

УДК 551.510

Вариации концентрации сажи в мегаполисах Пекине и Москве

В.М. Копейкин¹, Г.С. Голицын¹, Ван Гэнчэнь²,
Ван Пуцай², Т.Я. Пономарева^{3*}

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

²Институт физики атмосферы Китайской АН
1000029, г. Пекин, р-н Чаоюан, Хуайанли, стр. 40, Китай

³Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13, Россия

Поступила в редакцию 18.01.2019 г.

Представлены результаты измерений концентраций сажевого аэрозоля в Москве и Пекине в 2004–2010 гг. Диапазон изменения разовых концентраций сажи за этот период в Пекине составил 0,1–77 мкг/м³, а в Москве 0,1–22 мкг/м³. Средняя за семь лет концентрация сажи в Пекине в дневное время суток выше в 2,5 раза, чем в Москве. Сезонный ход концентрации сажи в Москве выражен отчетливее: летом ее значения на 23% ниже, чем зимой, а в Пекине только на 13%. Анализ обратных траекторий переноса воздушных масс и вариаций концентраций сажи показал, что значительный рост содержания сажи в атмосфере Пекина наблюдается при переносе воздушных масс из промышленно развитых регионов, находящихся к югу от Пекина. В Москве понижение уровня загрязнения воздушного бассейна сажей преимущественно происходит за счет адвекции при поступлении в Москву воздушных масс из северных регионов.

Ключевые слова: сажевый аэрозоль, массовая концентрация аэрозоля, загрязнение атмосферы мегаполисов, обратные траектории переноса воздушных масс; soot aerosol, mass concentration of aerosol, pollution of megacities atmosphere, reverse trajectories of air mass transfer.

Введение

Мониторингу состава атмосферы и контролю качества воздуха в крупных городах в настоящее время уделяется большое внимание во всем мире [1]. Атмосферный аэрозоль оказывает существенное влияние на радиацию и климат. Это влияние связано с его сажевой компонентой, поэтому необходимо проводить мониторинг концентрации сажевых частиц и изучать закономерности ее изменчивости в зависимости от метеорологических, географических и антропогенных факторов [2].

В мегаполисах, где сосредоточены промышленные предприятия и большое количество автотранспорта, атмосферный воздух сильно загрязнен продуктами сгорания органических топлив (нефть, уголь и т.д.), опасных для здоровья населения. В Москве из 10 химических канцерогенных веществ по степени опасности четвертое место занимает сажа, а из 16 химических веществ, усугубляющих неонкологические заболевания, сажа на пятом месте [3]. Для принятия эффективных управленческих решений

по снижению заболеваемости населения администрациям мегаполисов необходимо знать концентрации загрязняющих атмосферу веществ, включая сажу, и их вариации в разных метеорологических условиях.

В Пекине наблюдения за уровнем содержания сажи проводятся с начала 80-гг. XX в. различными организациями в рамках экологических программ, в том числе с участием иностранных специалистов из России, США, Канады, Германии, Японии и др. [4–6]. Продолжительных (1 год и более) систематических измерений концентрации сажи в Пекине до 2004 г. было проведено немного. За содержанием сажи в приземном слое атмосферы Пекина наблюдали с февраля 1983 г. по февраль 1984 г. (с перерывами) [4] и выяснили, что концентрация сажи максимальна в зимний (34 мкг/м³) и минимальна в весенний периоды (13,5 мкг/м³). В работе [5] в ходе измерений с июля 1999 г. по сентябрь 2000 г. получены средние сезонные значения концентрации сажи в Пекине: 6,7 мкг/м³ весной, 6,3 мкг/м³ летом, 10,2 мкг/м³ осенью и 11,1 мкг/м³ зимой. Сезонный ход концентрации сажи с максимумами осенью и зимой и минимумами весной и летом в период 2005–2008 гг. получен в работах [7] (2005–2006 гг.), [9] (2007 г.), [10] (2005–2007 гг.) и [8] (2005–2008 гг.).

