

Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей

Г.И. Горчаков¹, Е.Г. Семутникова², А.В. Карпов¹, А.Б. Колесникова¹,
Е.С. Байкова¹, О.С. Задорожная^{3*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²ГПУ «Мосэкомониторинг»
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

³Государственное учебно-научное учреждение Физический факультет
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

Поступила в редакцию 13.05.2010 г.

По данным мониторинга на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха в г. Москве определены количественные характеристики недельного цикла концентраций примесей. Показано, что минимум среднесуточных концентраций угарного газа, оксидов азота, ароматических углеводородов, формальдегида, сернистого газа и сероводорода достигается в воскресенье. На разных постах концентрации угарного газа и углеводородов (без метана) в воскресенье составляют 0,75–0,93 от средненедельных. Недельный цикл концентрации метана в среднем по городу практически отсутствует. На некоторых постах максимальные среднесуточные концентрации озона наблюдаются в воскресенье. Для массовой концентрации частиц аэрозоля размерами меньше 10 мкм (PM-10) типичны пониженные значения абсолютных и относительных концентраций в воскресенье (0,73–0,96 от средненедельных) и в субботу (0,83–0,96 от средненедельных). Выявлены существенные различия среднего суточного хода концентраций угарного газа и ряда других газовых примесей в выходные и рабочие дни. Уточнена методика краткосрочного статистического прогноза межсуточной и внутрисуточной изменчивости концентраций примесей в городской атмосфере.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, газовые примеси, массовая концентрация аэрозоля, недельный цикл концентраций примесей, статистический прогноз концентраций примесей; urban air pollution, statistical forecastings of the air pollution, calendar variability of the concentrations, gaseous admixture, aerosol mass concentration.

Введение

Газовое и аэрозольное загрязнение воздушных бассейнов городов определяется, главным образом, антропогенными факторами. На уровень загрязнения городской атмосферы, в частности, заметно влияет недельный цикл хозяйственной и деловой активности. Отличие средних концентраций некоторых вредных примесей в рабочие и выходные дни обнаружено давно (см., например, [1]).

В работе [2] было показано, что в г. Москве в выходные дни не только снижается концентрация угарного газа, но и заметно трансформируется ее суточный ход. Вариации отношения концентраций в выходные и рабочие дни были оценены в [3], а в [4] была предложена методика учета указанных вариаций

при статистическом прогнозе среднесуточных концентраций угарного газа.

В настоящее время повысился интерес к короткопериодной календарной изменчивости (недельному ходу) приземных концентраций и содержания в столбе атмосферы некоторых газовых примесей и аэрозоля [5, 6]. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости проведения детального анализа недельного цикла изменчивости концентраций примесей в воздушных бассейнах городов.

В данной работе проанализирован недельный ход концентраций угарного газа CO, оксидов азота NO, NO₂ и озона O₃, бензола C₆H₆, толуола C₆H₅CH₃, метана CH₄, формальдегида CH₂O, сернистого газа SO₂, сероводорода H₂S, суммарной концентрации (без метана) углеводородов (обозначается как CH) и массовой концентрации частиц аэрозоля размерами меньше 10 мкм (PM-10) по данным экологического мониторинга в воздушном бассейне г. Москвы. Характеристика аппаратуры, используемой в г. Москве на стационарных постах контроля качества атмосферного воздуха, содержится в работах [2, 7–9].

* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова; Алексей Владимирович Карпов (karpov@ifaran.ru); Александра Борисовна Колесникова (gengor@ifaran.ru); Евгения Сергеевна Байкова; Ольга Сергеевна Задорожная.

Недельный цикл среднесуточных концентраций газовых компонентов загрязнения атмосферного воздуха

Угарный газ

Результаты статистического анализа вариаций концентрации угарного газа [CO] в воздушном бассейне г. Москвы представлены в работах [2, 3, 9–11], а предварительные оценки недельного хода [CO] (сопоставления концентраций в рабочие и выходные дни) содержатся в [2, 3].

Детальные расчеты недельного хода концентраций угарного газа для сравнительно большого числа статистических ансамблей (в ансамбль входят результаты измерений среднесуточных концентраций на каком-либо посту в течение года) показали, что в г. Москве, как правило, средние концентрации угарного газа в субботу и воскресенье существенно различны. Заметно различаются и средние концентрации CO в разные рабочие дни недели. В качестве примера на рис. 1 по данным измерений в г. Москве (2005 г.) показан средний для группы из 7 постов (Балчуг, Бирюлево, Марьино, ул. Казакова, Сухаревская пл., Шаболовка, Ленинградский пр.) недельный ход концентраций угарного газа, метана и суммарной концентрации углеводородов.

В табл. 1 приведены концентрации угарного газа C_k ($k = 1, 2, \dots, 7$ – номер дня недели, начиная с понедельника) в разные дни недели для отдельных постов (числа над чертой), а также относительные концентрации (числа под чертой)

$$\eta_k = C_k / \bar{C}, \quad (1)$$

где

$$\bar{C} = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 C_k \quad (2)$$

– средненедельная концентрация.

