

Недельные циклы содержания NO_2 в атмосфере над урбанизированными регионами

С.А. Ситнов, Т.Г. Адикс*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 10.01.2013 г.

По данным наблюдений тропосферного содержания диоксида азота (NO_2) спутниковым прибором OMI проведен анализ изменений NO_2 по дням недели над крупнейшими мировыми городскими и промышленными агломерациями, включая г. Москву. С привлечением теста Крускала–Уоллиса получены оценки статистической значимости внутринедельных различий NO_2 . Над всеми рассматриваемыми территориями содержание NO_2 в тропосфере в рабочие дни выше, чем в выходные дни, при этом размах значимых недельных сигналов существенно различается, варьируя в диапазоне от 14 (Каир, Джакарта) до 64% (Лос-Анджелес). Внутринедельные различия NO_2 над густонаселенными Шанхаем и Дели статистически не значимы и не превышают 7%.

Более подробно исследована недельная цикличность содержания NO_2 в тропосфере над Московской агломерацией. Проведен анализ изменений по дням недели пространственного распределения NO_2 в Московском регионе. Проведено сопоставление недельных сигналов NO_2 в спутниковых и наземных данных, выявлено их согласие. Анализируются изменения суточного хода концентрации NO_2 в приземном воздухе по дням недели в летний и зимний периоды.

Ключевые слова: диоксид азота NO_2 , тропосферное содержание, недельный цикл, мировые агломерации, Московский регион, тест Крускала–Уоллиса, суточный ход, сезонная зависимость; nitrogen dioxide NO_2 , tropospheric NO_2 column, weekly cycle, urban agglomeration, Moscow region, Kruskal–Wallis test, diurnal cycle, seasonal dependence.

Введение

Оксиды азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) являются одними из главных загрязнителей атмосферного воздуха крупных городских и промышленных агломераций. Образываясь в этих районах в основном в процессе сжигания топлива автотранспортом и производственными предприятиями, NO_x играют важную роль в тропосферной фотохимии, являясь предшественниками тропосферного озона и нитратного аэрозоля [1–3]. Поглощение солнечной радиации NO_2 и озоном, а также ее рассеяние аэрозолем оказывают прямое влияние на радиационный баланс атмосферы [4, 5]. Аэрозоль, кроме того, влияет на радиационный баланс посредством изменения альбедо и времени жизни облаков [6, 7].

Для мониторинга регионального тропосферного содержания NO_2 в настоящее время активно используются спутниковые системы [8–20], данные которых позволяют исследовать характерные особенности пространственно-временной эволюции поля тропосферного содержания NO_2 над агломерацией в целом.

Интенсивность жизнедеятельности населения городских и промышленных агломераций обычно следует недельному ритму, обуславливающему максимальную интенсивность антропогенной эмиссии NO_x

в рабочие дни и минимальную в выходные дни, что может приводить к недельной цикличности (НЦ) содержания NO_x в тропосфере. Анализ внутринедельных различий тропосферного содержания NO_2 представляет большой интерес. Помимо фундаментальной задачи исследования отклика тропосферной фотохимической системы на регулярные вариации содержания одной из ключевых атмосферных примесей, а также исследования возможной связи НЦ NO_2 с квазинедельной цикличностью метеорологических параметров [15–17], изучение НЦ NO_2 представляет практическую ценность для уточнения краткосрочного прогноза качества атмосферного воздуха [21, 22]. Косвенные (опосредованные) радиационные эффекты аэрозолей антропогенного происхождения рассматриваются многими авторами как возможная причина НЦ метеорологических параметров [23].

Недельные циклы тропосферного содержания NO_2 по данным спутниковых наблюдений были ранее обнаружены над рядом зарубежных городских агломераций [8, 11], а также Санкт-Петербургом [12] и Москвой [14]. Обзор современного состояния исследований недельной цикличности атмосферных параметров, включая метеорологические величины, атмосферные газовые примеси и аэрозоль, можно найти в [23].

Мы представляем результаты диагностики недельных сигналов тропосферного содержания NO_2 над 15 крупнейшими мировыми городскими и промышленными агломерациями, включая Московскую,

* Сергей Африканович Ситнов (sitnov@ifaran.ru); Татьяна Георгиевна Адикс (taadix@yandex.ru).

и анализ статистической значимости внутринедельных различий NO₂ над рассматриваемыми территориями. С привлечением данных наземных наблюдений более детально исследуются особенности проявления НЦ NO₂ в воздушном бассейне Московского региона.

Представленные материалы дополняют результаты работ [14–20] по исследованию НЦ атмосферных параметров, опубликованных нами ранее: наличие НЦ тропосферного содержания NO₂ над Москвой впервые было выявлено в работе [14] и более подробно исследовано в [16]; в работах [15, 17] была обнаружена ранее не документированная НЦ метеорологических параметров в тропосфере [15–18] и в стратосфере [19, 20] над Центральной Россией (в частности, над Московским регионом), а в [17, 18] – НЦ оптической толщи аэрозоля.

База данных и их источники

Использовались обработанные по стандартному алгоритму, полученные в чистых условиях (суммарная площадь облаков в пикселе не превышает 30%) данные наблюдений тропосферного содержания NO₂ спутниковым прибором Ozone Monitoring Instrument (OMI, ColumnAmountNO₂trop, L2G V003) [24] в 2004–2009 гг. Координаты пространственных областей, занимаемых промышленно-городскими агломерациями, рассматриваемыми в настоящей статье, представлены в таблице.

Расчет временных рядов NO₂ над указанными территориями проведен с помощью системы удаленного доступа Giovanni (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), разработанной и обслуживаемой NASA GES DISC [26].

