработаны регрессионные модели максимальной суточной концентрации приземного озона. Наиболее значимыми предикторами оказались максимальная концентрация озона в предшествующий день (инерция) и метеорологический потенциал загрязнения (МПЗ). Установлено, что вклад инерции достигает 80–90%, но в эпизодах высоких концентраций озона более информативным становится индекс МПЗ. Включенный в расчетные уравнения индекс МПЗ показал преимущество перед использованием в статистических моделях отдельных метеорологических характеристик. Расчетные уравнения получены для теплого сезона. Сравнение рассчитанных максимальных концентраций озона с инерционным прогнозом показало большую успешность методического прогноза.

Введение

Наблюдению и прогнозированию приземного озона (далее — озона) в последнее десятилетие в мире уделяется повышенное внимание. Такой интерес вызван несколькими объективными причинами.

Во-первых, озон является токсичным загрязнителем атмосферы, в высоких концентрациях оказывающим негативное воздействие на здоровье человека и растительность [14]. Он относится к веществам первого класса опасности. Вследствие того что чаще всего плохое качество воздуха связано с высокими концентрациями озона [6, 21], Всемирная организация здравоохранения включила его в список пяти основных загрязнителей, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха.

Во-вторых, озон играет ключевую роль в химических и фотохимических процессах в тропосфере, обуславливая ее окислительную способность.

В-третьих, вызывают беспокойство как общий рост тропосферного и приземного озона, так и увеличение эпизодов с повышенными уровнями, наблюдаемые в обширных континентальных районах Северного полушария. С конца 90-х гг. XX в. в Московском регионе также стали учащаться эпизоды концентраций озона, превышающие предельно допустимые уровни [5, 13, 20].

В немалой степени резко возросший объем исследований озона в последние 15 лет связан с появлением сравнительно недорогих, высокоточных и способных работать в автономном режиме средств измерений концентрации озона [5, 8].

Система мониторинга озона в странах Западной Европы функционирует под эгидой Европейского агентства по окружающей среде (ЕЕА). Большинство станций сети расположено в районах, подверженных загрязнению, — именно в таких условиях наиболее часто отмечаются эффекты фотохимической генерации озона. В 2003 г. в центр ЕЕА были представлены данные наблюдений за озоном с 1805 станций (из них 1624 расположены на территории Европейского Союза — 497 станций в сельских районах, 857 — в городах, 139 станций характеризуются как станции промышленных регионов).

Часть станций проводят наблюдения озона в рамках программ Европейского Союза по фоновому мониторингу (проект ЕМЕР — «Совместная программа мониторинга и оценки дальнего переноса загрязнителей атмосферы в Европе») [17, 26]. Сеть ЕМЕР образована в 1979 г., ее деятельность направлена на исследование изменчивости газового состава атмосферы и экологической обстановки над Европой. В настоящее время число станций сети превышает 200, из них около 100 ведут наблюдения более 10 лет. Данные станций регулярно и тщательно проверяются на качество. Процент заполнения рядов составляет от 79 до 99%. Аналогичная сеть мониторинга озона работает также и в США.

На территории России мониторинг озона осуществляется лишь в отдельных пунктах. Регулярные наблюдения озона проводятся ИФА РАН в районе Кисловодска (с 1989 г.) [3] и в Москве (с 2002 г.) [4]. ИОА СО РАН с 1991 г. осуществляет измерения в Томске [23]; ПГИ КНЦ РАН совместно с ИФА РАН с 1992 г. проводит мониторинг озона в районе

г. Апатиты (Мурманская область). С 1991 г. ведутся регулярные наблюдения в лесопарковом пригороде Москвы в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) Росгидромета. В Москве с 2002 г. мониторинг озона осуществляет также ГПУ «Мосэкомониторинг», используя автоматизированную сеть контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА). В данный момент на АСКЗА функционируют примерно 30 постов наблюдений, расположенных практически во всех частях города на территориях с различной техногенной нагрузкой. На АСКЗА проводятся наблюдения за малыми газовыми примесями: оксидом углерода (СО), оксидом азота (NO), диоксидом азота (NO₂) и др.; измерения озона (O₃) проводятся на 9 станциях.

В данной статье представлены результаты анализа закономерностей временного хода озона в различных районах г. Москвы и выявлена их связь с метеорологическими параметрами и уровнями загрязнения, измеряемыми АСКЗА.