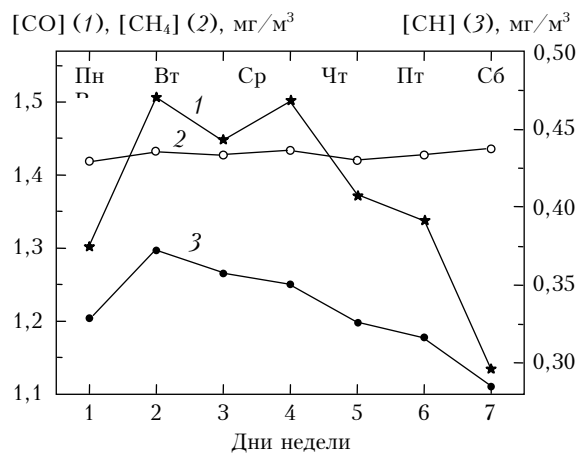


Рис. 1. Недельный ход среднесуточных концентраций угарного газа CO (1), метана CH₄ (2) и суммарной концентрации углеводородов CH (3) по данным измерений в г. Москве (2005 г.) на 7 постах

В табл. 1 также приведены осредненные величины относительных концентраций угарного газа как для 7 вышеупомянутых ансамблей ($\bar{\eta}_k^*$), так и для группы из 17 ансамблей ($\bar{\eta}_k^{**}$). Следует отметить, что средние относительные концентрации угарного газа для группы из 7 постов несущественно отличаются от средних концентраций для группы, включающей 17 постов (по данным измерений в 2005 г.).

Из рис. 1 и табл. 1 следует, что в воскресенье наблюдается довольно глубокий минимум концентрации угарного газа ($\eta_7 = 0,75 \div 0,93$, в среднем 0,81

Таблица 1

Недельный ход абсолютных концентраций (числа над чертой) и относительных концентраций η_k (числа под чертой) угарного газа по данным измерений в г. Москве (2005 г.) на 6 постах ($k = 1, 2, \dots, 7$ – дни недели). Средние относительные концентрации по данным измерений на 7 ($\bar{\eta}_k^*$) и на 17 ($\bar{\eta}_k^{**}$) постах в 2005 г.

Пост	Концентрация, мг/м³						
	Пн(1)	Вт(2)	Ср(3)	Чт(4)	Пт(5)	Сб(6)	Вс(7)
Балчуг	1,06	1,26	1,17	1,24	1,10	0,90	0,77
	1,02	1,04	1,03	1,04	1,06	0,97	0,84
Бирюлево	1,39	1,59	1,60	1,62	1,49	1,58	1,42
	0,91	1,04	1,05	1,06	0,98	1,04	0,93
Марьино	0,62	0,84	0,88	0,95	0,78	0,80	0,65
	0,78	1,07	1,11	1,20	0,99	1,02	0,82
ул. Казакова	1,42	1,70	1,65	1,80	1,55	1,60	1,30
	0,90	1,08	1,05	1,14	0,98	1,02	0,83
Сухаревская пл.	1,10	1,41	1,16	1,14	1,02	1,03	0,83
	1,00	1,28	1,06	1,04	0,93	0,94	0,75
Ленинградский проспект	2,22	2,25	2,23	2,26	2,30	2,11	1,83
	1,02	1,04	1,03	1,04	1,06	0,97	0,84
$\bar{\eta}_k^*$	0,94	1,08	1,04	1,11	1,00	0,99	0,84
$\bar{\eta}_k^{**}$	0,94	1,11	1,06	1,12	0,99	0,97	0,81

и 0,83 для двух разных групп постов) практически на всех постах и в среднем по городу. В частности, максимальная относительная концентрация CO в воскресенье составила (2005 г.) 0,93 (в Бирюлево), а минимальная снижалась до 0,75 (на Сухаревской пл.).

Максимальные абсолютные и относительные концентрации угарного газа, как правило, наблюдаются со вторника по четверг, когда средние относительные концентрации варьируют примерно в пределах от 1,04 до 1,12, а относительные концентрации на отдельных постах могут достигать значений 1,2–1,3. В понедельник концентрации CO в среднем заметно ниже средненедельной нормы, а в пятницу и субботу близки (в среднем) к указанной норме.

Таким образом, в г. Москве по данным измерений концентраций угарного газа воскресенье в среднем является наиболее чистым днем. Повышенные концентрации угарного газа наблюдаются во вторник, среду и четверг. Промежуточное положение занимают понедельник, пятница и суббота.

В первое десятилетие XXI в. в г. Москве на автотранспорт приходится подавляющая часть выбросов угарного газа в атмосферу (так, например, в 2008 г. больше 99%, согласно данным [12]). Поэтому очевидно, что недельный ход [CO] в г. Москве определяется, главным образом, недельным циклом режима движения автотранспорта на магистралях города и Подмосковья.

Неметановые углеводороды

Анализ вариаций суммарной концентрации углеводородов (без метана) в воздушном бассейне г. Москвы представлен в работе [9], где показано,

что вариации [CH] и [CO] качественно согласуются друг с другом. Средний недельный ход [CH] по данным измерений в 2005 г. на 7 постах показан на рис. 1 (кривая 3), а примеры недельного хода по данным измерений в 2004–2006 гг. на постах приведены в табл. 2.

В целом недельный цикл [CH] в первом приближении подобен недельному циклу [CO]. Относительные концентрации углеводородов в воскресенье η_7 варьируют в пределах от 0,75 до 0,90 ($\bar{\eta}_7 = 0,86$). Недельный ход [CH] имеет несколько меньший размах по сравнению с соответствующей изменчивостью [CO]. Отметим, что по приведенным в табл. 2 данным измерений на Ленинградском проспекте можно судить о масштабе межгодовой изменчивости недельного хода [CH].

В г. Москве доля автотранспорта в выбросах летучих органических соединений, к которым относятся углеводороды, в 2008 г. достигла 92% [12]. Именно этим обстоятельством объясняется сходство недельного цикла [CH] с недельным циклом [CO].

