

УДК 551.510

Зависимость вариаций содержания сажи в атмосфере Москвы от направления переноса воздушных масс

В.М. Копейкин¹, Т.Я. Пономарева^{2*}

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

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, пер. Большой Предтеченский, 11–13

Поступила в редакцию 19.01.2020 г.

Для нахождения зависимости вариаций концентрации сажи в воздушном бассейне Москвы от направления переноса воздушных масс и для определения регионов-источников сажи использованы данные о концентрации сажи C_{BC} (черный углерод, BC) в атмосфере Москвы и обратные 5-суточные траектории переноса воздушных масс, полученные в период 2003–2014 гг. По результатам 12-летних измерений концентрации сажи в воздухе Москвы показано, что вариации C_{BC} определяются характером циркуляции воздушных масс в тропосфере. С использованием результатов измерений содержания сажи в воздушном бассейне Москвы в июне–сентябре 2019 г. и обратных 10-суточных траекторий переноса воздушных масс изучено влияние последних на уровень загрязнения воздуха в Москве.

Ключевые слова: сажа (черный углерод, BC), массовая концентрация аэрозоля, загрязнение атмосферы мегаполисов, обратные траектории переноса воздушных масс; soot (black carbon, BC), mass concentration of aerosol, pollution of the atmosphere of megalopolises, reverse trajectories of air mass transfer.

Введение

В настоящее время мониторингу состава атмосферы и контролю качества воздуха в крупных городах уделяется большое внимание [1–8]. Концентрация сажевого аэрозоля – важный показатель качества атмосферного воздуха. В Москве среди канцерогенов сажа занимает четвертое место из десяти, а из 16 химических веществ, усугубляющих неонкологические болезни, она на пятом месте [9].

Для принятия мер по уменьшению загрязнения воздушного бассейна Москвы, приводящего к росту заболеваемости населения, необходимо знать концентрации загрязняющих атмосферу веществ и их вариации при разных метеорологических условиях.

Мы измеряем содержание сажи в воздушном бассейне Москвы с 1989 г. Изменение уровня загрязнения приземного воздуха зависит от мощности выбросов источников сажи (основным является автотранспорт – 85%), от состояния атмосферы и адвекции. При адвекции, когда в город поступает воздух из областей с более низким содержанием сажи, чем в Москве, он разбавляет и вытесняет городской воздух, в результате чего содержание сажи в атмосфере города снижается [10]. Когда воздушные массы приходят из мест пожаров (горение торфяников, древесных и травяных материалов), кон-

центрация сажи в воздухе растет. Мы наблюдали увеличение содержания сажи в Москве при поступлении воздушных масс, содержащих дым от лесных пожаров в Сибири [11], Брянской обл. [12], Шатурском р-не Московской обл. [13], а также местных источников сажи при пожарах в Подмосковье [14]. Участвовавшие случаи горения лесов Сибири и их вклад в увеличение загрязнения сажей воздушного бассейна Сибири и Томска обсуждаются в [15, 16].

Цель нашей работы – изучение изменчивости вариаций концентрации сажи в атмосфере Москвы в зависимости от направления переноса воздушных масс. Необходимо получить зависимости средних за 12 лет концентраций сажи в Москве при северном и южном направлениях переноса воздушных масс в разные сезоны, а также изучить влияние воздушных масс из высоких широт Арктики на уровень загрязнения воздуха в Москве.

1. Условия измерения концентрации сажи и определение направлений переноса воздушных масс

Чтобы найти зависимость содержания сажи в атмосфере Москвы от направлений переноса воздушных масс и определить источники сажи, мы использовали полученные в 2003–2014 гг. данные о концентрации сажи и направлениях переноса воздушных масс. Принимая во внимание, что Москва

* Владимир Михайлович Копейкин (kopeikin@ifaran.ru); Татьяна Яковлевна Пономарева (ponomareva_ty_a@mail.ru).

