

УДК 551.510.42

Суточный ход концентрации аэрозоля (PM₁₀) летом в Московском регионе

А.А. Глазкова¹, И.Н. Кузнецова¹, И.Ю. Шалыгина¹, Е.Г. Семутникова^{2*}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометцентр России»
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

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

Поступила в редакцию 24.01.2012 г.

Представлены типовой суточный ход концентрации (PM₁₀) в Московском мегаполисе летом, полученный по данным наблюдений на сети «Мосэкомониторинг», а также средний суточный профиль PM₁₀ при распространении продуктов природных пожаров летом 2007 и 2010 гг. Проводится сравнение среднего суточного хода PM₁₀ в Москве с данными зарубежного мониторинга. Рассматриваются причины повышения уровня PM₁₀ в периоды отсутствия пожаров. Выделены три типа аномального суточного хода PM₁₀: один из них обусловлен процессами накопления аэрозоля в приземном воздухе, другой – адвекцией, третий – усилением ветра перед атмосферным фронтом.

Ключевые слова: аэрозоль, типовой суточный ход, неблагоприятные метеорологические условия, аэрозоль при пожарах; aerosol, a typical diurnal variation, adverse meteorological conditions, fire aerosol.

Введение

Многокомпонентный по составу атмосферный аэрозоль естественного и антропогенного происхождения, влияя на радиационные потоки и облакообразование, а тем самым на погоду и климат, может нанести ущерб природным экосистемам [1, 2]. Аэрозольное загрязнение представляет угрозу здоровью людей, особенно частицы с аэродинамическим размером менее 10 мкм. Содержание аэрозоля (PM_{2,5}, PM₁₀) является одним из важнейших показателей, рекомендованных Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) для контроля качества воздуха. Для европейских стран предусмотрен норматив среднесуточной массовой концентрации частиц аэрозоля PM₁₀ (ПДК_{сс}) в приземном воздухе, который составляет 50 мкг · м⁻³ [3].

В развитых зарубежных странах мониторинг PM₁₀ осуществляется на густой сети станций непрерывного измерения: по данным EPA (Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>) на территории США – на 740 станциях, в Германии – около 270 [4], во Франции – около 400 [<http://acm.eionet.europa.eu/>]. У нас в стране регулярные наблюдения PM₁₀ проводятся в трех городах России – в Санкт-Петербурге [<http://gov.spb.ru/>] и Сочи [<http://www.feerc.obninsk.org/>], а также в Москве на станциях ГПУ «Мосэкомониторинг» [<http://www.mosecom.ru/>].

В зарубежных научных публикациях по данным многолетних наблюдений приводятся результаты исследования эмиссий и образования аэрозольных частиц, их трансформации и выведения из атмосферы, а также связей PM_{2,5} и PM₁₀ с погодными условиями, трансграничным и региональным переносами. Многие работы посвящены анализу изменчивости PM₁₀ в разных временных масштабах: изучаются многолетние тренды [5, 6] и характеристики сезонных и суточных колебаний [6–9]. Для исследования свойств атмосферных аэрозолей и определяющих их изменения процессов используются химические транспортные модели [10], многосторонний обзор которых делается в работе [11].

Начатые в 2004 г. измерения PM₁₀ в Москве позволили получить некоторые статистические характеристики изменчивости аэрозоля в Московском мегаполисе [1, 12, 13]. В настоящей статье обсуждаются результаты анализа внутрисуточных колебаний содержания аэрозоля в летние месяцы, а также факторы и причины, вызывающие нарушения типового суточного хода PM₁₀.

1. Используемые данные

Для расчетов использованы данные измерений концентрации PM₁₀ прибором ТЕОМ на автоматизированных станциях контроля за загрязнением атмосферы ГПУ «Мосэкомониторинг» летом 2007, 2009 и 2010 гг. на шести станциях Москвы (Марьинский парк, МГУ, Косино, Останкино, Спиридоновка, Кожухово) и на двух загородных станциях (гг. Зеленоград и Звенигород) на удалении 40–50 км от Москвы.

* Анна Александровна Глазкова (artamonova@mecom.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Ирина Юрьевна Шалыгина (shalygina@mecom.ru); Евгения Геннадьевна Семутникова (info@mosecom.ru).

Также использованы наблюдения PM_{10} на двух германских станциях г. Мюнхена [http://www.eea.europa.eu].

