

Вертикальные профили концентраций угарного газа и оксидов азота в пограничном слое городской атмосферы

Г.И. Горчаков¹, Е.Г. Семутникова², П.С. Глядков¹,
А.В. Карпов¹, А.Б. Колесникова¹, Е.А. Лезина^{2*}

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

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

Поступила в редакцию 18.07.2008 г.

Изучена изменчивость вертикальных профилей концентрации угарного газа и суммарной концентрации оксидов азота в г. Москве по данным измерений на телебашне Останкино в зимний сезон. Проанализированы статистические связи между вариациями концентраций угарного газа и оксидов азота на разных высотах. Выявлены различия в суточном ходе концентраций газовых примесей в нижней и верхней частях пограничного слоя атмосферы.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, угарный газ, оксиды азота, вертикальные профили, городская среда.

Введение

Исследование процессов загрязнения городской атмосферы [1–5] представляет большой интерес для теории климата [6, 7], химии атмосферы [8, 9] и особенно для атмосферной экологии [6, 10]. Современная стратегия охраны окружающей среды на урбанизированных территориях [10] предусматривает необходимость решения задач диагноза и прогноза загрязнения атмосферного воздуха на основе данных мониторинга некоторых компонентов загрязнения в приземном слое атмосферы [1, 2, 10].

Однако при решении задач распространения и трансформации газовых и аэрозольных компонентов загрязнения воздушных бассейнов крупных городов возникают серьезные трудности, связанные с недостатком информации о метеорологических процессах в пограничном слое атмосферы над городом, в том числе о формировании низкоуровневых струйных течений [11], о механизмах переноса примесей вихревыми структурами [12], в частности в уличных каньонах [13, 14], о роли конвективных процессов [15] и о структуре «многокупольного острова тепла» над городом [16], генетически связанного с «шапкой загрязнения» [17] и сложной циркуляцией воздуха над городом [18, 19]. Отсюда возникает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований метеорологических процессов и закономерностей вертикаль-

ного распределения газовых и аэрозольных примесей в городском пограничном слое.

В настоящее время для контроля пространственного распределения газовых примесей и характеристик аэрозоля эпизодически используются самолетные лаборатории [20], аэростаты и баллоны [21], лидары [22] и космические аппараты. К сожалению, для выявления статистических закономерностей изменчивости концентрации примесей в пограничном слое городской атмосферы, которые необходимо знать при разработке адекватных моделей распространения примесей и при оценке экологической обстановки в условиях плотной и особенно многоэтажной застройки, этих данных явно недостаточно. Поэтому в г. Москве с ноября 2006 г. в рамках городской системы контроля загрязнения атмосферного воздуха [23] был организован на телебашне Останкино мониторинг вертикальных распределений некоторых газовых компонентов загрязнения атмосферного воздуха [24]. Мониторинг вертикальных профилей газовых компонентов загрязнения атмосферного воздуха над городом совместно с мониторингом газовых и аэрозольных компонентов на 30 постах в г. Москве и 2 постах за пределами Московского мегаполиса дают уникальную информацию о сложных процессах переноса и трансформации примесей в воздушном бассейне большого мегаполиса.

В настоящей статье проведен статистический анализ вариаций в зимний сезон разовых и среднесуточных концентраций оксида углерода, т.е. угарного газа (CO), и концентраций оксидов азота NO_x (сумма концентраций оксида NO и диоксида азота NO₂). Указанные концентрации обозначим как [CO] и [NO_x]. Выбор угарного газа в качестве

* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова; Петр Сергеевич Глядков (gengor@ifaran.ru); Алексей Владимирович Карпов (karпов@ifaran.ru); Александра Борисовна Колесникова; Елена Александровна Лезина.

объекта исследования объясняется, в частности, его химической устойчивостью (большим временем жизни). Достаточно консервативна и суммарная концентрация оксидов азота NO_x . Сравнение вариаций двух различных компонентов загрязнения дает возможность получать более надежные результаты о слабо изученных закономерностях изменчивости примесей в пограничном слое городской атмосферы. Необходимость контроля вариаций как разовых, так и среднесуточных концентраций обусловлена соответствующими экологическими нормативами на содержание вредных примесей в атмосферном воздухе (ПДК_{мр} и ПДК_{сс} соответственно). В частности, для угарного газа предельно допустимая максимальная разовая и среднесуточная концентрации равны 5 и 3 мг/м³.

Мониторинг газового загрязнения пограничного слоя атмосферы в г. Москве

В Москве в рамках городской системы экологического мониторинга с ноября 2006 г. ведутся измерения концентраций газовых примесей атмосферного воздуха, включая концентрации угарного газа, оксида NO и диоксида NO₂ азота, на трех уровнях телебашни Останкино (130, 248 и 348 м) и рядом с телебашней на высоте 2 м. Для измерения концентраций угарного газа используются газоанализаторы ML 980 («Monitor Labs», Франция). Измерения выполняются с интервалом 20 с. Погрешность единичного измерения равна ±0,25 мг/м³. Концентрация оксидов азота [NO_x] измеряется газоанализаторами ME 9841 («Monitor Europe») с такой же дискретностью и погрешностью ±1 мкг/м³. Первичные данные осредняются за 20-минутные интервалы и пересылаются в базу данных ГПУ «Мосэкомониторинг».