Метан

В результате анализа данных мониторинга выяснилось, что в Москве концентрация метана CH_4 характеризуется определенным суточным ходом [9] и сезонной изменчивостью [9, 13]. Из рис. 1 видно, что недельный ход концентрации метана для города в целом (кривая 2) в Москве практически отсутствует (среднесуточные концентрации метана для избранной группы постов варьируют от 1,42 до 1,44 mg/m^3), откуда следует, что выбросы автотранспорта не сказываются на недельном цикле метана.

Таблица 2

Недельный ход значений абсолютной суммарной концентрации углеводородов (числа над чертой) и суммарной относительной концентрации углеводородов η_k (числа под чертой) по данным измерений в 2004–2006 гг. на 6 постах в Москве ($\bar{\eta}_k$ – средние относительные концентрации)

Год	Пост	Концентрация, mg/m^3						
		Пн(1)	Вт (2)	Ср(3)	Чт(4)	Пт(5)	Сб(6)	Вс(7)
2004	Ленинградский проспект	0,448	0,468	0,467	0,455	0,471	0,431	0,404
		1,00	1,04	1,04	1,01	1,05	0,96	0,90
2005	Ленинградский проспект	0,421	0,456	0,459	0,435	0,433	0,404	0,344
		1,00	1,08	1,09	1,03	1,03	0,96	0,81
	Марьино	0,292	0,335	0,347	0,327	0,269	0,280	0,263
		0,97	1,11	1,15	1,08	0,89	0,93	0,87
2005	Балчуг	0,335	0,392	0,361	0,382	0,348	0,296	0,256
		0,99	1,16	1,07	1,13	1,03	0,87	0,75
2005	Бирюлево	0,334	0,386	0,361	0,344	0,332	0,331	0,319
		0,97	1,12	1,05	1,00	0,97	0,96	0,93
2006	Сухаревская пл.	0,434	0,385	0,479	0,392	0,436	0,450	0,379
		1,03	0,91	1,14	0,93	1,03	1,06	0,90
2006	Шаболовка	0,208	0,261	0,231	0,232	0,235	0,209	0,185
		0,96	1,00	1,07	1,07	1,09	0,97	0,85
	$\bar{\eta}_k$	0,99	1,06	1,08	1,04	1,01	0,96	0,86

Для отдельных постов недельный ход $[CH_4]$ может существенно отличаться от среднего по городу.

Оксиды азота

Примеры недельного хода концентраций оксида и диоксида азота приведены на рис. 2 и в табл. 3. Минимум концентрации оксида азота, как и угарного газа, зафиксирован в воскресенье.

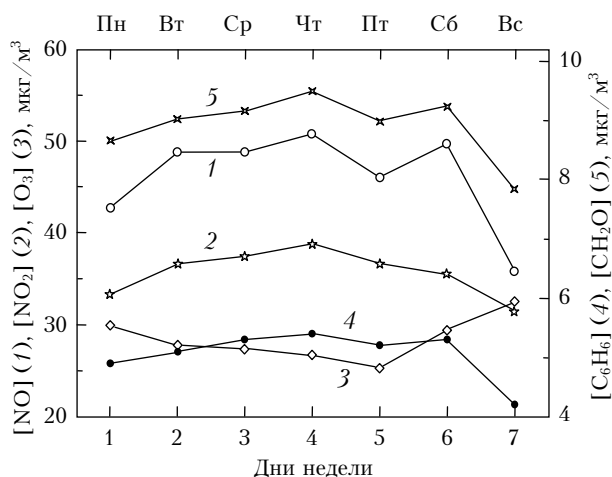


Рис. 2. Недельный ход среднесуточных концентраций оксида азота (1) и диоксида азота (2) по данным измерений на посту Бирюлево в 2005 г., концентрации озона (3) по данным измерений на Кутузовском проспекте в 2004 г., концентрации бензола (4) и формальдегида (5) по данным измерений на Кутузовском проспекте в 2006 г.

Как правило, пониженные (по сравнению со средненедельными) концентрации NO наблюдаются в понедельник. Что касается отдельных постов, то для NO закономерности недельного хода концентрации менее устойчивы, чем для CO . Так, например, в 2005 г. на посту Бирюлево средняя концентрация NO в субботу была примерно такой же, как в четверг (рис. 2).

Минимальные концентрации NO_2 также наблюдаются в воскресенье (рис. 2, табл. 3). Размах вариаций концентраций диоксида азота в недельном цикле, как правило, заметно меньше соответствующих размахов концентраций CO и NO .

Вариации $[NO]$ в недельном цикле в первую очередь определяются режимом движения автотран-

порта. Во многих случаях (особенно при низком уровне загрязнения) на недельный ход заметно влияет расход NO в химической реакции с озоном, которая ведет к образованию NO_2 [14, 15]. При этом концентрация образующегося диоксида азота ограничена сверху либо выбросами NO , либо содержанием озона в приземном слое атмосферы, куда озон поступает из вышележащих слоев атмосферы [15].

Доля оксидов азота (NO и NO_2), согласно данным 2008 г. [12], составляет 87%. Поэтому недельный ход концентраций NO и NO_2 может отличаться (на разных постах по-разному) от недельного хода концентрации угарного газа.

Ароматические углеводороды

Результаты расчетов недельного хода концентраций ароматических соединений, включая бензол (рис. 2) и толуол (табл. 3), показали, что и для них минимум концентраций в недельном цикле наблюдается в воскресенье. Говорить о закономерностях недельного хода концентраций для города в целом пока рано, поскольку соответствующие измерения проводятся только на Кутузовском проспекте.