Для анализа использовались стандартные метеорологические наблюдения, а также данные радиозондирования и микроволновых измерений профилей температуры МТП-5 в центре Москвы и в ближнем пригороде (г. Долгопрудный). Идентификация переноса воздушных масс проводилась методом обратных траекторий [http://www.arl.noaa.gov].

2. Результаты и обсуждения

Содержание аэрозоля в приземном воздухе определяется природными и антропогенными эмиссиями, седиментацией, коагуляцией, вторичным образованием аэрозоля в ходе химических взаимодействий и зависит от метеорологических условий. Влияющие в совокупности факторы определяют его пространственно-временную изменчивость и наиболее ярко выраженную внутрисуточную цикличность.

Цель наших исследований — изучение и описание характерных признаков короткопериодных (суточных) флуктуаций PM_{10} в летний период в Московском регионе, а также установление причин наблюдавшихся аномалий в суточном ходе PM_{10} в виде временных сдвигов экстремумов или значительного превышения фонового уровня, включая эпизоды с распространением продуктов горения лесов и торфяников в регионе.

2.1. Типовой суточный ход концентрации PM_{10}

Прежде чем обсуждать характерные черты типового суточного хода PM_{10} в Москве, кратко рас-

смотрим результаты, полученные по данным наблюдений на зарубежных станциях мониторинга загрязнений. По данным измерений концентрации PM_{10} в 2007 г. на станциях Мюнхена (пригородная и городская вблизи автодороги) рассчитан средний суточный ход летом на двух германских станциях (рис. 1, а).

Если на фоновой станции, где концентрация PM_{10} на 5–10 $мкг \cdot м^{-3}$ меньше городской, суточные экстремумы выражены слабо, то характерными чертами суточного хода PM_{10} на городской станции являются утренний и вечерний максимумы и примерно одного уровня два минимума PM_{10} — ночной и послеполуденный. Аналогичные результаты для Германии приводятся в статье [14], где дается указание на то, что основным источником, определяющим максимумы PM_{10} , является автотранспорт. Похожая форма суточного хода аэрозоля получена и по наблюдениям на некоторых станциях Великобритании [15].

Надо отметить, что данные PM_{10} на европейских континентальных станциях служат для авторов своего рода основой для верификации результатов, полученных по наблюдениям в Московском регионе. На рис. 1 видна схожесть форм суточного хода на европейских станциях и в Москве; совпадают временные привязки внутрисуточных экстремумов концентрации PM_{10} . Типовой суточный ход PM_{10} в Московском регионе летом представлен на рис. 1, б; средние величины рассчитаны по данным измерений концентраций на станциях «Мосэкомониторинг» с дискретностью 20 мин летом 2010 г. в период до массового распространения продуктов лесных пожаров, которые привели к резкому увеличению аэрозольного загрязнения [16, 17]. Показанные на рис. 1, б величины 95%-го доверительного интервала отражают временные и пространственные флуктуации уровня PM_{10} в регионе.