Кроме того, на телебашне Останкино измеряются концентрация озона (O₃) и суммарная концентрация углеводородов, для которых сведения о приборах и погрешностях измерений приведены в [5].

Статистические характеристики вариаций концентраций угарного газа и оксидов азота

Предварительный анализ данных измерений показал, что, во-первых, концентрации угарного газа и оксидов азота NO_x варьируют в широких пределах не только в приземном слое атмосферы, но и на всех вышеуказанных уровнях в пограничном слое атмосферы, а во-вторых, в пограничном слое реализуются разнообразные профили не только разовых, но и среднесуточных концентраций CO и NO_x. Отсюда следует необходимость изучения вариаций концентраций на различных высотах, межуровневых статистических взаимосвязей [CO] и [NO_x], а также корреляций этих примесей на всех уровнях. В частности, необходимо рассчитать (в данном случае для зимнего сезона) основные

статистические характеристики этих вариаций концентраций анализируемых примесей [5, 25].

По данным измерений [CO] и [NO_x], в период с 16.12.06 по 28.02.07 на высотах $H = 2, 130, 248$ и 348 м были рассчитаны средние концентрации $\langle [C_i] \rangle$ ($i=1$ относится к угарному газу, а $i=2$ – к оксидам азота) и отклонения от средних $[c_{ik}]$ для разовых концентраций $[C_{ik}]$ (k – номер измерения), что позволило определить стандартные отклонения σ_i , параметры асимметрии $A_i = B_i / \sigma_i^3$ и эксцесса [25] $E_i = -3 + F_i / \sigma_i^4$, где B_i и F_i – средние значения сумм кубов и четвертых степеней для отклонений концентраций $[c_{ik}]$, а также коэффициенты вариаций $\gamma_i = \sigma_i / \langle [C_i] \rangle$ (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Статистические характеристики вариаций концентрации CO

$H, \text{ м}$	$\langle [CO] \rangle, \text{ мг/м}^3$	$\sigma_{CO}, \text{ мг/м}^3$	γ_{CO}	A_{CO}	E_{CO}
2	0,64	0,52	0,82	4,46	28,2
130	0,41	0,34	0,82	4,77	44,6
248	0,33	0,25	0,75	4,14	32,6
348	0,28	0,23	0,81	2,07	10,3

Таблица 2

Статистические характеристики вариаций концентрации NO_x

$H, \text{ м}$	$\langle [NO_x] \rangle, \text{ мг/м}^3$	$\sigma_{NO_x}, \text{ мг/м}^3$	γ_{NO_x}	A_{NO_x}	E_{NO_x}
2	63	70	1,11	4,21	27,2
130	37	36	0,99	4,93	43,1
248	17	20	1,16	5,43	47,2
348	22	31	1,41	5,70	66,7

В среднем в зимний сезон 2006/07 г. уровень загрязнения пограничного слоя угарным газом в районе расположения телебашни Останкино (табл. 1) оказался невысоким. Видно, что среднесезонная концентрация CO (рис. 1, кривая 1) монотонно уменьшается с высотой.

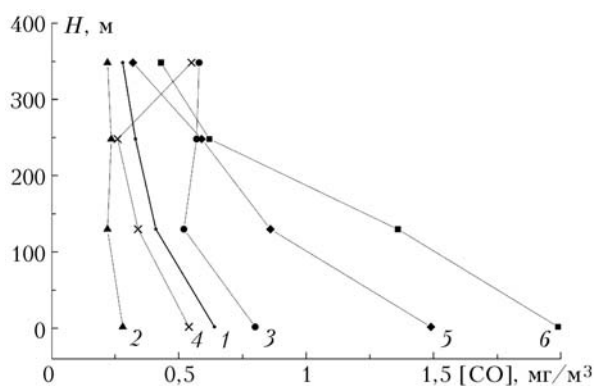


Рис. 1. Профили среднесуточных концентраций угарного газа (1 – средний за сезон; 2 – 3 января 2007; 3 – 13 января 2007; 4 – 26 декабря 2006; 5 – 8 февраля 2007; 6 – 12 февраля 2007 г.)

Уменьшается с высотой и стандартное отклонение для вариаций [CO], поэтому коэффициент вариаций γ_1 остается практически неизменным. Эм-

пирические распределения $[CO]$ в пограничном слое атмосферы на всех уровнях оказались асимметричными (см. табл. 1). Довольно большими оказались и эксцессы распределений. Из общего ряда выделяется уровень 348 м пониженными, по сравнению с другими уровнями, значениями асимметрии и эксцесса.

Концентрации NO_x на всех уровнях (см. табл. 2) варьируют в относительно более широких пределах, чем концентрации CO . В частности, коэффициент вариации γ_2 меняется на разных уровнях от 0,99 до 1,41, в то время как γ_1 — от 0,75 до 0,82. Для $[NO_x]$ изменчивость растет с увеличением высоты: максимальные значения γ , A и E для $[NO_x]$ имеют место на высоте 348 м. Отметим также, что среднесезонная концентрация NO_x на высоте 348 м больше, чем на высоте 248 м (рис. 2, кривая 1). Указанные особенности вариаций $[NO_x]$, по-видимому, свидетельствуют о существенном влиянии высотных источников оксидов азота.

