

А.А. Журавлев, Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова

Исследование антропогенной составляющей суточной изменчивости концентрации газовых составляющих и аэрозоля в городском воздухе

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

Представлены некоторые результаты исследования временных вариаций уровня загрязнения городского воздуха. База данных мониторинговых измерений концентраций примесных веществ (NO, NO₂, SO₂, CO, аэрозоля) и метеопараметров позволила исследовать суточную изменчивость концентраций загрязняющих веществ в атмосфере крупного города. Для различных примесей наблюдается несколько типов поведения кривой суточного хода, прослеживается зависимость от сезона. Выявлены утренний и вечерний максимумы концентраций всех исследуемых примесей. Обнаружена зависимость суточных вариаций концентраций загрязняющих веществ от некоторых метеопараметров, из которых наиболее существенное влияние оказывает скорость ветра. Рассмотренные формы и амплитуды суточных вариаций загрязнений воскресных и рабочих дней показало, что более ярко антропогенное воздействие выражено в летний период. Гистограммы распределения среднесуточных концентраций по дням недели демонстрируют нарастание концентраций некоторых примесей в течение рабочей недели и падение уровня загрязнения за выходные дни для теплого периода года, а также отсутствие подобной зависимости в холодный период.

Введение

Рост промышленного производства и транспортного потока в городской черте оказывает огромное влияние на экологическое состояние городов. Немалая часть загрязнений приходится на атмосферу. Хотя теме антропогенного загрязнения городского воздуха посвящено большое количество работ, тем не менее существуют значительные пробелы в вопросах переноса и рассеяния примеси, в численных оценках реального состояния воздуха в крупных городах.

Для исследования состояния атмосферного воздуха и динамики атмосферы достаточно давно применяются методы статистического анализа. Основываются подобные исследования на данных экологического мониторинга, накопленных за продолжительный промежуток времени. Значительная часть работ посвящена поиску закономерностей временных изменений концентраций воздушных примесей, поиску причин суточных вариаций концентраций газовых составляющих атмосферы и аэрозоля.

Так, в работе [1] представлен суточный ход счетной и массовой концентраций аэрозоля. Авторы определили, что максимум массовой концентрации аэрозоля в воздухе обнаруживается с 9 до 13 ч и с 19 ч вечера до полуночи. Оценено влияние прохождения холодного фронта на массовую концентрацию аэрозоля, и показано, что после установления антициклона концентрация аэрозоля плавно возрастает. В другой работе [2] в центре внимания находятся суточные вариации аэрозолеобразующих веществ. Исследования авторов показали, что максимум концентрации

аэрозолеобразующих веществ приходится на ночное время: 20 – 2 ч. В [3] значительное внимание уделено суточным вариациям счетной концентрации аэрозоля. Согласно приведенным результатам исследований счетная концентрация аэрозоля имеет ярко выраженный суточный ход. Повышение концентрации начинается в 6 ч утра и продолжается в течение 3 ч, стабилизируясь на уровне максимальных значений концентраций в промежутке времени с 10 до 17 ч, после чего следует плавный спад.

В работах [5–10] приводятся результаты исследования влияния основных параметров атмосферного пограничного слоя на приземные уровни концентраций примесей воздуха. К параметрам, характеризующим состояние атмосферного пограничного слоя, авторы относят: тип температурной стратификации атмосферы, высоту слоя перемешивания и скорость ветра. В ряде публикаций [5–7] получена высокая корреляция между концентрациями некоторых веществ и высотой слоя перемешивания. В то же время в [8, 9] отмечается значительная зависимость уровня загрязнения воздуха от скорости ветра.

Представленная работа основана на данных продолжительного мониторинга состояния городского воздуха. На протяжении 6 лет при нашем участии ведутся непрерывные наблюдения концентрации основных загрязняющих примесей в приземном слое атмосферы с помощью сети автоматических измерительных станций. Мониторинговая сеть из 5 станций расположена в г. Альметьевске [53° с. ш., 51° в. д.]. Станции измеряют концентрации газовых примесей: NO, NO₂, SO₂, CO, приземного аэрозоля и метеорологические параметры:

температуру, относительную влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра [4].