Оценка изменчивости содержания сажи в атмосфере Пекина в осенний период проведена сотрудниками Института физики атмосферы Российской

* Владимир Михайлович Копейкин (kopeikin@ifaran.ru);
Георгий Сергеевич Голицын (gsg@ifaran.ru); Ван Гэнчэнь
(wge@mail.iap.ac.cn); Ван Пуцай (pcwang@mail.iap.ac.cn);
Татьяна Яковлевна Пономарева (ponomareva_tya@mail.ru).

академии наук (ИФА РАН) по результатам ее круглосуточных измерений на высоте 9-го этажа здания Института физики атмосферы Китайской академии наук (ИФА КАН). Средняя концентрация сажи составляла 27,3 мкг/м³ в 1996–1998 гг. и 15,0 мкг/м³ в 2000–2004 гг. [6]. Резкое уменьшение (в 1,8 раза) уровня загрязнения атмосферы Пекина сажевым аэрозолем произошло за счет перестройки работы основных источников сажи, в том числе перевода всех автобусов к 2002 г. на сжатый и сжиженный газ и значительной части котельных и объектов энергетики – с угля на газ в 2000 г. [9].

В Москве с 1956 г. по 1987 г. концентрация сажи измерялась дважды в сутки (06:00–08:00 и 18:00–20:00) в Метеорологической обсерватории МГУ. Средняя за 11 лет (1956–1966 гг.) концентрация в январе составила 30–40 мкг/м³, а в июле 20–40 мкг/м³. В конце 60-х гг. XX в. в городе были остановлены мелкие котельные, работавшие на угле, в результате уровень загрязнения приземного воздуха снизился в 5 раз [10]. С 1989 г. по настоящее время регулярные измерения концентрации сажи в центре Москвы осуществляются в ИФА РАН.

В связи с проведением в Китае (в г. Пекине) в 2008 г. Летних Олимпийских игр ИФА РАН и ИФА КАН в 2002 г. дополнительно к проводимым с 1996 г. в течение 1 мес в год круглосуточным измерениям приняли программу круглогодичных измерений сажевого аэрозоля в дневное время на период 2004–2008 гг.

Настоящая работа посвящена исследованию общих закономерностей и выявлению отличий в характере загрязнения атмосферы сажей мегаполисов Пекина и Москвы по результатам круглогодичных измерений в дневное время.

Используемые данные

Концентрация сажи (black carbon (BC) – черный углерод) измерялась в Москве и Пекине в дневное время в 2004–2010 гг. Отбор проб аэрозоля проводился в центральной части Москвы в 10:00–14:00 на кварцево-волоконные фильтры на высоте 9 м от земли (3-й этаж здания ИФА РАН). В Пекине пробы аэрозоля отбирались на фильтры АФА-ХП на основе перхлорвиниловых волокон в 08:30–11:30 на высоте 36 м (12-й этаж здания ИФА КАН).

Пункт наблюдения в Пекине расположен в северной части города между 4-й и 5-й кольцевыми автомобильными дорогами. На севере от него, за 5-й кольцевой дорогой, располагается комплекс сооружений Олимпийской деревни. Концентрация сажи в аэрозольных пробах определялась оптическим методом с помощью фотометра ИФА РАН в Москве. Калибровка фильтра проводилась по набору кварцевых фильтров с известной концентрацией сажи [12].

Результаты измерений и обсуждения

За семь лет наблюдений в Пекине было отобрано 1427 проб, в Москве – 1258 проб. Диапазон

разовых вариаций концентрации сажи в Пекине составляет 0,1–77 мкг/м³, в Москве 0,1–22 мкг/м³. На рис. 1 представлены гистограммы повторяемости концентраций ВС в Москве и Пекине в 2004–2010 гг.