располагается на высоте 114–255 м над ур. м., а траектории переноса воздушных масс рассчитываются в Гидрометцентре России на уровнях 1000 и 925 мб (что соответствует высотам порядка 0 и 700 м над ур. м.) [17], мы использовали 5-суточные обратные траектории переноса воздушных масс на уровне 925 мб. Все полученные за 12 лет (2003–2014 гг.) траектории рассчитаны для 2062 дней отбора аэрозольных проб. Данные о концентрации сажи удовлетворяют требованиям статистической однородности ряда, поскольку измерения проводились на одном и том же приборе, в одном и том же месте, без смены условий окружающей местности. Пробы сажи отбирались на кварцево-волоконные фильтры на высоте 9 м от земли в центральной части Москвы в 10:00–15:00. Определение концентрации сажи C_{BC} (черный углерод, BC) в аэрозольных пробах осуществлялось оптическим методом с использованием фотометра ИФА им. А.М. Обухова РАН с погрешностью 20% – по ослаблению экспонированным фильтром излучения в красной области спектра (0,6–0,8 мкм). Калибровка фотометра проводилась по набору кварцевых фильтров с известной концентрацией сажи [14, 18]. Получено 2062 значения концентрации сажи в течение 12 лет.

В ежегодном распределении числа воздушных масс по направлениям переноса (аналог «розы ветров») в Москве воздушные массы западного направления наблюдались максимальное число раз – 404 случая, в то время как для нескольких секторов зарегистрировано всего 1–3 случая. Мы использовали распределение числа воздушных масс в зависимости от направлений переноса за периоды

по три года (I: 2003–2005; II: 2006–2008; III: 2009–2011; IV: 2012–2014 гг.), что позволило получить больше 7 случаев для каждого направления переноса.

Таблица 1 показывает, что за 12 лет уровень загрязнения сажей воздуха Москвы снизился в 2 раза с погрешностью 6% при доверительной вероятности $P = 0,95$. Относительная погрешность средних за 3 года концентраций сажи для 16 направлений переноса воздушных масс в 61 случаях из 64 составляет 10–46%.

Относительная погрешность для СВ направления переноса воздушных масс в период II составляет 64%. Высокий уровень загрязнения воздуха в Москве и области наблюдался 2 мая 2006 г. во время сжигания в Подмоскowie сухой прошлогодней травы и отходов древесины в условиях высокой температуры воздуха (днем 19° С) и низкой скорости ветра (менее 1 м/с). Для ССВ направления переноса в период III получена относительная погрешность 67%. 16–18 декабря 2009 г. в Москве наблюдалась самая низкая за 2003–2014 гг. для этих дней температура воздуха, от –16 до –20° С, и скорость ветра 0–1 м/с. В обоих случаях единичные C_{BC} превышали средние за 3 года C_{BC} (по 9–10 измерений) для соответствующих направлений переноса воздушных масс в 2–3 раза. Также большая относительная погрешность (55%) наблюдалась при восточном направлении переноса в период III, когда 6–9 августа 2010 г. во время горения в Подмоскowie торфяников и лесов единичные C_{BC} в 3–4 раза превышали среднюю за 3 года в период III (15 случаев).

Таблица 1

Средние за 3 года C_{BC} (мкг/м³), относительная погрешность ΔC_{BC} при доверительной вероятности $P = 0,95$ (%), число дней отбора проб аэрозоля (n) для каждого из 16 направлений переноса воздушных масс в Москве в 2003–2014 гг., и средние за 3 года C_{BC} по всем секторам

Сектор	Период											
	I			II			III			IV		
	C_{BC}	ΔC_{BC}	n	C_{BC}	ΔC_{BC}	n	C_{BC}	ΔC_{BC}	n	C_{BC}	ΔC_{BC}	n
С	4,0	23	34	3,1	26	36	3,0	27	32	1,8	26	27
ССВ	2,3	42	9	2,1	46	10	2,9	67	10	1,3	46	8
СВ	1,9	26	19	4,1	64	9	2,5	32	18	2,1	35	23
BCB	4,2	45	14	3,5	37	19	2,6	30	15	1,8	34	28
В	4,2	32	10	5,3	41	10	5,8	55	15	2,5	36	14
ВЮВ	5,9	26	22	5,0	29	25	3,9	14	42	2,6	18	44
ЮВ	4,5	26	14	5,4	24	15	3,5	18	26	3,3	31	18
ЮЮВ	5,4	37	13	4,7	19	13	3,7	27	15	3,0	39	11
Ю	4,9	17	44	4,2	22	31	3,7	14	47	2,3	17	52
ЮЮЗ	4,9	26	14	4,1	15	15	3,6	19	28	2,0	38	14
ЮЗ	5,1	16	30	4,5	18	30	4,0	26	27	2,1	19	30
ЗЮЗ	4,4	14	69	4,0	17	76	3,1	15	72	2,4	18	47
З	4,3	15	110	3,2	10	128	2,7	10	81	2,0	11	86
ЗСЗ	3,9	17	62	2,9	18	60	2,7	27	53	1,6	17	47
СЗ	3,3	25	28	2,3	25	32	1,9	23	26	1,6	33	20
ССЗ	4,2	41	8	2,6	25	7	2,0	38	7	1,5	33	9
Все сектора	4,3	5,8	515	3,7	5,7	534	3,2	5,4	528	2,2	6,2	402

