

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.42

Экстремальные аэрозольные загрязнения атмосферы в зимний период в Академгородке г. Томска

Е.П. Яушева[✉], В.А. Гладких, А.П. Камардин, В.П. Шмаргунов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.;
после доработки 22.05.2023 г.;
принята к печати 8.06.2023 г.

По результатам мониторинговых измерений аэрозольных характеристик и метеорологических величин нижнего слоя атмосферы в зимние периоды 2016–2022 гг. в Академгородке, расположенном на юго-востоке г. Томска, проанализированы условия возникновения экстремальных концентраций субмикронных частиц и поглощающего вещества (сажи, черного углерода) в их составе в приземном слое. Показано, что при сочетании приземной инверсии температуры воздуха и слабого (до 1,5 м/с) ветра — застое воздуха — средние значения исследуемых аэрозольных характеристик увеличиваются до 3 раз, а при слабом северо-западном ветре — до 7–8 раз относительно среднесезонных значений. Выявлено, что в ситуациях многодневного застоя воздуха типичный суточный ход, характеризующийся послеполуденным минимумом, меняется. Рост их концентраций продолжается до 15:00 до значений, в 1,8 раза больше ночного минимума, в то время как в остальные зимние дни максимум наступает в 10:00 с превышением ночного минимума концентрацией субмикронных частиц в 1,2 раза, а черного углерода — в 1,5 раза.

Ключевые слова: субмикронный аэрозоль, черный углерод, скорость ветра, направление ветра, приземная инверсия температуры, аэрозольные загрязнения, рельеф местности; submicron aerosol, black carbon, wind speed, wind direction, surface temperature inversion, aerosol pollution, topography.

Введение

Работа промышленных предприятий, ТЭЦ и котельных, выхлопы двигателей автотранспорта в городах приводят к выбросу в окружающую среду большого количества вредных примесей. Высокое содержание в воздухе взвешенных частиц антропогенного происхождения с их последующими физико-химическими превращениями отрицательно влияет на здоровье людей и окружающую природную среду. Достаточно подробно исследована связь между загрязнением воздуха и заболеваниями органов дыхания, сердечно-сосудистой и нервной систем [1–3].

Накопление и распространение в атмосфере города загрязняющих веществ зависит не только от количества и интенсивности их антропогенных источников, но и от метеорологических условий и рельефа местности [4–8]. Существует определенная связь между количеством взвешенных частиц и температурой, давлением, влажностью воздуха, ветром и атмосферными осадками [7, 8]. Одним из основных факторов, влияющих на увеличение концентрации аэрозольных и газовых веществ, является ветровой режим. Штиль или слабый ветер способствуют

накоплению выбросов вблизи источников загрязнителей воздуха, а от направления ветра зависит перенос примесей в конкретные районы. К неблагоприятным метеорологическим условиям, определяющим накопление загрязнений в атмосфере городов, также относится инверсия вертикального профиля температуры — повышение температуры воздуха с высотой, которая затрудняет вертикальный перенос воздуха. Инверсии делятся на приземные и приподнятые. Большую опасность для индустриально развитых районов представляет сочетание приземных инверсий температуры и слабого ветра. Такие условия принято называть застоем воздуха [9]; он может продолжаться несколько дней.

В многочисленных научных исследованиях концентрации вредных примесей измеряются в разных точках городских территорий, проводится сравнительный анализ загрязненности атмосферы городов с их пригородами и отдаленными фоновыми районами [10–14]. В последние десятилетия с особым вниманием изучаются антропогенные эмиссии черного углерода, который является индикатором выбросов продуктов сгорания различных видов углеродосодержащего топлива и негативно влияет на здоровье человека и окружающую среду [15–20].

