

УДК 551.510.522

## Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы

И.Н. Кузнецова<sup>1</sup>, А.А. Глазкова<sup>1</sup>, И.Ю. Шалыгина<sup>1</sup>,  
М.И. Нахаев<sup>1</sup>, А.А. Архангельская<sup>1</sup>, А.М. Звягинцев<sup>2</sup>,  
Е.Г. Семутникова<sup>3</sup>, П.В. Захарова<sup>3</sup>, Е.А. Лезина<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

<sup>2</sup>Центральная аэрологическая обсерватория

141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

<sup>3</sup>Мосэкомониторинг

119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

Поступила в редакцию 5.01.2014 г.

Представлены сезонно-суточные характеристики изменчивости взвешенных частиц ( $PM_{10}$ ) в приземном воздухе г. Москвы в период январь 2008 – август 2013 гг. В рассмотренный период в холодный сезон на станциях городского типа средняя концентрация  $PM_{10}$  составила  $17–21 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , медиана близка к средней  $15–18 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , среднеквадратическое отклонение (СКО)  $9–12 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ; с апреля по октябрь средняя концентрация  $PM_{10}$   $26–31 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , медиана  $21–27 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , СКО от 14 до  $20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Проанализированы различия режима аэрозольного загрязнения в Московском и ряде западноевропейских мегаполисов. В отличие от Москвы в мегаполисах Западной Европы годовой максимум наблюдается в холодный сезон, в летние месяцы средний уровень  $PM_{10}$  в Москве и европейских столицах мало отличается. Сделаны выводы о значительной роли климатических условий и различающихся источников аэрозольного загрязнения в регионах, разнесенных на тысячи километров. Показано, что чаще всего в Москве фиксируются аэрозольные эпизоды, обусловленные локальными эмиссиями при неблагоприятных метеорологических условиях, но практически ежегодно имеют место и 2–3-суточные эпизоды вследствие дальнего переноса взвешенных частиц.

**Ключевые слова:** качество воздуха, взвешенные частицы  $PM_{10}$ , сезонно-суточная изменчивость  $PM_{10}$ , эпизоды аэрозольного загрязнения; air quality, particulate matter  $PM_{10}$ , daily and seasonal variability  $PM_{10}$ , pollution episodes.

### Введение

Особое внимание к содержанию и изменчивости аэрозоля в атмосфере обусловлено его свойством влиять на радиационные процессы с соответствующими климатическими и менее масштабными изменениями температурных и влажностных характеристик [1–5]. Другой причиной повышенного интереса к аэрозольному загрязнению являются установленные связи целого ряда заболеваний с повышенным содержанием взвешенных частиц, а также синергические эффекты с другими загрязнителями (например, [6, 7]). Результаты эпидемиологических исследований стали для Всемирной организации здраво-

охранения обоснованием внесения взвешенных частиц с аэродинамическим диаметром не более  $10 \text{ мкм}$  ( $PM_{10}$ ) в перечень необходимых для оценки качества воздуха загрязняющих веществ [8].

Благодаря регулярным измерениям на сети мониторинга в зарубежных странах, целый ряд зарубежных работ посвящен короткопериодной изменчивости массовой концентрации аэрозоля  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  и многолетним трендам; значительное место занимают описания аэрозольных эпизодов в городских агломерациях, при этом большинство авторов пытаются установить причины формирования таких эпизодов [9–18]. В развитых зарубежных странах мониторинг  $PM_{10}$  осуществляется на густой сети станций: например, на территории США – на 740 станциях (<http://www.epa.gov>), в Германии около 270 станций (<http://www.eea.europa.eu/>), во Франции около 400 (<http://acm.eionet.europa.eu/>). В нашей стране регулярные измерения  $PM_{10}$  сегодня проводятся в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи.

Наблюдения за содержанием  $PM_{10}$  в Москве начаты около 10 лет назад (<http://mosecom.ru>);

\* Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Анна Александровна Глазкова (artamonova@mecom.ru); Ирина Юрьевна Шалыгина (shalygina@mecom.ru); Мурат Ислагалеевич Нахаев (muratmeteo@mail.ru); Анастасия Алексеевна Архангельская (ar.n@bk.ru); Анатолий Михайлович Звягинцев; Евгения Геннадьевна Семутникова; Полина Владимировна Захарова; Елена Александровна Лезина.

некоторые характеристики  $PM_{10}$  в отдельные годы и сезоны описаны в работах [19–22].

В настоящей статье обсуждены результаты обобщения измерений массовой концентрации  $PM_{10}$  ГПБУ «Мосэкомониторинг» в период 2008–2013 гг., описаны сезонные и суточные вариации  $PM_{10}$  в Москве, проведены сравнения с характеристиками  $PM_{10}$  в некоторых европейских столицах. Полученные режимных характеристик содержания  $PM_{10}$  в воздухе Москвы, выявление комплекса атмосферных процессов и факторов формирования эпизодов аэрозольного загрязнения рассматриваются и с точки зрения верификации методов прогнозирования на основе численных и статистических моделей [23, 24].

### Использованные данные

Методика и аппаратура измерений массовой концентрации аэрозоля  $PM_{10}$  на автоматизированной сети контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» частично описаны в [20]. Измерения проведены с помощью анализаторов типа ТЕОМ. Такие измерения обладают меньшей погрешностью по сравнению с гравитометрическим методом, который принят в качестве стандартного в странах Европейского Союза, и позволяют, в отличие от ряда других методов, получать оперативную информацию ежечасно [25].

Для общего анализа аэрозольного загрязнения приземного воздуха Москвы в период январь 2008 – август 2013 г. выбраны станции мониторинга, расположенные вблизи мегаполиса в направлении с юго-востока на северо-запад (Марьинский парк, Кожухово, Останкино, МГУ, Спиридоновка), и станция в городе-спутнике Зеленоград, расположенная примерно в 50 км от центра Москвы. В связи со значительным загрязнением воздуха продуктами горения лесов летом 2010 г., достаточно подробно описанным в [4, 5], данные наблюдений в период аномально сильного загрязнения атмосферы (август 2010 г.) при расчетах статистических характеристик  $PM_{10}$  из выборки были исключены.

Результаты измерений  $PM_{10}$  в четырех европейских столицах получены из данных открытого доступа: на городских станциях Лондона в период 2000–2012 г. на сайте <http://www.londonair.org.uk>, на городских станциях Берлина, Праги и Варшавы

в период 2004–2011 гг. на сайте <http://www.eea.europa.eu/>, исходя из наличия синхронизированных наблюдений и статистической обеспеченности рядов измерений в период 2004–2008 гг.