2. Концентрация сажевого аэрозоля при различных направлениях переноса воздушных масс и ее сезонная изменчивость

На рис. 1 представлены уровни загрязнения сажей воздуха Москвы для периодов I–IV и 12-летнего периода при разных направлениях переноса воздушных масс.

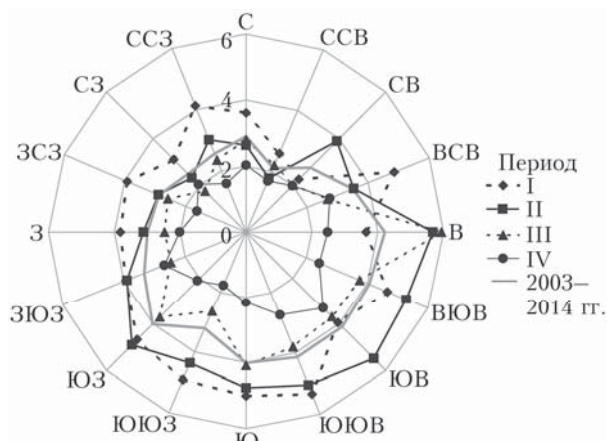


Рис. 1. Зависимость уровней загрязнения сажей воздушного бассейна Москвы от направления переноса воздушных масс для четырех периодов и средняя за 12 лет $C_{вс}$ (мкг/м³) для каждого направления

При поступлении воздушных масс южного направления переноса (Ю – 7 секторов, ВЮВ–ЗЮЗ) уровень содержания сажи в атмосфере Москвы при осреднении за 12 лет составляет $3,8 \pm 0,2$ мкг/м³ что в 1,4 раза выше, чем уровень $C_{вс}$ при северном направлении (С – 7 секторов, ЗСЗ–ВСВ) – $2,7 \pm 0,2$ мкг/м³. Средний уровень $C_{вс}$ для периодов I–IV снижается при поступлении в Москву

воздушных масс как из северных (3,5; 2,9; 2,3; 2,0 мкг/м³), так и из южных секторов (4,6; 4,6; 3,4; 2,5 мкг/м³). Отношение содержания сажи при южном и северном направлениях переноса воздушных масс составляет 1,3 (в периоды I и IV), 1,6 (II) и 1,5 (III) мкг/м³.

Таким образом, средний уровень $C_{вс}$ в 2006–2011 гг. в значительной мере определяется приходом воздушных масс с южных направлений переноса.

Мы определили уровни загрязнения сажей воздушного бассейна Москвы (мкг/м³) при северном и южном направлениях переносах воздушных масс (по 7 секторам) для четырех сезонов. Как следует из рис. 2, при поступлении воздушных масс южного направления переноса для всех сезонов вариации содержания сажи в воздухе Москвы имеют аналогичный вид для периодов II, III и IV, при этом средние $C_{вс}$ уменьшаются от II до IV периода. В период I весной и осенью значения $C_{вс}$ были максимальными, а летом и зимой загрязнение сажей воздуха Москвы было ниже, чем в период II. При поступлении воздушных масс северного направления переноса в Москву во все четыре сезона $C_{вс}$ различается по периодам.

В табл. 2 представлены отношения средних концентраций сажи в воздушном бассейне Москвы при южном и северном направлениях переноса воздушных масс для разных сезонов.