Состояние вопроса

В странах Западной Европы и Северной Америки прогнозирование озона осуществляется с использованием эмпирических моделей, основанных на связях уровней озона и метеорологических характеристик [25], и моделей атмосферного переноса, включающих блоки фотохимических преобразований. Известные зарубежные модели достаточно адекватно предсказывают концентрации озона в Западной и Центральной Европе с заблаговременностью от 1 до 3 сут. Некоторые модели распространяют свои прогнозы и на европейскую часть России, но, как показали наши экспертные оценки, модельные расчеты для городов России часто имеют высокую погрешность, в первую очередь, по видимому, из-за неточности данных об эмиссиях на территории России.

В 1982 г. в США [15] предложены регрессионные методы прогноза максимума приземного озона. Регрессионные модели основаны на связях максимальных суточных концентраций приземного озона и метеорологических характеристик, всего использовано 40 предикторов.

В России эмпирическая модель прогноза максимальных суточных концентраций озона впервые разработана в ЦАО [10]. Она основана на линейных регрессионных связях отклонений от «норм» концентрации озона и метеорологических предикторов. Для вычислений «норм» (точнее, их оценок) достаточно двух полных лет наблюдений; важно, чтобы вычисления «норм» озона и всех предикторов были произведены в один и тот же период. Для условий Москвы важнейшими предикторами являются максимальная концентрация озона в предшествующие сутки, максимальная приземная температура и минимальная относительная влажность воздуха. Модель эффективна, если антропогенные эмиссии предшественников озона сравнительно слабо меняются ото дня ко дню и от года к году, а их рассеяние обусловлено главным образом метеорологическими характеристиками [10].

В усовершенствованной версии модели, представленной в работах [8, 11], регрессионные коэффициенты между озоном и предикторами зависят от времени года. Для определения количественных показателей, входящих в модель, необходимо, в первую очередь, хорошее качество наблюдений озона, которое обеспечивается современными оптическими газоанализаторами.

Прогнозирование озона с учетом только метеорологических предикторов более эффективно для территорий, удаленных от значительных источников выбросов загрязнений (автодорог, промышленных предприятий и др.), где уровни озона определяются сравнительно хорошо прогнозируемыми метеорологическими параметрами, а влияние загрязнителей меньше.

Качество прогностической модели подтверждено проверкой на данных Московского региона и нескольких германских станций, предоставляющих результаты наблюдений в Программу ЕМЕП [6, 9, 11, 22]. В усовершенствованной модели наиболее значимыми предикторами оказались прогнозируемая максимальная температура приземного воздуха, отклонение уровня озона от нормы в предшествующий день, относительная влажность и скорость ветра.

Сравнение прогнозов модели с данными наблюдений для Московского региона по данным 2002 г. показало, что ошибка прогноза на 24 ч для периода наибольших сезонных уровней озона (с мая по сентябрь) превышала 0,032 мг/м³ (20% от максимальной разовой ПДК) не более чем в 7% случаев.

В научной литературе, посвященной сравнениям озона в городе и сельской местности, часто подчеркиваются трудности, которые связаны с интерпретацией результатов измерений на территории большого города [16, 18, 19]. В настоящей статье описана регрессионная модель, разработанная в Гидрометцентре России для г. Москвы. Впервые для анализа пространственной изменчивости озона на территории России использованы данные непрерывных наблюдений малых газовых примесей и показано, что качество их определения в Москве достаточно для улучшения характеристик модели. Модель разработана для теплого периода. В отличие от моделей [8, 11], кроме метеорологических характеристик в качестве предикторов нами апробированы предикторы, описывающие данные об эмиссиях – предшественниках озона. В представленной работе рассматриваются первые результаты проведенных исследований.

Используемые данные

Впервые для разработки городской модели озона привлечены непрерывные данные наблюдений за малыми газовыми примесями на АСКЗА «Мосэкомониторинг» в Москве [24]. Характеристики измерительных приборов этой сети подробно описаны в работе [2]. При разработке модели использованы данные станций АСКЗА, имеющих наиболее продолжительные ряды наблюдений: Кутузовский проспект, Марьянский парк, Новокузнецкое, МГУ.

Метеорологические предикторы рассчитаны по данным стандартных наземных наблюдений и аэро-

логического зондирования; также использованы данные микроволновых измерений профилей температуры, полученные с помощью приборов МТП-5 [12].

Вариация малых газовых примесей в городе

На начальной стадии разработки модели проведен контроль качества данных АСКЗА и оценена однородность рядов. При анализе пространственного распределения малых газовых примесей учтено, что территория города по уровню техногенных нагрузок условно разделена на 4 типа — примыкательные, смешанные, жилые и фоновые [1]. Выбранные для анализа станции АСКЗА относятся к разным типам и характеризуют: станция Кутузовский проспект — прилегающие к автомагистрали районы, Марьинский парк — территории под влиянием транспортных и промышленных выбросов, Новокосино — жилую зону на востоке столицы; МГУ — фоновую территорию, т.е. не находящуюся под прямым воздействием выбросов.