### Сезонные вариации концентрации $PM_{10}$

Усредненные за более чем пятилетний ряд концентрации  $PM_{10}$  в Москве достаточно хорошо согласуются с результатами расчетов для отдельных лет в [19, 20]. В табл. 1 представлены некоторые статистические характеристики  $PM_{10}$  на станциях АСКЗА, расположенных в разных частях города, в ноябре–марте и апреле–октябре. Усредненные по сезонам величины  $PM_{10}$  на станциях группируются в достаточно узких диапазонах. В холодный сезон средняя концентрация  $PM_{10}$   $17–21 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , медиана близка к средней величине –  $15–18 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , среднеквадратическое отклонение (СКО)  $9–12 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

С апреля по октябрь средняя массовая концентрация  $PM_{10}$  на городских станциях примерно на  $10 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$  выше, чем в холодный сезон:  $26–31 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , медиана  $21–27 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , СКО  $14–20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , интервалу 25–75 перцентилей соответствует диапазон  $15–32 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , в районе Останкино и Марьинского парка (юго-восток города) он немного шире  $17–39 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

О характерных и редко наблюдаемых концентрациях  $PM_{10}$  в приземном воздухе Москвы можно судить и по приведенному на рис. 1 частотному распределению средней за сутки концентрации  $PM_{10}$  на станциях мониторинга, не входящих в список «примагистральных».

При длине выборки в период январь 2008 – август 2013 г. средней за сутки концентрации  $PM_{10}$  от 1600 и более, наиболее полной является выборка на ст. МГУ – почти 1950 величин. Следует подчеркнуть, что анализируемые данные ст. Зеленоград сравнимы с данными ст. МГУ, находящейся на территории метеорологической обсерватории Московского государственного университета в жилом районе с развитой инфраструктурой, и, по-видимому, они в основном отражают городской уровень города-спутника, т.е. также «отягощены антропогенным фактором».

Таблица 1

Статистические характеристики концентрации  $PM_{10}$  ( $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) на станциях Москвы в 2008–2013 гг. (без августа 2010 г.). Холодный период: ноябрь–март, теплый период: апрель–октябрь

Характеристика	Станция											
	МГУ		Марьинский парк		Зеленоград		Спиридоновка		Останкино		Кожухово	
	Период											
	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый
Число измерений	823	1133	649	946	830	1134	740	1037	666	971	671	898
Среднее	18	23	19	31	17	24	20	26	21	30	18	26
Медиана	16	21	16	27	15	21	17	22	18	26	16	21
СКО	9	14	12	18	9	15	12	16	13	20	10	18
25%	11	14	12	18	10	14	12	15	13	17	11	15
75%	22	29	23	39	22	30	25	32	27	38	22	33

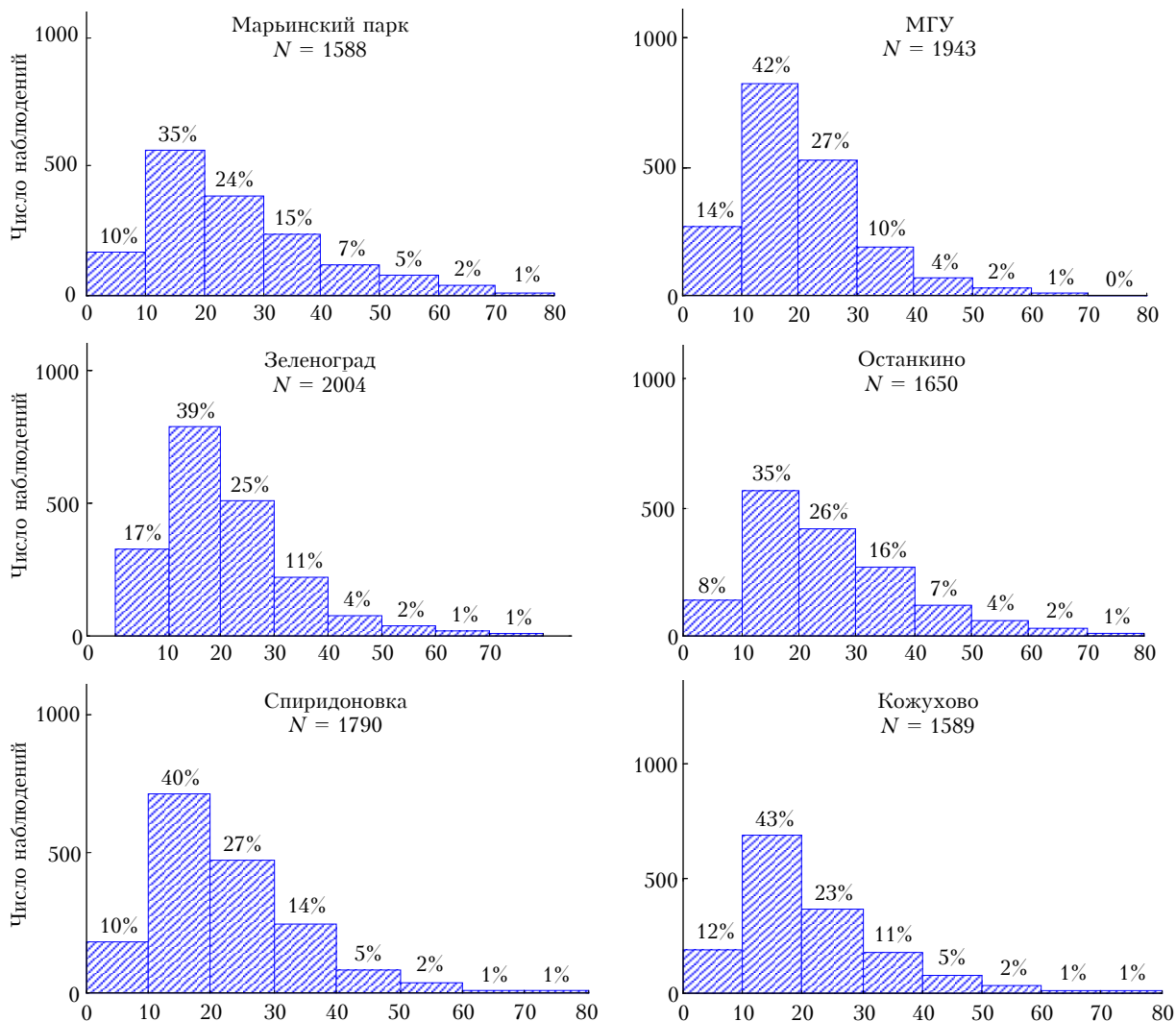


Рис. 1. Повторяемость (в процентах) средней суточной массовой концентрации  $PM_{10}$ ,  $\mu\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$  (в градусах), на станциях городского типа АСКЗА в период с января 2008 по август 2013 г. (без августа 2010 г.). Приведенные величины повторяемости (%) округлены до целых

Частота средних за сутки концентраций  $PM_{10}$  с нарушением отечественного гигиенического стандарта качества  $60 \mu\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$  [26] не превышает 2–3%, в районе Останкино – до 4%, в районе МГУ и в Зеленограде 1–2% (рис. 1). С учетом формы распределения  $PM_{10}$  на станциях рассчитаны коэффициенты парной корреляции часовой и усредненной за сутки концентрации  $PM_{10}$  между станциями (табл. 2). Судя по полученным результатам, вариации уровня  $PM_{10}$  в центре города (ст. Спиридоновка) связаны наиболее тесно с изменениями  $PM_{10}$  на других станциях.