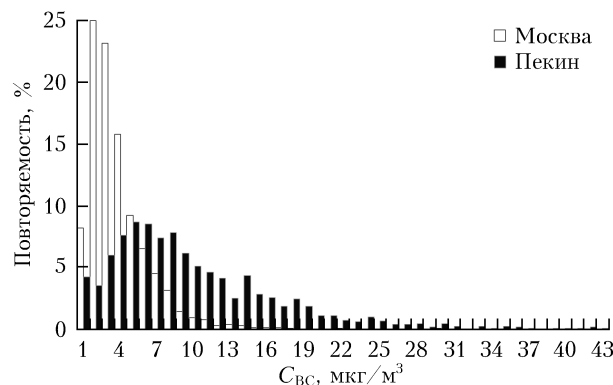


Рис. 1. Гистограммы повторяемости концентраций сажи в Москве и Пекине в 2004–2010 гг.

В дневное время высокие значения ВС (> 25 мкг/м³, 0,5 ПДК) наблюдаются в Москве очень редко (0,05% случаев), а в Пекине в 30% случаев. При этом в Москве в 64% случаев концентрация ВС приходится на диапазон 1–4 мкг/м³, а в Пекине в 57% случаев – на диапазон 2–10 мкг/м³.

По результатам дневных наблюдений за рассматриваемый период нами получены 60 среднемесячных значений концентрации сажи (с превышением 50% числа дней наблюдений в месяц) в Пекине и 75 значений в Москве. Среднемесячная концентрация ВС в Пекине варьирует в интервале 4,8–15,9 мкг/м³, а в Москве в интервале 1,5–7,9 мкг/м³. Годовой ход осредненных за семь лет среднемесячных дневных концентраций ВС в Москве и Пекине представлен на рис. 2.

Концентрация сажи в Москве с мая по июль составляла 2,5–3,5 мкг/м³, а в зимний период повышалась до 4–5 мкг/м³. В Пекине с февраля по сентябрь концентрация ВС находилась на уровне 7–9 мкг/м³, а в октябре – январе увеличивалась

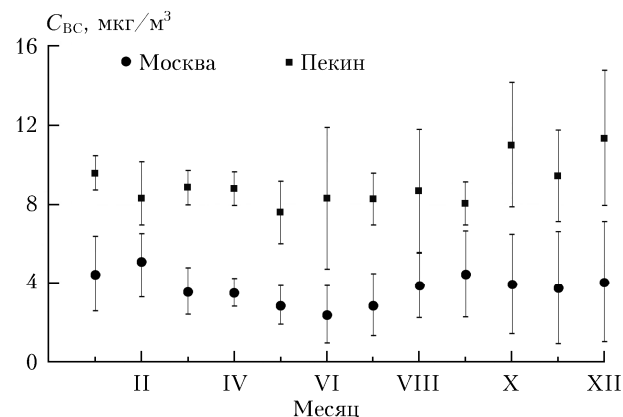


Рис. 2. Годовой ход осредненных за 2004–2010 гг. среднемесячных дневных концентраций сажи в Москве и Пекине

до 10–11 мкг/м³. Большие вариации средних квадратичных отклонений для обоих городов, в пределах 1–3 мкг/м³, обусловлены широкой изменчивостью метеоусловий в разные годы [6, 12, 15].

Осреднение среднемесячных дневных значений концентрации сажи позволило получить ее сезонные вариации в воздушных бассейнах обоих мегаполисов. В Москве минимальные концентрации сажи во все годы (за исключением 2010 г.) наблюдались летом. В Пекине в 2005–2007 гг. минимум получен для весенних, а в 2004 и 2008 гг. – для летних сезонов. В Пекине средние сезонные значения концентрации сажи в 2004–2009 гг. для зимы, весны, лета и осени соответственно равны 10,1; 8,5; 9,0 и 9,6 мкг/м³ (табл. 1), а в Москве – 3,9; 3,7; 3,0 и 4,3 мкг/м³ (табл. 2).