Сернистый газ и сероводород

В г. Москве на нескольких постах выполняются измерения серосодержащих соединений: сернистого газа SO_2 и сероводорода H_2S . Примеры результатов определения недельного хода концентраций для указанных химических соединений приведены в табл. 3. В рассматриваемых случаях, так же как и для большинства других газовых примесей, минимум концентраций наблюдается в воскресенье. Особенностью недельного хода в рассматриваемых случаях является близость значений концентраций SO_2 и H_2S в понедельник и воскресенье. Можно предполагать, что наблюдаемый в Москве недельный ход концентраций ароматических соединений, сернистого газа и сероводорода определяется преимущественно выбросами автомобильных двигателей.

Формальдегид

Концентрация формальдегида CH_2O в приземном слое городской атмосферы варьирует в сравнительно широких пределах [2, 16]. Анализ данных

Таблица 3

Недельный ход концентраций оксида и диоксида азота на ул. Толбухина, озона в Новокосино, толуола на Кутузовском проспекте, сернистого газа и сероводорода в Марьино по данным измерений в 2005 г.

Пост	Вещество	Концентрация, мкг/м³						
		Пн(1)	Вт(2)	Ср(3)	Чт(4)	Пт(5)	Сб(6)	Вс(7)
ул. Толбухина	Оксид азота	25	33	33	34	27	29	22
	Диоксид азота	30	33	33	35	34	32	28
Новокосино	Озон	24	26	23	19	20	24	29
Кутузовский пр.	Толуол	11	12	13	14	13	14	10
Марьино	Сернистый газ	4,1	5,3	5,8	6,7	4,5	4,8	4,0
	Сероводород	3,0	3,9	3,9	4,5	3,4	3,5	2,8

измерений показал, что для концентрации формальдегида характерен недельный ход, качественно подобный недельному ходу концентраций бензола и толуола. Как для большинства рассмотренных выше газовых примесей атмосферного воздуха в г. Москве, для формальдегида характерен воскресный минимум концентрации (см. рис. 2, кривая 5). Отметим также пониженные концентрации формальдегида в понедельник. Формальдегид не содержится в выхлопах автомобильного транспорта. Однако его временная изменчивость свидетельствует о том, что он является продуктом достаточно быстрых химических превращений некоторых соединений, содержащихся в выхлопах двигателей [17].

Озон

В городской атмосфере O_3 относится к числу химически активных примесей [14, 15]. Значительная часть озона тратится на окисление NO до NO_2 , поэтому при уменьшении концентрации оксида азота концентрация озона в приземном слое атмосферы может увеличиваться. Об этом эффекте свидетельствует воскресный максимум концентрации озона на ряде постов (см. рис. 2 и табл. 3). В недельном цикле минимум концентрации озона наблюдается в рабочие дни.

Для концентраций рассмотренных выше газовых примесей, за исключением метана и озона, в недельном цикле наблюдается достаточно отчетливо выраженный воскресный минимум. Для угарного газа благодаря большому объему наблюдательных данных надежно выявляется также повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха в период со вторника по четверг.

Недельный цикл вариаций массовой концентрации аэрозоля

Атмосферный аэрозоль является одним из существенных факторов загрязнения атмосферы. Экологический мониторинг предусматривает контроль массовой концентрации частиц аэрозоля размерами меньше 10 (PM_{10}) и 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) [18]. В Москве в течение нескольких лет ведутся регулярные измерения параметра PM_{10} [7, 8]. В последнее время

в Москве для измерения массовой концентрации аэрозоля используется прибор ТЕОМ [19]. В настоящей статье по данным измерений PM_{10} в 2007 и в 2009 гг. был проанализирован недельный ход массовой концентрации аэрозоля. Примеры результатов расчета концентраций аэрозоля по измерениям на 5 постах представлены в табл. 4. На рис. 3 показан осредненный по 11 ансамблям (данные измерений в 2007 и 2009 гг.) недельный ход PM_{10} (кривая 1).

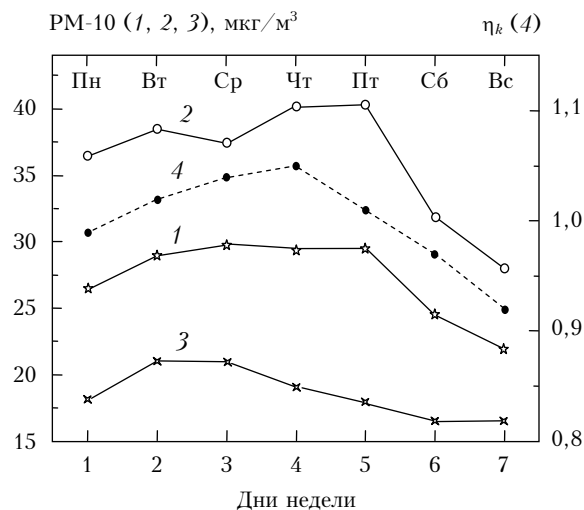


Рис. 3. Недельный ход средней массовой (PM_{10}) концентрации аэрозоля (1) по данным измерений в г. Москве на 5 постах в 2007 г. и на 6 постах в 2009 г., недельный ход PM_{10} по данным измерений на постах Новокузнецк (2) и в Павловском Посаде (3) в 2009 г. и недельный ход относительной массовой концентрации субмикронного аэрозоля (4) по данным измерений в Подмосковье в 1991–1992 гг.

Кроме того, на рис. 3 показаны соответствующие зависимости для Новокузнецка (2) и Павловского Посада (3), рассчитанные по данным измерений в 2009 г. Уровень концентрации аэрозоля в Павловском Посаде заметно ниже, чем в среднем по г. Москве, что, по-видимому, объясняется меньшей мощностью источников аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха за пределами г. Москвы.

