

Г.И. Горчаков, Б.А. Аношин, Е.Г. Семутникова

## Статистический анализ вариаций массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля в г. Москве

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 28.11.2006 г.

Проанализированы вариации массовых концентраций грубодисперсного аэрозоля в г. Москве. Рассчитаны основные статистические параметры вариаций концентраций. Представлены данные о внутрисуточной и сезонной изменчивости массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля.

### Введение

Аэрозольное загрязнение атмосферного воздуха в мегаполисах [1, 2] в настоящее время рассматривается как один из важнейших экологических факторов [3–5]. Все больше внимания уделяется и климатическим, в том числе, радиационным, эффектам аэрозоля. В атмосферной экологии одним из основных параметров, характеризующих аэрозольное загрязнение атмосферного воздуха, является массовая концентрация частиц аэрозоля [3] с размерами не более 10 мкм (PM10).

В настоящей статье проведен анализ результатов систематических измерений массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля  $M$ , или PM10, в г. Москве на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха ГПУ Мосэкомониторинг в 2004 г. Прослежена временная изменчивость массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля. Результаты статистического анализа вариаций концентраций газовых компонентов загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы представлены в работе [6].

### Методика измерений и аппаратура

Массовая концентрация частиц аэрозоля с размерами меньше 10 мкм измерялась радиоизотопным методом [7] по ослаблению  $\beta$ -излучения пробами аэрозоля, собираемого на периодически перемещаемую ленту волокнистого фильтра с помощью прибора ДАСТ (ООО «Мониторинг», г. Санкт-Петербург), предназначенного для измерения массовой концентрации пылевого (грубодисперсного) аэрозоля. В пылемере ДАСТ источником  $\beta$ -излучения является радиоактивный элемент протетий 147 (радионуклид  $^{147}_{61}\text{Pm}$ ).

В зависимости от уровня аэрозольного загрязнения и задаваемого времени отбора пробы верхний предел измерений у прибора ДАСТ может меняться

от 10 до 30 мг/м<sup>3</sup>. При мониторинге аэрозоля в г. Москве время осреднения составляло 20 мин. Расход воздуха через прибор равнялся 20 л/мин. Согласно паспортным данным основная погрешность прибора не превышала 20%. Однако при массовых концентрациях частиц грубодисперсного аэрозоля менее 10–20 мкг/м<sup>3</sup> время осреднения необходимо было увеличивать.

Следует отметить, что импакторы и циклоны не обеспечивают четкого разделения фракций частиц с размерами больше и меньше 10 мкм, так что в прибор могут попадать частицы аэрозоля размерами до 30 мкм [3]. Кроме того, важно иметь в виду, что пылемер ДАСТ не предназначен для измерения массовой концентрации субмикронной фракции аэрозоля.

### Статистические характеристики вариаций концентрации грубодисперсного аэрозоля

Для статистического анализа были взяты данные измерений массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля  $M$  (или PM10), полученные в 2004 г. на шести автоматических постах контроля качества атмосферного воздуха в г. Москве (Вешняки, Люблино, МГУ, Новокосино, ул. Народного ополчения и ул. Чайнова). Пример временной изменчивости среднесуточных концентраций грубодисперсного аэрозоля в январе – сентябре 2004 г. (Люблино) показан на рис. 1.

Характерной особенностью временного хода среднесуточных концентраций является их сильно выраженная синоптическая изменчивость. Представление о распределении вероятностей разовых массовых концентраций аэрозоля дает рис. 2.

Видно, что разовые концентрации в г. Москве редко превышают 120–130 мкг/м<sup>3</sup>. Более детальную информацию об эмпирических функциях распределения  $M$  можно получить, рассчитав основ-

ные статистические характеристики [8] вариаций этой величины.

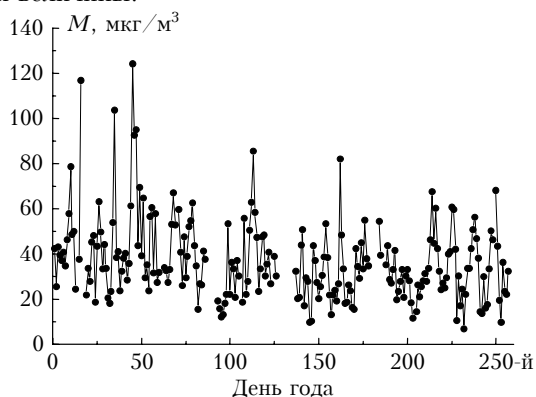


Рис. 1. Временная изменчивость среднесуточной массовой концентрации частиц с размерами меньше 10 мкм (PM10) по данным измерений в 2004 г. в г. Москве (Люблино)

