

Изменчивость приземного озона и других малых газовых составляющих атмосферы в мегаполисе и сельской местности

А.М. Звягинцев, Г. Какаджанова, О.А. Тарасова*

ГУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 15.06.2009 г.

Рассмотрена сезонно-суточная изменчивость озона и первичных загрязнителей атмосферы — оксидов азота и монооксида углерода — в приземном слое атмосферы большого города (на примере Москвы за 4 года). Сезонно-суточные ходы концентраций рассмотренных составляющих атмосферы свидетельствуют, что в теплый сезон они в значительной степени определяются вертикальным перемешиванием в пограничном слое атмосферы. Сравнены изменчивости приземного озона в городе и близкорасположенной сельской местности (на расстоянии около 100 км). Выявлены основные различия в концентрациях приземного озона в большом городе и сельской местности, а также в их временном ходе. Показано, что в разные периоды года соотношение концентраций приземного озона с первичными загрязнителями атмосферы определяется, главным образом, различными атмосферными процессами: адвекцией в холодный период и вертикальным перемешиванием в теплый. Наибольшая корреляция наблюдается между максимальной суточной концентрацией озона и максимальными утренними концентрациями первичных загрязнителей. В холодный сезон коэффициент корреляции между ними практически всегда отрицателен, в теплый, когда явно наблюдается фотохимическая генерация озона, бывает положительным.

Ключевые слова: приземный озон, малые газовые составляющие атмосферы, пограничный слой атмосферы, загрязнители воздуха; surface ozone, trace gases, planetary boundary layer, air pollutants.

В связи с возросшим вниманием к качеству атмосферного воздуха и необходимостью его контроля в последнее время в крупнейших городах России проводятся регулярные автоматические наблюдения концентраций малых газовых составляющих атмосферы (МГСА), являющихся загрязнителями приземного слоя [1–6]. В теплый сезон неудовлетворительное качество воздуха почти всегда связано с превышениями предельно допустимых концентраций (ПДК) приземного озона (далее — просто озона) или взвешенных частиц, входящих в пятерку важнейших загрязнителей (взвешенные частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} и МГСА: оксиды азота $NO_x = NO + NO_2$, монооксид углерода CO, диоксид серы SO_2 и озон O_3), по которым Всемирная организация здравоохранения рекомендует оценивать качество воздуха.

Мировым стандартам контроля качества воздуха и информационной обеспеченности населения этой информацией в России соответствует только мониторинг в системе ГПУ «Мосэкомониторинг» в Москве (<http://www.mosecom.ru>) и на TOR-станции в Томске (<http://meteo.iao.ru>), и то лишь частично. Необходимое число автоматических станций контроля загрязнения атмосферы имеется лишь в Москве [3],

но обобщение результатов измерений на них, в частности установление многолетних показателей распределения МГСА по территории, затруднено из-за неопределенностей качества данных [4]. Ряд закономерностей временного хода МГСА, по-видимому, присущих отечественным мегаполисам, установлен по данным московской станции МГУ–ИФА РАН (далее — просто МГУ) [4]. Цель настоящей работы заключается в выявлении особенностей временных ходов озона и других МГСА в Москве и окрестностях, а также в установлении связей между ними.

В работе использованы среднечасовые данные наблюдений озона, NO_x и CO на ст. МГУ в период 2002–2006 гг. ($55,7^\circ$ с.ш., $37,6^\circ$ в.д., 200 м над у.м.) и ст. Данки в период 1999–2003 гг. ($54,9^\circ$ с.ш., $37,8^\circ$ в.д., 140 м над у.м.; находится примерно в 100 км к югу от Москвы на территории Приокско-террасного государственного природного биосферного заповедника). Наблюдения на ст. Данки проведены Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН в рамках выполнения Европейской совместной программы мониторинга и оценки переноса воздушных загрязнений на большие расстояния — ЕМЕР: <http://nilu.no>.