Таблица 2

Отношение $C_{вс}$ в воздухе Москвы при южном и северном направлениях переноса воздушных масс для четырех сезонов осредненные за 3 года $C_{вс}$ (мкг/м³)

Сезон	Период				2003–2014 гг.
	I	II	III	IV	
Осень	1,0	0,9	1,5	1,1	1,1
Зима	1,4	1,5	1,2	0,9	1,2
Весна	1,7	1,3	1,6	1,4	1,5
Лето	1,4	1,9	1,3	1,7	1,6
Средняя за 3 года	$1,4 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,4$	$1,5 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,2$

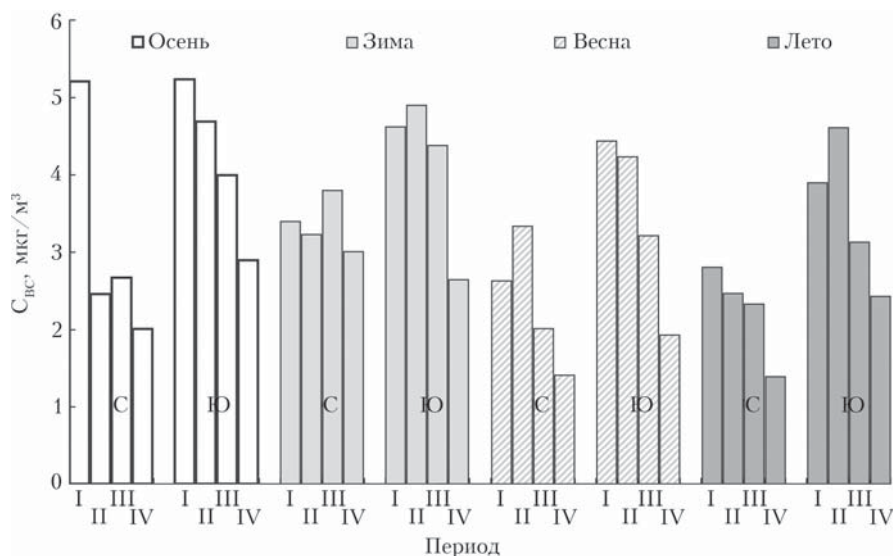


Рис. 2. Изменчивость уровней загрязнения сажей воздушного бассейна Москвы при северном и южном направлениях переноса воздушных масс для четырех сезонов по четырем периодам

Наименьшие отношения C_{BC} в воздухе Москвы при южном и северном направлениях переноса воздушных масс получено осенью и зимой (1,1 и 1,2 соответственно); они увеличиваются до 1,5 и 1,6 весной и летом. Таким образом, поступление в Москву воздушных масс из северных регионов незначительно влияет на загрязнение сажей воздуха в Москве осенью и зимой, гораздо сильнее — весной и летом.

На рис. 3 представлена изменчивость уровней загрязнения сажей воздуха в Москве для четырех периодов из 4-х секторов переноса воздушных масс для четырех сезонов. Низкие уровни загрязнения воздуха сажей в Москве для всех сезонов наблюдались при поступлении воздушных масс из северного сектора — 2–3 мкг/м³. Уровень загрязнения чаще всего увеличивался при поступлении воздушных масс из секторов в следующем порядке — северный, восточный, западный, южный.