Поведение и сезонная зависимость суточного хода

Вначале данные были разделены на два сезона: зима (ноябрь – март) и лето (май – сентябрь) и рассчитаны средние за сезон концентрации измеряемых атмосферных примесей. Результаты обработки представлены в таблице.

Средние за сезон концентрации различных загрязняющих веществ

Вещество	Концентрации веществ, мг/м ³	
	Лето	Зима
NO	0,011	0,017
NO ₂	0,012	0,019
SO ₂	0,010	0,013
CO	1,48	3,02
Аэрозоль	0,054	0,029

Анализ среднего за сезон уровня загрязнения показал, что зимние концентрации таких химических веществ, как NO, NO₂, SO₂, CO, больше летних в среднем в 2 раза, в то время как концентрация аэрозоля больше летом, чем зимой.

Следующим шагом стали построение и исследование суточного хода концентраций измеряемых примесей. Статистическая надежность расчетов оценивалась путем построения доверительных интервалов с использованием коэффициента Стьюдента для вероятности 0,95. На всех графиках отображены доверительные интервалы.

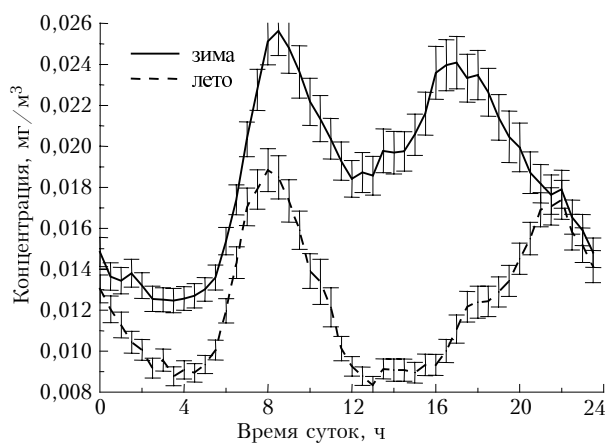
На рис. 1 представлен типичный вид суточных вариаций. В целом графики таких примесей, как NO, NO₂, CO и аэрозоля, имеют подобный друг другу вид (рис. 1,а).

В летний период наивысшие концентрации примесей наблюдаются с 7 до 10 утра (утренний максимум) и небольшое повышение концентрации в 21–22 ч (вечерний максимум). В ночное время, как и следовало ожидать, кривая суточного хода имеет глубокий минимум с 23 ч ночи до 5 ч утра (ночной минимум). Помимо того еще один минимум наблюдается с 12 до 17 ч дня (дневной минимум). Дневной минимум значителен по амплитуде и хорошо просматривается для этих примесей, часто принимая значения меньше среднесуточных.

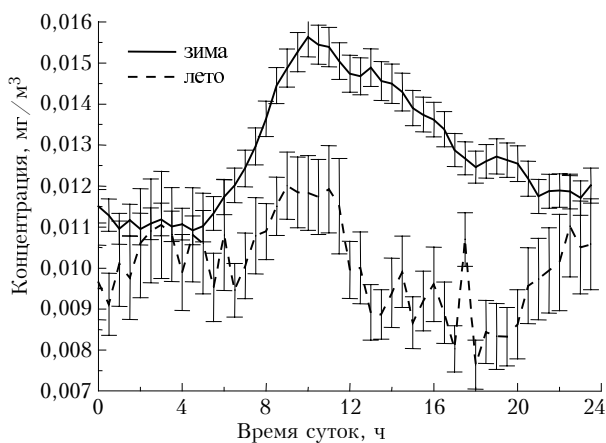
У SO₂ наблюдается несколько иная картина (рис. 1,б) – почти отсутствует дневной минимум, а утренний широкий максимум приходится на 8–12 ч. В целом концентрация SO₂ после 11 ч спадает, только в 14–15 и 19–20 ч наблюдаются небольшие повышения концентрации.