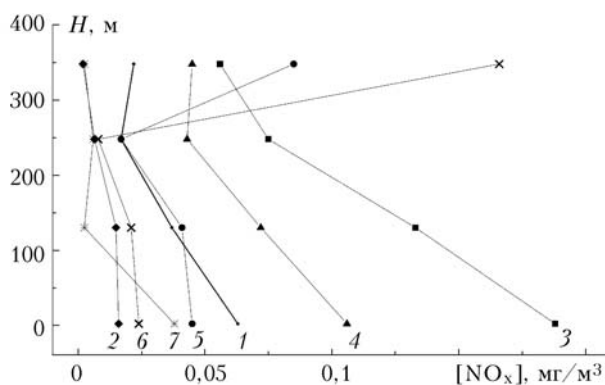


Рис. 2. Профили среднесуточной концентрации оксидов азота NO_x (1 — средний за сезон; 2 — 1 января; 3 — 26 января; 4 — 14 февраля; 5 — 9 января; 6 — 7 января; 7 — 23 февраля 2007 г.)

Более детальную информацию о вариациях $[CO]$ и $[NO_x]$ в пограничном слое атмосферы можно получить, анализируя соответствующие эмпирические функции распределения вероятностей w [25].

В качестве примера рассмотрим эмпирические функции распределения (ЭФР) w для $[NO_x]$ (рис. 3).

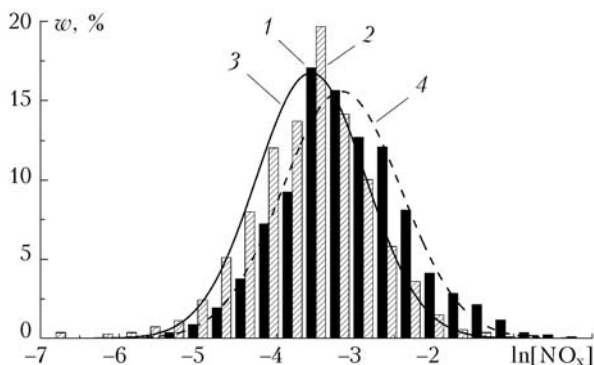


Рис. 3. Эмпирические функции распределения концентрации NO_x на высотах 2 м (1) и 130 м (2) и аппроксимирующие логонормальные распределения 3 и 4 соответственно

Вертикальные профили концентраций угарного газа и оксидов азота в пограничном слое городской атмосферы 789 9*

ЭФР $[NO_x]$ представлены для уровней 2 и 130 м. Видно, что эмпирические функции распределения w (1 и 2) удовлетворительно аппроксимируются логонормальными распределениями (кривые 3 и 4 соответственно):

$$p(y) = a\sigma^{-1} \exp\left\{-\frac{(y - \langle y \rangle)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1)$$

где a — константа нормировки; σ — стандартное отклонение для $\ln[NO_x]$; $\langle y \rangle = \langle \ln[NO_x] \rangle$ и $y = \ln[NO_x]$. Для высот $H = 2$ и 130 м константа $a = 11,3$ и 11,2%, стандартное отклонение $\sigma = 0,73$ и 0,67 (NO_x в mg/m^3) и $\langle y \rangle = -3,18$ и $-3,56$ соответственно. Нетрудно видеть, что при переходе от уровня 2 м к уровню 130 м доля больших концентраций заметно уменьшается, а эмпирическое распределение $w(\ln[NO_x])$ смещается в сторону меньших концентраций, оставаясь практически логонормальным.

На высотах 248 и 348 м эмпирические функции распределения $w(\ln[NO_x])$ (рис. 4) заметно отклоняются от логонормальных, особенно в области малых концентраций NO_x .

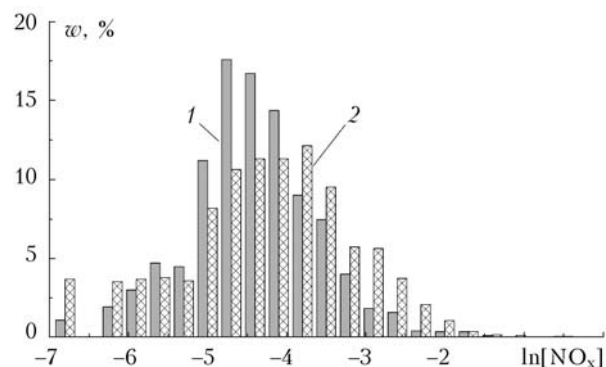


Рис. 4. Эмпирические функции распределения концентрации NO_x на высотах 248 (1) и 348 м (2)

Вероятность появления на высоте 348 м концентрации $NO_x > 18 mg/m^3$ составляет около 40%, а на высоте 248 только 25%. Это свидетельствует о заметном вкладе высотных источников в загрязненном воздухе на уровне 348 м. На высоте 348 м также наблюдается превышение (по отношению к уровню 248 м) не только средней концентрации (см. табл. 2), но и коэффициента вариаций $[NO_x]$, а также асимметрии и эксцесса.

Вертикальные профили среднесуточных концентраций угарного газа и оксидов азота

При разработке моделей распространения и трансформации примесей в городском пограничном слое необходимо иметь представление о вертикальном распределении примесей и вариациях вертикальных профилей. Анализ данных измерений разовых концентраций CO и NO_x на 4 уровнях показал, что

при 20-минутном осреднении наблюдаемых концентраций вертикальные профили указанных примесей разнообразны и сравнительно быстро трансформируются. Поэтому в данном разделе статьи анализируются вертикальные профили $[CO]$ и $[NO_x]$, осредненные за сутки.