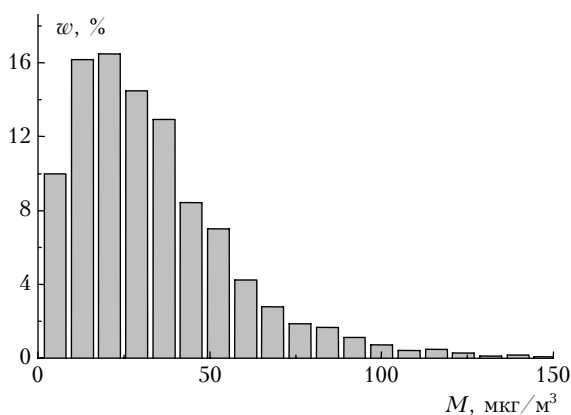


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения массовой концентрации аэрозоля (PM10) по данным измерений на посту Вешняки (Москва, 2004 г.)

Наряду со среднегодовыми концентрациями  $\bar{M}$  и соответствующими стандартными отклонениями  $\sigma$  были рассчитаны [8] значения асимметрии ( $k$  – номер реализации)  $A = n^{-1}\sigma^{-3}\sum_k m_k^3$  и эксцесса  $E = -3 + n^{-1}\sigma^{-4}\sum_k m_k^4$  эмпирических распределений концентраций  $M$ , где  $n$  – число измерений и  $m_k = M_k - \bar{M}$  – величины отклонений массовых концентраций от соответствующих средних.

В таблице приведены результаты расчетов среднегодовых концентраций аэрозоля  $\bar{M}$ , коэффициентов вариаций [8]  $\gamma = \sigma/\bar{M}$ , параметров асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$  по данным измерений в 2004 г., а также среднесезонные массовые концентрации  $\bar{M}_1$  (зима),  $\bar{M}_2$  (весна),  $\bar{M}_3$  (лето) и  $\bar{M}_4$  (осень).

Видно, что среднегодовые концентрации  $\bar{M}$  варьируют в сравнительно узких пределах (32–36 мкг/м<sup>3</sup>), за исключением поста, расположенного

на территории Метеорологической обсерватории МГУ ( $\bar{M} = 24$  мкг/м<sup>3</sup>). Коэффициенты вариаций для вышеуказанных постов (см. таблицу) находятся в диапазоне от 0,71 до 0,98, параметры асимметрии – от 2,6 до 4,0, а значения эксцесса – от 14 до 44. Статистический анализ показал, что вариации концентраций грубодисперсного аэрозоля описываются с удовлетворительной точностью логнормальными распределениями.

Статистические характеристики концентрации грубодисперсного аэрозоля в 2004 г.

Пост	$\bar{M}$ ,	$\gamma$	$A$	$E$	$\bar{M}_1$	$\bar{M}_2$	$\bar{M}_3$	$\bar{M}_4$
	мкг/м <sup>3</sup>				мкг/м <sup>3</sup>			
Вешняки	35	0,81	2,6	14	31	33	44	33
Люблино	36	0,76	3,8	29	46	36	32	30
МГУ	24	0,77	4,0	44	22	27	27	24
ул. Народного ополчения	36	0,98	3,0	15	34	34	45	31
Новокосино	32	0,82	3,6	28	35	36	31	26
ул. Чайанова	33	0,71	2,7	23	43	33	29	26
Среднее	33	–	–	–	35	33	35	28

Статистические закономерности изменчивости массовой концентрации аэрозоля представляют большой интерес в связи с задачей статистического прогноза аэрозольного загрязнения городской атмосферы. При статистическом прогнозе межсуточной изменчивости  $M$  необходимо знать распределение вероятностей приращений среднесуточных концентраций аэрозоля. Представление об этом распределении для г. Москвы дает рис. 3, на котором показана эмпирическая функция распределений разности  $\Delta M$  среднесуточных концентраций для следующих друг за другом суток (вчера – сегодня), построенная по данным измерений на ул. Чайанова в 2004 г. Нетрудно видеть, что модуль этой разности редко превышает 30 мкг/м<sup>3</sup>.