Коэффициенты парной корреляции средней суточной концентрации  $PM_{10}$  ( $R_{cc}$ ) находятся в интервале  $0,68 \div 0,82$  (все корреляции значимы с доверительной вероятностью  $> 0,95$  при длине выборки  $N = 785$ ). Можно заметить (табл. 2), что практически совпадают величины коэффициента корреляции  $PM_{10}$  в центре города (ст. Спиридоновка) с  $PM_{10}$  на юго-востоке мегаполиса (Марьинский парк – подветренная относительно преобладающего пере-

носа станция) и с  $PM_{10}$  в г. Зеленограде (на удалении почти в 40 км от центра Москвы).

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции средней суточной и разовой концентрации  $PM_{10}$  на станциях городского типа в Москве и Зеленограде**

Станция	Марьинский парк	МГУ	Зеленоград	Останкино	Спиридоновка
Средняя суточная массовая концентрация					
МГУ	0,66	1	–	–	–
Зеленоград	0,65	0,70	1	–	–
Останкино	0,57	0,74	0,60	1	–
Спиридоновка	0,72	0,80	0,73	0,74	1
Кожухово	0,68	0,71	0,62	0,61	0,82
Разовая концентрация					
МГУ	0,56	1	–	–	–
Зеленоград	0,51	0,53	1	–	–
Останкино	0,50	0,59	0,44	1	–
Спиридоновка	0,62	0,69	0,57	0,61	1
Кожухово	0,58	0,53	0,46	0,46	0,62

Достаточно большие коэффициенты корреляции средних суточных концентраций  $PM_{10}$  указывают на то, что данные выбранных станций отражают значительную часть изменчивости аэрозольного загрязнения под влиянием ряда факторов – суммарных эмиссий, процессов внутригородского переноса и синоптического масштаба и, по-видимому, образования и трансформации аэрозольных частиц.

Короткопериодные флуктуации (несколько часов) концентрации  $PM_{10}$  имеют большую зависимость от локальных источников; как и следовало ожидать, коэффициенты парной корреляции разовых измерений  $PM_{10}$  на станциях ( $R = 0,44 \div 0,69$ ) оказались меньше корреляций средней суточной концентрации – все корреляции значимы с достоверной вероятностью  $> 0,95$  при длине выборки  $N = 17144$  (табл. 2).

Полученные показатели тесной связи изменчивости  $PM_{10}$  на ст. МГУ с другими станциями и то обстоятельство, что на городской станции МГУ имеется наиболее полный ряд наблюдений, являются обоснованием для использования данных этой станции при описании общих закономерностей сезонно-суточного режима аэрозольного загрязнения приземного воздуха Московского мегаполиса частицами размером не более 10 мкм.

Межгодовую изменчивость аэрозольного загрязнения ( $PM_{10}$ ) отражает рис. 2, а, где представлены средние за месяц концентрации  $PM_{10}$  на станции МГУ в отдельные годы (2008–2013 гг.). Для Московского региона характерным является более высокое содержание  $PM_{10}$  в теплый сезон, годовой максимум чаще всего наблюдается в апреле, вторичный слабовыраженный максимум в июле–августе. Как видно, межгодовая изменчивость  $PM_{10}$  в основном значительно больше сезонной, за исключением весенних месяцев. В частности, разница величины концентрации  $PM_{10}$  между самым «загрязненным» и самым «чистым» апрелем в течение 5 лет составила около  $20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , что сравнимо с зимним уровнем аэрозольного загрязнения мегаполиса.

Имеющие место значительные вариации средних концентраций с марта по май в первую очередь обусловлены тем, что в рассматриваемые годы в Московском регионе имели место значительные сезонные аномалии циркуляционных и погодных условий. Так, решающим фактором наиболее высоких уровней  $PM_{10}$  в апреле–мае 2008–2010 гг., по-видимому, оказалась ранняя весна. В Москве снежный покров сошел в 2008 г. уже к 25 марта, в 2009 г. – 1 апреля, в 2009 г. – 10 апреля, а в 2012 г. – только 16 апреля. Именно в 2012 г. (рис. 2, а) содержание  $PM_{10}$  было самым низким, в том числе в апреле, чему способствовало и большее из всех рассмотренных лет число дней с осадками (16, в 2009 г. – 9) и их количество (больше 50 мм). Отметим, что средняя за месяц температура не является информативным предиктором. К примеру, во все рассмотренные годы апрель теплее «нормы» на 1,5–3,5 °С, а в 2009 г. – почти на 1 °С холоднее.

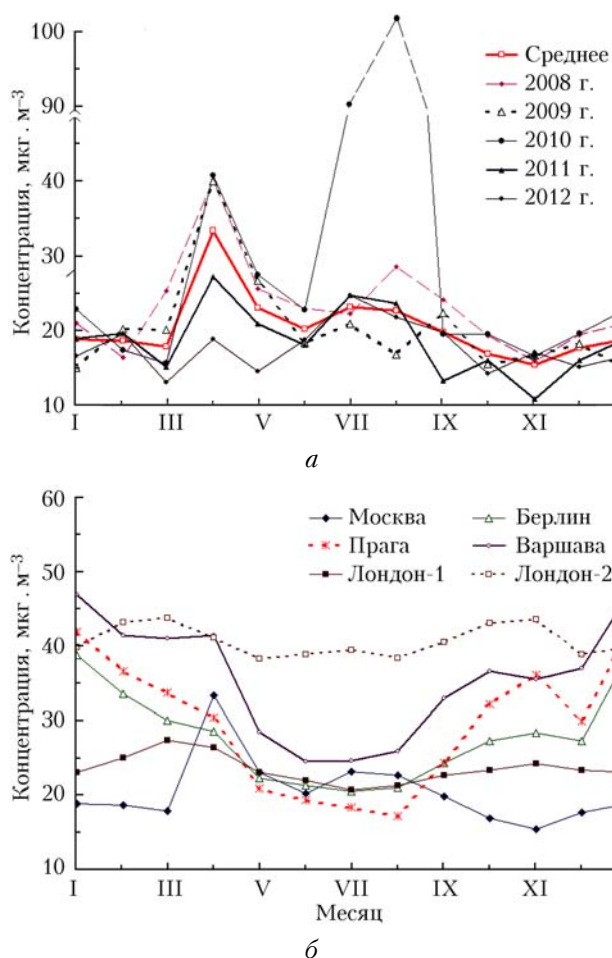


Рис. 2. Средняя за месяц концентрация  $PM_{10}$  на ст. МГУ в отдельные годы и в среднем за пять лет (а); средние за месяц концентрации  $PM_{10}$  на городской станции в Праге, Берлине, Варшаве, Лондоне-1 (станция городского типа Северный Кенсингтон) и Лондоне-2 (станция, классифицируемая как «транспортная», Мерилбоун роуд)

Безусловный интерес представляет сравнение уровней аэрозольного загрязнения воздуха Москвы с другими столицами; как показано в [6], самый низкий средний за год уровень  $PM_{10}$  из крупных европейских городов – в Стокгольме, Брюсселе и Лондоне (в среднем за год  $20\text{--}23 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ). Нами рассчитаны средние за месяц концентрации  $PM_{10}$  на одной из городских станций в Берлине, Праге и Варшаве (2004–2008 гг.). Самые представительные ряды наблюдений (2002–2012 гг.) и статистически достоверные расчеты получены по данным наблюдений на двух станциях в Лондоне (рис. 2, б). Обращает на себя внимание то, что в летние месяцы концентрации  $PM_{10}$  во всех мегаполисах мало отличаются и находятся в основном в диапазоне  $20\text{--}26 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Это в первую очередь следует связывать с общим влияющим на содержание взвешенных частиц в воздухе фактором, а именно механизмом конвективного перемешивания, обеспечивающим рассеивание примеси в теплый сезон и резко ослабевающим зимой.