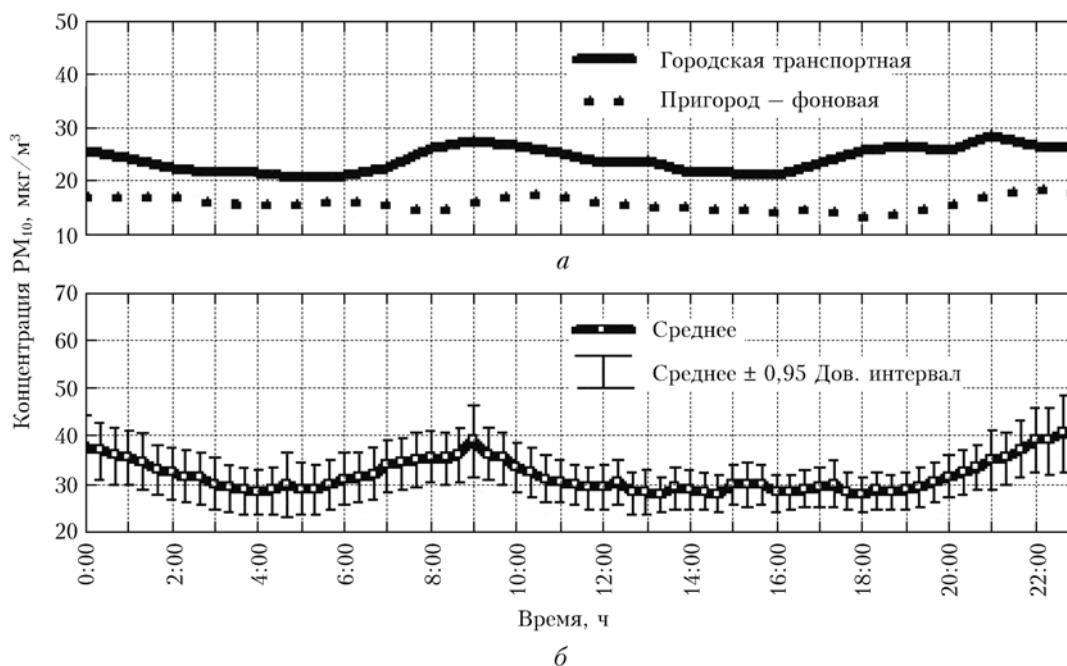


Рис. 1. Среднесуточный ход концентрации PM_{10} летом в Мюнхене (а) и Москве (б)

2.2. Аномалии суточного хода PM_{10} в Московском регионе

Анализ данных наблюдений летом 2007–2010 гг. позволил установить два основных вида аномалий суточного хода PM_{10} : а) временные смещения экстремумов, б) значительные отклонения от среднего/фонового уровня. На рис. 2 показано распределение усредненных за 20 мин концентраций и средних суточных концентраций на станциях Москвы.

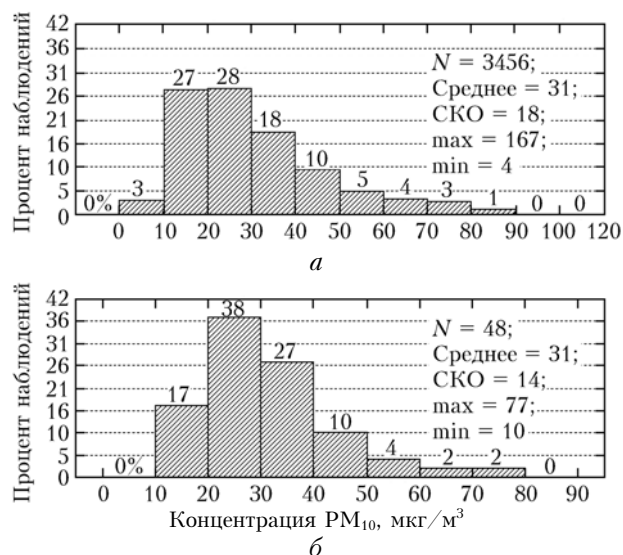


Рис. 2. Распределение средних за 20 мин концентраций (а) и среднесуточных концентраций (б) PM_{10} в летние месяцы. N – число случаев

Принимая, что аномальной является величина с повторяемостью не выше 5%, высокие аномалии в суточном ходе PM_{10} идентифицировались, если средняя за 20 мин концентрация превышала $65 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 2, а). Другим критерием аномалии была установленная ВОЗ величина предельной допустимой концентрации (среднесуточной – ПДК_{сс}) PM_{10} – $50 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. На рис. 2, б видно, что повторяемость концентраций больше этой величины в выборке не превысила 8%. Отметим, что в период до пожаров летом 2010 г. количество календарных дней с превышением ПДК_{сс} на станциях Московского региона составило 16.

Анализ условий значительного повышения концентраций PM_{10} позволил установить ряд факторов, способствующих или определяющих формирование аномально высокого содержания PM_{10} . Самые большие аномалии PM_{10} связаны с поступлением загрязненного воздуха из районов природных пожаров. Но чаще всего высокие аномалии PM_{10} в Московском регионе формируются при сочетании неблагоприятных для очищения воздуха метеорологических условий (НМУ). Реже всего причиной аномально высоких концентраций в приземном воздухе Москвы является дальний перенос аэрозоля – из районов почвенной засухи.

Наконец, четвертый, так называемый «предфронтальный», тип аномалии суточного хода PM_{10} ,

характерными чертами которого являются резкий рост содержания PM_{10} , обусловленный усилением скорости ветра в связи с приближением атмосферного, чаще всего холодного, фронта и резким спадом уровня аэрозольного загрязнения после прохождения фронта. Один из примеров предфронтальной аномалии показан на рис. 3, а, который дополнен данными измерений температуры в слое 0–600 м прибором МТП-5 в центре Москвы и в ближнем северном пригороде (рис. 3, б и в).