Крупнейшие мировые агломерации*

Агломерация	Население, млн чел. **	Область сбора спутниковых данных		Многолетние		День, max	min	День, min	p-value
				max	min				
Токио	34,7	35–36,2° с.ш.	139–140,2° в.д.	$\frac{11,7}{10,4}$	$\frac{13,5}{13,2}$	чт	$\frac{7,0}{6,6}$	вс	0***
Джакарта	23,3	5,9–7,7° ю.ш.	106–108° в.д.	$\frac{1,7}{1,6}$	$\frac{1,8}{1,7}$	ср	$\frac{1,5}{1,5}$	вс	0,0004
Нью-Йорк	21,3	39,5–41,5° с.ш.	73–75,7° з.д.	$\frac{7,9}{7,3}$	$\frac{9,2}{8,8}$	чт ср	$\frac{5,2}{4,7}$	вс	0
Дели	19,8	28–29,5° с.ш.	76–78° в.д.	$\frac{3,8}{3,7}$	$\frac{3,9}{3,8}$	вт	$\frac{3,7}{3,6}$	вс ср	0,67
Сан-Паулу	19,5	23–24° юш.	46–47° з.д.	$\frac{4,0}{3,6}$	$\frac{4,5}{4,3}$	пт	$\frac{2,6}{2,5}$	вс	0
Мехико	18,6	19–20° с.ш.	98–100° з.д.	$\frac{2,7}{2,4}$	$\frac{3,0}{2,7}$	пт	$\frac{2,2}{2,0}$	вс	$8,2 \cdot 10^{-6}$
Каир	17,0	29–31,7° с.ш.	31,2–32,2° в.д.	$\frac{2,9}{2,9}$	$\frac{3,1}{3,1}$	ср	$\frac{2,7}{2,6}$	пт	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Лос-Анджелес	14,9	33,6–34,4° с.ш.	117,7–118,7° з.д.	$\frac{13,1}{12,1}$	$\frac{15,7}{15,1}$	чт	$\frac{7,4}{6,6}$	вс	0
Шанхай	14,7	30–32° с.ш.	120–122° в.д.	$\frac{13,6}{12,6}$	$\frac{14,1}{13,1}$	чт вт	$\frac{13,1}{12,3}$	вс	0,72
Москва	13,7	55,5–55,9° с.ш.	37,4–37,9° в.д.	$\frac{10,4}{8,7}$	$\frac{12,0}{11,0}$	пт	$\frac{8,3}{7,0}$	вс	0,0002
Париж	10,5	48,7–49,1° с.ш.	2,1–2,6° в.д.	$\frac{8,5}{7,6}$	$\frac{10,4}{9,1}$	пт вт	$\frac{5,8}{5,4}$	вс	0
Лондон	8,6	51,2–51,7° с.ш.	0,5° з.д.– 0,3° в.д.	$\frac{9,4}{8,4}$	$\frac{10,5}{9,6}$	вт	$\frac{7,1}{6,6}$	вс	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Израиль	7,5	34,5–35,5° с.ш.	31–33,2° в.д.	$\frac{3,9}{3,8}$	$\frac{4,4}{4,3}$	чт	$\frac{3,0}{2,9}$	сб	0
Рур	7,3	50,7–51,8° с.ш.	6,8–7,8° в.д.	$\frac{11,1}{10,0}$	$\frac{13,0}{11,9}$	пт	$\frac{7,2}{7,1}$	вс	0
Берлин	3,7	52,3–52,7° с.ш.	13,1–13,8° в.д.	$\frac{5,2}{4,8}$	$\frac{6,0}{5,9}$	пт	$\frac{4,1}{3,9}$	вс	$1,2 \cdot 10^{-8}$

* Результаты применения теста Крускала–Уоллиса (*p*-value) к выборкам наблюдений NO₂, представляющим отдельные дни недели (жирным шрифтом выделены статистически не значимые различия); средние (цифры над чертой) и медианные (под чертой) – многолетние значения NO₂ и внутринедельные экстремумы соответствующих статистик (10¹⁵ молек./см²).

** www.demographia.com (2009).

*** Точность расчетов MATLAB.

Для более детального исследования НЦ NO₂ над Москвой дополнительно привлекались ежедневные пространственные распределения тропосферного содержания NO₂, полученные прибором OMI над Московским регионом, а также данные наблюдений приземной концентрации NO₂ на постах Балчуг, Бирюлево и Народное Ополчение ГПБУ «Мосэкомониторинг» (www.mosecom.ru) в период 2004–2007 гг.

Результаты и их обсуждение

Анализ статистической значимости внутринедельных различий NO₂

Необходимым условием существования недельного сигнала NO₂ является наличие статистически значимых внутринедельных различий NO₂. Для соответствующей проверки данные NO₂ были разбиты по дням недели на 7 групп и подвергнуты тесту Крускала–Уоллиса (КУ) [25]. Выбор данного теста объясняется отличием распределений NO₂ от нормальных. Из таблицы видно, что над всеми агломерациями (за исключением Каира) средние значения NO₂ больше соответствующих медианных значений, при этом распределение величин тропосферного содержания NO₂ над Москвой характеризуется наибольшей положительной асимметрией. Непараметрический (ранговый) тест КУ не предполагает нормальность распределений. Он сравнивает медианы выборочных данных для вышеупомянутых 7 групп и возвращает величину вероятности (*p*-value, далее просто *p*) нулевой гипотезы *H*₀, предполагающей, что все анализируемые выборки получены из одной генеральной совокупности. Если вероятность нулевой гипотезы мала (*p* ≤ 0,05), то считается, что по крайней мере одно медианное значение существенно отличается от других. Результаты применения теста КУ к данным NO₂ представлены в последнем столбце таблицы. Над всеми рассмотренными агломерациями, кроме Шанхая и Дели, отмечаются статистически значимые внутринедельные различия тропосферного содержания NO₂ (см. таблицу).

Недельные циклы тропосферного содержания NO₂ над крупнейшими мировыми агломерациями

На рис. 1 представлены ящичковые диаграммы величин NO₂, наблюдавшихся в дни с понедельника по воскресенье над 15 агломерациями.

Как и тест КУ, ящичковые диаграммы также основаны на медианном представлении. Средняя горизонтальная черта представляет собой собственно медиану распределения, а нижняя и верхняя границы «ящичка» — его нижний и верхний квартили (таким образом 50% наблюдений содержатся внутри межквартильного интервала). Представленные диаграммы позволяют непосредственно сравнивать основные характеристики распределений величин NO₂, наблюдающихся в разные дни недели. Рис. 1 свидетельствует, что НЦ NO₂ проявляются на фоне весьма значительной изменчивости NO₂. Максималь-

ный межквартильный интервал, характеризующий разброс значений NO₂ (аналог дисперсии нормального распределения), отмечается в пятницу в Москве. В таблице для каждой агломерации приведены внутринедельные максимумы и минимумы, а также дни их достижения, рассчитанные по средним и медианным значениям NO₂. Недельные сигналы NO₂ над различными агломерациями существенно различаются амплитудами, а над некоторыми из них также и фазами. Над большинством урбанизированных территорий недельные минимумы NO₂ отмечаются в воскресенье. Исключением являются Каир и Израиль, где минимумы NO₂ приходятся соответственно на пятницу и субботу, что отражает религиозные нормы и культурные традиции населения, проживающего на этих территориях. Недельные максимумы NO₂ над всеми агломерациями наблюдаются со вторника по пятницу.

Было также исследовано, в какие дни содержание NO₂ обнаруживает различия, значимые на уровне $\alpha = 0,05$, относительно недельного минимума (кружки на медианном значении на рис. 1). Проведенный анализ показал, в частности, что в Москве содержание NO₂ в понедельник, среду и субботу статистически незначимо отличается от содержания NO₂ в воскресенье. Незначимость отличий данных понедельника и субботы отчасти можно объяснить переносами рабочих и выходных дней. В период 2004–2007 гг. 11% понедельников были не рабочими, тогда как 3% суббот были, напротив, рабочими днями. Особенностью данных среды является большое количество экстремальных значений содержания NO₂ (см. символы «+» на рис. 1), при некотором уменьшении его медианного значения в этот день.