Помимо общей картины для каждой примеси наблюдаются и некоторые особенности. Так, у NO₂, CO и аэрозоля высота вечернего максимума близка по амплитуде к утреннему, тогда как у NO вечерний максимум выражен слабо. В зимний период картина не-

сколько меняется. У всех примесей наблюдаются значительное повышение вечернего максимума, который иногда превосходит по амплитуде утренний, его уширение и смещение к интервалу 15–19 ч. При этом дневной минимум становится менее выраженным и находится выше среднесуточного значения.



а



б

Рис. 1. Суточный ход концентрации: а – NO₂; б – SO₂

Поведение суточного хода концентраций примесей, описанное выше, в целом хорошо согласуется с общепринятыми представлениями об атмосферных процессах. Ночью, когда поступление загрязнений в атмосферу минимально, идет уменьшение концентраций. Далее в 6 ч быстро нарастает интенсивность транспортного потока, а в 8 ч начинают работать предприятия.

После достижения некоторого значения в 8 ч концентрации начинают убывать и стабилизируются после 12 ч на минимальном уровне в течение 4–6 ч летом и 2–3 ч зимой, после чего снова возрастают. При поверхностном рассмотрении довольно трудно объяснить происхождение дневного минимума, поскольку интенсивность поступления веществ в атмосферу в этот период почти не сокращается. Конечно, в обеденное время в городе несколько падает плотность транспортного потока, но это только снизило бы скорость нарастания концентраций.

Поиск причины такого поведения кривых суточного хода был продолжен рассмотрением суточной изменчивости метеопараметров (рис. 2,а). Ночью, с 22 до 6 ч утра, скорость ветра минимальна и составляет примерно 1,5 м/с, а днем с 13 до 17 ч принимает наибольшие значения – до 3 м/с. Утреннее нарастание скорости ветра начинается в 7 ч и продолжается до 12 ч дня, пересекая среднесуточный уровень в 9 ч.

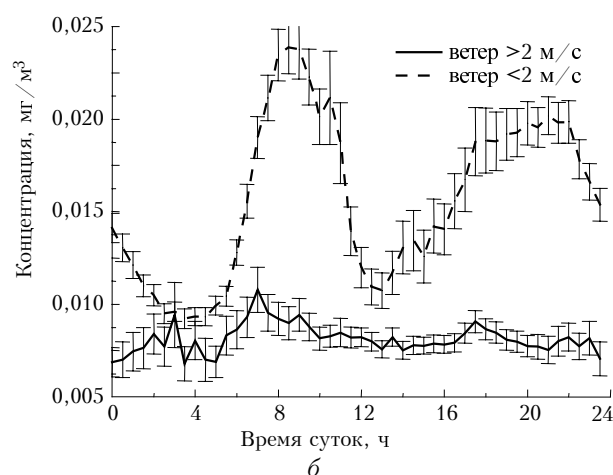
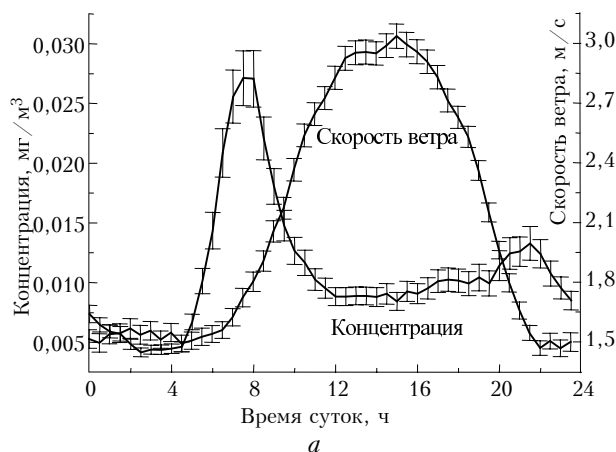


Рис. 2. Суточный ход концентрации NO и скорости ветра летом (а), концентрации NO₂ при разных скоростях ветра (б)

Влияние суточных вариаций величин основных метеопараметров на уровень загрязнения атмосферы исследовалось методом разделения исходных данных относительно порогового уровня значений метеопараметров. Обнаружено, что наиболее существенный фактор, приводящий к уменьшению концентраций примесных веществ в атмосфере, – это суточная изменчивость скорости ветра (рис. 2,а).