Среднесуточные профили $[CO]$ и $[NO_x]$ также оказались довольно изменчивыми. С целью иллюстрации этой изменчивости на рис. 1 и 2 приведены примеры указанных профилей вместе со среднесезонными профилями $[CO]$ (см. рис. 1, кривая 1) и $[NO_x]$ (см. рис. 2, кривая 1) в диапазоне высот от 2 до 348 м (см. табл. 1 и 2). Среднесуточные профили $[CO]$ (см. рис. 1) отличаются как по общему содержанию CO в пограничном слое атмосферы, так и по скорости убывания концентрации с ростом высоты. Есть отдельные среднесуточные профили CO с минимумами концентрации на высотах 130 и 248 м (см. рис. 1, кривые 3 и 4).

Вертикальные среднесуточные профили $[NO_x]$ еще разнообразней (см. рис. 2). Важно отметить, что иногда появляются профили с максимальной концентрацией NO_x на уровне 348 м (см. рис. 2, кривые 5 и 6). В частности, 7.01.07 среднесуточная концентрация NO_x на уровне 348 м в несколько раз превышала соответствующую среднесуточную концентрацию на уровне 2 м (см. рис. 2, кривая 6). Дополнительную информацию о вариациях вертикальных профилей $[CO]$ и $[NO_x]$ можно получить, анализируя статистические взаимосвязи между вариациями концентраций на различных уровнях и между концентрациями разных примесей на одном и том же уровне.

Межуровневые корреляции концентраций угарного газа

Для того чтобы выявить различные режимы формирования загрязнения пограничного слоя атмосферы над городом, необходимо изучить статистические связи между вариациями концентраций примесей на различных высотах. При этом большой интерес представляют корреляции как между разовыми, так и между среднесуточными концентрациями газовых компонентов загрязнения атмосферного воздуха.

Рассмотрим сначала корреляцию между разовыми концентрациями угарного газа на разных уровнях в пограничном слое атмосферы. На рис. 5 показаны результаты синхронных измерений разовых концентраций CO на уровнях 2 и 130 м в зимний сезон 2006/07 г.

Видно, что большой разброс концентрации CO на уровне 130 м ($[CO]_{130}$) при фиксированных значениях $[CO]$ на уровне 2 м ($[CO]_2$) не позволяет с достаточно высокой точностью восстанавливать величину $[CO]_{130}$ по известному значению $[CO]_2$ методом регрессии [25]. Уравнение линейной регрессии (рис. 5, кривая 1) в рассматриваемом случае имеет вид

$$[CO]_{130} = 0,46 [CO]_2 + 0,12. \quad (2)$$

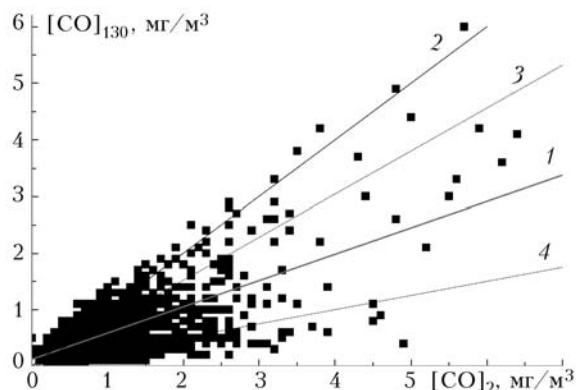


Рис. 5. Корреляционная связь между разовыми концентрациями угарного газа на высотах 2 и 130 м (1 – прямая регрессии; 2 – биссектриса I квадранта; 3 – прямая регрессии для ансамбля повышенных концентраций на высоте 130 м и 4 – для пониженных)

Используя линию регрессии (1), все необходимые ситуации можно разделить на случаи с повышенным отношением $\eta_{CO} = [CO]_{130} / [CO]_2$ и пониженным отношением указанных концентраций. Уравнения регрессии вида $[CO]_{130} = K_1 [CO]_2$ для этих двух классов ситуаций показаны на рис. 5 (3 и 4 соответственно). Для случаев повышенных концентраций CO на уровне 130 м ($\eta_{CO} \geq 0,45$) значение $K_1^{(1)} = 0,76$, а для случаев пониженных значений $[CO]_{130}$ $K_1^{(2)} = 0,24$. Интересно то, что первый режим чаще реализуется при повышенных концентрациях угарного газа в приземном слое атмосферы ($[CO]_2 > 4 \text{ мг/м}^3$).

Следует отметить, что разовые концентрации CO на уровне 130 м в пределах погрешности измерений практически не превышают значения соответствующих разовых концентраций на уровне 2 м. Одной из особенностей рассматриваемого статистического ансамбля является малая вероятность (см. рис. 5) превышения приземной концентрацией CO значения ПДК_{мр} = 5 мг/м³.

Корреляционные связи между разовыми концентрациями CO для других пар уровней оказались менее тесными. Соответствующие коэффициенты корреляции выделены курсивом (табл. 3).