Над Шанхаем и Дели содержание NO₂ в тропосфере довольно слабо меняется в течение недели. Отсутствие НЦ NO₂ над Восточным побережьем Китая было отмечено ранее в работе [8], авторы которой предположили, что уровень NO₂ в этом регионе определяется в основном выбросами мощных промышленных предприятий с непрерывным циклом работы. Отсутствие НЦ NO₂ в Дели (не рассмотренном в [8]) может объясняться экономической политикой индийского правительства, обязывающего предприятия иметь выходные дни в разные дни недели для выравнивания энергопотребления.

На рис. 2 показаны среднее содержание NO₂ в тропосфере над различными агломерациями и соответствующие амплитуды НЦ NO₂ (в % к среднему). Из расчетов следует, что максимальный размах НЦ NO₂ приходится на Лос-Анджелес и достигает 64%. Несмотря на то что среднее содержание NO₂ в Шанхае выше, чем в Лос-Анджелесе, размах НЦ NO₂ в Шанхае не превышает 7%. Тем не менее при рассмотрении агломераций, характеризующихся лишь значимыми внутринедельными различиями NO₂, обнаруживается заметная положительная корреляция (*R* = 0,77) между размахом недельного цикла NO₂ и средним содержанием NO₂.

Поскольку интенсивность выбросов NO₂ за счет автотранспорта более четко следует недельному ритму, чем выбросы других антропогенных источников,

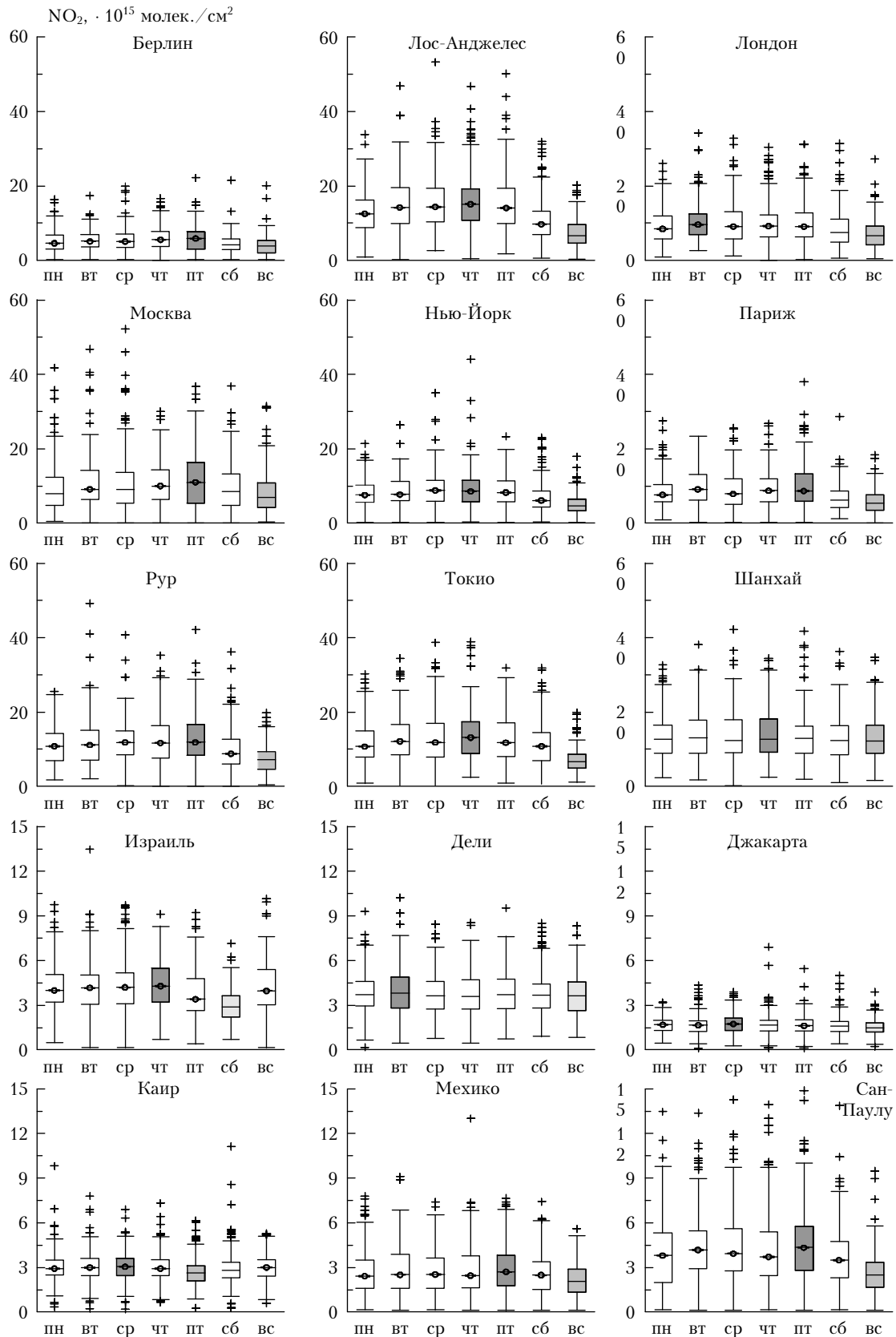


Рис. 1. Ящичковые диаграммы тропосферного содержания NO_2 над территориями 15 крупнейших мировых городских и промышленных агломераций. На каждой из диаграмм темной и светлой заливкой показаны дни недельного максимума и минимума соответственно. Символами «o» отмечены дни, в которые медианные значения NO_2 статистически значимо ($\alpha = 0,05$) отличаются от соответствующего недельного минимума NO_2 ; символами «+» показаны выбросы

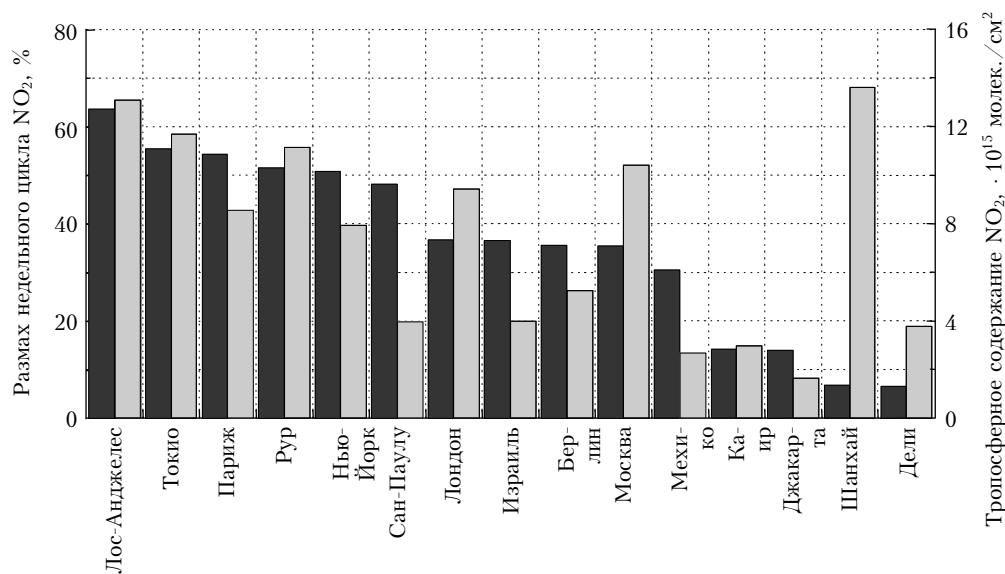


Рис. 2. Размах недельного цикла NO₂ (в процентах к локальному среднегодовому содержанию) над крупнейшими мировыми городскими и промышленными агломерациями (темная заливка, шкала слева); среднегодовое содержание NO₂ в тропосфере над рассматриваемыми территориями (светлая заливка, шкала справа)

обнаруженная положительная корреляция между размахом недельного сигнала NO₂ и его средним содержанием свидетельствует о преобладающем влиянии автотранспорта на загрязнение воздуха этих агломераций диоксидом азота.