Для сравнения газового состава воздуха Московского региона с наблюдаемым в сельской местности Европы использованы данные ст. Пайерн (Швейцария; $46,8^\circ$ с.ш., $7,0^\circ$ в.д., 490 м над у.м.;

* Анатолий Михайлович Звягинцев (azvyagintsev@cao-ghms.ru); Гульджахан Какаджанова; Оксана Алексеевна Тарасова (OTarasova@yandex.ru).

<http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/>), расположенной в центре Западной Европы. Также использованы метеоданные (температура, относительная влажность и др.) с мировой станции № 27612 (Москва) и индекс метеорологического потенциала загрязнения (МПЗ) по данным Гидрометцентра России [7]. Наблюдения озона с помощью электрохимического газоанализатора озона [8] и в системе ГПУ «Мосэкомониторинг» [3] указывают, что концентрация озона, измеренная на станции МГУ, расположенной на удалении около 300 м от оживленной автомагистрали и отделенной от нее зданиями и растительностью, в теплый сезон хорошо характеризует качество воздуха в «спальных» районах Москвы.

Ранее было отмечено [9–11], что сезонный ход концентрации озона в различные часы суток может заметно различаться. Для выяснения действующих при этом механизмов представляется целесообразным рассматривать сезонные вариации озона в раз-

личные часы совместно с поведением других МГСА, которые вовлечены в циклы химических трансформаций озона [12]. В литературе до сих пор дискутируется вопрос о природе сезонных максимумов приземного озона [13].

В наших более ранних работах [10, 11] показано, что весенний максимум озона, заметный на всех станциях, обусловлен динамическими факторами (такими, как вертикальный обмен со стратосферой и особенности горизонтальной адвекции), а летний, наиболее отчетливо проявляющийся лишь в южных и загрязненных регионах, — с фотохимической генерацией озона [12]. В [11] предложена классификация особенностей сезонно-суточного хода озона в зависимости от географического положения и уровня загрязнения окружающей местности, с концепции которой будем рассматривать сезонно-суточный ход озона и других МГСА на станциях МГУ (рис. 1) и Данки (рис. 2).