Прохождение холодного фронта (около 17 ч) ярко выражено на рис. 3, б и в (показано светлой стрелкой). Как показали данные наблюдений на метеостанциях, скорость ветра перед фронтом увеличивалась до $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Видно, что концентрация PM_{10} в 14–17 ч (перед фронтом) 13 июля в 2–3 раза выше, чем в эти часы накануне 12 июля. Следует отметить, что в данном случае предфронтальный рост концентраций сравним с уровнем PM_{10} при НМУ, наблюдавшимся ночью 12 июля (на рис. 3, а – черная стрелка).

2.3. Суточный ход PM_{10} при неблагоприятных для рассеивания примеси условиях

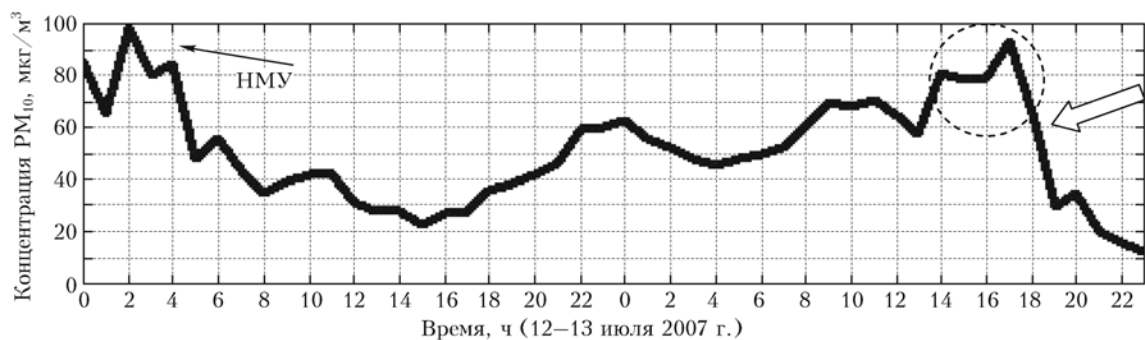
По нашим расчетам, летом повторяемость неблагоприятных для рассеивания примесей метеорологических условий в регионе увеличивается по сравнению с холодным периодом как следствие учащения застойных ситуаций, определяемых термической устойчивостью и ослаблением скорости переноса. Для случаев НМУ рассчитан средний по станциям города суточный ход концентраций PM_{10} (рис. 4, а).

Его характерными признаками являются 1) сдвиг (на 1 ч раньше) утреннего главного суточного максимума и его увеличение на $15\text{--}20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ по сравнению с максимумом в типовом суточном ходе, 2) приближение концентрации PM_{10} в послеполуденные часы к фоновому уровню как результат интенсивного конвективного перемешивания, способствующего притоку чистого воздуха из вышележащих уровней и удалению аэрозоля из приземного воздуха.

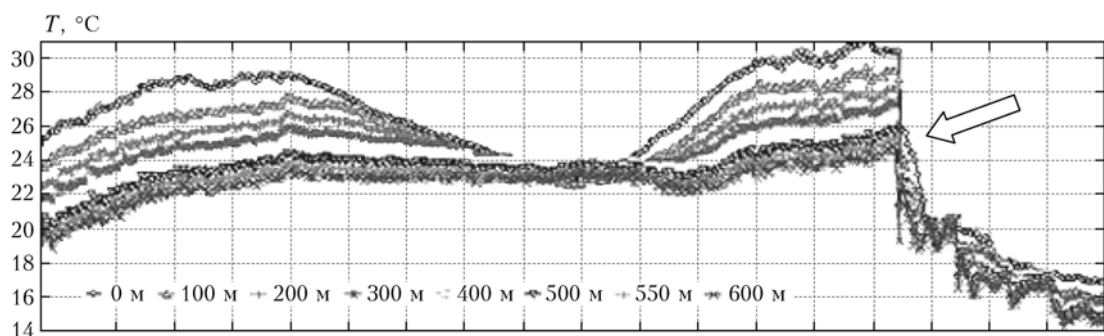
Отдельно отметим, что при НМУ повышенные концентрации PM_{10} наблюдаются в основном в период с 23 до 9 ч. Заметим, при суточном осреднении концентраций такие кратковременные летние эпизоды аэрозольного загрязнения могут остаться вне поля зрения при оценках воздействия загрязнений на биологические объекты, если проводятся сравнения с ПДК_{сс}.