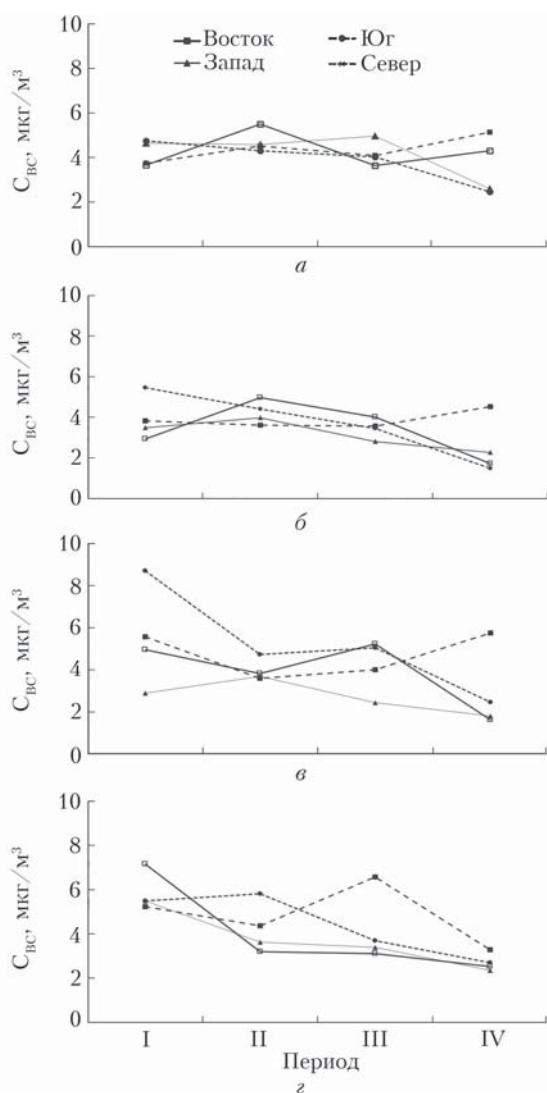


Рис. 3. Изменчивость уровней загрязнения сажей воздуха в Москве при поступлении воздушных масс из 4-х секторов переноса: для зимы (а); весны (б); лета (в); осени (г)

Летом (рис. 3, в) уровни загрязнения сажей воздуха в Москве существенно различались в зависимости от направления переноса воздушных масс. Низкое загрязнение воздуха наблюдалось при поступлении из северного и западного, высокое — из южного и восточного секторов.

Загрязнение сажей воздуха при поступлении воздушных масс восточного направления в периоды I, II и IV ниже, чем при южном направлении. В период III уровень загрязнения воздуха сажей при поступлении в Москву из восточного сектора достиг уровня загрязнения воздуха при поступлении воздушных масс из южного. Анализ ежегодной изменчивости C_{BC} в зависимости от направлений переноса воздушных масс показал, что основной вклад в загрязнение сажей воздушного бассейна Москвы в период III внес высокий уровень загрязнения в 2010 г. При атмосферной циркуляции, обусловленной блокирующим антициклоном, находившимся в августе 2010 г. над европейской частью России, большое содержание сажи в воздухе города (7,2–21,5 мкг/м³), наблюдалось во время горения лесов и торфяников в Подмоскowie 3–11 августа при В и ВЮВ направлениях ветра. В августе 2009 и 2011 гг. повышенные концентрации сажи, 4,0 и 5,7 мкг/м³ соответственно, наблюдались только один раз.

Зимой (рис. 3, а) отмечены большие значения C_{BC} в периоды II и IV (5,5 и 4,3 мкг/м³) при поступлении воздушных масс из восточного сектора, что, вероятно, связано с продолжительными инверсиями температуры в периоды низких температур воздуха в Москве.

4. Изменчивость концентрации сажевого аэрозоля в воздушном бассейне Москвы при поступлении арктических воздушных масс

Использованные нами обратные 5-суточные траектории переноса воздушных масс на уровне 925 мб одного направления значительно различаются по длине и, следовательно, по скорости перемещения воздушных масс, а также берут начало в разных широтных и долготных зонах. Мы изучили изменчивость содержания сажи в воздухе Москвы в зависимости от направления переноса при поступлении чистых арктических воздушных масс, берущих начало в областях выше 75° с.ш. Результаты исследования представлены в табл. 3.

Средние по сезонам и среднегодовые за четыре периода концентрации сажи уменьшаются с I по IV период. Средняя за 3 года концентрация сажи в период IV в 2 раза меньше (табл. 3), чем в период I.

Исключением являются результаты следующих наблюдений:

— 20 августа 2010 г. концентрация сажи в Москве составляла 1,9 мкг/м³. Воздушная масса поступила Москву из Арктики (С, начало в Баренцевом море) и прошла над территорией Республики Коми.

Таблица 3

Сезонная и среднегодовая изменчивость содержания сажи для четырех периодов (в скобках – число измерений) в воздухе Москвы при поступлении арктических воздушных масс, берущих начало в областях выше 75° с.ш., мкг/м³

Сезон	Период			
	I	II	III	IV
Зима	4,4 (8)	2,1 (7)	–	2,2 (6)
Весна	2,3 (8)	1,7 (2)	1,3 (8)	0,9 (5)
Лето	1,6 (5)*	1,2 (3)*	1,9 (6)**	1,0 (4)*
Осень	2,8 (5)	1,4 (3)	1,6 (7)	1,5 (9)
Средняя за 3 года	2,8 (26)	1,6 (15)	1,6 (21)	1,4 (24)

* июнь-июль, ** август.