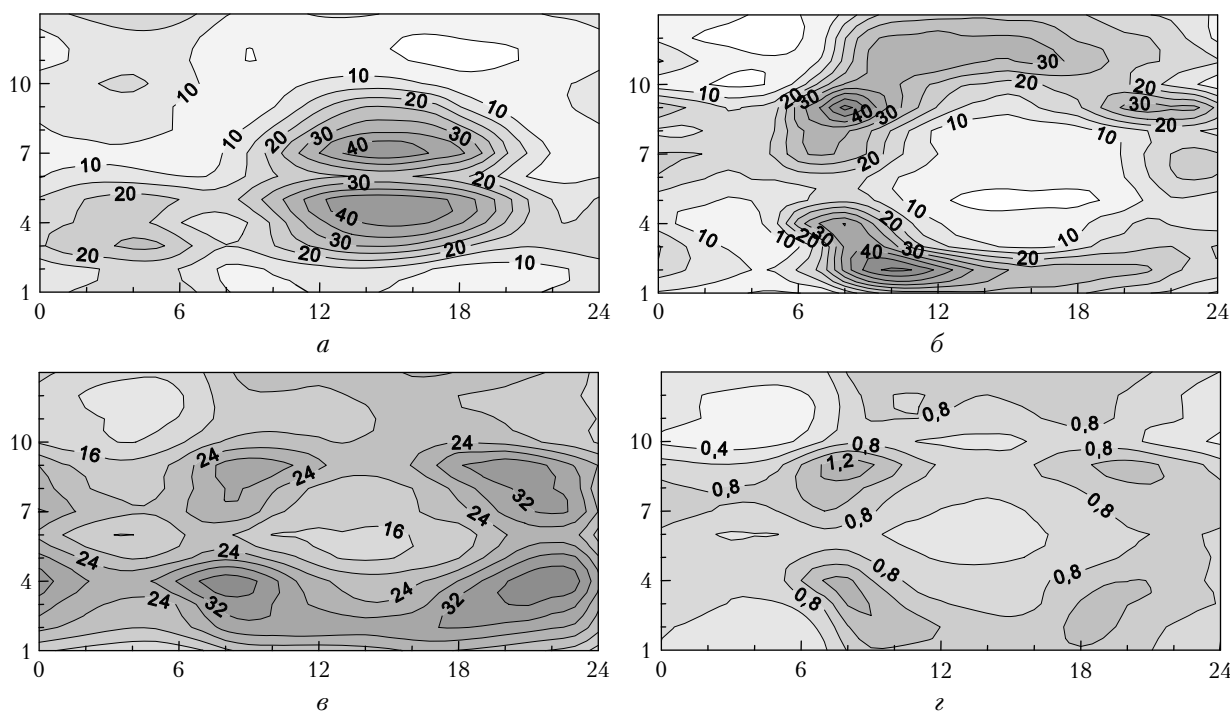


Рис. 1. Средний сезонно-суточный ход озона, млрд⁻¹ (а), NO, млрд⁻¹ (б), NO₂, млрд⁻¹ (в) и CO, млн⁻¹ (г) для ст. Москва (МГУ–ИФА РАН) в период 2002–2005 гг. По горизонтальной оси – время суток (ч), по вертикальной – месяцы

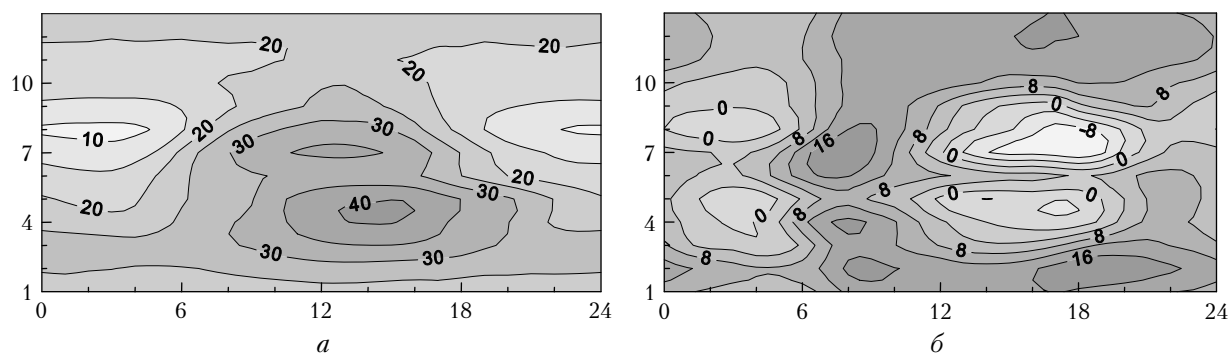


Рис. 2. Средний сезонно-суточный ход озона (млрд⁻¹) для ст. Данки в период 1999–2003 гг. (а), разность ходов на станциях Данки и Москва (МГУ–ИФА РАН) (б)

Сезонно-суточный ход МГСА на ст. Пайерн (рис. 3) представлен для сравнения, поскольку отсутствуют репрезентативные данные, характеризующие их ход в сельской местности на территории России (из эпизодических наблюдений в эксперименте ТРОЙКА [14] можно заключить, что величины этих концентраций в сельской местности России могут быть еще ниже, чем на ст. Пайерн). Отметим, что на фоновой ст. Кошетце (Чехия; 49,6° с.ш., 15,1° в.д., 534 м над у.м.) формы сезонных и суточных ходов концентраций МГСА такие же, как и на ст. Пайерн, а сами значения концентраций NO и NO₂ в 3–10 раз меньше.

Сезонно-суточные ходы концентраций озона на всех перечисленных станциях имеют много общего и типичны для умеренно загрязненных равнинных станций [11]. Как и на многих других станциях Европы [3, 4, 9–11], на рассматриваемых станциях в течение года наблюдаются два максимума среднечасовых концентраций озона через 1–4 ч после полудня: в апреле–мае и июле–августе. Сезонный максимум в ночное время на всех станциях в согласии с [10, 11] наблюдается в марте–апреле, в то время как летний максимум в ночных наблюдениях отсутствует. Это указывает [10, 11] на то, что весенний максимум связан с динамическими факторами, а летний – с влиянием фотохимических процессов. В пользу такой интерпретации свидетельствует, в частности, и сопоставление ходов концентрации озона на рис. 1 и 2: в центре мегаполиса, где можно ждать более интенсивного фотохимического образования озона, уровень летнего максимума близок к весеннему, а в сельской местности – заметно ниже.