Таблица 3
Коэффициенты межуровневой корреляции разовых и среднесуточных концентраций CO

H, м	2	130	248	348
2	1	<i>0,71</i>	<i>0,46</i>	<i>0,16</i>
130	0,84	1	<i>0,61</i>	<i>0,20</i>
248	0,68	0,69	1	<i>0,32</i>
348	0,24	0,24	0,26	1

Несколько более тесными являются межуровневые корреляции для среднесуточных концентраций CO. Коэффициенты межуровневой корреляции для этого случая выделены жирным шрифтом. Восстановить среднесуточную концентрацию CO по данным измерений $[CO]_2$ можно с помощью линейной регрессии (2). Сравнительно низкая корреля-

ция между разовыми концентрациями CO на разных уровнях свидетельствует о существовании нескольких различных режимов формирования вертикальных профилей концентрации угарного газа в пограничном слое атмосферы над г. Москвой.

Межуровневые корреляции концентраций оксидов азота

Межуровневые корреляции для вариаций $[NO_x]$ (табл. 4) оказались в среднем более тесными, чем аналогичные корреляции для вариаций $[CO]$.

Таблица 4

Коэффициенты межуровневой корреляции концентраций NO_x

H, м	2	130	248	348
2	1	<i>0,72</i>	<i>0,46</i>	<i>0,31</i>
130	0,84	1	<i>0,76</i>	<i>0,47</i>
248	0,72	0,91	1	<i>0,58</i>
348	0,51	0,64	0,68	1

Примечание. Курсивом выделены значения разовых концентраций, жирным шрифтом – значения среднесуточных.

Наибольшими как для разовых, так и для среднесуточных являются коэффициенты корреляции между вариациями $[NO_x]$ на уровнях 130 и 248 м.

Для оценки $[NO_x]_{130}$ по данным измерений $[NO_x]_2$ можно воспользоваться соотношением линейной регрессии (рис. 6, прямая 1):

$$[NO_x]_{130} = 0,38 [NO_x]_2 + 0,016. \quad (3)$$

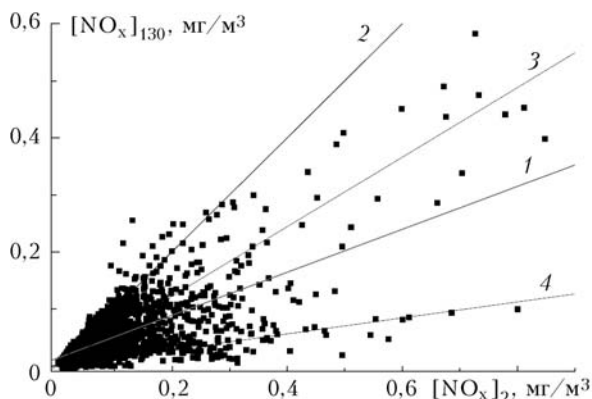


Рис. 6. Корреляционная связь между разовыми концентрациями оксидов азота NO_x на высотах 2 и 130 м (1 – прямая регрессии; 2 – биссектриса I квадранта; 3 – прямая регрессии для ансамбля повышенных концентраций на высоте 130 м и 4 – для пониженных)

Примерно с такой же погрешностью можно восстановить $[NO_x]_{130}$ с помощью соотношения

$$[NO_x]_{130} = K_2^{(0)} [NO_x]_2, \quad (4)$$

где $K_2^{(0)} = 0,40$. По аналогии со случаем угарного газа (см. рис. 5) получим соотношения линейной

регрессии для повышенных (рис. 6, прямая 3) и пониженных (прямая 4) отношений концентраций NO_x на уровнях 130 и 2 м. Коэффициенты регрессии в этих случаях равны: $K_2^{(1)} = 0,60$ и $K_2^{(2)} = 0,08$. Отметим, что превышения $[NO_x]_{130}$ над $[NO_x]_2$ наблюдаются только в области $[NO_x]_2 < 0,3$ мг/м³.

Корреляционные связи между концентрациями CO и NO_x в пограничном слое городской атмосферы

При разработке малопараметрических статистических моделей вертикальных распределений концентраций газовых компонентов загрязнения необходимо иметь информацию о корреляционных связях между вариациями концентраций CO и NO_x на одном и том же уровне.

На рис. 7 представлены результаты синхронных измерений $[CO]$ и $[NO_x]$ в приземном слое атмосферы в зимний сезон 2006/07 г. вблизи телебашни Останкино.

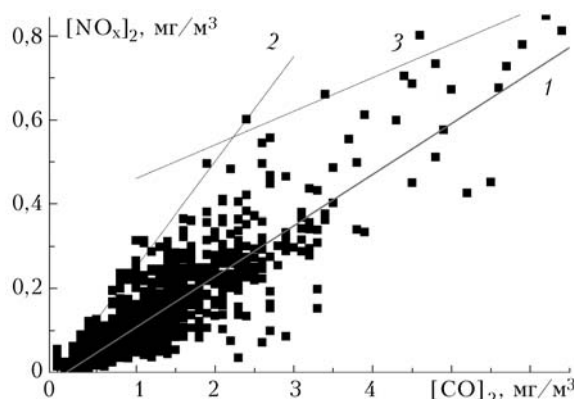


Рис. 7. Корреляционная связь между разовыми концентрациями угарного газа и оксидов азота NO_x на высоте 2 м: 1 – прямая регрессии; 2 и 3 – оценки верхних границ концентраций оксидов азота при малых ($< 2,0 \div 2,5$ мг/м³) и больших ($> 2,0 \div 2,5$ мг/м³) концентрациях угарного газа

Уравнение линейной регрессии для рассматриваемого случая имеет вид

$$[NO_x]_2 = 0,12 [CO]_2. \quad (5)$$

Нетрудно также найти оценки верхней границы восстанавливаемой концентрации NO_x при малых $[CO]_2 \leq 2,0 \sim 2,5$ мг/м³ (рис. 7, прямая 2) и при больших (прямая 3) значениях $[CO]_2$.