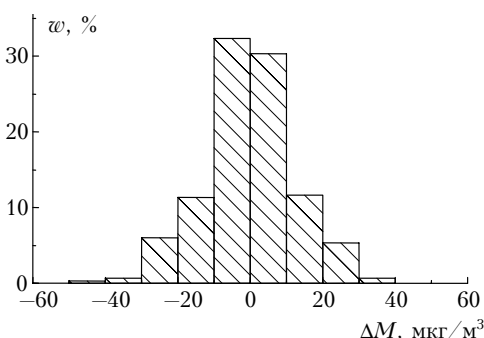


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения разности «соседних» (вчера–сегодня) среднесуточных концентраций аэрозоля

### Временная изменчивость массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля

Информация о сезонной изменчивости массовой концентрации  $M$  приведена в таблице. Согласно данным измерений  $M$  в 2004 г., в среднем по

городу сезонный максимум ( $35 \text{ мкг/м}^3$ ) был достигнут зимой и летом, а минимум ( $28 \text{ мкг/м}^3$ ) — осенью. Сезонный ход  $M$  для разных постов оказался существенно различным. На посту Вешняки и на ул. Народного ополчения максимальными оказались средние концентрации ( $44\text{--}45 \text{ мкг/м}^3$ ), а на ул. Чайнова и в Люблино — зимние ( $43\text{--}46 \text{ мкг/м}^3$ ). В МГУ во все сезоны средний уровень аэрозольного загрязнения в 2004 г. был низким, а в Новокосино — близким к среднему по городу.

Минимальные значения коэффициента вариаций наблюдались летом ( $0,56\text{--}0,62$ ) на всех постах кроме ул. Народного ополчения, где этот факт имел место зимой ( $0,76$ ), а максимальные — осенью ( $0,82\text{--}1,02$ ) и зимой в Люблино ( $0,80$ ) и в Новокосино ( $1,14$ ). Параметр асимметрии также достигал минимума летом ( $1,10\text{--}1,82$ ) на четырех постах, зимой на ул. Народного ополчения ( $1,36$ ) и весной на ул. Чайнова ( $0,90$ ). Максимальные значения параметра асимметрии в 2004 г. были зарегистрированы в осенний сезон ( $3,36\text{--}7,72$ ) и только в Новокосино ( $3,92$ ) зимой.

Более подробно особенности годового хода концентраций грубодисперсного аэрозоля показаны на рис. 4. Наибольший размах среднемесячных концентраций аэрозоля наблюдался на ул. Народного ополчения (кривая 1). Слабая изменчивость среднемесячных концентраций, за исключением положительных аномалий в январе и феврале, имела место на ул. Чайнова (кривая 3).

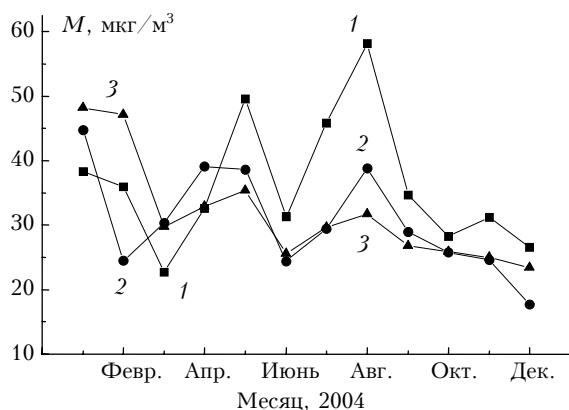


Рис. 4. Годовой ход массовой концентрации аэрозоля (PM10) в г. Москве (2004 г.) по данным измерений на ул. Народного ополчения (1), в Новокосино (2) и на ул. Чайнова (3)

О внутрисуточной изменчивости массовой концентрации  $M$  грубодисперсного аэрозоля можно судить по среднему суточному ходу этой величины. Суточный ход  $M$  для четырех сезонов года был осреднен по всем шести постам. Результаты расчетов суточного хода представлены на рис. 5.

Зимой на суточном ходе массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля наблюдаются два максимума: утренний и дневной. Поскольку глубина минимума между ними сравнительно невелика, эти максимумы можно объединить в один. Кроме того, в зимний сезон имеет место вечерний мини-

мум концентрации аэрозоля. Весной наблюдается широкий утренний максимум, а летом — дневной. Весной наряду с утренним максимумом отчетливо выражен дневной минимум. Заметно отличается от прочих сезонов осенний суточный ход  $M$  прежде всего широким ночным минимумом. В дальнейшем важно оценить масштаб межгодичной изменчивости среднего суточного хода  $M$  для разных сезонов.