Для оценки степени неоднородности уровня загрязнения приземного воздуха в Москве рассчитаны средние сезонные характеристики концентраций различных загрязняющих примесей для четырех типов территорий. На рис. 1 в качестве иллюстрации неоднородности распределения уровня загрязнений приведен средний суточный ход СО на различных станциях.

Видно, что в периоды минимума (позднего ночного и дневного) различия в уровне загрязнения между территориями с разной техногенной нагрузкой сравнительно невелики, но в часы утреннего и вечернего максимумов эти различия увеличиваются в 2–2,5 раза.

Суточный ход концентраций оксида углерода — одного из важных предшественников озона — имеет, как видно из графика, значительную изменчивость на территории города, что связано, в первую очередь, с удаленностью от источников выбросов, а также с микроклиматическими особенностями. Рис. 1 иллюстрирует территориальные различия не только абсолютных величин, но и вида суточного хода. Такие закономерности прослеживаются во все сезоны и для NO, и для NO₂. Здесь можно отметить, что уровень концентраций первичных выбросов (СО, NO) в промышленной зоне в несколько раз может превышать соответствующие уровни в удаленных от источников районах.

В отличие от предшественников озона, максимальные концентрации которых наблюдаются в утренние или вечерние часы, наибольшие концентрации озона в приземном воздухе наблюдаются, как правило, в послеполуденное время. На это же время приходятся и представляющие наибольший интерес максимальные контрасты концентрации озона на территории города. На рис. 2 приведены суточные максимумы озона на четырех станциях города летом 2004 г.

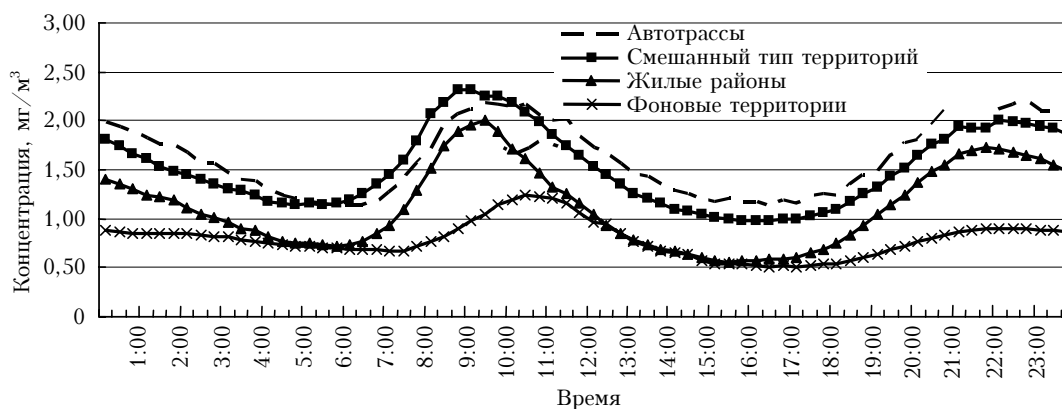


Рис. 1. Средний суточный ход концентрации СО. Москва, сентябрь — октябрь 2005 г.

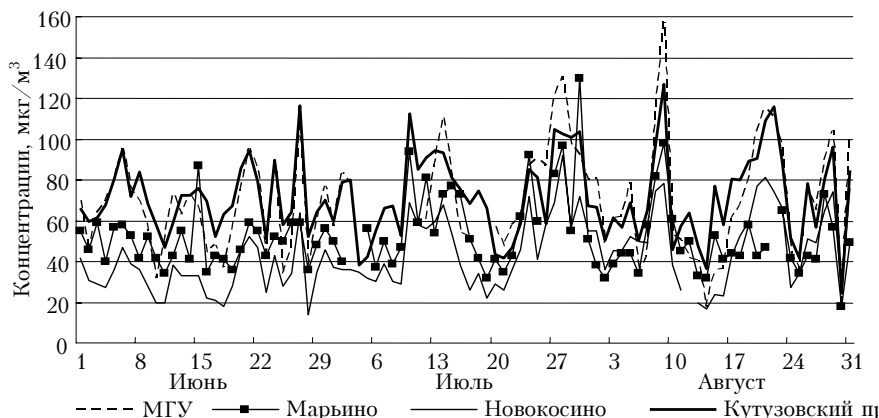


Рис. 2. Максимальные измеренные суточные концентрации приземного озона на станциях АСКЗА. Москва. Июнь—август 2004 г.

Анализ данных показал, что изменения содержания озона на станциях отражают воздействие атмосферных процессов различного масштаба. Межсуточные флуктуации на станциях, в основном, синхронизированы, но в отдельные дни они могут значительно отличаться по абсолютной величине, что связано, вероятно, с локальными эмиссиями.