Сравнение амплитуд НЦ и среднего содержания NO₂ над европейскими агломерациями свидетельствует о том, что в Париже и Берлине уровень загрязнения воздуха NO₂ в большей степени формируется за счет выбросов автотранспорта в отличие от Москвы, Лондона и Рурской области, где выше доля промышленных источников.

Московский мегаполис

Москва является крупнейшим мегаполисом Европы. Уровень загрязнения воздуха диоксидом азота превышает соответствующий уровень загрязнения крупнейших европейских столиц и сопоставим с уровнем загрязнения воздуха Рурской области (таблица) и долины р. По (не показано). Размах недельного цикла тропосферного содержания NO₂ над территорией, представляющей Москву, составляет примерно 35%. В пределах Московской кольцевой автодороги (МКАД) Москва является относительно компактной агломерацией (30 × 40 км), окруженной лесопарковой зоной, значительно более благополучной в экологическом отношении, чем город. Тем не менее влияние мегаполиса ощущается во всем столичном регионе и даже за его пределами [16]. Спутниковые наблюдения позволяют изучить эволюцию пространственной картины регионального загрязнения воздуха NO₂ в течение недели.

Пространственное распределение NO₂ в Московском регионе

На рис. 3, а (цв. вклейка) приведено пространственное распределение среднего многолетнего со-

держания NO₂ в тропосфере Московского региона. Максимальные среднегодовые значения содержания NO₂, достигающие $8,1 \cdot 10^{15}$ молек./см², отмечаются над районами мегаполиса, примыкающими к МКАД с востока, а наиболее чистой частью региона является его северо-западная часть, граничащая с Тверской областью. Шлейф загрязнений отличается заметной асимметрией и вытянут в юго-восточном направлении. Особенности пространственного распределения NO₂ могут быть связаны с преимущественным расположением предприятий производственного комплекса Москвы на востоке-юго-востоке столицы, преобладанием западного переноса и орографией местности.

На рис. 3, б показан рельеф Московского региона (данные Google Earth с дискретизацией 0,05 и 0,1° по широте и долготе (соответственно) и последующим их сглаживанием гауссовым матричным фильтром 3 × 3). Видно, что с севера, запада и юга Москва окружена возвышенностями, тогда как к востоку и юго-востоку от мегаполиса, где располагается Мещерская низменность, рельеф заметно понижается. Сопоставление рис. 3, а и 3, б показывает, что шлейф загрязнения NO₂ от Московского мегаполиса ориентирован в юго-восточном направлении, вдоль долины Москвы-реки, т.е. в сторону понижения рельефа местности. В этом направлении шлейф загрязнений простирается далеко за пределы Московской области. Отмеченные особенности свидетельствуют о влиянии рельефа местности на пространственное распределение NO₂.

Изменение пространственного распределения NO₂ в течение недели

На рис. 3, в, г приведены распределения тропосферного содержания NO₂ в Московском регионе соответственно во вторник и в воскресенье (жирными