Цель данной работы — исследование значений и межгодовой изменчивости массовой концентрации субмикронного аэрозоля и содержания в нем черного углерода (black carbon, eBC), взаимосвязь их значительных увеличений со стратификацией температур

* Елена Петровна Яушева (helen@iao.ru); Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Павлович Камардин (kar136@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

в пограничном слое атмосферы и приземным ветром в зимние сезоны 2016–2022 гг. в условиях антропогенной нагрузки в атмосфере Академгородка – окраинном районе г. Томска. В категорию экстремальных отнесены ситуации, когда среднесуточные значения исследуемых аэрозольных характеристик выше среднемесячных значений плюс их СКО в данном месяце в течение двух дней и более. В качестве зимнего сезона рассматривается период с ноября предыдущего по март последующего года [21].

Аппаратура и методы измерений

На Аэрозольной станции ИОА СО РАН, расположенной на юго-востоке г. Томска, с 1997 г. в мониторинговом режиме нефелометром типа FAN-A измеряется коэффициент направленного рассеяния «сухой основы» субмикронных частиц μ_d ($\text{Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) под углом 45° на длине волны излучения $0,51 \text{ мкм}$ в приземном слое воздуха. Затем оценивается массовая концентрация субмикронного аэрозоля ($\text{мкг}/\text{м}^3$) по эмпирическому соотношению $M_A = 2,4\mu_d(45^\circ)$ (для плотности частиц $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$) [22]. Оптическим методом с помощью аэталометра МДА-2 [23] определяется массовая концентрация поглощающего вещества. Поскольку калибровка прибора осуществлялась с применением частиц черного углерода, то поглощение излучения приводится к эквиваленту массовой концентрации черного углерода в воздухе еВС ($\text{мкг}/\text{м}^3$), или, для краткости, массовой концентрации черного углерода.

Рядом с Аэрозольной станцией с 2015 г. в мониторинговом режиме функционирует метеокomплекс, который состоит из температурного профилимера МТР-5 [24] и ультразвуковой метеостанции «Метео-2» [25]. Профилимер измеряет температуру в пограничном слое атмосферы до высоты 1 км, метеостанция определяет температуру воздуха, направление и скорость ветра, относительную влажность и атмосферное давление на высоте 17 м от подстилающей поверхности. Описание и примеры результатов работы данного комплекса приведены, например, в [26, 27].

Измерения температурным профилимером МТР-5 проводятся с шагом по высоте $H = 50 \text{ м}$ и интервалом по времени 5 мин; $\mu_d(45^\circ)$ и еВС измеряются в первые десять минут каждого часа. Для совместного анализа всех данных используются профили температуры воздуха, направление и скорость ветра, измеренные одновременно с аэрозольными параметрами. Положение границ инверсий и соответствующих им температур определяется интерполяцией экспериментальных данных.

Результаты и обсуждение

Аэрозольные характеристики в неблагоприятных метеоусловиях в зимний период

Наибольшие значения массовых концентраций субмикронного аэрозоля и черного углерода на Аэрозольной станции регистрируются при северо-

западном (С-З) ветре. На рис. 1 показаны зависимости концентрации этих характеристик от направления ветра в течение зимы 2017/2018 г., типичные для всего исследуемого периода. Согласно розе ветров этого сезона (рис. 1, в) количество метеоситуаций с С-З ветром в течение зимы невелико, а значения M_A и еВС при этом направлении ветра самые высокие. Это объясняется местоположением мощных антропогенных источников аэрозольных загрязнений. На небольшом расстоянии от измерительного