Выбор значимых предикторов

Как отмечалось в работах [10, 11], инерционный фактор, т.е. содержание озона накануне дня прогноза, является самым значимым предиктором. Инерция озона велика, что является отражением нормального хода сезонной изменчивости. По нашим оценкам, оправдываемость инерционного прогноза составляет 80–92%. Поэтому инерционный параметр был включен первым в список искомым значимых предикторов. В набор искомым значимых предикторов, в отличие от известных моделей, были включены данные о концентрациях CO, NO и NO₂ для каждой станции: в 9 ч текущих суток, средние концентрации за период от 9 ч предыдущих суток до 9 ч текущих суток, изменение концентрации за период 6–9 ч для каждого из трех ингредиентов. Являясь предшественниками озона, эти малые газовые примеси определяют степень генерации озона. В качестве потенциального предиктора также рассматривались значения средней городской концентрации CO, NO и NO₂, рассчитанные по данным измерений на постах АСКЗА.

Для отбора значимых метеорологических предикторов рассматривались 8 характеристик, отражающих состояние пограничного слоя атмосферы и крупномасштабной циркуляции: максимальная и минимальная температура приземного воздуха, минимальная относительная влажность воздуха, скорость ветра у земли, а также температура и скорость ветра на изобарической поверхности 925 гПа (около 750 м) за два срока — 0 и 12 ч (BCB). Впервые в качестве предиктора использован количественный показатель метеорологического потенциала загрязнения (МПЗ), основанный на идентификации комплекса метеорологических условий, благоприятных для формирования аномальных уровней озона в воздухе г. Москвы.

Установлено, что аномалии озона, т.е. превышающие сезонные вариации концентрации, связаны с определенным типом метеорологических условий и наблюдаются в периоды также аномальной погоды. Повторяемость аномалий озона невелика и имеет неустойчивую повторяемость от года к году. Так, в 2002–2005 гг. в июне не наблюдалось ни одного случая превышения сезонного уровня $O_{3\max}$, а в июне 2006 г. в течение шести дней при благоприятных для аномального уровня метеорологических условий фиксировались повышенные концентрации озона.

В последнее время максимальное количество эпизодов аномального озона было зафиксировано в 2002 г., что явилось следствием длительной засухи и поступления продуктов горения из очагов лесных пожаров. Заметим, эпизодам аномально высо-

ких концентраций озона предшествуют периоды неблагоприятных для очищения воздуха метеорологических условий, сопровождающихся увеличением содержания предшественников приземного озона (CO, NO, NO₂), как правило, в ночные и утренние часы.

Учитывая высокую территориальную неоднородность предшественников и озона, модели озона разрабатывались для каждой станции отдельно. Для всех станций методом пошаговой регрессии определялись наиболее информативные предикторы. Предиктантом в регрессионных моделях является максимальная суточная концентрация озона. Ниже перечислены наиболее значимые предикторы, вошедшие в расчетные уравнения:

- 1) Максимальная концентрация озона в предшествующий день, мг/м³.
- 2) Индекс МПЗ.
- 3) Максимальная температура T , °С.
- 4) Разность минимальной и максимальной приземной температуры T , °С.
- 5) Минимальная относительная влажность воздуха, %.
- 6) Температура на уровне 925 гПа в 0 и 12 ч T , °С.
- 7) Скорость ветра на уровне 925 гПа в 0 ч, м/с.

Как и ожидалось, наиболее значимым предиктором для всех уравнений оказалась максимальная концентрация озона в предшествующий день (инерционный предиктор). Это совпадает с наиболее эффективным предиктором в моделях прогноза озона [10, 11], так же как и максимальная приземная температура T_{\max} и минимальная относительная влажность H . Отдельно следует отметить, что вторым по значимости предиктором оказался индекс МПЗ. В полученных нами расчетных уравнениях для каждой станции набор метеорологических предикторов и предикторов-предшественников озона индивидуален, т.е. единого расчетного уравнения для города в целом получить не удалось.

Набор метеорологических предикторов в целом на станциях схож, но вклад каждого из них может варьировать на различных станциях. Предикторы предшественников озона по каждой станции индивидуальны.

Обсуждение результатов

Предложенная нами синоптико-статистическая модель основана на связи максимальных суточных концентраций озона с метеорологическими характеристиками и антропогенными эмиссиями — предшественниками озона.

Расчеты проведены для теплого сезона: с апреля по сентябрь. В теплый сезон внутрисуточная изменчивость озона достигает наибольших значений. В холодный сезон в Московском регионе изменчивость максимальных суточных концентраций озона невелика, максимальные значения практически никогда не превышают 0,08 мг/м³, что вполнину меньше ПДК_{м.р} (0,16 мг/м³).