Различия временного хода концентрации озона на станциях МГУ и Данки проявляются как в су-

щественной разнице в отдельные периоды времени, так и в качественных характеристиках суточного хода. Эти различия хорошо заметны на величине «добавки» озона в сельской местности по сравнению с городом (см. рис. 2, б). Известно [15], что в городах концентрации озона меньше, чем в окружающей сельской местности, и только при достаточно больших уровнях озона эти концентрации сближаются. За счет погрешностей измерений и межгодовой изменчивости озона разность между данными на станциях МГУ и Данки, по нашим оценкам, не должна превысить 5 млрд⁻¹; большие различия связаны с особенностями ходов концентрации озона в большом городе и сельской местности. Меньшие концентрации озона в Москве по сравнению с концентрациями в сельской местности в холодный период года (с ноября по март) в течение всего времени суток связаны с разрушением озона в результате реакции нитрификации O₃ + NO в загрязненной антропогенными выбросами атмосфере города, а также с большей скоростью сухого осаждения на поверхность (скорости сухого осаждения на чистый снег существенно ниже, чем на загрязненную поверхность города [16]). Более затянутое в летний период сохранение больших концентраций озона в большом городе в районе 16–20 ч (область отрицательных значений на рис. 2, б) связано, по-видимому, с более медленным послеполуденным спадом температуры в городе по сравнению со спадом температуры в сельской местности.

Появление ночного максимума в суточном ходе озона (см. рис. 1) присуще только большим городам [4, 5, 11, 15] или высокогорным станциям, в сельской местности он не наблюдается [10, 11]. Из сравнения суточных ходов озона в городе и сельской