В отличие от Москвы в обсуждаемых европейских столицах в холодный сезон уровень аэрозольного загрязнения выше, чем в теплый. Как видно на рис. 2, б, в столице Германии в холодный сезон уровень  $PM_{10}$  ниже, чем в Праге и Варшаве. Во многом благодаря географическому положению, морскому климату, в Лондоне амплитуда среднего многолетнего годового хода на «городской станции» составляет всего  $6-7 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , слабовыраженный годовой максимум приходится на февраль—апрель. Не исключено, что определенный вклад в годовой максимум  $PM_{10}$  в Лондоне вносят ситуации, связанные с продолжительными туманами, чаще всего они наблюдаются в столице Англии в январе и феврале ([www.weatheronline.co.uk](http://www.weatheronline.co.uk)). Приведенные на рис. 2, б различия уровней  $PM_{10}$  на городской и придорожной станциях Лондона в течение всего года около  $20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , с одной стороны, указывают на стабильность источника аэрозольного загрязнения (городской транспорт), а с другой стороны показывают градиент концентрации  $PM_{10}$  между транспортной и жилой зоной одного из самых чистых европейских городов.

Можно также предположить, что в холодный сезон весомый вклад в аэрозольное загрязнение воздуха столиц Центральной Европы вносит широко применяемое домашнее печное отопление. Одним из важных факторов аэрозольного загрязнения в Европе считаются начало агротехнических работ и обработка сельхозугодий, включая пыление при пахоте и испарение вносимых в почву жидких удобрений [27].

### Сезонно-суточные характеристики $PM_{10}$

Специфические отличия сезонных вариаций содержания  $PM_{10}$  в Москве и в названных выше европейских столицах отражают не только различия климатических условий очищения приземного воздуха, но, по-видимому, еще и природных и антропогенных источников аэрозольного загрязнения. В Московском регионе одним из важнейших факторов аэрозольного загрязнения является состояние подстилающей поверхности; резкое увеличение содержания мелких частиц в атмосфере происходит после схода снежного покрова в апреле до появления растительности (см. рис. 2, а). Более высокий уровень  $PM_{10}$  в теплый сезон в Москве в отличие от зимнего — следствие повышения химической активности атмосферы и увеличения повторяемости «застойных» синоптических ситуаций. Формированию последних в Московском регионе летом способствуют ослабление интенсивности крупномасштабной циркуляции, уменьшение скорости переноса в атмосферном пограничном слое (почти в 1,5 раза в сравнении со скоростью переноса зимой) и учащение образования радиационных инверсий. При том что в теплый сезон дневная конвекция и турбулентное перемешивание являются мощным меха-

низмом очищения приземного слоя от примесей, условия для их накопления в вечерние и утренние часы наблюдаются чаще, чем в холодный сезон.

В ряде исследований, например [10, 13, 18, 19, 21], отмечается, что в большинстве своем изменчивость аэрозоля определяется процессами синоптического масштаба. В частности, из результатов многолетнего анализа субмикронного аэрозоля в Западной Сибири [28] следует, что антропогенное воздействие города (Томска) проявляется лишь в 20–30% суточных реализаций.

Главной причиной короткопериодных колебаний концентрации химически малоактивных загрязняющих веществ в приземном воздухе в мегаполисе является определяемый внутрисуточным и недельным циклами транспорта [29] режим городских эмиссий. На рис. 3 представлены диаграммы временной изменчивости  $PM_{10}$ , угарного газа СО и диоксида азота  $NO_2$  по измерениям на АСКЗА «МГУ».

Хорошо видно, что конфигурации полей  $PM_{10}$  и СО в общем и в деталях имеют много похожего, т.е. вариации  $PM_{10}$  и СО различного временного масштаба квазикогерентны. По нашим расчетам, коэффициент корреляции между  $PM_{10}$  и СО при часовой реализации равен 0,77, для усредненных за сутки концентраций 0,87. Иначе выглядит связь колебаний  $PM_{10}$  с химически активным и фотохимически зависимым  $NO_2$ . По расчетам коэффициент корреляции  $PM_{10}$  с  $NO_2$   $R \approx 0,25$  (для средних за сутки и часовых концентраций).

В годовом ходе концентрации СО, как и  $PM_{10}$ , главный максимум приходится на апрель, а самые низкие уровни наблюдаются в ноябре—декабре. Усредненный суточный ход имеет устойчивую форму и сезонную динамику: для теплого сезона характерны максимальная амплитуда и наибольший межпиковый временной интервал, от весны к осени вторичный (вечерний) максимум ослабевает.

В холодный сезон меняется форма суточного хода  $PM_{10}$ : слабовыраженный максимум сохраняется с утра до вечера, ночью приземная концентрация  $PM_{10}$  понижается до самых низких в году величин. Летом суточный минимум  $PM_{10}$  наблюдается в послеполуденные часы (следствие интенсивного конвективного очищения приземного воздуха), уровень ночного минимума выше дневного.

Обращает на себя внимание (рис. 3), что конфигурация поля сезонно-суточных концентраций  $NO_2$  и зоны экстремумов имеют существенные отличия от  $PM_{10}$ . При общих закономерностях, а именно, что годовой максимум  $NO_2$  приходится на апрель, годовой минимум на ноябрь—декабрь, а так же что, как для  $PM_{10}$ , имеет место сближение межпиковых концентраций от весны к осени, в суточном ходе  $NO_2$  летом формируется хорошо выраженный вечерний максимум (главный — больше утреннего), сохраняющийся в первые часы после полуночи. Можно заметить и то, что в наиболее «грязном» апреле послеполуденные концентрации  $NO_2$  резко уменьшаются, достигая, в отличие от  $PM_{10}$ , суточного минимума.