– 2–3 и 22–24 августа 2011 г. концентрация сажи варьировала в интервале 1,2–3,2 мкг/м³ и в среднем составляла 1,9 мкг/м³. Арктические

воздушные массы (СВ, начало в Карском море) проходили над территорией Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО).

Таким образом, загрязнение воздуха, скорее всего, произошло над территориями сжигания попутного нефтяного газа Республики Коми и ЯНАО.

Мы изучили влияние воздушных масс из арктических широт на уровень загрязнения воздуха в Москве с помощью более продолжительных по времени обратных 10-суточных траекторий, а также результатов наблюдения содержания сажи в Москве в июне–сентябре 2019 г., когда имела место необычная циркуляция воздушных масс в тропосфере европейской территории России. Среднесуточная температура воздуха в Москве поднималась до 25° С в июне и снижалась до 15° С в июле (рис. 4, а) [19]. Концентрация сажи в воздухе города в июне–сентябре 2019 г. варьировалась в интервале 1,3–6,2 мкг/м³ (рис. 4, б). Стрелки указывают дни нахождения

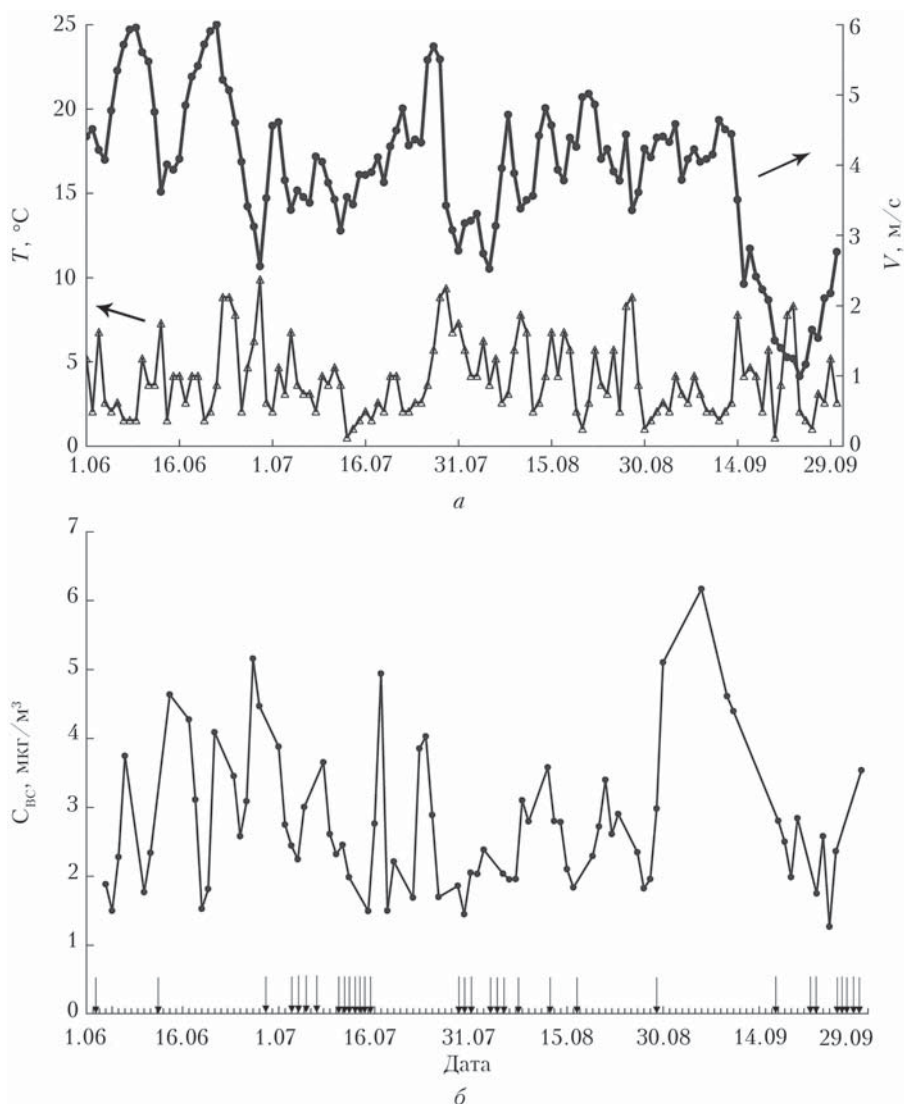


Рис. 4. Среднесуточные вариации температуры и скорости ветра (а), концентрации сажи (б) в Москве в июне–сентябре 2019 г.