2.4. Суточный ход PM_{10} в загрязненной продуктами природных пожаров воздушной массе

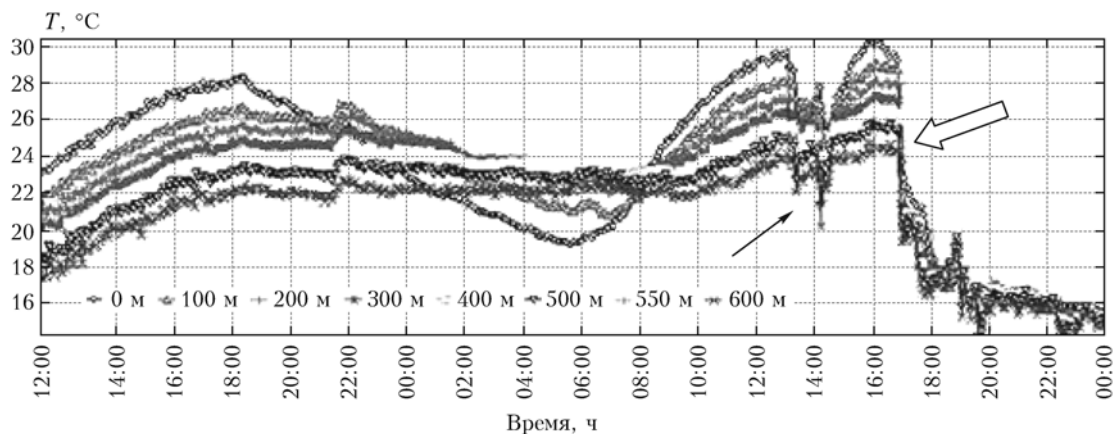
Хотя масштабные по времени и охваченным территориям лесные/торфяные пожары возникают значительно реже, чем наблюдаются НМУ, распространение продуктов горения способствует значительному ухудшению качества воздуха в мегаполисе. Анализ последствий самого масштабного за последние



a



б



в

Рис. 3. Временной ход средней по станциям региона концентрации PM_{10} (*a*), температуры воздуха в слое 0–600 м по данным МТП-5 в центре города (*б*) и ближнем пригороде (*в*) при НМУ (ночью 12 июля) и перед холодным фронтом (толстая стрелка) 13 июля 2007 г. Черная стрелка (*в*) – дождь в пригороде, которого не было в центре Москвы

годы горения лесов на европейской части России летом 2010 г. представлен во многих отечественных научных публикациях, например [16, 17]. Пожарам и обусловившим их атмосферным условиям посвящен отдельный выпуск журнала (Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6).

Отличия от типового суточного хода в период задымления были установлены по данным наблюдений в последние годы, когда в Московский регион поступали воздушные загрязнения от природных пожаров: кратковременные эпизоды 2007 г. (10–18, 21–23 августа) и 19 июля – 18 августа 2010 г. (самое сильное загрязнение за последние многие десятилетия). Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Суточный ход по данным 2007 г. почти повторяет типовой профиль PM_{10} , но «приподнят» над типовым на 30–50 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Суточный ход по данным 2010 г. резко отличается от типового не только превышением в 5–8 раз фоновых величин, но и формой суточного профиля PM_{10} . Суточный главный максимум смещен к полудню и сформирован не только предшествующим ночным накоплением аэрозоля при устойчивой стратификации, но в значительной мере притоком загрязнений из верхней части АПС во время его конвективного «прорыва» [18]. Как видно (рис. 4, *б*), не ночью или ранним утром, а в период с 8 до 13 ч аэрозольное загрязнение приземного воздуха достигало при пожарах экстремально высоких величин.