Нетрудно видеть, что в недельном ходе наблюдается сравнительно глубокий минимум в воскресенье как в среднем, так и в большинстве частных случаев.

Таблица 4

Недельный ход относительной массовой концентрации аэрозоля (PM_{10}) по данным измерений в Москве в 2007 и в 2009 гг. на 5 постах ($\bar{\eta}_k$ — средние относительные концентрации для 11 годовых ансамблей)

Год	Пост	Концентрация						
		Пн(1)	Вт(2)	Ср(3)	Чт(4)	Пт(5)	Сб(6)	Вс(7)
2007	Марьино	1,02	1,07	1,07	1,09	1,11	0,90	0,75
	Останкино	0,94	1,06	1,03	1,13	1,15	0,96	0,73
2009	МГУ	1,01	1,08	1,14	1,06	1,00	0,85	0,86
	Вешняки	1,00	1,10	1,15	1,04	1,04	0,83	0,84
	Спирidonовка	0,92	1,09	1,17	1,11	1,08	0,84	0,80
$\bar{\eta}_k$		0,97	1,07	1,10	1,08	1,07	0,90	0,81

Относительная концентрация η_7 для PM-10 варьирует в пределах 0,73–0,86 (в среднем 0,81). Пониженные концентрации PM-10 имеют место и в субботу (η_6 варьирует в пределах от 0,83 до 0,96 и при 0,90). В понедельник концентрация аэрозоля в среднем близка к средненедельной. В период со вторника по пятницу средние концентрации аэрозоля оказались повышенными.

Таким образом, в первом приближении недельный ход концентрации аэрозоля (PM-10) подобен среднему недельному ходу концентрации угарного газа. Однако автотранспорт московского мегаполиса заведомо не является единственным источником аэрозольного загрязнения городской атмосферы, о чем, в частности, свидетельствуют близкие уровни концентраций субмикронной фракции аэрозоля в Москве и Подмосковье [20].

Анализ данных измерений массовой концентрации субмикронного аэрозоля в Подмосковье показал, что и эта характеристика аэрозоля имеет отчетливо выраженный недельный цикл. На рис. 3 (кривая 4) показан недельный ход относительной концентрации субмикронного аэрозоля η_s , рассчитанный по данным измерений [21, 22] в 1991–1992 гг. Недельный ход η_s имеет сравнительно глубокий минимум в воскресенье. Пониженные концентрации субмикронного аэрозоля наблюдаются в понедельник и субботу, а повышенные – в период со вторника по пятницу. В целом, недельный ход массовой концентрации субмикронного аэрозоля в Подмосковье близок к полученному нами среднему недельному ходу PM-10 для Москвы.

Согласно данным измерений минимальные значения аэрозольной оптической толщины в Германии наблюдаются в воскресенье и понедельник [6]. Однако инвентаризация недельного хода выбросов в атмосферу (на территории Германии) оксидов азота NO_x , сернистого газа SO_2 , элементарного углерода (сажевого аэрозоля) и частиц аэрозоля размерами меньше 10 мкм позволила установить, что минимальная (и приблизительно одинаковая) сумма выбросов имеет место в субботу и воскресенье. Сумма выбросов с понедельника по пятницу для вышеперечисленных примесей в 1,4–1,6 раза больше, чем в воскресенье. Противоречие снимается, если учесть, что значительная доля примесей атмосферного воздуха поступает в Германию с территории Франции [6] и в Германии преобладает западный перенос воздушных масс.

В Московском регионе влияние дальнего переноса на недельный цикл аэрозоля становится более неопределенным, поскольку в аэрозольное загрязнение воздушного бассейна г. Москвы могут вносить вклад весьма протяженные территории Европы, расположенные к западу от г. Москвы. Следует отметить, что на уровень аэрозольного загрязнения Московского региона влияет также дальний перенос воздушных масс с других направлений [23].

Наблюдаемый отчетливый минимум PM-10 в воскресенье, а также сходство недельного цикла PM-10 с недельным циклом $[\text{CO}]$ в г. Москве свидетельствуют, на наш взгляд, о существенном вкладе в аэро-

зольное загрязнение воздушных бассейнов г. Москвы и Подмосковья региональных источников и в первую очередь регионального автотранспорта, как непосредственно за счет выхлопов двигателей и взаимодействия автомашин с полотном дороги, так и, по видимому, благодаря процессам превращения газ-частица (образование вторичного аэрозоля). Для количественной оценки относительной роли вкладов различных источников эмиссии или генерации субмикронного и грубодисперсного аэрозоля в г. Москве и в Московском регионе необходимы более детальные исследования.

Дальний перенос и региональные источники могут заметно влиять на недельный цикл концентрации сернистого газа и, возможно, ряда других газовых примесей в воздушном бассейне г. Москвы.

Особые ситуации возникают при заносах в Москву дымового аэрозоля вследствие крупномасштабных пожаров [24].