Для каждой из четырех станций разработано несколько моделей с использованием метода множественной пошаговой линейной регрессии. По результатам анализа и статистическим коэффициентам моделей выбраны лучшие значимые модели. В общем виде уравнения выглядят следующим образом:

$$O_{\max} = a_1 O_{3\max}(d-1) + a_2 \text{МПЗ} + a_3 T_{\max} + a_4 H + \dots + a_5 P + a_0,$$

где $O_{3\max}$ – расчетная максимальная суточная концентрация озона; $O_{3\max}(d-1)$ – максимальная суточная концентрация озона в предшествующие прогнозу сутки; МПЗ – индекс МПЗ; H – минимальная относительная влажность воздуха; P – концентрация / изменение в период 6–9 ч CO, NO, NO₂; a_0, a_1, \dots – регрессионные коэффициенты.

Прогностические уравнения с включением параметров местного и среднего городского уровней CO, NO, NO₂ по каждому пункту получены как для теплого сезона в целом, так и отдельно для весны и лета. Для всех станций получены значимые уравнения.

Наибольшая эффективность расчетных уравнений получена для фоновой станции МГУ, удаленной от прямых источников выбросов. Они описывают от 72 до 80% дисперсии $O_{3\max}$; на долю инерции здесь приходится менее 50% изменчивости, предшественники озона описывают до 6% его изменчивости. На рис. 3 представлены сравнения измеренных и модельных концентраций $O_{3\max}$ на ст. МГУ в июне–августе 2002 г.

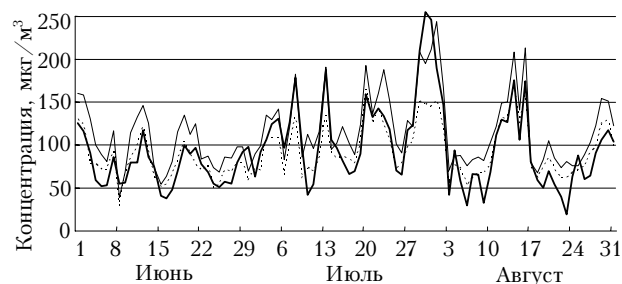


Рис. 3. Измеренные и модельные значения концентрации озона на ст. МГУ (жирная линия – измеренные концентрации $O_{3\max}$, тонкая – расчеты по модели $MR_{\text{лок}}$, пунктирная – расчеты по модели $MR_{\text{ср.гор}}$)

Хорошо видно, что модель, учитывающая локальный уровень предшественников $O_{3\max}$ ($MR_{\text{лок}}$), лучше отражает изменчивость $O_{3\max}$, чем модель с включением показателя среднего городского уровня предшественников ($MR_{\text{ср.гор}}$). Последняя из указанных моделей ($MR_{\text{ср.гор}}$) заметно завышает значения $O_{3\max}$, за исключением нескольких дней июля 2002 г. (8, 13, 29–31), когда наблюдалось экстремально высокое содержание озона в приземном воздухе, обусловленное адвекцией предшественников и фотохимической генерацией озона [7].

Сравнение расчетных и измеренных концентраций озона показало, что погрешности расчетов, превышающие 0,032 мг/м³ (20% от максимально-

разовой ПДК_{м.р.}) для модели с местным загрязнением составляют от 3 до 6% случаев. Ошибки расчетов по среднему городскому загрязнению резко менялись от года к году; в 2005 г. они составили менее 1%, в 2002 г. – 33%.

На станции Марьинский парк (тип смешанных территорий) инерция оказалась самой значимой из всех станций, она описывает до 60% изменчивости $O_{3\max}$. Введение предикторов – предшественников озона позволило улучшить прогностические свойства уравнений на 4–6%, причем применение показателя уровня предшественников как местного, так и среднего городского показало схожие результаты, свидетельствующие о том, что станция находится в условиях, близких к «средним городским» условиям загрязнения воздуха. В отличие от фоновых территорий сезонные модели (отдельно для весны и лета) показали, что вклад инерционного фактора в весенний сезон выше (63–70%), чем летом. В летние месяцы значимость инерции уменьшается до 47–54%. Высокий вклад инерции весной является отражением главного механизма поступления озона в приземный слой из верхней тропосферы преимущественно путем вертикального обмена. Уменьшение инерционного вклада летом при возрастании значимости метеорологических предикторов и предшественников озона (от 6 до 17%) подтверждает существенное влияние фотохимической генерации в летние месяцы, когда учащаются благоприятные для нарастания загрязнения приземного воздуха метеорологические условия.