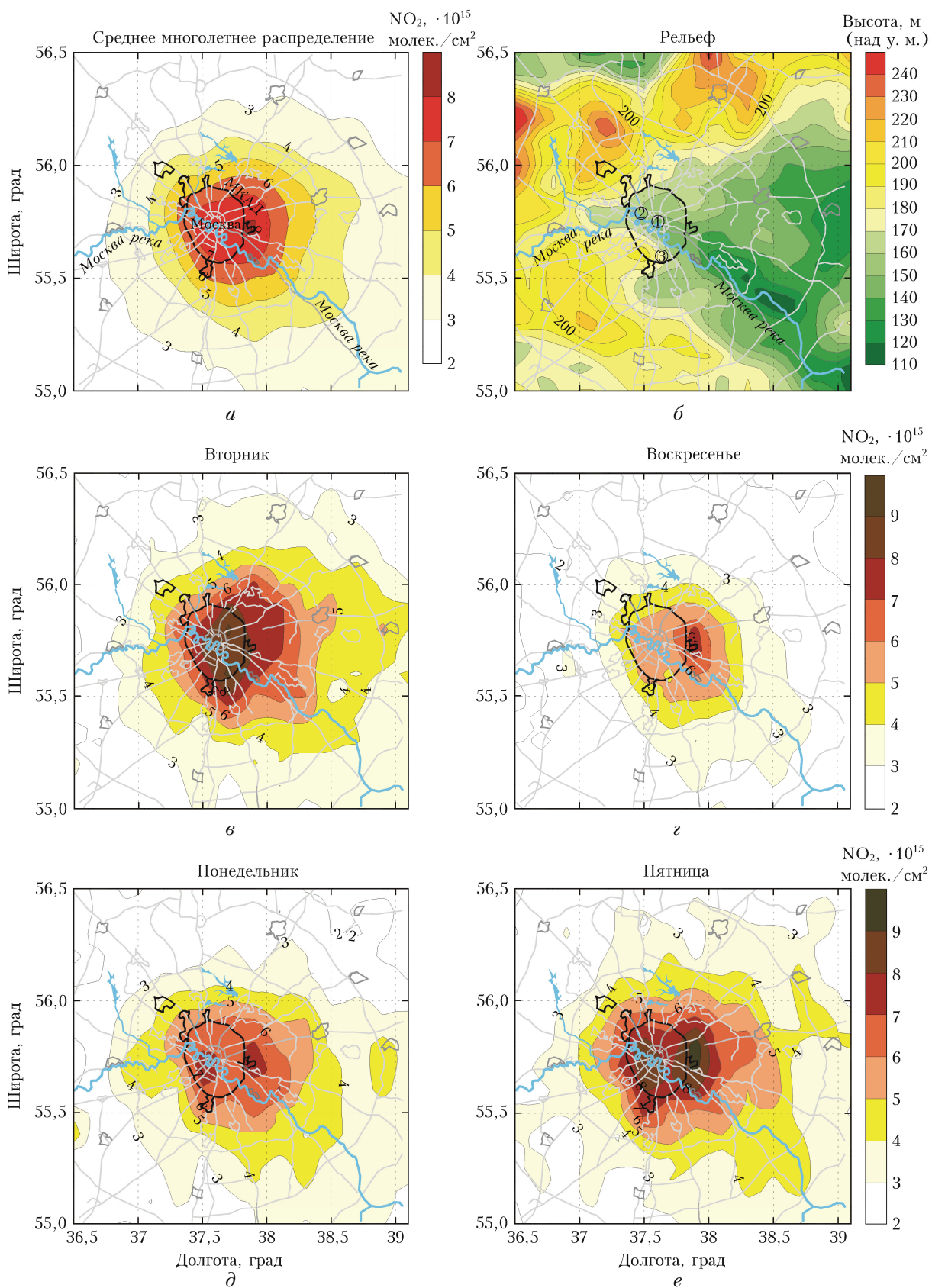


Рис. 3. Среднее многолетнее распределение NO₂ в тропосфере Московского региона (а); рельеф Московского региона (б), цифрами показаны положения постов ГПБУ «Мосэкомониторинг»: Балзуг (1), Народное Ополчение (2) и Бирюлево (3); пространственное распределение NO₂ во вторник (в), в воскресенье (г), в фазе максимального роста (д), в фазе максимального убывания (е)

черными линиями показаны контуры Москвы). В оба дня распределения характеризуются локальными максимумами. Во вторник максимум NO_2 отмечается внутри МКАД и в 1,4 раза превышает воскресный максимум, центрированный за МКАД (р-н Косино). Область высоких загрязнений ($\text{NO}_2 > 5 \cdot 10^{15}$ молек./см²) в будний день ориентирована в восточно-северо-восточном направлении, что объясняется дополнительной (к эмиссии мегаполиса) эмиссией NO_2 с территории наиболее урбанизированной восточной части Подмосковья, при этом область слабого загрязнения ($\text{NO}_2 < 3 \cdot 10^{15}$ молек./см²) ориентирована в юго-восточном направлении – в сторону понижения рельефа местности. В воскресенье, при уменьшении антропогенных выбросов от местных источников, распределение NO_2 ориентировано вдоль русла Москвы-реки, т.е. в целом отражает особенности рельефа. В понедельник и пятницу, в фазах максимального роста и убыли NO_2 в течение недели (рис. 3, *д* и *е* соответственно), в пространственном распределении NO_2 появляется второй локальный максимум, сдвинутый к юго-западу от центра мегаполиса. Отмеченные

особенности пространственного распределения тропосферного содержания NO_2 в Московском регионе, полученные по данным спутникового прибора OMI, согласуются с результатами наблюдений NO_2 , полученными экспедицией TROICA-10 при объезде вокруг Москвы по Московской кольцевой железной дороге [27].

Недельные циклы среднесуточных приземных концентраций NO_2 в Москве

Недельная цикличность концентраций NO_2 в приземном слое атмосферы Московского мегаполиса ранее была выявлена в [22] при анализе данных наблюдений NO_2 на нескольких постах ГПБУ «Мосэкомониторинг» в 2005 г. На рис. 4 представлены результаты анализа ИЦ среднесуточных значений приземных концентраций NO_2 на постах Балчуг, Бирюлево и Народное Ополчение в 2004–2007 гг. (положение пунктов наблюдений показано на рис. 3, *б*).

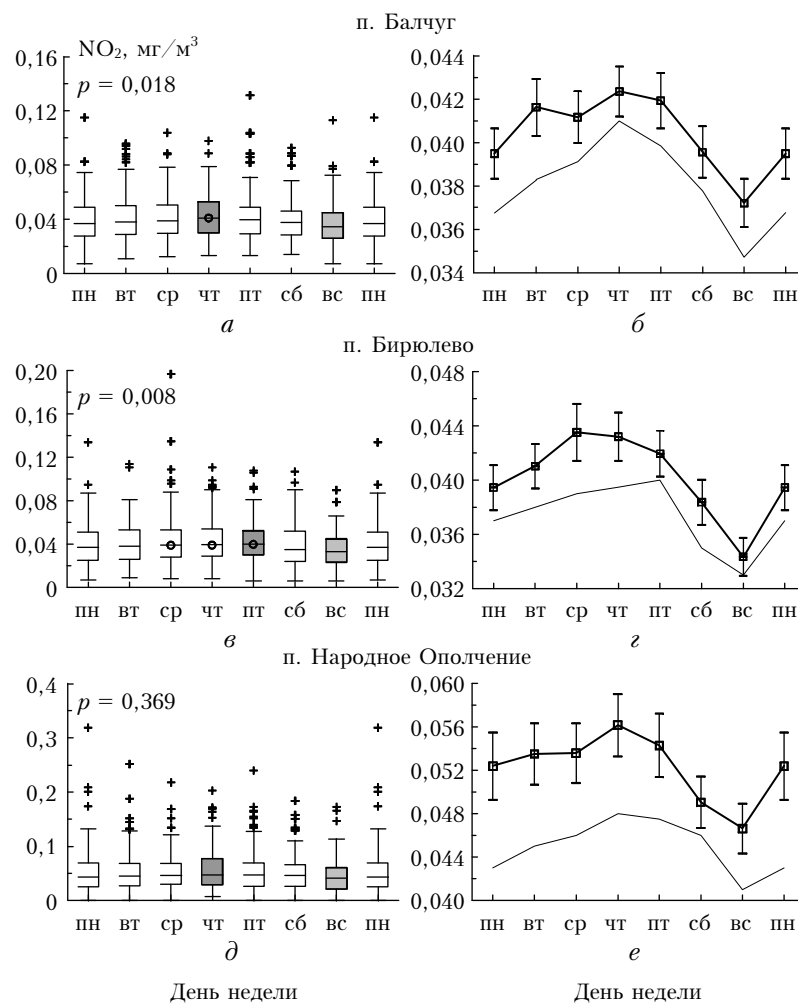


Рис. 4. Ящичковые диаграммы приземной концентрации NO_2 , p – результаты теста Крускала–Уоллиса (остальное как на рис. 1) (ряд слева). Изменения в ходе недели средних значений NO_2 (жирная линия с символами, вертикальными отрезками показано \pm среднее квадратическое отклонение средних) и медианных значений NO_2 (тонкая линия): *a*, *б* – Балчуг, *в*, *г* – Бирюлево, *д*, *е* – Народное Ополчение (ряд справа)

Из рис. 4, а, в, д видно, что во всех трех пунктах недельные минимумы NO_2 отмечаются в воскресенье, а максимумы в будние дни (четверг и пятницу).

Результаты применения теста КУ свидетельствуют о статистической значимости внутринедельных различий приземной концентрации NO_2 в пунктах Балчуг и Бирюлево. В Бирюлево днями, в которые средние ранги данных NO_2 статистически значимо отличаются от среднего ранга данных NO_2 в воскресенье, являются среда, четверг и пятница, а в п. Балчуг единственные дни, обнаруживающие статистически значимые различия NO_2 , – воскресенье и четверг. Внутринедельные различия NO_2 в п. Народное Ополчение статистически не значимы (на уровне значимости $\alpha = 0,05$). Отсутствие статистически значимых недельных сигналов в вариациях приземного содержания NO_2 вблизи г. Звенигорода (запад Подмосковья) отмечалось в [28].