Таблица 1

Сезонная изменчивость концентрации сажи в 2004–2009 гг. в Пекине (С_{ВС}, мкг/м³)

Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднегодовая
2004	–	11,2	6,5	11,3	9,7
2005	10,3	7,8	10,2	9,6	9,5
2006	8,5	7,8	8,9	8,8	8,5
2007	10,6	6,4	10,4	8,3	8,9
2008	10,8	9,4	9,0	–	9,7
2009	–	–	–	10,2	–
Среднее	10,1	8,5	9,0	9,6	9,3

Таблица 2

Сезонная изменчивость концентрации сажи в 2004–2009 гг. в Москве (С_{ВС}, мкг/м³)

Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Среднегодовая
2004	–	3,1	3	6,1	4,6
2005	5,1	3,2	2,9	6	4,3
2006	3,8	4,7	3,8	4,7	4,3
2007	3,8	4,3	3,1	3,0	3,6
2008	2,7	3,9	2,7	2,7	3,0
2009	4,0	2,9	2,3	3,4	3,2
Среднее	3,9	3,7	3,0	4,3	3,8

В Москве сезонный ход концентрации ВС выражен отчетливее (летние значения в воздухе на 23% ниже зимних), чем в Пекине (весной на 13% ниже, чем зимой). Аналогичная сезонная изменчивость получена и в работах других авторов, но за меньшие периоды наблюдений: 2005–2006 гг. [8], 2007 г. [9], 2005–2007 гг. [10] и 2005–2008 гг. [11].

Средняя концентрация сажи по данным дневных измерений в 2004–2009 гг. в Пекине составляет 9,3 мкг/м³ (табл. 1), что в 2,5 раза выше среднего значения для приземного слоя атмосферы в Москве (3,8 мкг/м³, табл. 2).

Уровень загрязнения воздуха сажей с большей определенностью характеризуется среднесуточными значениями концентрации ВС. Из результатов круглосуточных измерений, проведенных нами в Пекине (четыре эпизода), а также из данных [13, 14] следует (табл. 3), что среднемесячные концентрации ВС, рассчитанные по данным круглосуточных измерений, выше, чем вычисленные по результатам днев-

ных измерений, приблизительно на 6,4% (0–12,1%). Это сопоставимо с результатами для Москвы в 2004–2007 гг. (выше на 6,4%; 0–12,7%).

Таблица 3

Средние за период измерения дневные концентрации сажи (С_{ВС, дн}) и их отличие от средних круглосуточных значений dС_{ВС} в Пекине и Москве

Город	Дата	С _{ВС, дн} , мкг/м ³	dС _{ВС} , %
Пекин	1–15.01.2004 [13]	8,8	0,0
	24.08–14.09.2004	15,0	–6,1
	1.06–31.08.2006 [14]	6,4	–6,9
	1.01–28.02.2005, [14]	6,5	–7,0
	1–31.12.2006	6,5	–7,0
	27.10–16.11.2007	9,3	–12,1
	22.10–16.11.2009	10,6	–8,2
Москва	7.10–5.11.2010	9,4	–5,5
	7.05–12.06.2004	2,2	–12,7
	19.09–5.10.2007	2,9	0,0

Таким образом, средние значения концентрации сажи, полученные в дневное время и в течение суток, равны друг другу, а уровень загрязнения воздуха сажевым аэрозолем в Пекине по среднесуточным значениям в 2,5 раза выше, чем в Москве.

Уровень загрязнения мегаполиса сажей зависит от климатических факторов, мощности локальных городских источников сажи (промышленность, объекты энергетики и автотранспорт) и поступления сажевого аэрозоля с воздушными массами от региональных источников. Основной показатель переноса загрязняющих веществ – это направление переноса воздушных масс. Проведенный ранее анализ зависимости изменчивости концентрации сажи в Пекине от обратных траекторий переноса воздушных масс в осенние сезоны 2003 и 2004 гг. [6] показал, что минимальные концентрации сажи соответствуют переносу воздушных масс из Сибири и Монголии, а максимальные – из южных и юго-западных регионов Китая [15].