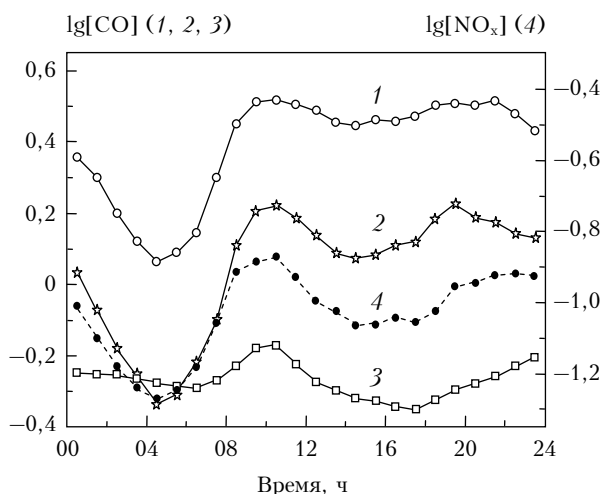
Недельный цикл суточного хода концентраций примесей

В [2, 3] по данным измерений в Москве были выявлены существенные различия среднего суточного хода концентрации угарного газа в рабочие и выходные дни. Из полученных выше результатов следует, что необходим более детальный анализ трансформации суточного хода в недельном цикле концентраций примесей атмосферного воздуха. В настоящей статье мы ограничимся сопоставлением среднего суточного хода концентраций $[\text{CO}]$ в воскресенье со средним суточным ходом в среду, который в данном случае представляет рабочие дни с повышенными концентрациями примесей.

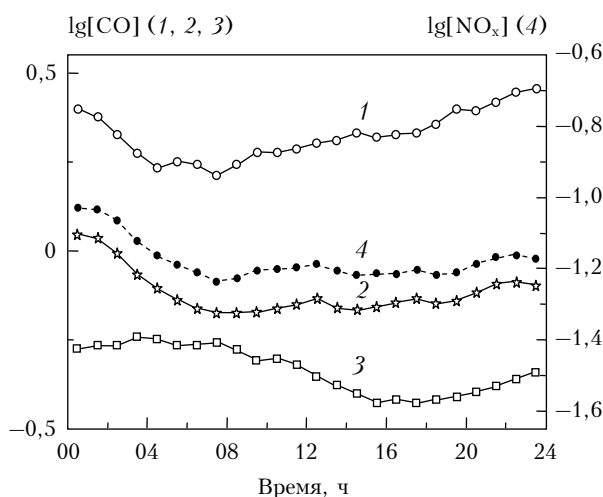
На рис. 4, а показаны в логарифмическом масштабе примеры суточного хода концентрации угарного газа (измеряются в $\text{мг}/\text{м}^3$) в среду, полученные по данным измерений в 2004 г. для трех постов: Московский автомобильно-дорожный институт (МАДИ) или Ленинградский проспект, Балчуг и Лосиный Остров. Отчетливо видны не только отличия в уровне загрязнения приземного воздуха на разных постах, но и заметные различия временной изменчивости концентраций, в том числе смещения вечернего максимума.

Средний суточный ход суммарной концентрации оксидов азота NO_x в среду в основном подобен суточному ходу $[\text{CO}]$, что иллюстрируется на рис. 4, а (кривая 4) результатами расчетов для поста МАДИ.

Для всех вышеуказанных постов средний суточный ход концентрации угарного газа в воскресенье (рис. 4, б) радикально отличается от соответствующего суточного хода в среду: отсутствуют отчетливо утренний и вечерний максимумы, а скорость изменения концентрации понижена. Также обращают на себя внимание заметные различия суточного хода концентраций на разных постах. Как и следовало ожидать, суточный ход (NO_x) в воскресенье (рис. 4, б,



а



б

Рис. 4. Средний суточный ход в среду (а) и в воскресенье (б) концентрации угарного газа ($\text{мг}/\text{м}^3$) по данным измерений на Ленинградском проспекте (1), на Балчуге (2) и на посту Лосиный Остров (3) в 2004 г. и средний суточный ход суммарной концентрации оксидов азота (4) по данным измерений на Ленинградском проспекте в 2004 г.

кривая 4) существенно отличается от соответствующего суточного хода в среду и качественно подобен среднему суточному ходу $[\text{CO}]$ в этот день. Однако в рассматриваемом случае (МАДИ, 2004 г.) концентрация NO_x после утреннего минимума практически не растет в отличие от концентрации $[\text{CO}]$.

Наблюдаемые особенности недельного цикла суточного хода концентраций большинства рассмотренных выше примесей объясняются, главным образом, недельным циклом режима движения автотранспорта. Однако на изменчивость суточного хода концентрации NO_x и ряда других примесей могут заметно влиять и другие факторы.

Короткопериодная календарная изменчивость (недельный цикл) суточного хода концентраций нуждается в более подробном исследовании. Однако эта задача выходит далеко за рамки настоящей статьи.

Уточнение методики краткосрочного статистического прогноза концентраций примесей в городской атмосфере

В работах [3, 4] рассмотрена задача краткосрочного (на 3 сут вперед) статистического прогноза концентраций загрязняющих примесей на примере г. Москвы. Разработана методика последовательного прогноза межсуточной и внутрисуточной изменчивости концентрации примесей. Новые результаты исследования короткопериодной календарной изменчивости дают возможность уточнить методику прогноза загрязнения городской атмосферы.

1. Прогноз межсуточной изменчивости

При прогнозе среднесуточных концентраций необходимо учитывать отличия относительных концентраций примесей η_k ($k = 1, 2, \dots, 7$) в разные дни недели. Эти отличия определяются отношениями ($j, k = 1, 2, \dots, 7$)

$$m_{jk} = \eta_j / \eta_k, \quad (3)$$

где η_j — средние относительные концентрации для дней прогноза, η_k — относительные концентрации в те дни недели, для которых абсолютные концентрации (C_0 в работе [4]) используются в качестве предикторов прогноза.