Недельные циклы NO_2 трудноразличимы на фоне значительной изменчивости концентраций NO_2 в приземном слое атмосферы (на рис. 4, а, в, д). Рис. 4, б, з, е более детально представляет изменения средних и медианных значений NO_2 в ходе недели. Хорошо видно, что для всех дней недели разброс данных пункта Народное Ополчение больше разброса данных в двух других пунктах. Анализ представленных данных свидетельствует также, что медианные значения NO_2 на 5–15% (в среднем на 9%) ниже соответствующих средних значений NO_2 .

Изменение суточного хода NO_2 в течение недели

Важным аспектом исследований недельной цикличности NO_2 является анализ изменений суточного хода NO_2 по дням недели. Внутрисуточная эмиссия оксидов азота, фотохимическая трансформация NO_x и процессы рассеивания загрязнений воздуха являются основой для формирования НЦ NO_2 . Все отмеченные факторы зависят от сезона. На рис. 5 (цв. вклейка) величины концентраций NO_2 представлены в зависимости от времени суток (ось абсцисс) и дней недели (ось ординат) отдельно для летнего и зимнего периодов.

Из зимних данных исключены предновогодние дни, а также дни новогодних и рождественских каникул, когда недельный цикл антропогенной эмиссии NO_2 нарушается. Анализ рис. 5 свидетельствует, что, несмотря на значительные количественные различия среднесуточных величин NO_2 (и их разнонаправленные изменения в зависимости от сезона в разных пунктах), внутрисуточные изменения NO_2 во всех трех пунктах обнаруживают определенное сходство.

Летом (рис. 5, а, в, д) в будние дни в суточном ходе наблюдаются два максимума: утренний – более слабый, практически совпадающий с утренним часом пик, и вечерне-ночной – более сильный, сдвинутый от вечернего часа пик к полуночи, т.е. примерно на 3–4 ч. Дневной минимум NO_2 обусловлен интенсификацией процессов рассеивания загрязнений воз-

духа летом в дневной период. В воскресенье утренние максимумы практически отсутствуют. В пунктах Бирюлево и Народное Ополчение в любое время суток концентрация NO_2 в будние дни выше, чем в воскресенье. Более сложная картина наблюдается в п. Балчуг. В этом пункте в начале воскресных суток ночные концентрации NO_2 заметно превышают ночные концентрации NO_2 в будние дни. Данный факт отражает интенсификацию ночной жизни центра Москвы в ночь с субботы на воскресенье.

Зимой (рис. 5, б, з, е) внутрисуточные изменения NO_2 в будние и выходные дни во всех пунктах характеризуются качественным подобием, хотя средний уровень концентрации NO_2 в пунктах Бирюлево и Народное Ополчение существенно выше, чем в п. Балчуг, так же как и сами внутрисуточные изменения NO_2 в этих двух пунктах гораздо заметнее, чем в п. Балчуг. Минимумы NO_2 в суточном ходе отмечаются утром, а довольно широкие максимумы разной продолжительности по времени в разных пунктах начинаются днем и продолжаются до вечера. Такой суточный ход обусловлен преобладанием зимой устойчивых состояний атмосферы в течение всего дня, в отличие от лета. Из рис. 5, б, з следует, что в пунктах Балчуг и Бирюлево в любое время суток концентрация NO_2 в будние дни выше, чем в воскресенье. В целом, представленные суточные вариации NO_2 согласуются с результатами работ [29, 30], в которых исследовалась, в частности, сезонная изменчивость суточных ходов NO_2 в Москве, но без разделения данных по отдельным дням недели.

Сравнение недельных циклов в спутниковых и наземных данных NO_2

С учетом доминирования низких источников загрязнений и короткого времени жизни NO_2 в нижней тропосфере восстановленное по данным прибора ОМІ тропосферное содержание NO_2 отражает усредненное содержание NO_2 в пограничном слое атмосферы. Представляет интерес сравнить недельные вариации тропосферного содержания NO_2 над Москвой, полученные по данным ОМІ, и недельные циклы средненедельной (12:00–17:00) приземной концентрации NO_2 в Москве (наблюдения ОМІ относятся к дневному периоду). Результаты сравнения наземных и спутниковых данных представлены на рис. 6 и свидетельствуют об удовлетворительном согласии недельных сигналов в локальных и в интегральных характеристиках NO_2 (для удобства приведены процентные отклонения величин NO_2 от соответствующих средненедельных значений).

Следует отметить, что многолетние недельные сигналы приземной концентрации NO_2 , диагностированные на станциях, расположенных в разных московских районах, характеризуются очевидным сходством. Этот факт говорит о том, что именно автотранспорт является доминирующей причиной НЦ приземной концентрации NO_2 в этих пунктах, поскольку, в отличие от стационарных источников