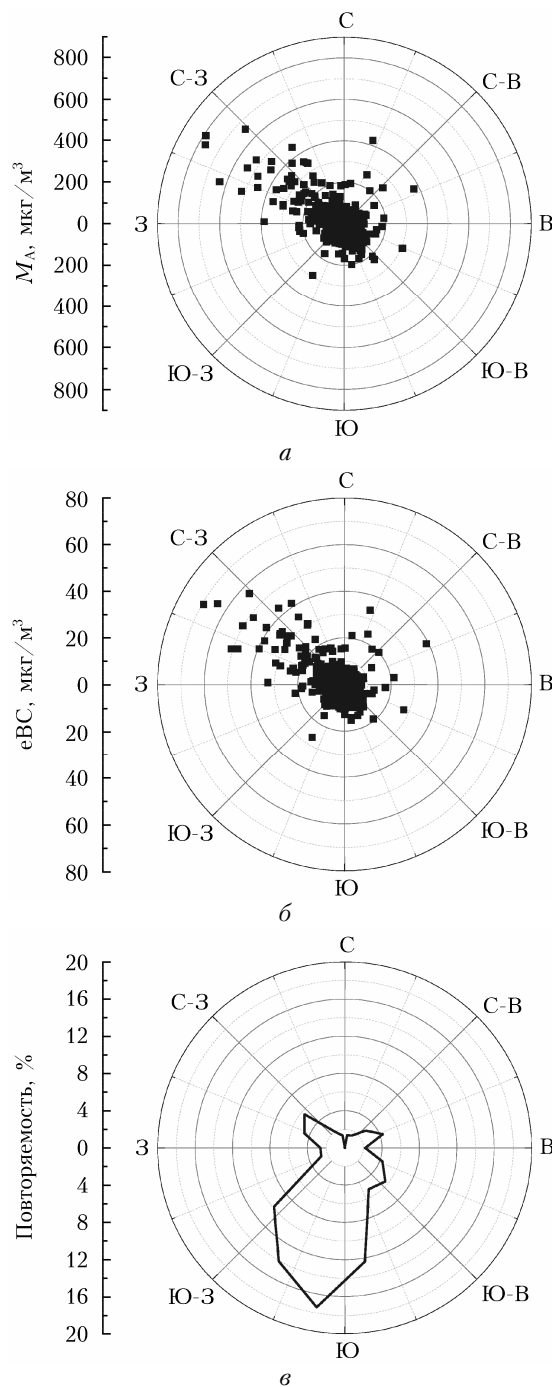


Рис. 1. Диаграммы массовых концентраций аэрозоля (а) и черного углерода (б) в зависимости от направления ветра; роза ветров (в) зимой 2017/2018 г.

пункта расположены жилые и административные здания Академгородка многоэтажной застройки, микрорайоны индивидуального жилья (рис. 2, цв. вкладка) [28]. На северо-западе от Аэрозольной станции, на 70 м ниже Академгородка и близлежащих городских территорий, находится низина, куда при штиле или слабом ветре, особенно при наличии приземной инверсии, опускаются аэрозольные вещества от вышерасположенных городских источников загрязнения. В самой низине находятся малоэтажные жилые дома с печным отоплением, протекает р. Ушайка. Между этим районом и пунктом измерений на расстоянии 800 м от измерительного комплекса проходит нагруженная автомобильная трасса с развязкой, соединяющей разные районы города. Таким образом, при слабом С-З ветре (менее 1,5 м/с) накопленные аэрозольные примеси перемещаются в сторону Аэрозольной станции.

Примером значительного роста концентраций атмосферного аэрозоля и черного углерода в антициклональных условиях со слабым ветром и приземной температурной инверсии в г. Томске является ситуация в середине января 2022 г. (рис. 3, цв. вкладка). В первой половине суток 12 января массовая концентрация субмикронного аэрозоля находилась на уровне 14 ± 1 мкг/м³, черного углерода — $1,3 \pm 0,4$ мкг/м³ (рис. 3, з). Ветер был южным, затем юго-западным, скорость 2–2,5 м/с. На высоте 300–500 м наблюдалась приподнятая температурная инверсия. Начиная с 17:00 метеоситуация стала постепенно меняться. В ночь с 12 на 13 января сформировалась приземная инверсия. Перепады температур ΔT на соседних уровнях с шагом 50 м достигали 2 °С (рис. 3, а). Приземная температура понизилась до –22 °С (рис. 3, б). Ветер сменился на северо-западный (рис. 3, в), его скорость уменьшилась до 0,5 м/с (рис. 3, б). В этот период произошло экстремальное увеличение массовых концентраций субмикронного аэрозоля и черного углерода с максимальными значениями 13 января в 01:00: $M_A = 152$ мкг/м³ и $e_{BC} = 17$ мкг/м³, что в 10 и 12 раз соответственно больше среднесуточных значений предыдущего дня (рис. 3, з). Затем днем приземная инверсия температуры преобразовалась в приподнятую, что способствовало выносу взвешенных частиц вверх и привело к уменьшению значений аэрозольных характеристик в среднем до $M_A = 40$ мкг/м³ и $e_{BC} = 2,7$ мкг/м³. После 16:00 вновь восстановилась приземная инверсия, скорость ветра стала постепенно увеличиваться до 2 м/с и более, M_A и e_{BC} увеличились до 60 и 5 мкг/м³ соответственно и с небольшими вариациями сохранялись на этом уровне до конца 14 января. Интересно, что практически весь следующий день наблюдалась интенсивная приземная инверсия с $\Delta T > 3$ °С (рис. 3, а), но при скорости ветра 3 м/с произошел горизонтальный перенос аэрозольных загрязнений и в приземном слое воздуха в районе пункта измерений их концентрации уменьшились.