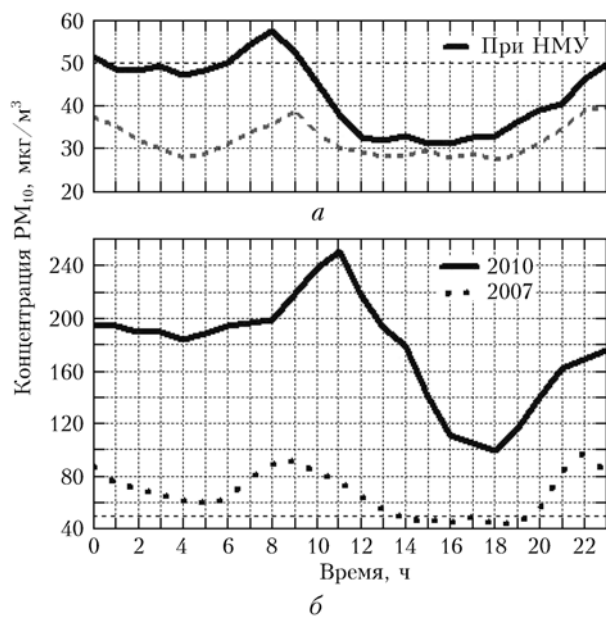


Рис. 4. Среднесуточный ход концентрации PM_{10} : а – при неблагоприятных для рассеивания метеорологических условиях; б – при поступлении дымов от природных пожаров

Другой особенностью суточного хода при пожарах является суженный по сравнению с типовым (растянутым) послеполуденный минимум PM_{10} . Все это указывает на то, что в период пожаров происходили значительные внутрисуточные колебания уровня PM_{10} : самое сильное аэрозольное загрязнение наблюдалось перед полуднем, оно ослабевало на короткое время после полудня (16–18 ч).

2.5. Суточный ход PM_{10} при адвекции аэрозоля

При анализе эпизодов с аномально высокими концентрациями PM_{10} (выше ПДК_{сс}) в 2010 г. наше внимание привлек эпизод 23–26 июня, когда аэрозольное загрязнение в 2–3 раза превысило фоновый уровень. Было установлено, что высокое содержание PM_{10} связано с поступлением воздушной массы на территорию Московского региона, которая перемещалась из районов Поволжья и Западного Казахстана, где до этого наблюдалась сильная почвенная засуха [18]. Похожий эпизод был идентифицирован также 26–31 мая 2007 г., когда в течение нескольких суток концентрация PM_{10} на всех станциях Москвы значительно превышала фоновые. На рис. 5 представлен средний суточный ход PM_{10} в названных эпизодах со средней суточной концентрацией больше ПДК_{сс}.

Его отличительные черты – сохранение высокого уровня в течение суток и слабовыраженные внутрисуточные колебания, определявшиеся локальными процессами перемешивания и регионального переноса.

Заключение

По данным непрерывных измерений концентрации PM_{10} на сети «Мосэкомониторинг» рассчитан

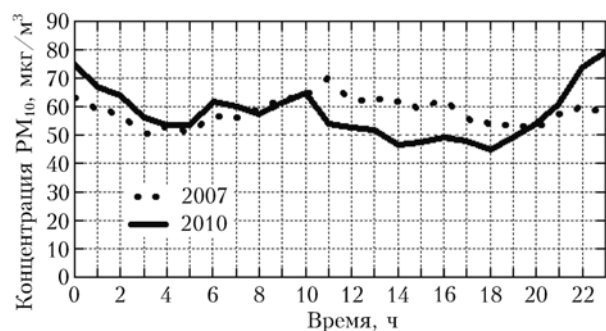


Рис. 5. Суточный ход концентрации PM_{10} при адвекции аэрозоля в эпизодах 2007 и 2010 гг.

типовой суточный ход PM_{10} в летнее время. Наиболее характерными признаками суточного профиля PM_{10} являются: утренний (8–9 ч) и вечерний (22–23 ч) максимумы, два примерно одного уровня минимума, причем дневной минимум более продолжительный. Показано, что типовой суточный ход PM_{10} в Московском регионе в общих чертах совпадает с рассчитанным по данным наблюдений на германских станциях (Мюнхен).

Показано, что аномалии в суточном ходе PM_{10} (значительное превышение фона или смещения экстремумов) обусловлены: а) НМУ, б) адвекцией аэрозоля, в) поступлением продуктов природных пожаров, г) усилением ветра при приближении атмосферного фронта. Установленные причины аномалий суточного хода PM_{10} могут быть использованы при анализе и прогнозировании качества воздуха, в частности аэрозольного загрязнения, а также для интерпретации численного прогноза загрязнения в регионе.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (проекты № 11-05-91061-НЦНИ-а, 11-05-01144-а).