Оценки погрешностей расчетов показали, что в 2005 г., когда метеорологических условий, благоприятных для формирования anomalно высоких концентраций озона, не наблюдалось, ошибки прогноза, превышающие 20% ПДК_{м.р.}, составили лишь 2% и с учетом предикторов местного, и с учетом среднего городского уровней предшественников озона. В остальные годы ошибки с указанным допуском колеблются в пределах от 5 до 8,5%.

Станция Новокосино (жилая зона на востоке города) – единственная из всех рассмотренных станций, на которой учет среднего городского уровня предшественников озона показал лучшие результаты по сравнению с учетом уровня предшественников озона на самой станции. Из этого следует, что формирование озона в данном районе часто находится под влиянием шлейфа городского загрязнения. Модель, учитывающая средний городской уровень предшественников озона, описывает до 71% вариаций озона, из них 56% приходится на долю инерционного фактора, 2–3% определяют параметры загрязнения. В среднем ошибки прогнозов, превышающие 20% от максимально-разовой ПДК, составляют около 6% для модели со средним городским уровнем предшественников и 7,5% для модели с местным уровнем.

Как показали оценки моделей, на станции, расположенной вблизи крупной автомагистрали (Кутузовский проспект), метеорологические предикторы описывают до 22% изменчивости максимальных концентраций озона; инерционный предиктор – до

34–50%, т.е. меньше, чем на других станциях. Столь низкая доля инерции отражает то обстоятельство, что флуктуации и первичных, и вторичных загрязнений в примагистральных районах находятся в зависимости от режима транспортного потока, а существенные изменения происходят, в основном, под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов. В среднем ошибки моделей для станции Кутузовский пр. с допуском 20% от максимально-разовой ПДК составили 2–7%. Существенных различий в успешности моделей с учетом среднего городского и с учетом местного уровня предшественников озона не установлено.

Подводя итоги, отметим, что расчетные уравнения, полученные для всех станций, имеют преимущество перед инерционным прогнозом. В таблице приведена общая оправдываемость методических и инерционных прогнозов за три года.

Оправдываемость инерционного (колонка 1) прогноза O_{3max} и расчетных значений с учетом локального уровня предшественников (2), %

Год	МГУ		Марьинский парк		Новокосино		Кутузовский пр.	
	1	2	1	2	1	2	1	2
2003	82	94	91	92	91	92	—	—
2004	89	95	88	92	88	92	86	98
2005	84	97	97	98	97	98	83	93

Данные таблицы показывают, что наибольшие преимущества перед инерционным прогнозом расчетные методы имеют на фоновой станции (МГУ) и на самой «загрязненной» (Кутузовский пр.) — до 10–13%. При общей высокой оправдываемости инерционных прогнозов она различается от года к году на 3–9%, методических — на 1–6%. Значительная изменчивость инерционного прогноза связана, в первую очередь, с разнообразием метеоро-

логических условий в разные годы. Так, в 2005 г., когда благоприятных для аномального озона метеорологических условий не наблюдалось, на двух из четырех рассматриваемых станций инерция составила 97%. А в аномальном 2002 г. на станции МГУ оправдываемость инерционного прогноза не превысила 74%.

Установлено, что успешность инерционного прогноза резко падает именно в период формирования высоких концентраций озона. На рис. 4 представлены измеренные концентрации O_{3max} и отклонения расчетных величин от наблюдавшихся на четырех станциях города в июле–августе 2004 г.

Видно, что измеренные на станциях максимальные концентрации O_{3max} хорошо согласованны, отражая общие закономерности изменений O_{3max} под влиянием меняющихся в значительном диапазоне метеорологических условий. В целом, наиболее высокие концентрации наблюдались на фоновой станции, а самым низким содержание озона чаще всего в послеполуденное время было на ст. Новокосино, что в определенной степени может быть связано с нахождением станции в «климатическом» городском шлейфе загрязнений. Для ст. Новокосино ошибки расчета во всем эпизоде ни разу не превышали 20% от максимальной разовой ПДК (т.е. 32 мг/м³). На станции МГУ ошибка расчета лишь 9 августа превысила указанный диапазон допуска. Заметим, что в этот день при аномальных метеорологических условиях на всех станциях отмечалось синхронное повышение содержания озона в приземном воздухе (см. рис. 4). Но наибольшая погрешность расчета имела место на станции, где наблюдался самый высокий приближившийся к ПДК_{м.р} уровень O_{3max} , при этом на других станциях максимальные значения были предсказаны расчетными уравнениями с высокой точностью.