Из рис. 7 следует, что при больших значениях $[CO]_2$ для более точного восстановления $[NO_x]_2$ вместо (5) целесообразно использовать нелинейные регрессионные соотношения.

Сравнительно тесная корреляционная связь между разовыми концентрациями CO и NO_x в приземном слое атмосферы (коэффициент корреляции 0,91) в зимний сезон 2006/07 г. была присуща и вариациям концентраций на уровнях 130 и 248 м

(табл. 5). Несколько более тесной была корреляционная связь между вариациями среднесуточных концентраций CO и NO_x (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между разовыми и среднесуточными концентрациями CO и NO_x на одной высоте (Δt – время осреднения)

Δt	H, м			
	2	130	248	348
20 мин	0,91	0,90	0,80	0,38
24 ч	0,96	0,93	0,79	0,29

Из полученных результатов следует, что в первом приближении в зимний сезон можно использовать для восстановления вертикальных профилей [CO] и [NO_x] однотипные модели профилей. Наибольшее расхождение между этими моделями наблюдается на уровне 348 м.

Средний суточный ход концентраций CO и NO_x

При решении многих задач наряду со статистическими характеристиками необходимо знать закономерности временной изменчивости концентраций газовых компонентов загрязнения городской атмосферы. Особый интерес указанная информация представляет при исследовании режимов загрязнения в пограничном слое атмосферы. В данной статье анализируется внутрисуточная изменчивость концентраций CO и NO_x.

Основные особенности внутрисуточной изменчивости концентрации указанных примесей выявляются в их среднем суточном ходе. Средний суточный ход [CO] для зимнего сезона показан на рис. 8.

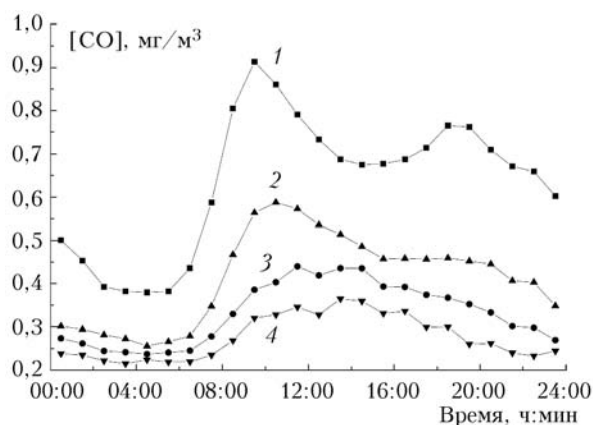


Рис. 8. Средний суточный ход концентрации угарного газа в зимний сезон на высотах 2 (1), 130 (2), 248 (3) и 348 м (4)

Обращает на себя внимание сходство среднего суточного хода [CO] на высотах 2 и 130 м. Утренний максимум [CO] на высоте 130 м наступает в среднем примерно на 1 ч позже, чем в приземном слое атмосферы.

Аналогичная картина (рис. 9) наблюдается и в среднем суточном ходе концентраций NO_x.

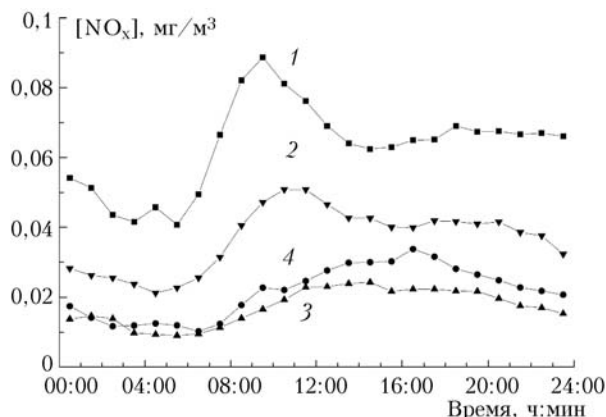


Рис. 9. Средний суточный ход концентрации оксидов азота NO_x в зимний сезон на высотах 2 (1), 130 (2), 248 (3) и 348 м (4)

Здесь утренний максимум на высоте 130 м наступает позже, чем на уровне 2 м, примерно на 1,5 ч. Если считать, что источники CO и NO_x находятся в приземном слое атмосферы (в основном это автотранспорт), то оказывается, что процесс перемешивания в нижнем слое городской атмосферы толщиной примерно 150 м в зимний сезон происходит сравнительно быстро (за 1,0–1,5 ч).

На уровнях 248 и 348 м утренний максимум концентрации CO и NO_x отсутствует. Слабо выраженный дневной максимум концентраций этих примесей сдвинут относительно утреннего максимума [CO] и [NO_x] в приземном слое атмосферы на 5–7 ч. Это, в частности, свидетельствует о медленном обмене воздуха между нижним (включая уровни 2 и 130 м) и верхним (включая уровни 248 и 348 м) слоями городской атмосферы в зимний сезон. Различия суточного хода концентраций CO и NO_x в верхнем (H ≥ 150–200 м) и нижнем слоях городской атмосферы обусловлены также влиянием высотных источников загрязнения городской атмосферы, о котором говорилось выше.