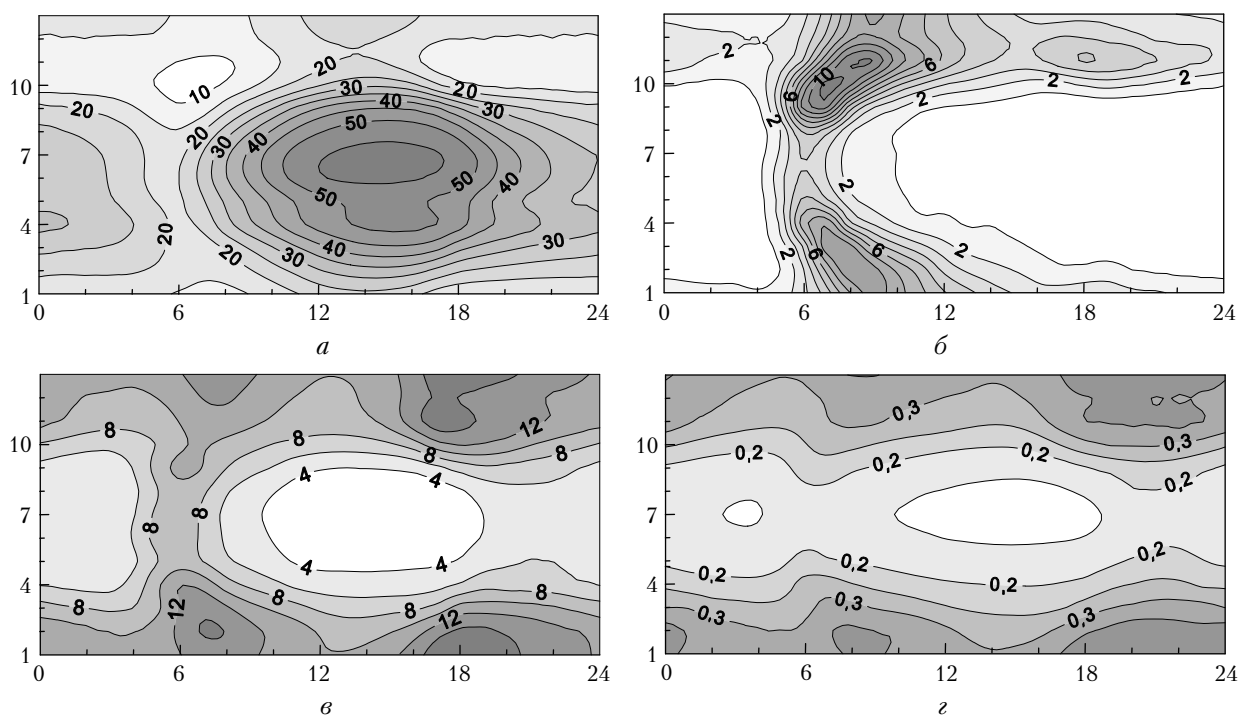


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для ст. Пайерн в период 1999–2007 гг.

местности (см. рис. 1–3) отчетливо видно, что его ночной максимум в городе связан не с увеличением концентрации озона в ночное время, а с двумя провалами в суточном ходе поздним вечером (20–24 ч) и утром (6–11 ч), создающими иллюзию «ночного» максимума.

Несомненно, что причиной этих провалов являются выбросы загрязнений, в первую очередь NO, от автотранспорта (доля автотранспорта в загрязнении атмосферы Москвы заведомо превышает 80%): ночной максимум озона во все сезоны наблюдается близ срока ночного минимума выбросов (см. рис. 1). Вечернее уменьшение концентрации озона связано с ослаблением вертикального перемешивания [17–19], ослаблением фотохимической генерации вследствие уменьшения солнечной радиации и увеличением концентраций первичных загрязнителей (прежде всего, NO), в химических реакциях с которыми озон разрушается.

Ночной приток озона в город происходит за счет вертикального перемешивания (хотя и значительно ослабленного по сравнению с дневным периодом) и горизонтального переноса из сельской местности (за счет городского острова тепла). Поэтому в середине ночи по мере уменьшения эмиссий и концентраций NO концентрации озона начинают расти и растут до тех пор, пока ранним утром не произойдет существенного увеличения концентрации NO вследствие антропогенных выбросов. После восхода Солнца и определенной стабилизации выбросов концентрация озона растет вследствие усиления вертикального перемешивания [17–19], приносящего озон из более высоких слоев атмосферы, где его концентрация выше, а также благодаря фотохимической генерации озона. В сельской местности из-за небольшой суточной изменчивости выбросов NO ночной максимум озона не наблюдается (см. рис. 2 и 3).

Рассмотрим наблюдаемые взаимозависимости временных ходов концентраций первичных загрязнителей (CO и NO_x) и озона. Отметим, что из-за сравнительно невысокой химической активности и, следовательно, долгого времени жизни (до 3 мес) CO считается одним из наиболее эффективных маркеров основных антропогенных эмиссий [20, 21]. В Москве наблюдаются два сезонных минимума среднесуточных концентраций CO и NO_x: хорошо выраженный в теплый сезон — с мая по июль и слабо выраженный в холодный — с октября по январь [3, 4, 22] (см. рис. 1). С февраля по октябрь наблюдаются два минимума их концентраций в течение суток — ночью (0–6 ч) и днем (12–18 ч); промежуток времени между утренним и вечерним максимумами примерно пропорционален длине светового дня. Осенью этот промежуток сокращается практически до нуля и в период до января–февраля в суточных ходах CO и NO_x наблюдается лишь один минимум ночью и максимум днем (см. рис. 1). На сельских станциях Западной Европы (Чехия, Нидерланды и др.) концентрации CO и NO_x в несколько раз — десятки раз ниже, чем в Москве. Их суточные ходы невелики или практически отсутствуют, хорошо выраженный сезонный минимум обычно единственен и наблюдается в теплый сезон, а максимум — в холодный (см. рис. 3).