в Москве арктических воздушных масс. В июне зафиксировано всего 3 случая прихода воздуха из Арктики, в июле, августе и сентябре – 13, 7 и 8 случаев. В периоды поступления в Москву арктических воздушных масс средние за месяц концентрации сажи были низкими – 1,9, 2,1 и 2,1 мкг/м³ в июле, августе и сентябре. В дни, когда не было поступления арктического воздуха в Москву, средние C_{BC} увеличивались и составляли в июне, июле, августе и сентябре 3,0, 2,8, 2,7 и 4,0 мкг/м³. Отличие средних C_{BC} в периоды отсутствия и поступления в Москву арктических воздушных масс составило 1,5, 1,3 и 1,9 раза в июле, августе и сентябре соответственно. Необходимо отметить, что в периоды, когда в Москву не поступали воздушные массы с северных направлений, 4–9 июня, 13–25 июля и 30 августа–13 сентября на метеостанции ВДНХ [19] зарегистрирована низкая скорость ветра (0,1–1,0 м/с), вследствие чего загрязнение сажей воздуха в Москве повысилось до 3,8–6,2 мкг/м³.

Заключение

Анализ результатов измерений содержания сажи в воздушном бассейне Москвы показал следующее.

Средняя за 12 лет (2003–2014 гг.) концентрация сажи при поступлении воздушных масс северных направлений переноса в 1,4 раза ниже, чем при поступлении воздушных масс южных направлений.

Большое отличие средних C_{BC} за 12 лет (в 1,5 и 1,6 раза) получено при южном и северном направлениях переноса воздушных масс весной и летом. Небольшие отличия (в 1,1 и 1,2 раза) наблюдались осенью и зимой.

Летом для периода III при поступлении воздушных масс, проходивших над областями выше 75° с.ш., зарегистрированы максимальные за 12 лет наблюдений значения C_{BC} . Траектории переноса воздушных масс пролегли над территориями сжигания попутного нефтяного газа Республики Коми и ЯНАО, что, скорее всего, стало причиной загрязнения их сажевым аэрозолем.

С использованием результатов наблюдений содержания сажи в воздушном бассейне Москвы в июне–сентябре 2019 г. и обратных 10-суточных траекторий переноса воздушных масс изучено влияние поступления воздушных масс из высоких широт Арктики на уровень загрязнения воздуха в Москве. Концентрация сажевого аэрозоля в периоды отсутствия и поступления в Москву арктических воздушных масс различалась в 1,5, 1,3 и 1,9 раза в июле, августе и сентябре соответственно.

Работа выполнена в рамках госзадания (проект № 0129-2019-0002).

1. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракинин 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. Rattigan O.V., Carpenter A., Civerolo K., Felton D. Pollutant measurements at near road and urban background sites in New York, USA // Atmos. Poll. Res. 2020. V. 11, N 5. P. 859–870.

3. Yang Wang, Szeling Liu, Peng Shi, Yanli Li, Chao Mu, Ke Du. Temporal variation of mass absorption efficiency of black carbon at urban and suburban locations // Aer. Air Qual. Res. 2013. V. 13, N 1. P. 275–286.

4. Jiannong Quan, Youjun Dou, Xiujuan Zhao, Quan Liu, Zhaobin Sun, Yubing Pan, Xingcan Jia, Zhigang Cheng, Pengkun Ma, Jie Su, Jinyuan Xin, Yangang Liu. Regional atmospheric pollutant transport mechanisms over the North China Plain driven by topography and planetary boundary layer processes // Atmos. Environ. 2020. V. 221. P. 117098.

5. Alizadeh-Choobari O., Bidokhti A.A., Ghafarian P., Najafi M.S. Temporal and spatial variations of particulate matter and gaseous pollutants in the urban area of Tehran // Atmos. Environ. 2016. V. 141. P. 443–453.