В [4] целью межсуточного прогноза является оценка интервалов, в которые с заданной вероятностью попадают прогнозируемые на первые ($i = 1$), вторые ($i = 2$) и третьи ($i = 3$) сутки. Среднесуточные концентрации примесей C_i (в одном из вариантов статистического прогноза) должны попадать в интервалы

$$C_0 + \xi_i \sigma_c > C_i > C_0 - \xi_i \sigma_c, \quad (4)$$

где σ_c — стандартное отклонение для соответствующей среднесуточной концентрации примеси; ξ_i ($j = 1, 2, 3$) — заданные параметры прогноза. С учетом недельного хода среднесуточных концентраций вышеуказанные интервалы должны определяться соотношениями:

$$C_0^{(k)} + m_{jk} \xi_i \sigma_c > C_i^{(jk)} > C_0^{(k)} - m_{jk} \xi_i \sigma_c. \quad (5)$$

Коэффициенты m_{jk} варьируют в сравнительно широких пределах. Так, например, в случае прогноза концентрации угарного газа на воскресенье по данным измерений в четверг (см. табл. 1) коэффициент m_{47} (отсчет дней недели начинается с понедельника) снижается примерно до 0,7, а при прогнозе на среду по данным измерений в воскресенье m_{73} достигает примерно 1,4. Таким образом, коррекция методики прогноза межсуточной концентрации примесей необходима. Ввиду большого разброса коэффициентов m_{jk} для разных постов и примесей указанная коррекция должна осуществляться с учетом статистических характеристик конкретных статистических ансамблей наблюдательных данных.

2. Прогноз внутрисуточной изменчивости

Недельный цикл среднего суточного хода необходимо учитывать при статистическом прогнозе внутрисуточных вариаций концентраций примесей. В [4] показано, что при прогнозе внутрисуточной изменчивости концентраций примесей целесообразно перейти от среднего суточного хода $\bar{C}(t)$, где t – время, к нормированному среднему суточному ходу $\bar{c}(t) = \bar{C}(t)/\bar{C}$, где \bar{C} – среднесуточная концентрация примеси.

С учетом недельного хода концентраций примесей будем использовать набор эмпирических функций $\bar{C}_k(t)$ ($k = 1, 2, \dots, 7$), что позволяет ввести нормированный среднесуточный ход для каждого дня недели:

$$\bar{c}_k(t) = \bar{C}_k(t)/\bar{C}_k, \quad (6)$$

где \bar{C}_k ($k = 1, 2, \dots, 7$) – среднесуточные концентрации для различных дней недели. Прогнозируемый суточный ход $C_k^*(t)$ определяется соотношениями

$$C_k^*(t) = C_i^{(jk)} \bar{c}_k(t), \quad (7)$$

где $C_i^{(jk)}$ оценивается с помощью соотношений (5).

В ряде случаев целесообразно ограничиться упрощенным подходом. Во-первых, внутрисуточную изменчивость концентраций примесей в воскресные дни $C_k^*(t)$ можно прогнозировать с помощью (7). Для остальных дней можно пользоваться одним общим нормированным ходом $\bar{C}(t)$, в качестве которого можно использовать среднегодовой нормированный суточный ход $\bar{c}(t)$ или учесть сезонную изменчивость суточного хода [2, 4, 9] и использовать эмпирические зависимости $C_p(t)$, где $p = 1, 2, 3, 4$ – номер сезона. Отметим, что при прогнозе внутрисуточной изменчивости необходимо учитывать конкретные эмпирические закономерности, характерные для различных постов и примесей атмосферного воздуха.

Заключение

1. Проанализирован недельный ход среднесуточных концентраций газовых компонентов загрязнения и аэрозоля в воздушном бассейне г. Москвы. Общим для недельного хода концентраций угарного газа, оксидов азота, ароматических углеводородов, формальдегида, сернистого газа, сероводорода и суммарной концентрации углеводородов является воскресный минимум среднесуточных концентраций. На разных постах средние концентрации угарного газа в воскресенье составляют 0,75–0,93 (в среднем 0,81–0,93 для двух групп постов) от средненедельных, а для суммы углеводородов (без метана) – от 0,75 до 0,90 (в среднем 0,86). Недельный ход среднесуточной концентрации угарного газа может быть охарактеризован более детально: кроме воскресенья достаточно отчетливо выделяется группа дней (вторник, среда, четверг) с повышенной концентрацией

и группа дней (понедельник, пятница, суббота), для которых среднесуточные концентрации близки к средненедельной.

2. Среднесуточные концентрации метана для выбранной нами группы постов в течение недели меняются незначительно: от 1,42 до 1,44 мг/м³.

3. В недельном цикле максимальная концентрация озона на некоторых постах наблюдается в воскресенье, а минимальная – в один из рабочих дней.

4. Минимальные значения среднесуточной массовой концентрации частиц аэрозоля размерами менее 10 мкм (PM-10) и массовой концентрации субмикронного аэрозоля наблюдаются в воскресенье (относительные концентрации PM-10 составляют 0,73–0,86). Субботние концентрации PM-10 также заметно ниже средненедельных: 0,83–0,96 от средненедельных (в среднем для группы постов 0,90).

5. Проанализирована календарная изменчивость суточного хода концентрации угарного газа. Выявлены значительные отличия суточного хода [CO] в воскресенье от соответствующего суточного хода в рабочие дни.

6. Уточнена методика краткосрочного (на 3 сут вперед) статистического прогноза концентраций примесей в приземном слое городской атмосферы (на примере г. Москвы) с учетом недельного цикла среднесуточных концентраций и недельного цикла суточного хода концентраций примесей атмосферного воздуха.

7. Показано, что недельный цикл концентраций газовых компонентов загрязнения атмосферного воздуха в воздушном бассейне Москвы определяется недельным циклом режима движения автотранспорта.

В работе использованы данные измерений концентраций газовых компонентов загрязнения и массовой концентрации аэрозоля (PM-10) ГПУ «Мосэкомониторинг» на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха в Москве.