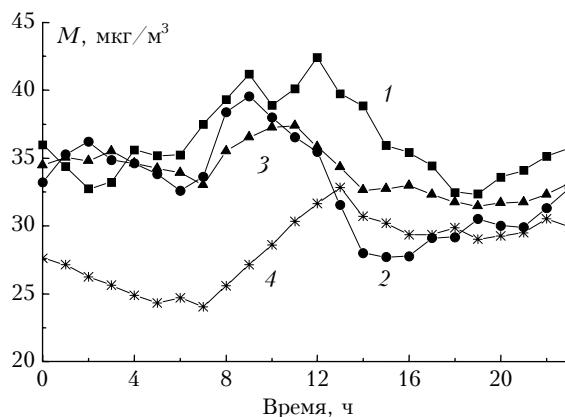


Рис. 5. Средний суточный ход массовой концентрации аэрозоля (PM10) в г. Москве зимой (1), весной (2), летом (3) и осенью (4)

Средний суточный ход  $M$  можно использовать как один из предикторов при прогнозе среднечасовых концентраций грубодисперсного аэрозоля. Однако значительный вклад нерегулярной компоненты в общую дисперсию вариаций среднечасовых концентраций  $M$  снижает эффективность статистического прогноза внутрисуточной изменчивости грубодисперсного аэрозоля. Поэтому более успешным должен быть «четырёхпериодный» прогноз внутрисуточной изменчивости  $M$ , который можно свести к статистической оценке средних утренних, дневных, вечерних и ночных концентраций по известным значениям среднесуточных концентраций аэрозоля. В качестве примера реализации четырехпериодного статистического прогноза концентрации грубодисперсного аэрозоля на рис. 6 представлена корреляционная диаграмма  $M_1 - M$ , построенная по данным измерений на ул. Чайнова в 2004 г., где  $M_1$  — средние ночные концентрации (период времени с 22:00 до 4:00) и  $M$  — соответствующие среднесуточные концентрации.

Прямая регрессии  $M_1 = 1,1M$  (кривая 1 на рис. 6) позволяет определять наиболее вероятные значения  $M_1$ , а прямая  $M_1 = 1,1M + b$ , где  $b = 20 \text{ мкг/м}^3$  (кривая 2 на рис. 6) дает возможность оценить максимальные ночные концентрации грубодисперсного аэрозоля.

Уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха в г. Москве сопоставим с уровнем аэрозольного загрязнения других городов Европы. Так, например, по данным измерений в Лондоне (1986–1989 гг.) в центре города вблизи магистралей среднегодовая массовая концентрация аэрозоля (PM10) достигала  $60\text{--}100 \text{ мкг/м}^3$ , а в других районах

города не более  $40 \text{ мкг/м}^3$  [9]. Превышения уровня  $100 \text{ мкг/м}^3$  (1992 г.) в Лондоне, Бирмингеме, Кардиффе и Ньюкастле наблюдались менее чем в 1% случаев [9].

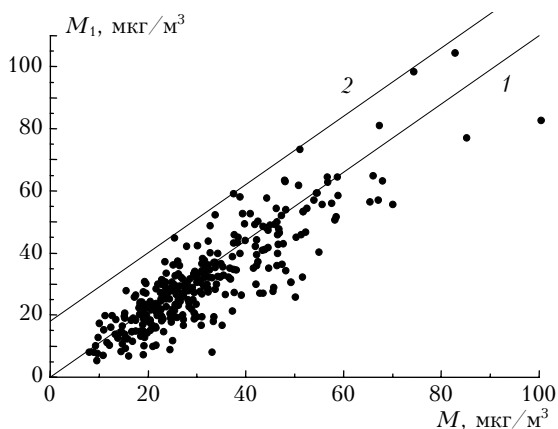


Рис. 6. Корреляционная связь между концентрацией аэрозоля  $M_1$  в ночное время и среднесуточной концентрацией  $M$  по данным измерений в г. Москве (2004 г.) на ул. Чайнова (1 – прямая регрессии, 2 – граница максимальных «ночных» концентраций)

Зимой в Праге [3] (январь 1997 г.) в центре города среднесуточные концентрации грубодисперсного аэрозоля (PM10) достигали  $150\text{--}230 \text{ мкг/м}^3$ , в районах с интенсивным движением транспорта  $130\text{--}200 \text{ мкг/м}^3$  и в жилых районах  $90\text{--}130 \text{ мкг/м}^3$ .

В Германии [10] по данным измерений в городских агломерациях средняя концентрация грубодисперсного аэрозоля снизилась примерно с  $200 \text{ мкг/м}^3$  в 1969 г. до  $80 \text{ мкг/м}^3$  в 80-х гг. прошлого века.