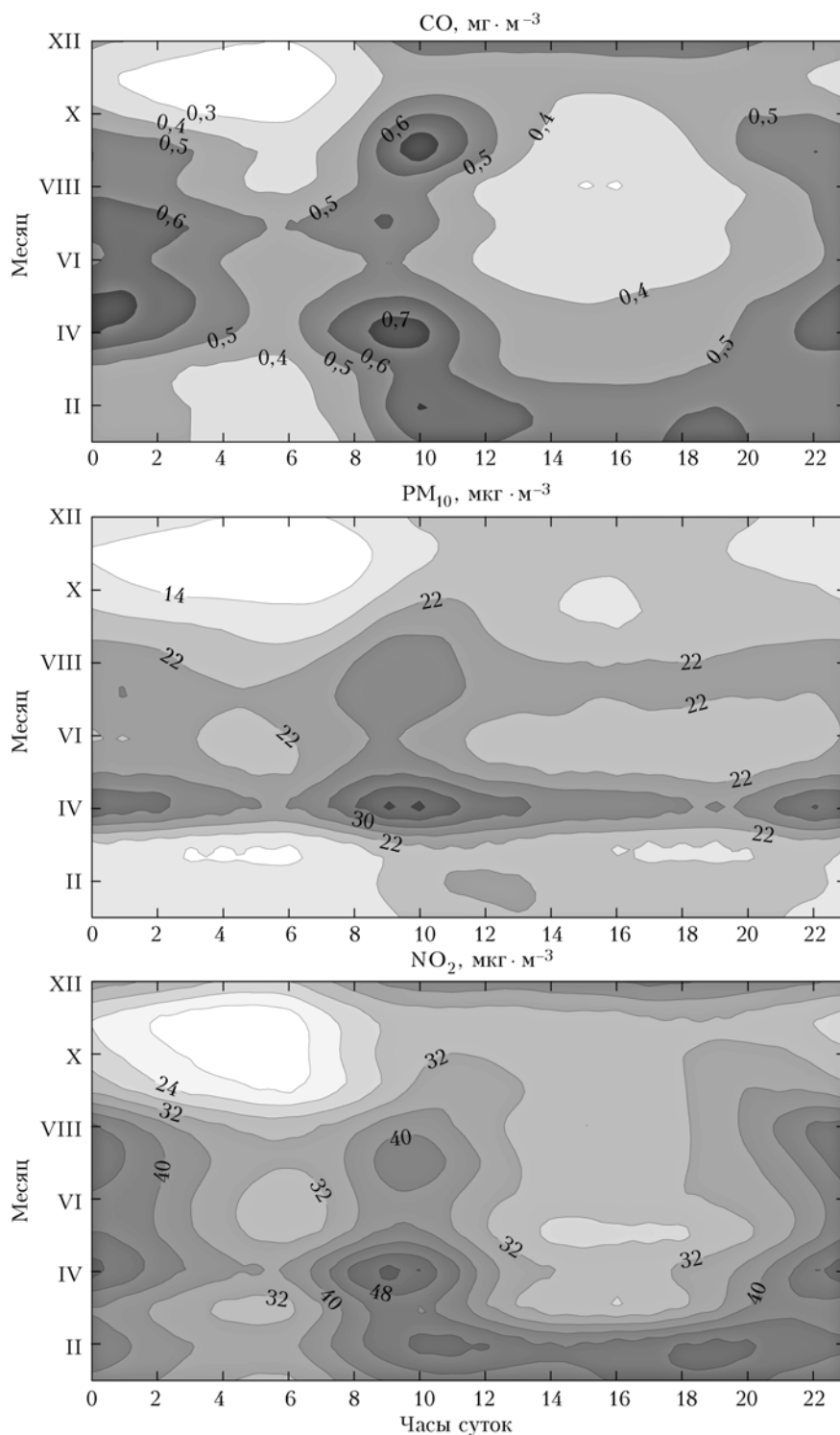


Рис. 3. Сезонно-суточная изменчивость CO, PM<sub>10</sub> и NO<sub>2</sub>. Станция МГУ, «Москэкомониторинг». 2008–2013 гг. (без августа 2010 г.). По оси ординат – месяцы, начиная с января

## Эпизоды аэрозольного загрязнения

Наиболее значимо, с точки зрения негативного воздействия на здоровье, повышение содержания загрязняющих веществ в приземном воздухе с достижением «критических» уровней предельно допус-

тимых концентраций (ПДК) [26] происходит в так называемых неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ), которые определяются термической устойчивостью и слабым ветром в нижних слоях атмосферы. Один из примеров НМУ, которые чаще всего являются предпосылками для аэрозольных эпизодов в Москве, иллюстрируется на рис. 4.



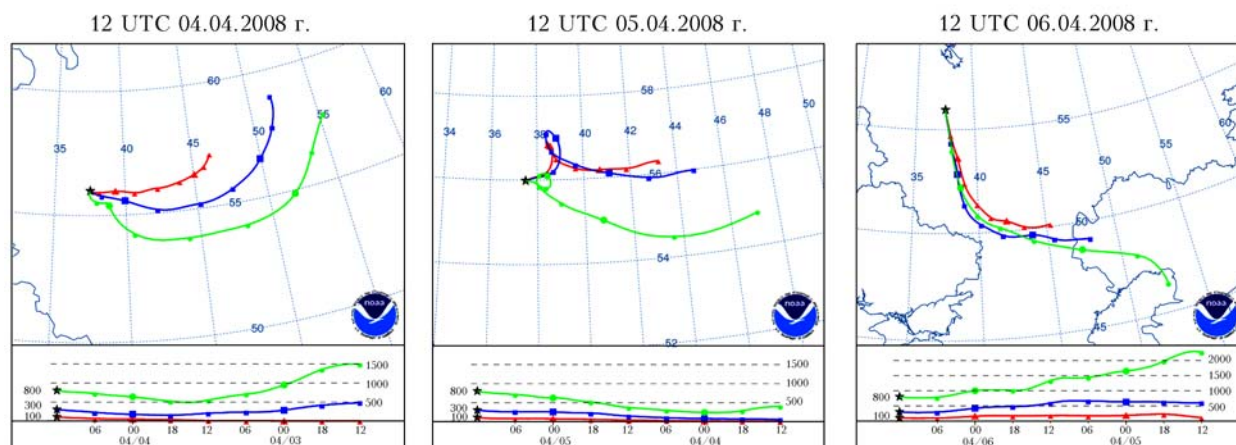
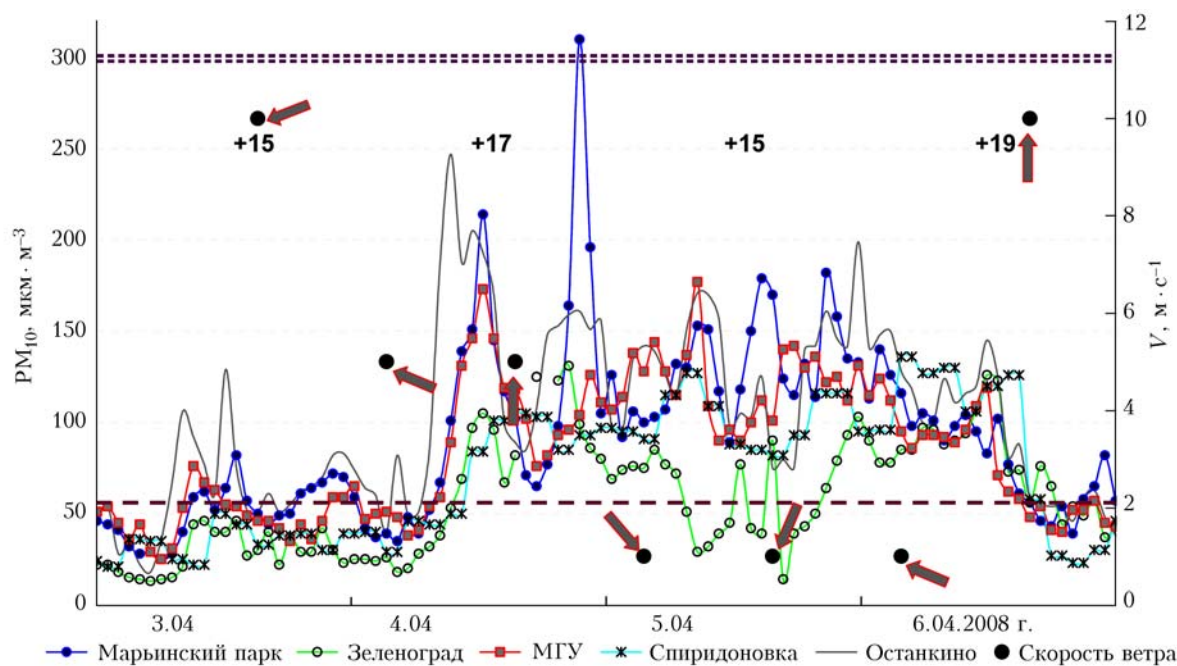