1. Горчаков Г.И., Аношин Б.А., Семутникова Е.Г. Статистический анализ вариаций массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля в г. Москве // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 7, № 6. С. 501–505.
2. Цыро С.Г. Региональная модель формирования, трансформации и дальнего переноса аэрозольных частиц в атмосфере // Метеорол. и гидрол. 2008. № 2. С. 34–47.
3. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокси азота и двуокси серы. Глобальные обновленные данные 2005 год. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2006. 27 с.
4. Enke W., Kreienkamp F., Spekat A. STAT-IMM, a statistical approach to determine local and background contributions to PM_{10} levels // Advances in Science and Research. 2008. V. 2. P. 119–126.
5. Fuller G., Green D. Evidence for increasing concentrations of primary PM_{10} in London // Atmos. Environ. 2006. V. 40, N 32. P. 6134–6145.
6. Barmpadimos I., Hueglin C., Keller J., Henne S. Influence of meteorology on PM_{10} trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008 // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 4. P. 1813–1835.
7. Gomisucuek B., Hauck H., Stopper S., Preining O. Spatial and temporal variations of PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} and particle number concentration during the AUPHER-project // Atmos. Environ. 2004. V. 38, N 24. P. 3917–3934.

8. *Kuang-Ling Yang*. Spatial and seasonal variation of PM₁₀ mass concentrations in Taiwan // *Atmos. Environ.* 2002. V. 36, N 21. P. 3403–3411.
9. *Likun Huang, Kun Wang, Chung-Shin Yuan, Guangzhi Wang*. Study on the Seasonal Variation and Source Apportionment of PM₁₀ in Harbin, China // *Aerosol and Air Quality Research*. 2010. V. 10, N 1. P. 86–93.
10. *Stern R., Builtjes P., Schaap M., Timmermans R., Vautard R., Hodzic A., Memmesheimer M., Feldmann H., Renner E., Wolke R., Kerschbaumer A.* A model inter-comparison study focussing on episodes with elevated PM₁₀ concentrations // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 19. P. 4567–4588.
11. *Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M., Baklanov A., Klein T., Miranda A.I., Monteiro A., Hirtl M., Tarvainen V., Boy M., Peuch V.-H., Poupkou A., Kioutsioukis I., Finardi S., Sofiev M., Sokhi R., Lehtinen K.E.J., Karatzas K., San R., Astitha M., Kallos G., Schaap M., Reimer E., Jakobs H., Eben K.* A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 1. P. 1–87.
12. *Кузнецова И.Н., Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Артамонова А.А.* Вычислительный комплекс «модель атмосферы – химическая транспортная модель» как модуль системы оценки качества воздуха // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, № 6. С. 485–492.
13. *Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Зарипов Р.Б., Артамонова А.А., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Звягинцев А.М., Бикманн М.* Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентрации взвешенного вещества (PM₁₀) в Москве и Зеленограде // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 3. С. 48–60.
14. *László M., Helmut M.R., János M., Tamás S., Jutta H.* Variations of traffic related air pollution on different time scales in Szeged, Hungary and Freiburg, Germany // *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*. 2010. V. 35, iss. 1–2. P. 85–94.
15. *Latha K.M., Highwood E.J.* Studies on particulate matter (PM₁₀) and its precursors over urban environment of Reading, UK // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 2006. V. 101, N 2. P. 367–379.
16. *Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шальгина И.Ю.* Загрязнение воздуха на европейской части России и Украины в условиях жаркого лета 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2011. Т. 47, № 6. С. 757–766.
17. *Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г., Чубарова Н.Е., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карнов А.В., Лезина Е.А., Задорожная О.С.* Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля задымленной атмосферы Московского региона в 2010 г. // *Докл. РАН*. 2011. Т. 437, № 5. С. 686–690.
18. *Кузнецова И.Н.* Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха Москвы в летних эпизодах 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2012. Т. 48, № 4.

A.A. Glazkova, I.N. Kuznetsova, I.Yu. Shalygina, E.G. Semutnikova. The diurnal variation of aerosol concentration (PM₁₀) in summer in the Moscow region.

The article is about a typical diurnal variation of aerosol (PM₁₀) concentration in the Moscow area in summer obtained by observations on the “Mosekomonitoring” network, as well as an average daily PM₁₀ profile in distributing products of fires in summers of 2007 and 2010. A comparison of the average diurnal variation of PM₁₀ in Moscow with the data of foreign monitoring. The reasons of PM₁₀ increase during periods of the absence of fires are considered. There are three types of abnormal diurnal variation of PM₁₀: one due to the processes of accumulation of aerosol in surface air, another one, advection, the third one, the wind increasing before the atmospheric front.