В Гидрометцентре России рассчитаны пятисуточные обратные траектории переноса воздушных масс, приходивших в Москву, над равнинной местностью на уровне 925 мб (что соответствует высоте порядка 700 м над ур. м.), а для Пекина, расположенного в долине, окруженной горными массивами, – на уровне 850 мб (1500 м). Все полученные за 2004–2010 гг. траектории располагаются в 16 секторах вокруг пунктов измерений. Для каждого сектора вычислены средние концентрации сажи для четырех сезонов и среднегодовая за семь лет. Их зависимости для Москвы и Пекина от направления переноса воздушных масс показаны на рис. 3.

Осредненная за семь лет концентрация сажи в Москве (рис. 3, а) при поступлении из северных регионов чистых арктических воздушных масс приблизительно в 1,5 раза меньше, чем в случае прихода воздушных масс южного направления.

Загрязнение сажей воздуха Пекина заметно возрастает (рис. 3, б) при переносе воздушных масс из секторов от ЮЗ до ЮВ, когда среднегодовые значения концентрации сажи (~7,7 мкг/м³) на 30%

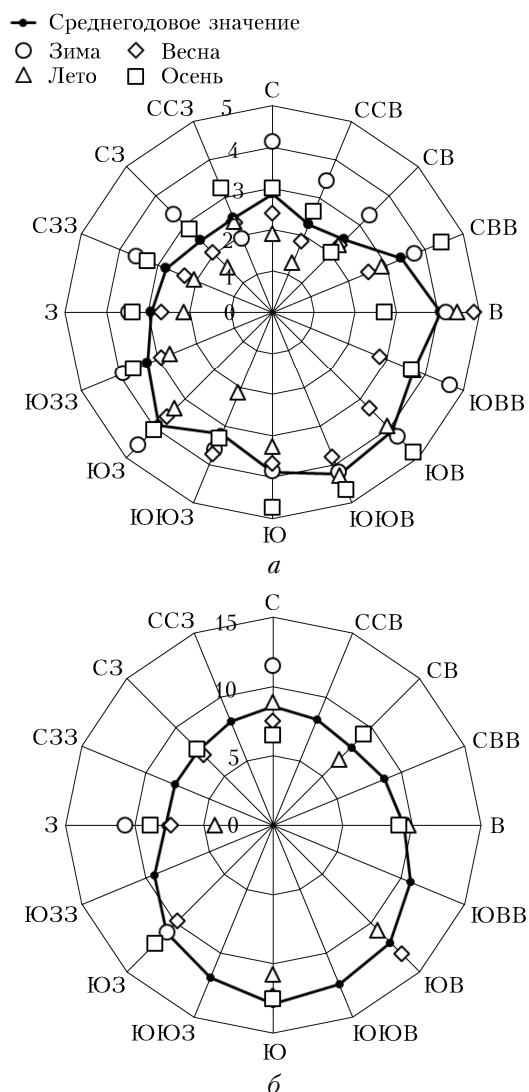


Рис. 3. Зависимость уровней загрязнения сажей воздушных бассейнов Москвы (а) и Пекина (б) от направления переноса воздушных масс для четырех сезонов и среднегодовая за период 2004–2010 гг.

превышают средние концентрации ВС в случае прихода воздушных масс с других направлений. В северной части Пекина уровень загрязнения воздуха сажей повышается при переносе воздушных масс из промышленно развитых регионов, находящихся в радиусе ~1,0–1,5 тыс. км к югу от города [1], а также от источников, расположенных внутри города. Когда воздушные массы поступают в Пекин из 350-кило-

метровой области вокруг него (сектор 0), средняя за весь срок измерений концентрация сажи составляет 9,4 мкг/м³. Уровни загрязнения сажей воздушного бассейна Пекина весной, летом и осенью отличаются друг от друга незначительно и в среднем ниже зимнего значения на 25%. Повышение концентрации ВС зимой связано с метеорологическими условиями, а также с появлением новых источников сажи с наступлением отопительного сезона в Пекине и в целом в регионе, которые дают дополнительный вклад в загрязнение приземного воздуха.