Из вышеизложенного следует, что в зимний сезон нижний слой (H < 150–200 м) можно рассматривать как слой быстрого перемешивания. Коэффициент вертикального турбулентного перемешивания примесей [26] в этом слое можно оценить по вертикальным градиентам концентраций CO и NO_x. Полученные в настоящей статье закономерности суточного хода концентраций CO и NO_x дадут возможность разрабатывать реалистические модели загрязнения пограничного слоя городской атмосферы в Москве.

Оценка параметров режима перемешивания в пограничном слое атмосферы

Общее содержание угарного газа Q₁ и оксидов азота Q₂ в пограничном слое можно оценить в приближении «ступенчатого» распределения этих при-

месей, включающего четыре слоя толщиной по 100 м с постоянными концентрациями, наблюдаемыми на высотах 2, 130, 248 и 348 м. Максимальные среднесезонные значения общего содержания достигаются во время утреннего максимума (см. рис. 8 и 9): $Q_1 \cong 0,20 \text{ г/м}^2$ и $Q_2 \cong 0,018 \text{ г/м}^2$. В период утреннего роста приземных концентраций приращение ΔQ_1 в период с 07:00 до 09:00 в среднем составляет $0,06 \text{ г/м}^2$.

Среднюю суммарную мощность β_1 источников СО в утренние часы можно оценить, предполагая, что, во-первых, источники СО находятся в приземном слое атмосферы, а во-вторых, изменение концентраций СО в пограничном слое атмосферы обусловлено только переносом СО за счет вертикального перемешивания. В рассматриваемый промежуток времени в соответствии с данными о среднем суточном ходе концентрации СО в пограничном слое атмосферы над городом (см. рис. 8 и 9) получаем $\beta_1 = 30 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) = 8,3 \text{ г}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})$, что меньше величины $100\text{--}200 \text{ г}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})$, полученных в [27] при анализе общего содержания СО над Москвой. Возможными причинами такого расхождения являются образование «шапки загрязнения» вблизи центра Москвы, где выполнялись измерения общего содержания СО [27], и относительно быстрое очищение пограничного слоя городской атмосферы вблизи телебашни Останкино.

Скорость вертикального переноса примесей v^* в нижней части пограничного слоя атмосферы в утренние часы можно грубо оценить по временной задержке ($1\div 1,5$ ч) наступления максимума концентрации на высоте 130 м по отношению к приземному слою: $v^* \cong 130 \text{ м}/5400 \text{ с} \cong 2 \text{ см/с}$. Вертикальные потоки G_1 угарного газа можно оценить из соотношения $G(H) = \langle C(H) \rangle v^*(H)$. На уровне 130 м в 08:00 имеем $G_1 = 0,35 \text{ мг}/\text{м}^3 \cdot 0,02 \text{ м/с} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \cong 25 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, что по порядку величины согласуется со средней мощностью источников СО β_1 в утренние часы.

Вертикальные среднесуточные градиенты концентраций СО и NO_x нетрудно оценить по их среднему суточному ходу (см. рис. 8 и 9). В частности, градиент концентрации СО $\psi_1 = \frac{dC_1}{dH}$ на высотах $100\text{--}200$ м в утренние часы по порядку величины составляет $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ мг}/\text{м}^4$. Для оксидов азота градиент на порядок меньше: $\psi_2 \cong 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ мг}/\text{м}^4$.

Коэффициент турбулентного перемешивания [26] K_t нетрудно оценить, если известны вертикальный поток G и вертикальный градиент концентрации: $G = K_t \psi$. Из сказанного выше следует, что на высотах $100\text{--}200$ м для зимнего сезона среднее значение коэффициента турбулентности K_t по порядку величины равно $5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Для получения более надежных оценок мощности источников газовых компонентов загрязнения необходим детальный анализ метеорологических факторов, влияющих на процессы переноса в пограничном слое городской атмосферы.

Основные результаты

1. По данным мониторинга в зимний сезон 2006/07 г. в Москве на телебашне Останкино рассчитаны статистические характеристики вариаций концентраций СО и NO_x на уровнях 2, 130, 248 и 348 м.

2. Получены вертикальные профили концентраций СО и NO_x . Среднесуточные концентрации указанных примесей в большинстве случаев монотонно убывают с увеличением высоты. Выявлено большое разнообразие среднесуточных профилей в пограничном слое атмосферы над городом. В некоторых случаях среднесуточные концентрации NO_x на уровне 348 м намного превышают соответствующие концентрации на более низких уровнях.

3. Проанализированы межуровневые корреляции между разовыми и среднесуточными концентрациями СО (и аналогично между концентрациями NO_x) в пограничном слое городской атмосферы. Наиболее велика корреляция между концентрациями примесей в нижней части пограничного слоя городской атмосферы. Слабее всего коррелирует концентрация угарного газа на уровне 348 м с приземной концентрацией.

4. Проанализированы статистические связи между концентрациями СО и NO_x в пограничном слое атмосферы. В приземном слое атмосферы концентрация NO_x в среднем составляет примерно 12% от концентрации угарного газа.

5. Для зимнего сезона рассчитан средний суточный ход концентраций угарного газа и оксидов азота на уровнях 2, 130, 248 и 348 м. Установлено, что утренний максимум концентраций СО и NO_x в среднем суточном ходе на уровне 130 м наступает на $1\text{--}1,5$ ч позже, чем в приземном слое. Этот факт свидетельствует о сравнительно быстром перемешивании примесей в нижней части пограничного слоя.