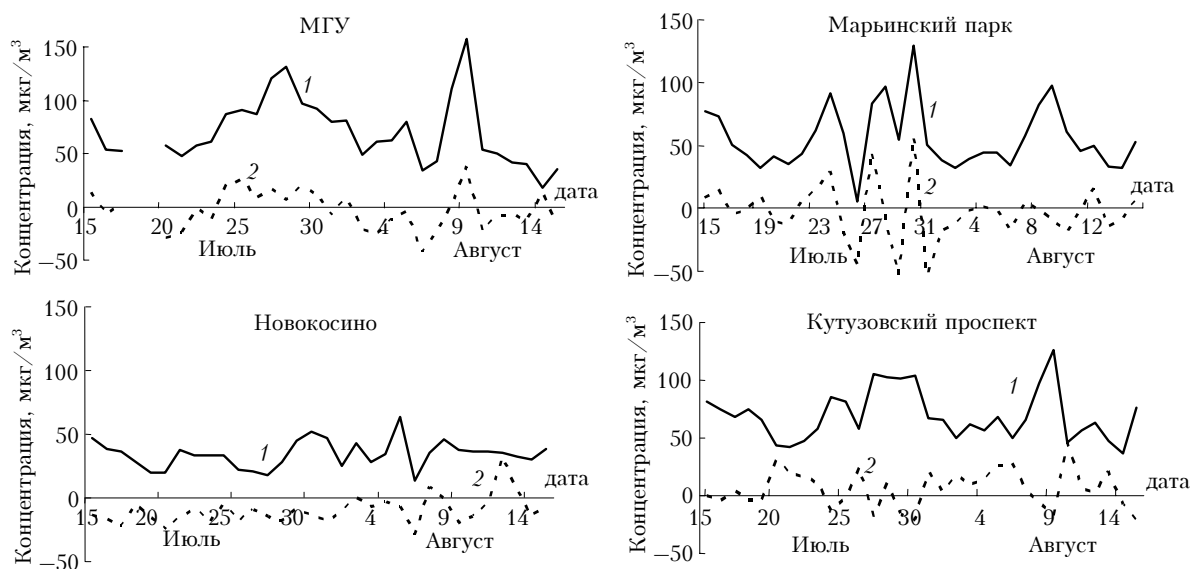


Рис. 4. Измеренные максимальные концентрации O_3 (кривые 1) и отклонения модельных расчетов в период 15 июля – 15 августа 2004 г. (кривые 2)

На следующий день, 10 августа, синоптические условия резко изменились. Отклонения расчетных значений от фактических за счет вклада инерционного предиктора заметно увеличились; на ст. Кутовский проспект ошибка расчета превысила 20% от максимальной разовой ПДК. А вот на станции МГУ, где вклад инерции в расчетном уравнении наименьший, наименьшей оказалась и ошибка.

Этот эпизод показывает, что при типичных для сезона метеорологических условиях изменчивость содержания озона на территории города незначительна и хорошо идентифицируется инерционным прогнозом. При наступлении благоприятных для сезонной аномалии метеорологических условий диапазон уровней озона по территории города расширяется, при этом ошибки инерционного прогноза резко возрастают.

Выводы

Данные непрерывных наблюдений за содержанием малых газовых примесей в г. Москве позволили получить некоторые новые представления о неоднородности поля загрязнения приземного воздуха в мегаполисе. Показано, что на территории города концентрации озона могут существенно отличаться от средних — при метеорологических условиях, благоприятных для формирования аномально высоких уровней озона, различия в содержании озона в приземном воздухе между отдельными районами могут составлять 0,07 мг/м³ и более.

Получены расчетные уравнения для теплого сезона для четырех типов городских территорий, различающихся уровнем техногенной нагрузки. Универсального уравнения для всех типов территорий получить не удалось. Это косвенно указывает на то, что изменчивость озона в мегаполисе зависит не только от крупномасштабных процессов и локальных метеорологических условий, но и от интенсивности антропогенной нагрузки района расположения станции. Полученные расчетные уравнения отражают характерную изменчивость максимальных концентраций озона на территории города, в первую очередь, за счет инерционного фактора, а также из-за предшественников озона.

Показано, что вклад инерционного фактора в изменчивость озона на территории города находится на уровне 45–60%; роль инерции убывает от фоновых территорий к наиболее загрязненным. Впервые использованная в качестве предиктора комплексная идентификация метеорологических условий загрязнения показала преимущество перед использованием отдельных метеорологических характеристик. Индекс МПЗ описывает от 5 до 20% изменчивости озона. Наиболее значимыми предикторами расчетных уравнений являются инерционный фактор и МПЗ. Предикторы, описывающие предшественников озона, увеличивают успешность расчетов максимальной концентрации озона в городе от 2 до 6%; их роль возрастает в эпизодах, способствующих формированию аномальных уровней озона.