По данным выборочных измерений в Лондоне [9] в мае–июне 1992 г. среднечасовые концентрации аэрозоля (PM10) варьировали в пределах от 29 до  $49 \text{ мкг/м}^3$ . Максимальные среднечасовые концентрации аэрозоля наблюдались утром в 9 ч ( $44 \text{ мкг/м}^3$ ) и днем в 14 ч ( $49 \text{ мкг/м}^3$ ), а минимальные в 11 ч ( $36 \text{ мкг/м}^3$ ) и ночью в 3 ч ( $28,5 \text{ мкг/м}^3$ ).

## О пространственном распределении грубодисперсного аэрозоля в г. Москве

Выше было показано, что на масштабе сезонной изменчивости наблюдаются значительные вариации пространственного распределения грубодисперсного аэрозоля в городе. Дополнительные различия пространственных распределений  $M$  появляются при переходе к меньшим временным масштабам.

В связи с задачей прогноза аэрозольного загрязнения городской атмосферы представляют интерес корреляционные связи между вариациями среднесуточных концентраций аэрозоля в разных районах города. В качестве примера на рис. 7 показана корреляционная диаграмма  $M_B - M_D$  сред-

несуточных концентраций грубодисперсного аэрозоля на постах Вешняки и Люблино.

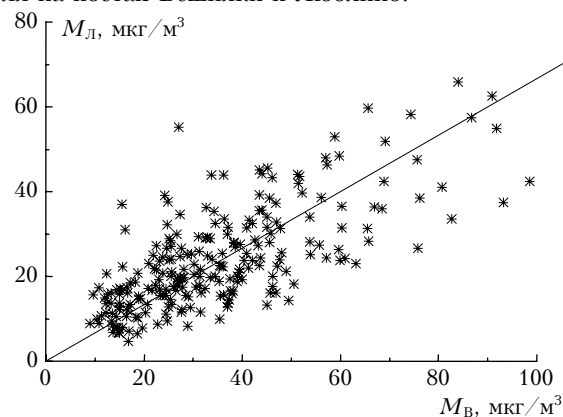


Рис. 7. Корреляционная связь между среднесуточными концентрациями аэрозоля (PM10) по данным измерений в г. Москве (2004 г.) на постах Вешняки ( $M_B$ ) и Люблино ( $M_D$ )

Коэффициент корреляции  $\rho(M_B, M_D)$  оказался равным 0,48. Похожие корреляционные диаграммы и близкие значения коэффициентов корреляции получаются и для других пар постов. Погрешность статистического прогноза  $M_B$  по известным значениям  $M_D$  может быть сравнительно большой. В частности, недооценка уровня загрязнения по данным измерений  $M$  на другом посту может достигать  $20 \text{ мкг/м}^3$  и более.

## Заключение

Итак, сформулируем основные результаты работы.

1. По данным измерений в г. Москве рассчитаны статистические характеристики вариаций концентрации грубодисперсного аэрозоля.
2. Проанализирован суточный и годовой ходы массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля.
3. Продемонстрированы возможности четырех-периодного внутрисуточного прогноза массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля.
4. Получены оценки степени корреляционных связей среднесуточных концентраций грубодисперсного аэрозоля в разных пунктах города.

В статье использованы данные измерений в г. Москве на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха ГПУ «Мосэкомониторинг».

1. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения городов. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 184 с.
2. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. М.: Мир, 1980. 540 с.
3. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека // Региональные проблемы ВОЗ. Европейская серия. Копенгаген. 2001. № 5. 293 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. Cass G.P., Crutzen P.J., Ramanathan V. et al. The Asian Brown Cloud: Climate and other Environment Impacts. Nairobi: UNEP, 2002. 53 p.
6. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В., Карпов А.В., Лезина Е.А. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 176–190.
7. Палкин А.Б., Кудряшов В.В. Непрерывный контроль концентрации пылевого аэрозоля радионуклидным методом // Окружающая среда – человек, ресурсосбережение. Т. 1. № 2. Алчевск: ДТМИ, 1999. С. 110–127.
8. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Физматгиз, 1959. 436 с.
9. United Kingdom. First Report of the Quality of Urban Air Review Group. London: Department of the Environment, 1993. 201 p.
10. Facts and Figures on the Environment of Germany. Berlin: Federal Environmental Agency, 1990. 238 p.

*G.I. Gorchakov, B.A. Anoshin, E.G. Semoutnikova.* **Statistical analysis of the mass concentration variations of the coarse aerosol in Moscow.**

Mass concentration variations of the coarse aerosol in Moscow have been analysed. Basic statistical parameters of the concentration variations have been calculated. Temporal variations of the coarse aerosol concentrations have been studied.