6. Выявлены существенные отличия среднего суточного хода как [СО], так и [NO_x] на уровнях 248 и 348 м от среднего суточного хода указанных примесей в нижней части пограничного слоя атмосферы. Максимальные концентрации СО и NO_x на уровнях 248 и 348 м достигаются на $5\text{--}6$ ч позже, чем в нижней части пограничного слоя, что свидетельствует о замедленном переносе примесей между уровнями 130 и 248 м.

7. Получены оценки параметров вертикального перемешивания примесей в утренние часы в слое быстрого перемешивания. Скорость вертикального переноса в этом слое примерно равна 2 см/с , а мощность источников угарного газа в приземном слое атмосферы составляет около $8 \text{ г}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})$.

В работе использованы результаты измерений концентраций газовых компонентов загрязнения атмосферного воздуха на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха ГПУ «Мосэкомониторинг».

Работа частично поддержана ИСТС (проект № 3254).

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 272 с.

2. *Сонькин Л.Р.* Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 227 с.
3. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения городов. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 184 с.
4. *Хуторова О.Г., Теттин Г.М.* Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782–790.
5. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин В.Е., Карпов А.В., Лезина Е.А.* Вариации газовых компонентов загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 176–190.
6. *Cass G.P., Crutzen P.Y., Ramanatan V.* The Asian Brown Cloud: Climate and Other Environment Impacts. Nairobi: UNEP, 2002. 53 p.
7. *Виноградова А.А., Федорова Е.И., Беликов А.А., Гинзбург А.С.* Временные изменения концентраций углекислого газа и метана // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 651–663.
8. *Исидоров В.А.* Органическая химия атмосферы. СПб.: Химиздат, 2001. 352 с.
9. *Алоян А.Е.* Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М.: Наука, 2008. 415 с.
10. *Мониторинг* качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека. Копенгаген: региональные публикации ВОЗ. Европейская серия. № 5. 2001. 293 с.
11. *Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д.* Влияние низкоуровневых струйных течений на ближний перенос атмосферных примесей: Тезисы докл. // XII Междунар. конф. молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Борок, май, 2008. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, 2008. С. 72–73.
12. *Гончаров В.П., Гряник В.М.* Классификация физических механизмов переноса примеси вихрями и аномальный перенос // Модели аномального переноса и трансформации примесей в атмосфере. М.: Институт физики атмосферы РАН, 1993. С. 5–10.
13. *Гончаров В.П.* Циркуляционные режимы переноса в циркулярно-вихревой модели уличного каньона // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1995. Т. 31. № 2. С. 205–210.
14. *Нутерман Р.Б., Старченко А.В.* Моделирование распространения загрязнения воздуха в уличном каньоне // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 649–657.
15. *Иванов В.Н.* Особенности условий возникновения и структуры конвективных ячеек в пограничном слое атмосферы // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. С. 467–489.
16. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова Н.Н., Голицын Г.С.* Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Докл. РАН. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
17. *Белан Б.Д.* Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1045–1054.
18. *Курбацкий А.Ф.* Противогradientный перенос тепла в атмосферном пограничном слое над шероховатой поверхностью // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 171–177.
19. *Пененко В.В., Пьянова Э.А., Зернова А.В.* Изучение процессов мезомасштабного переноса примесей с помощью моделей эйлера и лагранжева потоков // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 484–490.
20. *Белан Б.Д.* Самолетное экологическое зондирование атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 6. № 2. С. 205–222.
21. *Chien-Lung Chen, Ben-Jei Tsuang, Chia-Ying Tu, Wan-Li Cheng, Min-Der Lin.* Wintertime vertical profiles of air pollutants over a suburban area in central Taiwan // Atmos. Environ. 2002. V. 36. Iss. 12. P. 2049–2059.
22. *Зувев В.Е.* Лазерное зондирование тропосферы и поверхности Земли. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
23. *Бюллетень* о состоянии атмосферного воздуха в городе Москве в 2005 г. М.: Мосэкомониторинг, 2006. 72 с.
24. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Глядкин П.С., Колесникова А.Б.* Стратификация газовых компонентов загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы: Тезисы докл. // XIV Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, ноябрь, 2007. Томск: ИОА СО РАН, 2007. С. 20.
25. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Физматгиз, 1959. 436 с.
26. *Халтинер Дж., Мартин Ф.* Динамическая и физическая метеорология. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. 436 с.
27. *Казанский А.Б., Фокеева Е.В., Каллистратова М.А., Шурыгин Е.А.* Определение формы струи атмосферной примеси, возникающей над городом, мощности источника и концентрации CO // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2001. Т. 37. № 4. С. 507–512.

G.I. Gorchakov, E.G. Semoutnikova, P.S. Glyadkov, A.V. Karpov, A.B. Kolesnikova, E.A. Lezina.
Vertical profiles of the carbonic oxide and nitrogen oxide concentrations in the boundary layer of the urban atmosphere.

Vertical profile variability of carbonic oxide and nitrogen oxide concentrations in Moscow by the data acquired on the Ostankino mast in winter season have been studied. Correlations between the air pollutants at various heights were analyzed. The peculiarities of day variability of concentration of those two air pollutants in the lower and upper parts of the boundary layer were find out.