Рис. 4. Концентрация  $PM_{10}$  на станциях городского типа в Москве в эпизоде НМУ 4–6 апреля 2008 г. Стрелками показано направление переноса в атмосферном пограничном слое,  $V$  – средняя скорость переноса. Нижняя штриховая горизонтальная линия ( $60 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) – ПДК<sub>сс</sub> для средней за сутки концентрации  $PM_{10}$ , сверху двойная штриховая горизонтальная линия ( $300 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) – ПДК<sub>м.р.</sub> для разовой концентрации  $PM_{10}$ . В нижних окнах – траектории поступивших воздушных частиц на уровнях 100, 300, 800 м над поверхностью длительностью 2 сут, построенные по модели HYSPLIT, NOAA

Здесь представлен временной ход концентрации  $PM_{10}$  на пяти станциях АСКЗА 4–6 апреля 2008 г. Эпизод зафиксирован в период сухой аномально теплой погоды (температура повышалась до  $+17...+19 \text{ }^\circ\text{C}$ ), скорость переноса в атмосферном пограничном слое (АПС) ослабевала до  $1\text{--}5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Горизонтальная штриховая линия ( $60 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$  – отечественный норматив) указывает, что повышенный уровень  $PM_{10}$  сохранялся почти 3 сут. Первый в эпизоде значительный всплеск  $PM_{10}$  до  $210\text{--}250 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$  утром 4 апреля происходил, как показал траекторный анализ, с участием загрязнений, поступивших из восточных окрестностей мегаполиса. Об этом свидетельствует то, что концентрации  $PM_{10}$  на востоке и юге города оказались в 2 раза больше, чем в центре города.

Шлейф городских загрязнений обусловил резкое повышение уровня  $PM_{10}$  в подветренном северо-

западном пригороде (Зеленоград); пиковые концентрации пришлось на время конвективного прорыва АПС, когда высота слоя перемешивания быстро увеличивалась и превысила 300 м [30]. Максимальный в эпизоде уровень  $PM_{10}$  – около  $300 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$  (ПДК<sub>м.р.</sub>) – наблюдался вечером 4 апреля в центре Москвы, что могло стать следствием «возврата» воздушной массы при смене направления переноса на противоположное и установления затишья в АПС. С этим же процессом связан максимум  $PM_{10}$  и в Зеленограде, где после изменения направления переноса на северное даже при слабом ветре уровень  $PM_{10}$  был низким до нового изменения ветра на юго-восточное в ночь на 6 апреля. В шлейфе «московских загрязнений» Зеленоград (с незначительными отличиями от  $PM_{10}$  в Москве) оставался до полудня 6 апреля, когда произошло резкое увеличение

скорости ветра в АПС, и в регион пришла новая теплая воздушная масса с юга.

Рассмотренный эпизод аэрозольного загрязнения позволяет идентифицировать возможный уровень  $PM_{10}$ , обусловленный накоплением взвешенных частиц в воздухе Московского мегаполиса за счет городских эмиссий в худших условиях проветривания. Как показано на рис. 4, концентрации  $PM_{10}$  в жилой зоне повышались при НМУ (5–6 апреля) до 120–180  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Среди обусловленных НМУ случаев высоких концентраций  $PM_{10}$  в воздухе Москвы имеют место эпизоды с иным типом атмосферных процессов, характерным признаком которых является интенсивный перенос ( $10\text{--}15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в нижних слоях атмосферы в теплых секторах барических образований, часто при наличии там мезоструйных течений. Причиной такого типа аэрозольного загрязнения может быть адвекция взвешенных частиц из удаленных районов, где почвенный аэрозоль попадает в воздух в результате механических процессов образования мелких частиц [31], ветрового подъема минеральных и солевых частиц в районах почвенной

засухи или пыльных бурь и благодаря известному механизму быстрого переноса загрязнений «warm conveyor belt» перемещается с воздушной массой на расстояния до 1000 км за сутки.

В Московском регионе редкие и «нетипичные» аэрозольные эпизоды адвективного происхождения наблюдаются в основном в теплый период, чаще всего весной при поступлении воздушной массы, прошедшей над Нижним Поволжьем и Западным Казахстаном [21, 24, 32]. В отдельные годы такие события фиксировались и в феврале, например в 2013 г. Кратко обсудим один из самых редких типов эпизодов повышенного уровня  $PM_{10}$  при поступлении 27–29 апреля 2009 г. воздушной массы, прошедшей над Белоруссией и Украиной, где, повидимому, с установлением сухой и жаркой погоды проводились пахотные работы (рис. 5).

Начало аэрозольного эпизода в ночь на 27 апреля совпало с резким повышением температуры и с усилением скорости переноса до  $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Концентрации  $PM_{10}$  на городских станциях Москвы повысились и более 2 сут удерживались в диапазоне 60–80  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Весьма примечательным в этом эпизоде является