Полученные уравнения предполагается использовать для расчетов максимальных концентраций

озона в теплый сезон в г. Москве в периоды аномальных метеорологических условий. Важно, что все входящие в расчетные уравнения предикторы доступны из оперативно поступающей информации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Департамента экологии и природопользования г. Москвы, грантов РФФИ № 05-05-65288-а, 05-05-08018-офи_а, 06-05-64104.

1. *Бюллетень* о загрязнении воздушной среды города Москвы за 2004 год. М.: Мосэкомониторинг, 2005. 26 с.
2. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В., Карпов А.В., Лезина Е.А., Ульяновко А.В. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 156–170.
3. Еланский Н.Ф., Сенюк И.А. Измерения приземной концентрации озона на Высокогорной научной станции Кисловодск: сезонные и суточные вариации // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1995. Т. 31. № 2. С. 251–259.
4. 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.
5. Еланский Н.Ф., Звягинцев А.М., Тарасова О.А. Исследования тропосферного озона в Европе и России // Метеорол. и гидрол. 2003. № 1. С. 125–128.
6. Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 387–396.
7. Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И. и др. Положительные аномалии приземного озона в июле–августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 75–86.
8. 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.
9. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. О пространственно-временных связях приземной концентрации озона в Европе // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 1997. Т. 33. N 1. С. 104–113.
10. 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.
11. Zuyagintsev A.M., Kuznetsova I.N. Regression relations of surface ozone and meteorological parameters and possibilities of surface ozone forecasting // Phys. of Auroral Phenomena. 29th Annual Seminar. Abstracts. Apatity: PGI. 2006. P. 78.
12. Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н. Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 678–688.
13. Ованесянц А.М., Красильникова Т.А., Летников Б.С. О загрязнении природной среды и радиационной обстановке на территории Российской Федерации в июле 2002 г. // Метеорол. и гидрол. 2002. № 10. С. 111–113.
14. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1973. 296 с.
15. Clark T., Karl T. Application of prognostic meteorological variables to forecasts of daily maximum one-hour

- ozone concentrations in the Northern United States // J. Amer. Meteorol. 1982. V. 21. P. 1662–1671 /1.
16. *Balcar T., Krizan P., Kastner J.* Urban and Background Surface Ozone Trends over the Czech Republic in 1995–2004 // Geophys. Res. Abstr. 2006. V. 8. 00753.
 17. *Fiala J., Cernikovskiy L., de Leeuw F., Kurfuerst P.* Air pollution by ozone in Europe in summer 2003 // European Environment Agency Topic report 3/2003. Copenhagen, 2003. 33 p.
 18. *Jaroslawski J., Obnińska B., Bogucka M.* Surface ozone variability in Poland, 1995–2005 // Geophys. Res. Abstr. 2006. V. 8. 00755.
 19. *Kremler M.* Surface ozone concentrations on the mountain stations in Slovakia // Geophys. Res. Abstr. 2006. V. 8. 00765.
 20. *Tarasova O.A., Zvyagintsev A.M., Kakajanova G., Kuznetsova I.N.* Tropospheric ozone climatology at extratropical latitudes // Geophys. Res. Abstr. 2006. V. 8. 00751.
 21. *Solberg S., Bergstroem R., Langner J., Laurila T., Sjoeborg K., Lindskog A.* Changes in ozone episodes due to emission reductions: A Nordic study, Norwegian Institute for Air Research: Kjeller. EMEP/CCC-Report 10/2002. 74 p. (<http://www.nilu.no>).
 22. *Stedman J.R.* The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heat wave // Atmos. Environ. 2003. V. 38. P. 1087–1090.
 23. <http://meteo.iao.ru>
 24. <http://mosecom.ru>
 25. <http://www.eumetnet.eu.org/contozon.html>
 26. <http://www.emep.int>

I.U. Shalygina, I.N. Kuznetsova, M.I. Nahkaev, E.A. Lesina, A.M. Zvyagintsev. **About the forecasting of a surface ozone in a big city (by the example of Moscow).**

The variations of small gas admixtures was analysed on the territory of a big city by the facts of changes at the network «Mosecomonitoring», which allowed us to get new ideas about the heterogeneity of the field of small gas admixtures, including surface ozone. The regressive models of the maximum daily concentration of the surface ozone are elaborated for the first time for the four types of urban territories, which differ in the level of man-caused assignment. It is determined that the investment of the inertia mounts to 80–90%, but the index of the meteorological potential of the pollution become more informative in the episodes of high concentrations of the ozone. The index of the meteorological potential of the pollution showed the advantage over the use of individual meteorological characteristics in the statistic models, the index is included in calculated equations. The calculated equations are obtained for the warm season. A comparison of the maximum calculated concentrations of the ozone with the inertial forecast showed a success of the methodical forecast.