Хорошо известна связь между интенсивностью турбулентности и коэффициентом турбулентного перемешивания K , который в свою очередь пропорционален произведению скорости ветра на масштаб турбулентности [11]: $K \sim \bar{u}L$. Поэтому при неизменных масштабах неоднородностей в пограничном слое обнаруживается зависимость интенсивности турбулентности от скорости ветра.

Для проверки нашего предположения построены суточные хода концентраций примесей для разных диапазонов скоростей ветра: больше и меньше 2 м/с. При сильном ветре суточные вариации концентраций незначительно меняются около среднего значения и максимумы не проявляются. При дневном усилении ветра увеличивается интенсивность перемешивания, что, вероятно, приводит к понижению уровня загрязнения воздуха. При слабом ветре утренний и вечерний максимумы концентраций сохраняются, а дневной минимум стал несколько меньше по амплитуде, но не исчез (рис. 2,б). Таким образом, мы считаем, что уровень загрязнения воздуха во многом определяется скоростью ветра, что согласуется с выводами работ [8–10]. Существуют и другие причины дневного убывания концентрации. Некоторые авторы связывают его с дневным нарастанием температуры воздуха в приземном слое, с увеличением интенсивности конвективных потоков и разрушением слоя температурной инверсии.

Так, в работе [10] исследовалась зависимость концентрации аэрозоля и аэрозолеобразующих веществ в центре г. Москвы от типа воздушной массы, состояния атмосферного пограничного слоя, мощности источников загрязнения, интенсивности солнечной радиации, температуры и влажности. Исследователи выявили существенную зависимость концентраций от сезона, от типа господствующей воздушной массы, скорости ветра. Значительное влияние оказывает и тип температурной стратификации.

Исследование антропогенной составляющей суточного хода

С целью исследования свойств антропогенной составляющей для каждой примеси были построены графики суточного хода, усредненные по пяти рабочим дням и по двум выходным. На рис. 3 для примера представлены графики суточного хода рабочих и выходных дней для NO.

Из рис. 3 видно, что кривые суточного хода рабочих и выходных дней слабо различаются по форме, но проявляют весьма значительные амплитудные различия.

У примесей NO₂ и аэрозоля по выходным дням наблюдаются ощутимый сдвиг вечернего максимума на 1–1,5 ч позже и сохранение его интенсивности на уровне рабочих дней. Вместе с тем интенсивность утреннего максимума в выходные составляет лишь 40–60% от амплитуды максимума по рабочим дням и в результате вечерний максимум по выходным дням превосходит утренний для указанных примесей. Для CO в зимнее время сдвиг вечернего максимума не наблюдается, но отношение его интенсивности к интенсивности утреннего максимума еще более значительное. У SO₂ происходит понижение концентрации в выходные дни примерно в 2 раза по сравнению с концентрациями в рабочие дни.

Было выдвинуто предположение, что в атмосфере должны наблюдаться накопление загрязнений

в течение рабочей недели и спад концентраций за выходные дни. Поэтому для каждой примеси строились