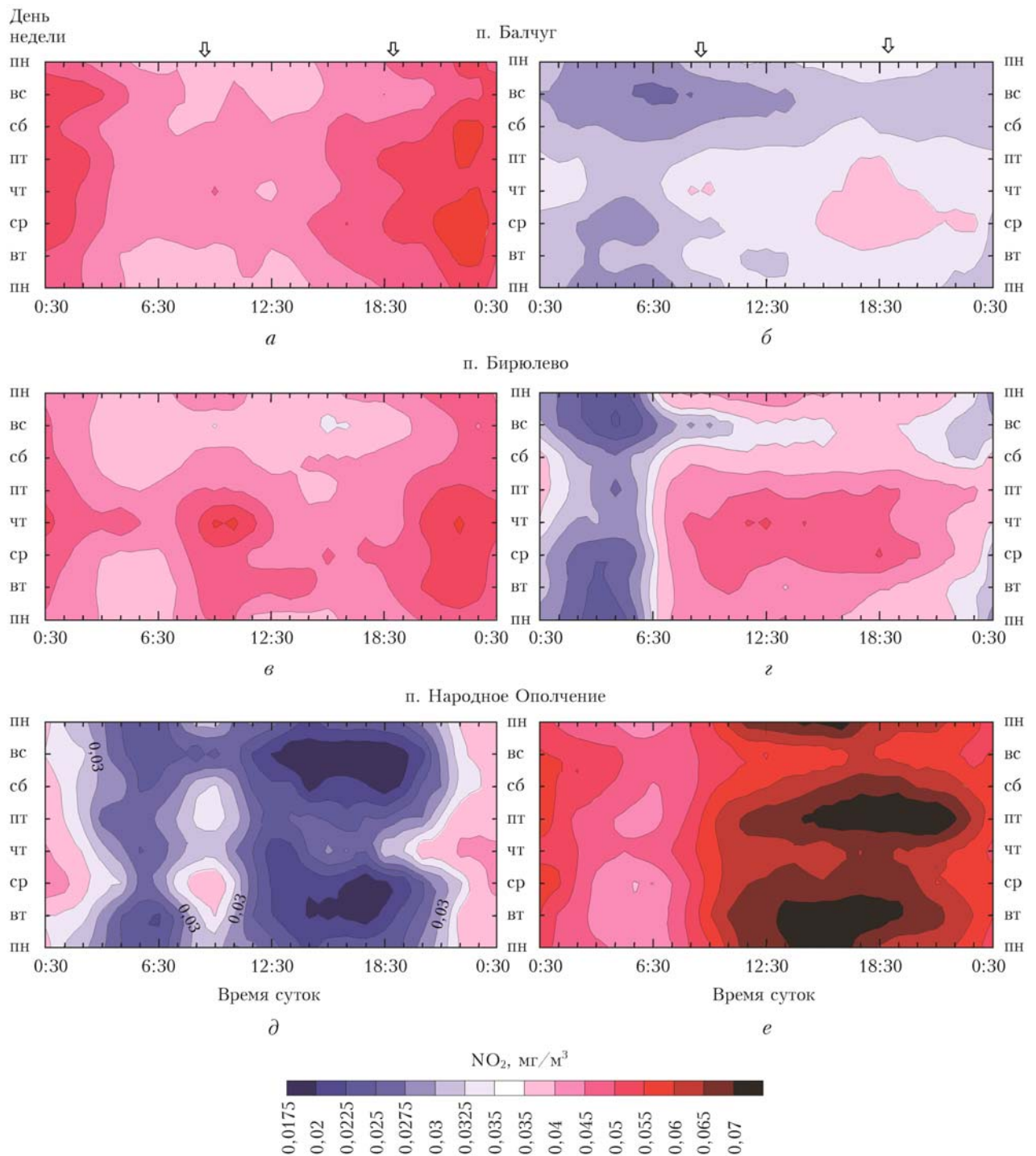


Рис. 5. Зависимость приземной концентрации NO₂ от времени суток и дня недели в пунктах Балчуг (а, б), Бирюлево (в, г) и Народное Ополчение (д, е) в периоды с 1 июня по 31 июля (а, в, д) и 20 ноября – 15 февраля (б, г, е) (период 21 декабря – 14 января исключен). Стрелки – утренний и вечерний часы пик

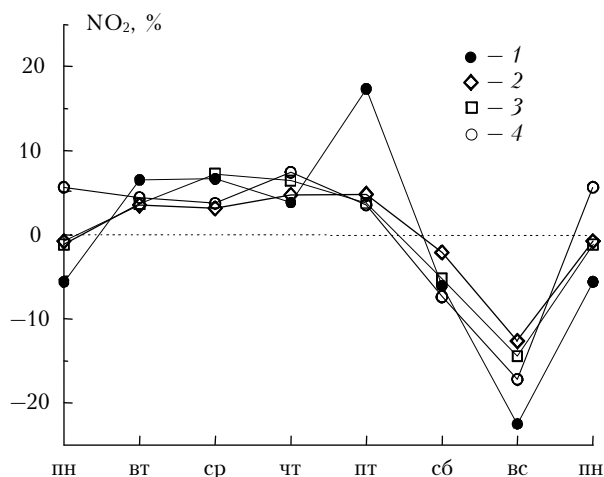


Рис. 6. Процентные отклонения тропосферного содержания NO₂ от средненедельного значения (1), рассчитанные по данным ОМИ; то же, но для приземных концентраций NO₂ в пунктах Балчуг (2), Бирюлево (3) и Народное Ополчение (4)

атмосферных загрязнений, мобильные источники NO₂ имеют более четкий недельный цикл.

Заключение

Анализ данных наблюдений тропосферного содержания NO₂ спутниковым прибором ОМИ над крупнейшими мировыми городскими и промышленными агломерациями мира показывает, что над большинством из них минимальные значения NO₂ в ходе недели отмечаются в воскресенье. Исключением являются территории Большого Каира и Израиля, где недельные минимумы отмечаются в пятницу и субботу соответственно. Над 13 (из 15) агломерациями различия NO₂ по дням недели являются статистически значимыми в соответствии с результатами теста КУ. Размах недельных сигналов, характеризующихся значимыми внутринедельными различиями, меняется от 14 (Джакарта, Каир) до 65% (Лос-Анджелес). Над такими территориями отмечается положительная корреляция размаха НЦ NO₂ с его средним содержанием. Полученные результаты свидетельствуют, что основным источником загрязнения воздушных бассейнов большинства агломераций диоксидом азота является автотранспорт.

Характерной особенностью Московского мегаполиса является сильная изменчивость тропосферного содержания NO₂. Пятница в Москве характеризуется максимальным разбросом данных NO₂ среди всех рассмотренных урбанизированных территорий. Размах НЦ над Москвой составляет около 35%.

На примере Москвы изучены изменения пространственного распределения NO₂ над городской агломерацией в ходе недели. Установлено, что основным источником регионального загрязнения воздуха NO₂ является Московский мегаполис, влияние которого максимально в юго-восточном направлении и распространяется на расстояние до 350–400 км. По данным многолетних наблюдений максимальный

уровень загрязнения воздуха NO₂ отмечается над восточным пригородом Москвы (р-н Косино) и достигает $8,1 \cdot 10^{15}$ молек./см². Выявлены существенные изменения в ходе недели пространственного распределения над Московским регионом, проявляющиеся в увеличении в 1,4 раза уровня максимального содержания NO₂ и значительном расширении ареала загрязнения в середине рабочей недели по сравнению с воскресным днем.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии рельефа местности на пространственное распределение тропосферного содержания NO₂. Это влияние более заметно проявляется в воскресный день в связи с уменьшением антропогенных выбросов NO₂.

Анализ среднесуточных приземных концентраций NO₂ на трех постах ГПБУ «Мосэкомониторинг» (Балчуг, Бирюлево и Народное Ополчение) в 2004–2007 гг. подтвердил наличие эффекта выходного дня в приземном содержании NO₂ в Москве — во всех трех пунктах минимальные концентрации отмечались в воскресенье. Применение теста КУ к представляющим разные дни недели выборкам наблюдений NO₂ выявило статистическую значимость внутринедельных различий концентраций в пунктах Балчуг и Бирюлево. Отсутствие значимых различий в п. Народное Ополчение может быть обусловлено большим разбросом внутрисуточных значений NO₂ в данном пункте.

Приведенный нами анализ изменений суточного хода концентрации NO₂ в приземном воздухе по дням недели в летний и зимний периоды позволил более детально проследить трансформацию суточного хода NO₂ в течение недели. Выявлено, что летом в п. Балчуг концентрации NO₂ в воздухе в ночь с субботы на воскресенье превышают ночные концентрации NO₂ в будние дни. Данный факт объясняется, по-видимому, интенсификацией ночной жизни центра Москвы в летний сезон.

Проведено сопоставление многолетних НЦ NO₂ в тропосферном содержании NO₂ по данным спутниковых наблюдений и в приземных концентрациях NO₂. Выявлено удовлетворительное согласие недельных сигналов в интегральном и локальном содержании NO₂.