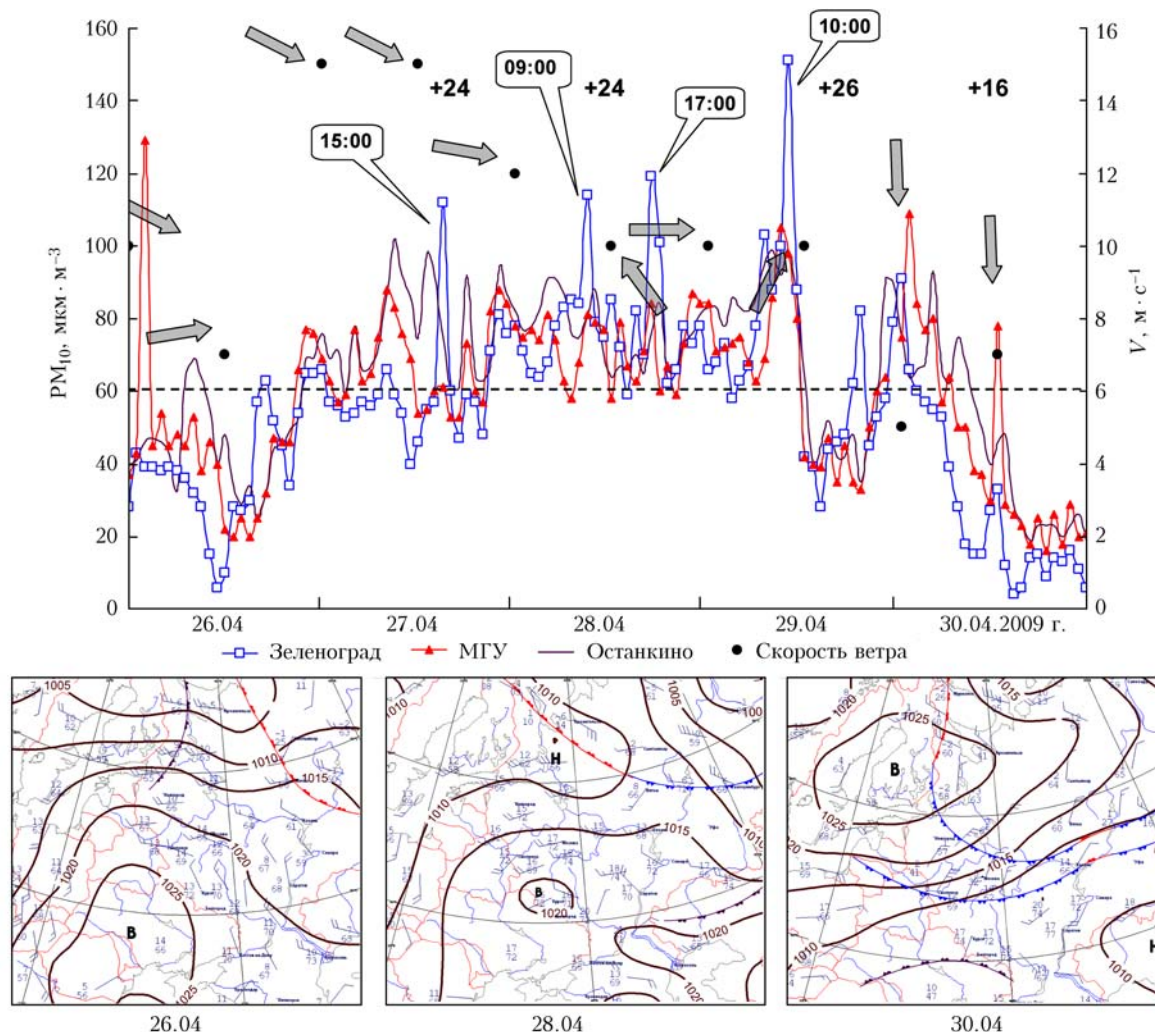


Рис. 5. Концентрация  $PM_{10}$  на станциях АСКЗА в эпизоде «дальнего» переноса взвешенных частиц 26–30 апреля 2009 г. (обозначения те же, что на рис. 4). В нижних окнах – синоптические карты, иллюстрирующие динамику крупномасштабных процессов в «нетипичном» эпизоде аэрозольного загрязнения



колебание уровня  $PM_{10}$  в Зеленограде, где концентрация  $PM_{10}$  оказалась сравнима с  $PM_{10}$  на московских станциях, а пиковые значения наблюдались в часы прорыва АПС или достижения максимальной высоты термического перемешивания (выноски на рис. 5). Перемещение на юг антициклона с теплым запыленным воздухом после полудня 29 апреля сопровождалось резким повсеместным понижением уровня  $PM_{10}$ , кратковременные всплески 30 апреля были вызваны предфронтальным усилением ветра. После прохождения холодного атмосферного фронта в пришедшей с севера воздушной массе (температура понизилась почти на 10 °С) концентрации уменьшились до 10–20  $мкг \cdot м^{-3}$ .

Можно заметить, что в описанном выше аэрозольном эпизоде (см. рис. 4) по его окончании концентрации  $PM_{10}$  в городе уменьшились до 40–50  $мкг \cdot м^{-3}$ . Это количественно указывает на значительно большее аэрозольное загрязнение континентальной воздушной массы, прошедшей над потенциальными источниками почвенного аэрозоля – междуречьем Дона и Волги, Прикаспием. По-видимому, в южных регионах нашей страны, в том числе Западной Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока, где наблюдения за  $PM_{10}$  пока не проводятся, аэрозольные эпизоды, обусловленные адвекцией частиц природного происхождения, имеют высокую повторяемость и представляют реальную экологическую опасность.

### Заключение

Исследована периодическая изменчивость массовой концентрации взвешенных частиц размером не более 10  $мкм$  ( $PM_{10}$ ) по данным измерений на станциях «городского» типа ГПБУ «Мосэкомониторинг» в период 2008–2013 гг.; показано, что для аэрозольного загрязнения воздуха Москвы характерна ярко выраженная сезонность: от холодного сезона к тепловому уровень  $PM_{10}$  увеличивается в среднем на 10–15  $мкг \cdot м^{-3}$ . Годовой максимум наблюдается в апреле, в этом месяце после схода снежного покрова резко меняется аэрозольный режим городской атмосферы. Межгодовая изменчивость  $PM_{10}$  наиболее выражена в весенние месяцы; обнаруженные значительные отклонения от многолетних уровней  $PM_{10}$  в апреле–мае являются следствием аномалии крупномасштабной циркуляции и погодных условий в регионе.

Показаны сезонные различия массовой концентрации  $PM_{10}$  в городских районах Москвы и столиц некоторых западноевропейских стран: в отличие от Москвы в мегаполисах Центральной Европы, а также в Лондоне годовой максимум наблюдается в холодный сезон. В летние месяцы средний уровень  $PM_{10}$  в Москве и европейских столицах мало отличается. По-видимому, несовпадение годовых максимумов связано не только с климатическими условиями рассеивания примеси, но и с различиями источников, определяющих состав  $PM_{10}$ .

Описаны типичные для холодного и теплого сезона суточные ходы массовой концентрации  $PM_{10}$ , различающиеся временем образования экстремумов: суточный максимум наблюдается в летний сезон утром и вечером, в зимний – днем, и имеет слабовыражен-

ную сигнатуру. Суточный минимум  $PM_{10}$  зимой отмечается ночью, летом самый низкий уровень  $PM_{10}$  наблюдается после полудня, вторичный минимум – ночью.

Показана тесная связь изменчивости средней за сутки концентрации  $PM_{10}$  на станциях городского типа (коэффициенты парной корреляции находятся в диапазоне 0,7–0,8), а также колебаний уровня  $PM_{10}$  и СО на типовой городской территории (МГУ). Коэффициенты корреляции между ними для усредненных за сутки концентраций и для концентраций по разовым измерениям находятся в интервале 0,77–0,87.

Повторяемость календарных дней с нарушением отечественного норматива  $PM_{10}$  (более 60  $мкг \cdot м^{-3}$ ) на станциях «городского» типа по расчетам на общей выборке составила 1–3%. Но эпизоды аэрозольного загрязнения с превышением ПДК в основном наблюдаются в теплый сезон. Их появлению способствуют более характерные для этого сезона неблагоприятные для рассеивания метеорологические условия – термическая устойчивость и слабый перенос в пограничном слое атмосферы. Кроме эпизодов, которые возникают из-за местных эмиссий загрязнений, практически ежегодно в Московском регионе фиксируются случаи повсеместного повышения уровней  $PM_{10}$ , обусловленные адвекцией взвешенных частиц из удаленных районов в теплых секторах барических образований со скоростью переноса в нижних слоях атмосферы 10–15  $м \cdot с^{-1}$ .