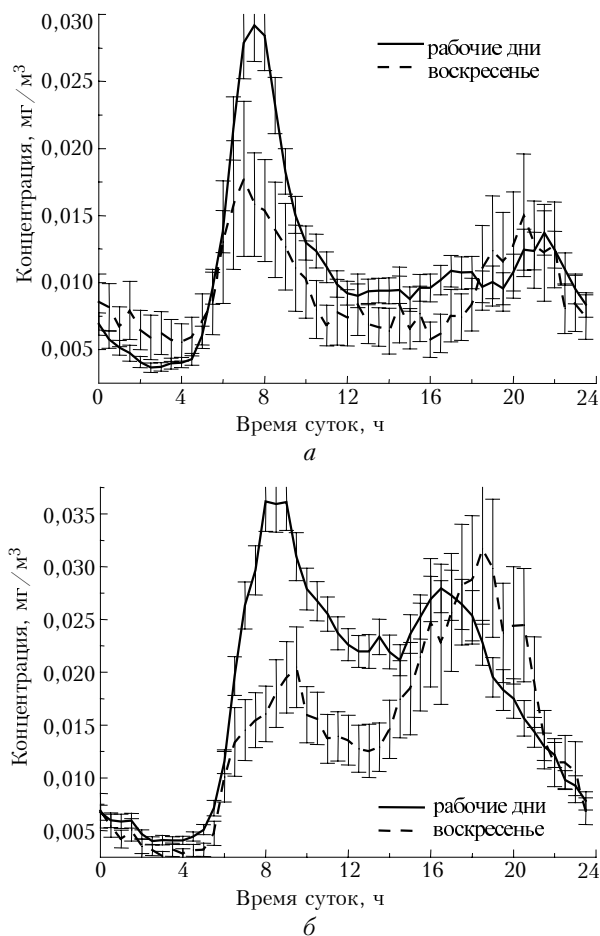


Рис. 3. Суточный ход концентрации NO летом (а) и зимой (б) с вычтенным среднесезонным значением

усредненные за сезон графики суточного хода каждого дня недели. Такой подход позволяет полнее оценить степень антропогенного влияния. Предполагалось, что суточный ход загрязнений в выходные дни менее всего подвержен антропогенному влиянию, а четверг или пятница более всего. Сравнение кривых этих дней дает нам наиболее яркую картину воздействия промышленности и транспорта на уровень загрязнения городского воздуха.

Каждая примесь имеет некоторые особенности своего поведения. В летний период для CO ярко просматривается зависимость амплитуды утреннего максимума от дня недели. Утренний максимум концентраций CO в выходные дни едва достигает уровня 2,25 мг/м³, тогда как в четверг и пятницу превышает значения 3,30 мг/м³. Но вместе с тем вечерний максимум, видимо, слабо связан с антропогенным фактором. Концентрации в воскресные дни в этот период времени примерно на 15% меньше, чем в рабочие, и в выходные дни они превосходят утренний максимум. Кроме того, вечернее повышение концентрации CO проявляется в выходные дни на 0,5 – 1 ч позже, чем в рабочие. В зимнее время зависимость от дня недели

просматривается крайне слабо, и вечерние концентрации воскресного дня приблизительно совпадают с уровнями концентраций в рабочие дни.

Несколько иную картину демонстрирует график суточных вариаций NO₂. Летом в течение всего воскресного дня концентрация этой примеси остается на уровне ночного минимума при значениях 0,005–0,007 мг/м³, несколько повышаясь лишь в 8 ч и в 21–22 ч до значений 0,010–0,012 мг/м³. По рабочим дням максимумы принимают значения порядка 0,040 и 0,035 мг/м³ утром и вечером соответственно. Смещения максимумов у NO₂ не наблюдаются. В зимний период зависимость от дня недели проявляется в незначительной степени. Утренний максимум в воскресенье составляет 2/3 от уровня рабочих дней, а вечерний – 5/6 от наблюдаемых концентраций в рабочие дни. Заметно смещение вечернего максимума в воскресные дни на 1–1,5 ч позже, чем в рабочие.

Поведение SO₂ похоже на рассмотренный выше суточный ход NO₂. В летнее время воскресные концентрации флуктуируют около значения 0,0012 мг/м³, несколько повышаясь в 12–13 ч. Зимой поведение суточных вариаций воскресного и рабочего дней повторяют друг друга с разницей лишь в среднесуточном уровне загрязнений, который в рабочие дни составляет 0,014 мг/м³, а в выходные в среднем 0,012 мг/м³. Можно предположить, что повышения концентрации SO₂ в большей степени, чем для других примесей, обусловлены деятельностью человека.