Используя пятисуточные траектории переноса воздушных масс за 2004–2010 гг., мы вычислили долю различных направлений переноса воздушных масс для Пекина (табл. 4). Зимой, весной и осенью перенос СЗ направления составляет 56,6; 43,9 и 38,9% соответственно. Летом велик вклад переноса воздушных масс ЮВ и ЮЗ направлений (23,9 и 21,4%) и минимален вклад СЗ и СВ направлений (14,7 и 14,5%). Перенос воздушных масс в Пекин по сложным траекториям в секторе 0 составляет 10,1; 7,0; 25,5 и 15,7% для зимы, весны, лета и осени соответственно.

Летом 2004 г. перенос воздушных масс южного направления с высоким содержанием сажевого аэрозоля в Пекин был минимальный (26,4%) по сравнению с другими годами (38,0–46,7%). По этой причине сезонная изменчивость концентрации ВС была наиболее выраженной в 2004 г. (см. табл. 1): ее уровень летом равнялся 6,5 мкг/м³, а это ниже, чем в другие сезоны, приблизительно в 1,6 раза.

Во время проведения Летних Олимпийских игр в Пекине 4–24.08.2008 г., как следует из табл. 4, в сумме доля ЮВ и ЮЗ направлений переноса воздушных масс с высоким содержанием сажи составляла 42,2%, а в те же сроки в 2004–2007 гг. — 31,2%, т.е. 2008 г. был менее благоприятным для снижения загрязнения воздуха Пекина. Однако измерения показали, что средняя концентрация ВС в атмосфере города во время Олимпиады составляла 10,7 мкг/м³, что ниже соответствующего значения (13,2 мкг/м³) для того же периода в 2004–2007 гг. Снижение загрязнения воздушного бассейна Пекина, по-видимому, было достигнуто за счет принятых правительством мер: было сокращено на 45% число личных автомобилей, выезжающих на дороги города (по четным дням выезд разрешался только машинам с четными номерами, по нечетным — наоборот, а с 00:00 до 03:00 в любой день — всем автомобилям), введен запрет на движение по городу старых марок автомобилей и др.

Таблица 4

Направление	Доля направлений переноса воздушных масс для Пекина (%)				2004–2007 гг. 4–24.08	2008 г. 4–24.08
	2004–2010 гг.					
	Зима	Весна	Лето	Осень		
СЗ	56,6	43,9	14,7	38,9	17,6	11,6
СВ	6,1	10,8	14,5	8,2	26,9	20,6
ЮВ	5,1	13,6	23,9	10,9	20,2	22,6
ЮЗ	22,1	24,7	21,4	26,3	11,0	19,6
Сектор 0	10,1	7,0	25,5	15,7	24,3	25,6

Заключение

Анализ результатов измерений содержания сажи в воздушных бассейнах мегаполисов Пекина и Москвы показал следующее.

Диапазон разовых вариаций концентрации сажи в Пекине составляет 0,1–77 мкг/м³, а в Москве 0,1–22 мкг/м³. Средняя за семь лет концентрация сажи в Пекине в дневное время составляет 9,3 мкг/м³. Это в 2,5 раза выше, чем в Москве, где уровень загрязнения сажей приземного воздуха составляет 3,8 мкг/м³. В Москве сезонный ход концентрации сажи выражен отчетливее: летом ее значения на 23% ниже, чем зимой, а в Пекине – только на 13%.

Из анализа обратных траекторий переноса воздушных масс следует, что значительный рост содержания сажи в атмосфере Пекина наблюдается при переносе воздушных масс из промышленно развитых регионов, находящихся в секторе от ЮЗ до ЮВ. В Москве понижение уровня загрязнения воздушного бассейна сажей преимущественно происходит за счет адвекции с поступлением в Москву воздушных масс из северных регионов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-55-53062).

1. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракитин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолем // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 8–19.
2. Розенберг Г.В. О природе аэрозольного поглощения в коротковолновой области спектра // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1979. Т. 15, № 12. С. 1280–1291.
3. Петрухин В.А. Риск заболевания населения от загрязнения атмосферы автотранспортом, опыт применения методологии оценки риска в России. М.: Наука, 2000. С. 217.
4. Dod R.L., Giauque R.D., Novakov T. Sulfate and carbonaceous aerosols in Beijing, China // Atmos. Environ. 1986. V. 20, N 11. P. 2271–2275.
5. He K., Yang F., Ma Y., Zhang Q., Yao X., Chan C.K., Cadle S., Chan T., Mulawa P. The characteristics

- of PM_{2.5} in Beijing, China // Atmos. Environ. 2001. V. 35, N 29. P. 4959–4970.
6. Емиленко А.С., Копейкин В.М. Сравнение синхронных измерений концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в регионах с разной степенью антропогенной нагрузки // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 535–540; Emilenko A.S., Kopeikin V.M. Comparison of synchronous measurements of soot and submicron aerosol concentrations in regions with different anthropogenic loadings // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 4. P. 421–427.
7. Zhang R.J., Cao J.J., Lee S.C., Shen Z.X., Ho K.F. Carbonaceous aerosols in PM₁₀ and pollution gases in winter in Beijing // Environ. Sci. China. 2007. V. 19, N 5. P. 564–571.
8. Yang F., Huang L., Duan F., Zhang W., He K., Ma Y., Brook J.R., Tan J., Zhao Q., Cheng Y. Carbonaceous species in PM_{2.5} at a pair of rural-urban sites in Beijing, 2005–2008 // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2011. V. 11. P. 8719–8746.
9. Wang G.C., Bai J., Kong Q., Emilenko A. Black carbon particles in the atmosphere in Beijing // Adv. Atmos. Sci. 2005. V. 22, N 5. P. 640–646.
10. Справочник эколого-климатических характеристик / под ред. А.А. Исаева. М.: Изд-во МГУ, 2005. Т. 2. 312 с.
11. Осипов Ю.С., Горелова Л.П., Черняева В.И. Мониторинг состояния загрязнения природной среды г. Москвы // Метеорология и климатология в СССР. Московский филиал географического общества СССР. 1991. 279 с.
12. Копейкин В.М. Экспериментальное исследование изменчивости концентрации сажевого аэрозоля в городской атмосфере: авторефер. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1998. 17 с.
13. Zhang R.J., Cao J.J., Lee S.C., Shen Z.X., Ho K.F. Carbonaceous aerosols in PM₁₀ and pollution gases in winter in Beijing // Environ. Sci. 2007. V. 19, N 5. P. 564–571.
14. He X., Li C.C., Lau A.K.H., Deng Z.Z., Mao J.T., Wang M.H., Liu X.Y. An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 8903–8915.
15. Emilenko A.S., Wang Gengchen, Sviridenkov M.A., Isakov A.A., Kopeikin V.M. Comparison of the levels of soot and submicron aerosol pollution near surface in conditions of Beijing and Moscow // Intern. Sympos. on Atmos. Phys. and Chem. Qufu, Shandong, China. 2007. P. 5–8.

V.M. Kopeikin, G.S. Golitsyn, Wang Gengchen, Wang Pucui, T.Ya. Ponomareva. Variations in soot concentrations in megacities of Beijing and Moscow.

The results of BC concentration measurements in Moscow in 2003–2013 and in Beijing in 2004–2010 are presented. Measurement ranges of single BC concentrations in 2004–2010 are 0.1–77 µg/m³ in Beijing and 0.1–22 µg/m³ in Moscow. The seven-year average daytime BC concentration in Beijing is 2.5 times higher than in Moscow. The seasonal variability of the BC concentration is more pronounced in Moscow (in summer it is 33% lower than in winter) than in Beijing (in summer it is only 13% lower). A significant increase in the BC concentration in the air of Beijing occurs when air masses are transferred from industrialized regions south of Beijing. The air pollution with BC mainly decreases in Moscow due to advection under arrival of air masses from northern regions.