Авторы благодарят Б.Д. Белана и С.А. Ситнова за полезные советы.

1. *United Kingdom*. First Report of the Quality of Urban Air Review Group. London: Department of the Environment. 1993. 201 p.
2. 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.
3. 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.
4. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Аношин Б.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б. Статистический прогноз загрязнения городской атмосферы. 2. Методика прогноза межсуточной и внутрисуточной изменчивости концентраций угарного газа и оксидов азота // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 287–293.
5. Ситнов С.А. Анализ пространственно-временной изменчивости тропосферного содержания NO₂ над московским

- мегаполисом по данным спектрометра (спутник AURA) // Докл. РАН. 2009. Т. 429, № 4. С. 534–540.
6. *Baumer D., Rinke R., Vogel B.* Weekly periodicities of Aerosol Optical Thickness over Central Europe – evidence of an anthropogenic direct aerosol effect // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8, N 1. P. 83–90.
 7. *Бюллетень* о состоянии атмосферного воздуха в г. Москве в 2005 г. М.: Мосэкомониторинг, 2006. 72 с.
 8. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Аношин Б.А.* Статистический анализ массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля в г. Москве // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 6. С. 501–505.
 9. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Аношин Б.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б.* Углеводороды в городской атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2009. Т. 45, № 3. С. 337–347.
 10. *Аношин Б.А.* Статистический анализ вариаций среднесуточных и максимальных концентраций угарного газа в воздушном бассейне г. Москвы // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 6. С. 546–550.
 11. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Глядко П.С., Карпов А.В., Колесникова А.Б., Лезина Е.А.* Вертикальные профили концентраций угарного газа и оксидов азота в пограничном слое городской атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 8. С. 787–794.
 12. *Ежегодник* выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2008 год / Под ред. В.Б. Миляева. СПб.: НИИ «Атмосфера», 2009. 141 с.
 13. *Виноградова А.А., Федорова Е.И., Беликов И.Б., Гинзбург А.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И.* Временные изменения концентрации углекислого газа и метана // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2007. Т. 43, № 5. С. 651–663.
 14. *Белан Б.Д.* Тропосферный озон. 3. Содержание озона в тропосфере. Механизмы и факторы, его определяющие // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 7. С. 600–618.
 15. *Белан Б.Д.* Тропосферный озон. 6. Компоненты озоновых циклов // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 4. С. 358–370.
 16. *Горчаков Г.И., Колесникова А.Б., Лезина Е.А.* Вариации концентрации формальдегида в приземном слое городской атмосферы // *Естественные и антропогенные аэрозоли.* СПб.: СПбГУ, 2009. С. 55–60.
 17. *Воробьева И.А.* Исследование причин формирования повышенных концентраций формальдегида в атмосфере города // *Труды Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* 2008. Вып. 557. С. 206–215.
 18. *Мониторинг* качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека. Копенгаген: региональные публикации ВОЗ. Европейская серия. № 5. 2001. 293 с.
 19. *Solomon P.A., Sioutas C.* Continuous semicontinuous monitoring techniques for particulate matter mass and chemical components: a synthesis of findings from EPA's particulate matter supersites program and related studies // *J. of the air & Waste management association.* 2008. V. 58, N 1. P. 164–195.
 20. *Емиленко А.С., Сидоров В.Н.* Синхронные измерения концентрации субмикронного аэрозоля в г. Москве и Подмосковье // *Контроль состояния воздушного бассейна г. Москвы. Часть II / Препр. ИФА РАН.* (М.). 1992. С. 93–104.
 21. *Сидоров В.Н.* Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое // *Физика атмосферного аэрозоля: Труды конференции.* М.: ИФА РАН, 1999. С. 356–367.
 22. *Горчаков Г.И., Исаков А.А., Мохов И.И., Свириденков М.А., Шукуров К.А., Карпов А.В., Чернокульский А.В.* Статистические характеристики вариаций массовых концентраций субмикронного аэрозоля // *Естественные и антропогенные аэрозоли.* СПб.: СПбГУ, 2005. С. 499–503.
 23. *Исаков А.А., Тихонов А.В.* О сопоставлении осредненных направлений прихода воздушных масс с средними величинами параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 1. С. 9–13.
 24. *Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А.* Исследование состава задымленной атмосферы Москвы во время пожаров торфяников летом–осенью 2002 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2004. Т. 40, № 3. С. 366–380.

G.I. Gorchakov, E.G. Semoutnikova, A.V. Karpov, A.B. Kolesnikova, E.S. Baykova, O.S. Zadorozhnaya. Air pollution week-long cycle in Moscow: of refinement quantitative parameters and statistical forecasting of impurity concentration.

The quantitative characteristics of the week-long cycle impurity concentration in Moscow have been determined according to the monitoring data at the automated air quality stations. It is shown that the minimum mean daily concentration of pollutant gases (carbon oxide, nitrogen oxides, aromatic hydrocarbons, formaldehyde, sulfur dioxide and hydrogen sulphide) is reached on Sunday. Relative concentrations of carbon oxide and hydrocarbon (without methane) on Sunday fall in range 0.75–0.93. Week-long cycle of methane concentration on the average in the city is absent. Ozone daily-average concentration maximum takes place on Sundays for some stations. Daily-average aerosol mass concentrations (PM-10) reach 0.75–0.93 on Sundays and Saturdays relative to the average week concentrations. Essential distinctions between the average daily carbon oxide concentration variations at weekends and working days have been revealed. Forecasting method of the interdiurnal and intradiurnal impurity concentration variations in urban atmosphere has been refined.