Аэрозоль ведет себя по-другому. Летом в выходные дни его концентрация после 6 ч утра продолжает убывать, опускаясь ниже ночного минимума, который обычно имеет значение 0,020–0,025 мг/м³, до значения примерно 0,016–0,018 мг/м³, и только в 10–11 ч начинается рост с заметными всплесками в 14.00, 17.30, 18.30, достигая максимума в 22 ч. Высота воскресного вечернего максимума имеет почти те же значения, что и в рабочие дни. Это позволяет предположить, что летний вечерний максимум не имеет ярко выраженной антропогенной природы и, вероятно, обусловлен изменчивостью метеорологических параметров. В противоположность ему утреннее повышение концентрации можно связать с деятельностью человека. Зимой концентрация аэрозоля ведет себя идентично другим примесям во все дни недели. Особенность состоит в том, что вечерний максимум, так же как и летом, не имеет зависимости от дня недели, а утренний остается зависимым от интенсивности деятельности человека и концентрации в воскресные дни обычно на 40% меньше, чем в рабочие.

Отличия в форме и амплитуде суточных вариаций концентраций SO₂, NO₂ и частично NO в холодный период могут быть обусловлены, помимо других факторов, отопительным сезоном, поскольку эти примеси в значительных количествах содержатся в выбросах ТЭЦ и котельных [10].

Построение гистограмм распределения среднесуточных концентраций по дням недели демонстрирует

степень накопления загрязнений в атмосфере в течение рабочей недели и скорость их убывания в выходные (рис. 4).

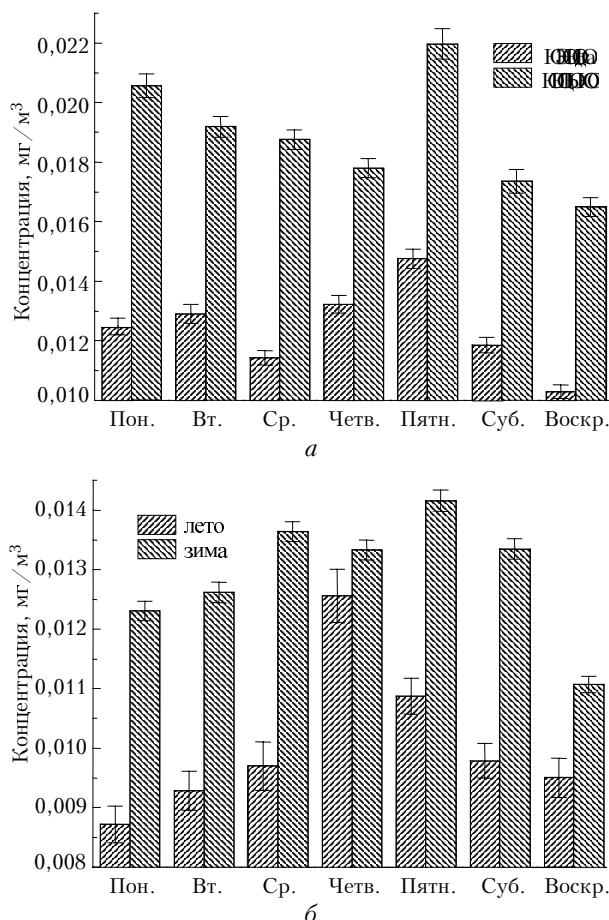


Рис. 4. Гистограммы распределения среднесезонных концентраций по дням недели: NO₂ (а) и SO₂ (б)

В летнее время гистограммы среднесуточных концентраций NO, NO₂ и SO₂ показывают достаточно устойчивое повышение концентрации в течение рабочей недели и быстрый спад в выходные. CO и аэрозоль не проявляют яркой зависимости от дня недели и флуктуируют в небольшом интервале. Зимой зависимость от дня недели наблюдается лишь для SO₂. Относительно поведения других примесей можно сказать, что максимальные среднесуточные концентрации наблюдаются чаще всего в пятницу, а минимальные в воскресенье. В остальном явная зависимость среднесуточной концентрации от дня недели не просматривается.

Заключение

База данных реальных измерений концентраций ряда примесных веществ и метеопараметров позволила глубже исследовать значительный спектр вопросов, связанных с загрязнением городского воздуха, распространением и временными вариациями загрязняющих веществ в атмосфере крупных городов. Ис-

следование показало, что суточные хода концентраций загрязняющих веществ в городском воздухе претерпевают значительные сезонные изменения. В зимнее время вместе с увеличением среднесезонного уровня химического загрязнения наблюдается уширение утреннего и вечернего максимумов, заметен сдвиг вечернего максимума к более раннему времени. Обнаружена зависимость суточных вариаций концентраций загрязняющих веществ от скорости ветра.