И сезонный, и суточный ходы CO и NO_x на всех рассмотренных станциях хорошо соответствуют известным закономерностям динамики этих примесей в пограничном слое атмосферы [23, 24]. В течение года радиационный баланс подстилающей поверхности обуславливает в среднем устойчивую стратификацию в холодный сезон и неустойчивую в теплый, из-за чего вертикальное перемешивание в холодный сезон ослаблено, а в теплый — усилено. Поэтому в предположении о примерном постоянстве выбросов загрязнителей в течение года следует ожидать единственного максимума среднесуточных концентраций CO и NO_x в холодный период и минимума в теплый. Именно такой сезонный ход концентраций CO и NO_x наблюдается на ст. Пайерн. Нерезкий зимний минимум концентраций CO и NO_x в Москве (см. рис. 1) обусловлен, по-видимому, уменьшением интенсивности движения автотранспорта в зимний период.

С утра до вечера скорость выбросов загрязнений в Москве примерно постоянна [4], она резко уменьшается только ночью. Уменьшение концентраций CO и NO_x в дневные часы в Москве происходит за счет конвективного вертикального перемешивания (см. рис. 1), ослабленного в холодный сезон и интенсивного в теплый. Днем в теплый сезон такое перемешивание должно также приводить к выравниванию концентрации озона по всей высоте пограничного слоя. В условиях достатка солнечного излучения дополнительное количество озона в теплый сезон образуется и за счет его фотохимической генерации [12]. Однако с учетом того, что на верхней границе пограничного слоя атмосферы концентрация озона составляет не менее 35–50 млрд⁻¹, см., например, [25–27], а в теплый сезон высота слоя перемешивания не ниже этой верхней границы [18, 28], доля фотохимически образованного за день озона в пограничном слое Московского региона, по-видимому, даже летом в среднем не превышает 10–30%.

В течение некоторых месяцев года между концентрациями озона и CO (а также NO_x) наблюдаются заметные корреляционные связи. В частности, в зимние месяцы корреляция между максимальными концентрациями озона (днем) и CO (утром) отрицательна, а в летние часто положительна (коэффициенты корреляции по абсолютной величине более 0,5; коэффициенты корреляции между среднесуточными значениями обычно меньше). Это обстоятельство, в принципе, может быть использовано для прогнозирования максимальной суточной концентрации (усредненной за 1 или 8 ч) озона в рамках статистической модели, описанной, например, в [29]. Наличие такой положительной корреляции используется для установления причин образования озона в приземном воздухе [20, 30].

В холодный сезон при отсутствии фотохимической генерации озона стабильно наблюдаемый отрицательный коэффициент корреляции между концентрациями озона и CO, очевидно, обусловлен процессами смены воздушных масс. В этот сезон массы, загрязненные в Московском мегаполисе выбросами автотранспорта и предприятий, с высокими уровнями

СО и малыми озона замещаются на чистые, пришедшие из сельских местностей и/или больших высот, с малыми уровнями СО и высокими озона, и наоборот. Такое заключение подтверждается также фактом, что в холодный период имеют место заметные корреляции скорости ветра с концентрациями озона (положительная) и СО (отрицательная).

Считается [20, 21, 30], что положительный коэффициент корреляции между концентрациями озона и СО связан с фотохимической генерацией озона с участием соединений, которые образуются совместно с СО. В условиях Москвы для отдельных месяцев в теплый период года этот коэффициент как для среднесуточных, так и для максимальных суточных концентраций очень нестабилен и может принимать статистически значимые как положительные, так и отрицательные значения. В частности, за период 2002–2008 гг. в целом набралось лишь 3 мес, когда коэффициент корреляции между максимальными суточными значениями озона и СО превышал 0,5.

В каждый из этих месяцев максимальные суточные концентрации озона в отдельные сутки превышали 50 млрд^{-1} , что указывает на интенсивность происшедшей в этот месяц фотохимической генерации озона. В эти месяцы концентрации СО хорошо коррелировали также с МПЗ и/или максимальной суточной температурой. При использовании в статистической модели концентрации озона [29] в качестве предиктора концентрации СО (а также NO_2) эффективность модели практически не улучшается. Это, вероятно, указывает на то, что в Московском регионе в теплый сезон наблюдаемая временами корреляционная связь между концентрациями озона и СО обусловлена, в первую очередь, их зависимостью от метеопараметров.