Результаты проведенных исследований пространственно-временной изменчивости  $PM_{10}$  являются основой для верификации методов численного краткосрочного прогноза массовой концентрации взвешенных частиц с применением химических транспортных и статистических моделей.

Работа выполнена частично при поддержке проекта РФФИ № 14-05-00481\_а.

1. *WMO/IGAC. GAW Report N 205. Impacts of Megacities on Air Pollution and Climate – Geneva // WMO. 2012. P. 314.*
2. *Molina M.J., Molina L.T. Megacities and atmospheric pollution // J. Air & Waste Manage. Assoc. 2004. V. 54, N 6. P. 644–680.*
3. *Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change // New York: John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. 2006. 1225 p.*
4. *Горчакова И.А., Мохов И.И. Радиационные и температурные эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 558–565.*
5. *Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловецова О.А. Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмоскowie // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 774–789.*
6. *Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Рекомендации в отношении политики для стран Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии // Всемирная организация здравоохранения. Европейское региональное бюро. 2013. С. 14. (www.euro.who.int).*
7. *Heal M.R., Kumar P., Harrison R.M. Particles, air quality, policy, and health // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41, N 19. P. 6606–6630.*
8. *WHO 2005. Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide // WHO. 2006. P. 484.*

9. Bigi A., Ghermandi G. Climatology of atmospheric PM<sub>10</sub> concentration in the Po Valley // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2014. N 14. P. 137–170. URL: www.atmos-chem-phys-discuss.net/14/137/2014/doi:10.5194/acpd-14-137-2014
10. Saliba N.A., El Jam F., El Tayar G., Obeid W., Roumie M. Origin and variability of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) mass concentrations over an eastern Mediterranean city // Atmos. Res. 2010. V. 97. P. 106–114.
11. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution lines that connect. Journal of the Air and Waste // Managem. Associat. 2006. V. 56, N 6. P. 709–742.
12. Rodriguez S., Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Alarcon M., Mantilla E., Ruiz C.R. Comparative PM<sub>10</sub> PM<sub>2.5</sub> source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in eastern Spain // Sci. Total Environ. 2004. N 328. P. 95–113.
13. Aldabe J., Elustondo D., Santamaria C., Lasheras E., Pandolfi M., Alastuey A., Querol X., Santamaria J.M. Chemical characterisation and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at rural, urban and traffic sites in Navarra (north of Spain) // Atmos. Res. 2011. V. 102, N 1–2. P. 191–205.
14. Chaloulakou A., Kassomenos P., Spyrellis N., Demokritou P., Koutrakis P. Measurements of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particle concentrations in Athens, Greece // Atmos. Environ. 2003. V. 37, N 5. P. 649–660.
15. Gummeneni S., Bin Yusup Y., Chavali M., Samadi S.Z. Source apportionment of particulate matter in the ambient air of Hyderabad city, India // Atmos. Res. 2011. V. 101, N 3. P. 752–764.
16. Lopez M.L., Ceppi S., Palancar G.G., Olcese L.E., Tirao G., Toselli B.M. Elemental concentration and source identification of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> by SR XRF in Cordoba city, Argentina // Atmos. Environ. 2011. V. 45, N 31. P. 5450–5457.
17. Morishita M., Keeler G.J., Kamal A.S., Wagner J.G., Harkema J.R., Rohr A.C. Identification of ambient PM<sub>2.5</sub> sources and analysis of pollution episodes in Detroit, Michigan using highly time resolved measurements // Atmos. Environ. 2011. V. 45, N 8. P. 1627–1637.
18. Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В. Влияние города Томска на химический и дисперсионный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 486–491.
19. Горчаков Г.И., Аношин Б.А., Семутникова Е.Г. Статистический анализ вариаций массовой концентрации грубодисперсного аэрозоля в г. Москве // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 501–505.
20. Gorchakov G., Semoutnikova E., Karpov A., Lezina E. Air Pollution in Moscow Megacity // Advanced Topics in Environmental Health and Air Pollution Case Studies. Intech. 2011. P. 211–236. URL: www.intechopen.com
21. Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г. Суточный ход концентрации аэрозоля (PM<sub>10</sub>) летом в Московском регионе // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 495–500.
22. Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2012 г. М.: Мосэкомониторинг, 2013. 180 с.
23. Кузнецова И.Н., Заритов 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.
24. Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Глазкова А.А., Нахаев М.И., Заритов Р.Б., Лезина Е.А., Звягинцев А.М., Бикманн М. Наблюдаемая и рассчитанная изменчивость концентрации взвешенного вещества PM<sub>10</sub> в Москве и Зеленограде // Метеорол. и гидрол. 2011. № 3. С. 48–60.
25. Walden J., Hillamo R., Aurela M., Mäkelä T., Laurila S. Demonstration of the equivalence of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> measurement methods in Helsinki // Report. Helsinki: Finnish Meteorological Institute, 2010. P. 108.
26. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».
27. Plass-Dülmer C., Fricke M. Spring Maximum in Aerosol – Where does it come from? // GAW Letter. 2007. N 40. URL: http://www.dwd.de/de/FundE/Observator/gaw/gaw.htm
28. Козлов В.С., Панченко М.В., Якушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–569.
29. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Колесникова А.Б., Байкова Е.С., Задорожная О.С. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 784–792.
30. Кузнецова И.Н., Кадыров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.
31. Козлов А.С., Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Власенко А.Л., Еременко С.И., Малышкин С.Б. Исследования механических процессов образования субмикронного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 664–666.
32. Кузнецова И.Н. Влияние метеорологических условий на содержание PM<sub>10</sub> и СО в летних эпизодах 2010 года // Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 566–577.

*I.N. Kuznetsova, A.A. Glazkova, I.Yu. Shalygina, M.I. Nakhaev, A.A. Arkhangelskaya, A.M. Zvyagintsev, E.G. Semutnikova, P.V. Zakharova, E.A. Lezina. Seasonal and diurnal variability of particulate matter PM<sub>10</sub> in surface air of Moscow habitable districts.*

Seasonal and diurnal characteristics of particulate matter (PM<sub>10</sub>) variability in surface air of Moscow for period January 2008 – August 2013 are presented. In the cold season, the mean PM<sub>10</sub> concentrations, their average and standard deviations were of the order of 17–21, 15–18, and 9–12 μg · m<sup>-3</sup> at urban background network stations. In the warm season (April–October), the mean PM<sub>10</sub> concentrations, their average and standard deviations were of the order of 25–31, 21–27, and 14–20 μg · m<sup>-3</sup>. Differences of aerosol pollution regimes in Moscow and Western European megacities (including London) are analyzed. In distinct from Moscow the aerosol seasonal maximal concentrations in the Western Europe are observed during the cold season. In summer, aerosol concentrations in Moscow and Western European megacities are close. The study establishes a great influence of climatic conditions and different sources of aerosol pollution in regions, which are thousands kilometers distant. It is suggested that aerosol episodes due to local emissions under adverse meteorological conditions are mostly frequent in Moscow, but short (2–3 days) episodes caused by long-range air transport of PM<sub>10</sub> are observed every year.