Рассмотрение формы и амплитуды суточных вариаций воскресных и рабочих дней показало, что более ярко антропогенное воздействие выражено в летний период. На наш взгляд, утренний максимум концентрации NO, NO₂, SO₂ и аэрозоля обязан своим происхождением антропогенному влиянию, максимум концентрации CO частично обусловлен деятельностью человека. Для SO₂ можно утверждать, что вечерние повышения концентрации могут быть следствием деятельности человека. На вечернем увеличении концентрации NO, NO₂, CO, видимо, сказываются какие-либо волновые процессы в атмосфере и изменчивость метеопараметров. Вечернее повышение концентрации аэрозоля трудно объяснить влиянием деятельности человека. Возможно, этот максимум образуется в результате воздействия естественных природных процессов и изменения метеорологических параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ, гранты № 02-05-06222, 01-05-64390, а также при поддержке Фонда НИОКР РТ, грант № 09-9.4-52/2001 ф.

1. Ruoss K., Karg E. and Brand P. Short variation of size distributions and concentrations of atmospheric aerosol particles // J. Aerosol Sci. 1991. V. 22. S. 1. P. 629.
2. Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Власенко А.Л., Козлов А.С., Малышкин С.Б. Определение концентрации аэрозольобразующих веществ в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6-7. С. 644.
3. Kikas U., Mirme A. and Tamm E. Variability of near-ground atmospheric aerosols // J. Aerosol Sci. 1991. V. 22. S. 1. P. 637.
4. Sschepovskih A.I., Safin R.N., Khutorova O.G. Seasonal variation of impurities in the troposphere from the measurements by automatic station Zelenodolsk // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. 1997. V. 3. № 3. P. 19-28.
5. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 168 с.
6. Гречко Е.И., Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Джола А.В., Пекур М.С., Тиме Н.С. Изучение влияния параметров атмосферного пограничного слоя на изменчивость содержания окиси углерода в центре Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1993. Т. 29. № 1. С. 11-17.
7. Красненко Н.П., Фурсов М.Г. Дистанционный акустический мониторинг полей метеоэлементов в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 652-654.
8. Пекур М.С., Локощенко М.А. Содарные наблюдения атмосферного пограничного слоя над центром Москвы // Тр. 11-й сессии РАО «Акустический мониторинг сред». М., 1993. С. 66-67.
9. Russell P.B., Uthe E.E. Acoustic and direct measurements of atmospheric mixing at three sites during an air

- pollution incident // *Atm. Environ.* 1978. V. 12. P. 1061–1074.
10. *Адикс Т.Г.* Сульфатный и нитратный аэрозоль в атмосфере Москвы. Влияние параметров атмосферного пограничного слоя // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2001. Т. 37. № 2. С. 223–234.
11. *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.

A.A. Zhuravlev, G.M. Teptin, O.G. Khutorova. **Characterizing the anthropogenic component in diurnal variability of concentrations of gaseous constituents and aerosol in urban air.**

Some results of studying temporal variations of the urban air pollution level are presented. A database of monitoring measurements of pollutant (NO, NO₂, SO₂, CO, aerosol) concentrations and meteorological parameters allowed us to study the diurnal variability of pollutant concentrations in the atmosphere of a big city. Several types of the diurnal behavior were observed for different pollutants, as well as some seasonal dependence. Morning and evening peaks were revealed in concentrations of all the studied pollutants. The diurnal variability of pollutant concentrations was found to depend on some meteorological parameters, first of all, wind velocity. Analysis of the shape and amplitude of diurnal variations of pollutant concentrations in working days and the weekend showed that the anthropogenic effect is most pronounced in summer. Histograms of distribution of daily mean concentrations over days of a week demonstrated their increase in working days and decrease in the weekend for the warm season and the absence of such dependence in the cold season.