6. Elansky N. Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // Urban Climate. 2014. N 8. P. 42–56.

7. Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скоороход А.И., Чубарова Н.Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей PM_{2.5} в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042; Gubanova D.P., Belikov I.B., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Chubarova N.E. Variations in PM_{2.5} surface concentration in Moscow according to observations at MSU meteorological observatory // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 290–299.

8. Вильфанд Р.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Нахаев М.И., Захарова П.В., Ланченко В.А. Мониторинг и прогнозирование качества воздуха в Московском регионе // Биосфера. 2014. Т. 6, № 4. С. 339–351.

9. Риск заболевания населения от загрязнения атмосферы автотранспортом. Опыт применения методологии оценки риска в России / Петрухин В.А. (ред.). М.: Наука, 2000. 188 с.

10. Копейкин В.М., Голицын Г.С., Гэнчэнь Ван, Пуцай Ван, Пономарева Т.Я. Вариации концентрации сажи в мегаполисах Пекине и Москве // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 453–457.

11. Семутникова Е.Г., Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчакова И.А., Пономарева Т.Я., Исаков А.А., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Курбатов Г.А., Кузнецов Г.А. Сибирская дымная мгла над европейской территорией России в июле 2016 г. Загрязнение атмосферы и радиационные эффекты // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 962–970; Semoutnikova E.G., Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Ponomareva T.Ya., Isakov A.A., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Kurbatov G.A., Kuznetsov G.A. Siberian smoke haze over European territory of Russia in July 2016: Atmospheric pollution and radiative effects // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 171–180.

12. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Ситнов С.А., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Лезина Е.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Кузнецов Г.А., Пономарева Т.Я. Московская дымная мгла в октябре 2014 г. Вариации массовой концентрации аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 872–878; Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Sitnov S.A., Semoutnikova E.G., Sviridenkov M.A., Karpov A.V., Lezina E.A., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kuznetsov G.A., Ponomareva T.Ya. Moscow smoke haze in October 2014.

- Variations in the aerosol mass concentration // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 5–11.
13. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Лезина Е.А., Пономарева Т.Я., Соколов А.В. Московская дымная мгла 2010 г. Экстремальное аэрозольное и газовое загрязнение воздушного бассейна Московского региона // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 452–458.
 14. Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Лоскутова О.В., Пономарева Т.Я. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 5–10; Kopeikin V.M., Emilenko A.S., Isakov A.A., Loskutova O.V., Ponomareva T.Ya. Variability of soot and fine aerosol in the Moscow region in 2014–2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 243–249.
 15. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Относительное содержание сажи в субмикронном аэрозоле как индикатор влияния дымов удаленных лесных пожаров // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 484–491.
 16. Чернов Д.Г., Козлов В.С., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Годовая изменчивость концентраций аэрозоля и черного углерода в безоблачной тропосфере Западной Сибири в 2000–2016 гг. // Proc. SPIE. 2017. С. 104662I.
 17. Белоусов С.Л., Пагава Т.С. Расчет траекторий воздушных частиц // Отраслевой фонд алгоритмов и программ «Гидрометслужба». 1998. № 257244 8.00150-01 13.
 18. Hansen A.D.A., Rosen H., Novakov T. The aethalometer-an instrument for real-time measurement of optical absorption by aerosol particles // Sci. Total. Environ. 1984. V. 36, N 1. P. 191–196.
 19. URL: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Москве_\(ВДНХ\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Москве_(ВДНХ)) (last access: 19.12.2019).

V.M. Kopeikin, T.Ya. Ponomareva. Dependence of the soot content variations in the atmosphere of Moscow on the air mass transfer directions.

The data on the concentration of soot C_{BC} (black carbon, BC) in Moscow and the inverse 5-day trajectories of air mass transfer obtained between 2003 and 2014 were used to determine the influence of advection on the level of soot pollution of the air basin of Moscow and to determine the source regions of soot outside the city. According to the results of 12-year soot measurements in Moscow, it was shown that the C_{BC} variations are determined by the nature of the air mass circulation in the troposphere. The period from June to September 2019 was also studied with the use of inverse 10-day air mass trajectories.