Авторы благодарны разработчикам прибора и алгоритма ОМИ за свободный доступ к информации. Данные по тропосферному содержанию NO₂ прибора ОМИ получены через систему удаленного доступа Giovanni, разработанную NASA GES DISC (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>). Авторы благодарят ГПБУ «Мосэкомониторинг» за предоставленные данные наблюдений приземных концентраций NO₂.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-05-00704.

1. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
2. Адикс Т.Г. Сульфатный и нитратный аэрозоль в атмосфере Москвы. Влияние параметров атмосферного пограничного слоя // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2001. Т. 37, № 1. С. 98–104.

3. *Bauer S.E., Koch D., Unger N., Metzger S.M., Shindell D.T., Streets D.G.* Nitrate aerosols today and in 2030: a global simulation including aerosols and tropospheric ozone // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 19. P. 5043–5059.
4. *Vasilkov A.P., Joiner J., Oreopoulos L., Gleason J.F., Veefkind P., Bucsela E., Celarier E.A., Spurr R.J.D., Platnick S.* Impact of tropospheric nitrogen dioxide on the regional radiation budget // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 17. P. 6389–6400.
5. *Martin S.T., Hung H.M., Park R.J., Jacob D.J., Spurr R.J.D., Chance K.V., Chin M.* Effects of the physical state of tropospheric ammonium-sulfate-nitrate particles on global aerosol direct radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 1. P. 183–214.
6. *Lohmann U., Feichter J.* Global indirect aerosol effects: a review // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5, N 3. P. 715–737.
7. *IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. S. Solomon, B. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. New York; Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
8. *Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T.* Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3, N 6. P. 2225–2232.
9. *Richter A., Burrows J.P., Nüß H., Granier C., Niemeier U.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space // *Nature (Gr. Brit.)*. 2005. V. 437, N 7055. P. 129–132.
10. *Van der A.R.J., Eskes H.J., Boersma K.F., van Noije T.P.C., van Rosental M., De Smedt I., Peters D.H.M.U., Meijer E.W.* Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D04302. doi: 10.1029/2007JD009021.
11. *Boersma K.F., Jacob D.J., Trainic M., Rudich Y., De Smedt I., Dirksen R., Eskes H.J.* Validation of urban NO₂ concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from space (SCIAMACHY and OMI sensors) using in situ measurements in Israeli cities // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 12. P. 3867–3879.
12. *Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Региональный космический мониторинг содержания двуокиси азота в тропосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2009. Т. 45, № 4. С. 467–476.
13. *Тронин А.А., Крицук С.Г., Латышов И.Ш.* Диоксид азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2009. Т. 2, № 6. С. 217–223.
14. *Ситнов С.А.* Анализ пространственно-временной изменчивости тропосферного содержания NO₂ над Московским мегаполисом // *Докл. РАН.* 2009. Т. 429, № 4. С. 534–540.
15. *Ситнов С.А.* Недельная цикличность метеорологических параметров над Московским регионом // *Докл. РАН.* 2010. Т. 431, № 5. С. 685–691.
16. *Ситнов С.А.* Анализ спутниковых наблюдений тропосферного содержания NO₂ над Московским регионом // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 2. С. 184–203.
17. *Ситнов С.А.* Недельная изменчивость температуры и количества осадков в Москве: связь с недельной цикличностью загрязнений и синоптической изменчивостью // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 4. С. 484–495.
18. *Ситнов С.А.* Пространственно-временная изменчивость оптической толщи аэрозоля над центральной частью Европейской территории России по данным спутниковых приборов MODIS // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 5. С. 634–652.
19. *Sitnov S.A.* Weekly variability in atmospheric tracers and meteorological parameters over Central Russia // *Proc. EGU General Assembly 2011.* Online Publ. http://presentations.copernicus.org/EGU2011-172_presentation.ppt
20. *Ситнов С.А.* Оптическая толщина аэрозоля и общее содержание оксида углерода над Европейской территорией России в период массовых пожаров лета 2010 г.: взаимосвязь изменчивости загрязнений и метеорологических величин // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2011. Т. 47, № 6. С. 774–789.
21. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Аношин Б.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б.* Статистический прогноз загрязнения городской атмосферы. 1. Статистические закономерности межсуточной изменчивости концентрации угарного газа и оксидов азота // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 3. С. 211–217.
22. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Колесникова А.Б., Байкова Е.С., Задорожная О.С.* Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентрации примесей // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 9. С. 784–792.
23. *Sanchez-Lorenzo A., Laux P., Hendricks Franssen H.-J., Calbo J., Vogl S., Georgoulias A.K., Quass J.* Assessing large-scale weekly cycles in meteorological variables: a review // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 13. P. 5755–5771.
24. *Levelt P.F., van den Oord G.H.J., Dobber M.R., Mälkki A., Visser H., de Vries J., Stammes P., Lundell J., Saari H.* The Ozone Monitoring Instrument // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44, N 5. P. 1093–1101.
25. *Kruskal W.H., Wallis W.A.* Use of ranks in one-criterion variance analysis // *J. Amer. Stat. Assoc.* 1952. V. 47, N 260. P. 583–621.
26. *Acker J.G., Leptoukh G.* Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // *Eos. Trans. AGU.* 2007. V. 88, N 2. P. 14–17.
27. *Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA.* М.: МНТЦ, 2009. 81 с.
28. *Груздев А.Н., Исаков А.А., Елохов А.С.* Анализ недельной цикличности приземного аэрозоля и NO₂ на Звенигородской научной станции ИФА РАН // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 884–889.
29. *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. 42, № 2. С. 176–190.
30. *Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А.* Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2007. Т. 43, № 2. С. 246–259.

S.A. Sitnov, T.G. Adix. Weekly cycles in tropospheric NO₂ content over urban regions.

Using tropospheric nitrogen dioxide (NO₂) columns obtained by OMI instrument, the analysis of NO₂ intraweek changes over the world largest urban agglomerations (including Moscow) was carried out. With the help of Kruskal–Wallis test the estimates of statistical significance of differences in NO₂ content between different days of the week were obtained. It was found that over all considered agglomerations tropospheric NO₂ content is higher during workdays than during weekend. The peak-to-peak amplitudes of the statistically significant weekly cycles vary in the range from 14 (Cairo, Jakarta) up to 64% (Los Angeles). Intraweek differences of NO₂ over densely populated Shanghai and Delhi are statistically insignificant and do not exceed 7%.

The NO₂ weekly cycle over the Moscow agglomeration is investigated in more detail. The changes in the spatial distribution of tropospheric NO₂ content over the Moscow region in the course of week were analysed. Using the data from three ground-based stations of air pollution control network in Moscow the weekly cycles in surface NO₂ concentrations were investigated and statistical significance of the intraweek differences of them was tested. The weekly cycle in tropospheric NO₂ column over Moscow was compared with those in surface NO₂ concentrations and a satisfactory agreement was found. The transformation of diurnal courses in surface NO₂ concentrations during a week in the summer and winter periods was also analyzed.