Таким образом, из представленных материалов могут быть сделаны следующие заключения:

1. Средние сезонно-суточные ходы концентрации приземного озона на станциях Москвы и близкорасположенной станции в сельской местности характерны для европейских станций; максимумы концентрации наблюдаются через 1–4 ч после полудня в конце весны и середине лета. Наиболее значительные различия концентраций озона в мегаполисе и сельской местности имеют место в утренние часы, когда в мегаполисе начинается интенсивное движение транспорта и концентрация озона уменьшается, и летом, когда дневной максимум озона в мегаполисе растягивается до вечера. Появление ночного максимума в суточном ходе концентрации озона в Москве связано с разрушением озона антропогенными выбросами в вечерние и утренние часы.

2. Средние сезонные и суточные ходы концентраций озона и других МГСА (оксидов азота и монооксида углерода) имеют почти зеркальный характер: увеличение концентраций озона, как правило, сопровождается уменьшением концентраций МГСА, и наоборот. В Московском регионе в теплый сезон суточные ходы концентраций озона и МГСА в значительной степени определяются вертикальным перемешиванием в пограничном слое атмосферы.

3. Коэффициент корреляции между суточными концентрациями озона и монооксида углерода (а также окислов азота) в холодный сезон в Москве отрицательный и статистически значимый; в теплый сезон положительная корреляция наблюдается лишь в случаях, когда налицо явная фотохимическая генерация озона. В холодный сезон такой характер связи обусловлен, по-видимому, сменой воздушных масс с различным уровнем загрязненности.

Авторы благодарны сотрудникам ИФА РАН и ГПУ «Мосэкомониторинг» за предоставленные данные, а также сотрудникам ГМЦ России за данные о МПЗ и полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-05-13545-офи_ц.

1. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Лиготский А.В., Мелешихин В.Е., Панченко М.В., Покровский Е.В., Рогов А.Н., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. TOR-станции мониторинга атмосферных параметров // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1085–1092.
2. Genikhovich E.L., Ziv A.D., Iakovleva E.A., Palmgren F., Berkowicz R. Joint analysis of air pollution in street canyons in St. Petersburg and Copenhagen // Atmos. Environ. 2005. V. 39. N 15. P. 2747–2757.
3. 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 Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 40. № 2. С. 156–170.
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 Москвы // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2007. Т. 43. № 2. С. 219–231.
5. Звягинцев А.М., Селегей Т.С., Кузнецова И.Н. Изменчивость приземного озона в г. Новосибирске // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 7. С. 647–650.
6. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Мариняйте И.И., Пененко В.В., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Фофанов А.В., Ходжер Т.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 428–437.
7. Шальгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. О прогнозировании приземного озона в большом городе (на примере Москвы) // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 7. С. 651–658.
8. Звягинцев А.М., Рудаков В.В., Кузнецова И.Н., Демин В.И. О временном ходе приземного озона в центре Европейской территории России в весенне-летний период 2004 г. // Метеорол. и гидрол. 2006. № 4. С. 41–46.
9. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 486–495.
10. Звягинцев А.М. Основные периодичности временного хода приземного озона в Европе // Метеорол. и гидрол. 2004. № 10. С. 46–55.
11. Tarasova O.A., Breninkmeijer C.A.M., Joeckel P., Zvyagintsev A.M., Kuznetsov G.I. A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. N 24. P. 6099–6117. www.atmos-chem-phys.net/7/6099/2007/
12. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 3. Содержание озона в тропосфере. Механизмы и факторы, его определяю-

- щие // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 7. С. 600–618.
13. *Monks P.S.* A review of the observations and origins of the spring ozone maximum // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. N 21. P. 3545–3561.
 14. *Маркова Т.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Грисенко А.М., Севастьянов В.В.* Распределение окислов азота в приземном слое атмосферы над континентальными районами России // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2004. Т. 40. № 6. С. 796–808.
 15. *Transboundary air pollution: Acidification, eutrophication and ground-level ozone in UK (NEGTAР 2001)* // Edinburgh: СЕН, 2001. 314 p.
 16. *Ровинский Ф.Я., Егоров В.И.* Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 184 с.
 17. *Feister U., Pedersen U., Schulz E., Hechler S.* Ozone measurements January 1986 – December 1986. Report N 2 // *EMEP/CCC Report 8/90.* 1990. GDR–Norway. 204 p.
 18. *Еланский Н.Ф., Смирнова О.И.* Концентрация озона и окислов азота в приземном воздухе г. Москвы // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 1997. Т. 33. № 5. С. 597–611.
 19. *Zhang J., Rao S.T.* The Role of Vertical Mixing in the Temporal Evolution of Ground-Level Ozone Concentrations // *J. Appl. Meteorol.* 1999. V. 38. P. 1674–1691.
 20. *Parrish D.D., Trainer M., Holloway J.S., Yee J.E., Warshawsky M.S., Fehsenfeld F.C., Forbes G.L., Moody J.L.* Relationships between ozone and carbon monoxide at surface sites in the North Atlantic region // *J. Geophys. Res.* D. 1998. V. 103. N 11. P. 13357–13376.
 21. *Wang Y., McElroy M.B., Munger J.W., Hao J., Mal H., Nielsen C.P., Chen Y.* Variations of O₃ and CO in summertime at a rural site near Beijing // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. N 21. P. 6355–6363. www.atmos-chem-phys.net/8/6355/2008/
 22. *Загрязнение* воздушной среды города Москвы за 2004 год. М.: ГПУ «Мосэкомониторинг», 2005. 32 с.
 23. *Гейгер Р.* Климат приземного слоя воздуха. М.: ИЛ, 1960. 486 с.
 24. *Оке Т.Р.* Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 360 с.
 25. *Pan L.L., Randel W.J., Gary B.L., Mahoney M.J., Hintsа E.J.* Definitions and sharpness of the extratropical tropopause: A trace gas perspective // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. D23103, doi:10.1029/2004JD004982.
 26. *Fischer H., Lawrence M., Gurk Ch., Hoor P., Lelieveld J., Hegglin M.I., Brunner D., Schiller C.* Model simulations and aircraft measurements of vertical, seasonal and latitudinal O₃ and CO distributions over Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. N 2. P. 339–348.
 27. *Звягинцев А.М.* Аномалии приземного озона в Европе // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2004. Т. 40. № 3. С. 387–396.
 28. *Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: Справочное пособие* / Под ред. Э.Ю. Безуглой. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 328 с.
 29. *Звягинцев А.М.* Статистическое прогнозирование концентраций приземного озона в Москве // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 8. С. 49–59.
 30. *Stohl A., Berg T., Burkhardt J.F., Fjaeraа A.M., Forster C., Herber A., Hov O., Lunder C., McMillan W.W., Oltmans S., Shiobara M., Simpson D., Solberg S., Stebel K., Stroem J., Torseth K., Treffeisen R., Virkkunen K., Yttri K.E.* Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. N 2. P. 511–534. www.atmos-chem-phys.net/7/511/2007/

A.M. Zvyagintsev, G. Kakajanova, O.A. Tarasova. **Cycles of surface ozone and other trace gases in urban and rural regions.**

Seasonal and daily cycles of surface ozone and primary pollutants, nitrogen oxides and carbon monoxide in Moscow city for 4 years are considered. Seasonal and daily cycles of all these trace gases show that their concentrations in warm seasons strongly depend on vertical mixing in atmospheric boundary layer. Surface ozone cycles in city and rural areas (at a distance of 100 km) are compared. The main differences of surface ozone concentrations in urban and rural areas, as well as in their seasonal and daily cycles are found. It is shown that relations of surface ozone and primary pollutants in different seasons are mainly due to different atmospheric processes: advection in the cold season and vertical mixing in the warm one. The highest correlation is observed between maximal daily ozone concentration and maximal morning primary pollutant's concentrations. The correlation coefficient between them is usually negative in the cold season and sometimes it is positive in the warm one, when obvious episodes of ozone photochemical generation arise.