Таким образом, в пункте измерений неблагоприятные метеоусловия 12–13 января привели к сильному увеличению концентраций загрязняю-

щих аэрозольных веществ в приземном слое атмосферы. Значительную роль в этом сыграл именно слабый С-З ветер. Подробное описание данного случая приведено для пояснения типичных ситуаций, выделение и анализ которых было одной из целей этой работы.

Для определения влияния метеоусловий с приземной инверсией и слабым ветром на среднесезонные концентрации субмикронного аэрозоля и черного углерода выполним сравнительный анализ среднесезонных значений аэрозольных характеристик и их средних значений при застоях воздуха. Отдельно рассмотрим ситуации при застое воздуха со слабым С-З ветром (рис. 4). На рис. 4 и в табл. 1 под годом подразумевается зимний сезон, т.е. период с ноября предыдущего года по март текущего.

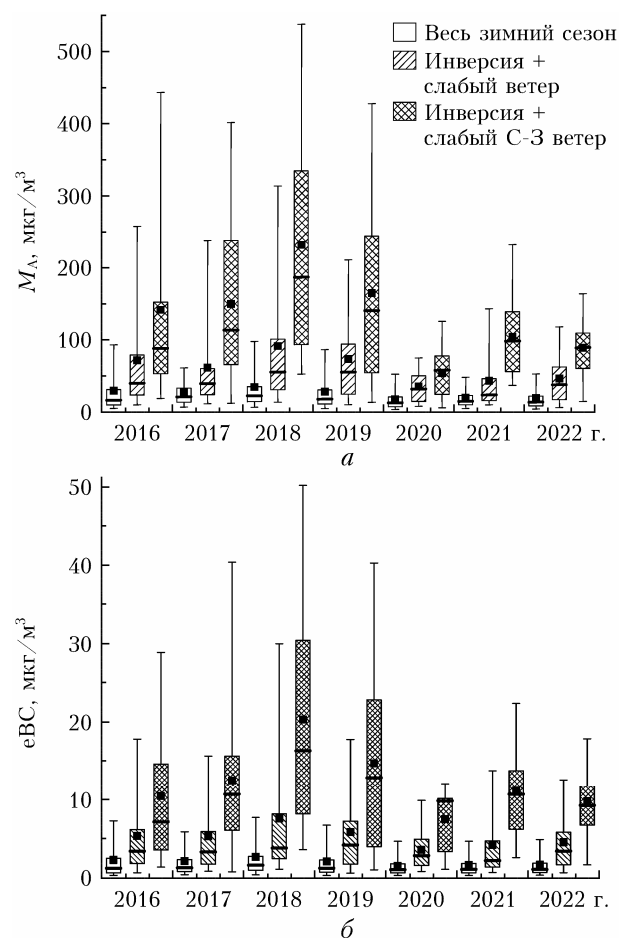


Рис. 4. Межгодовая изменчивость массовых концентраций субмикронного аэрозоля (а) и черного углерода (б) на Аэрозольной станции. Нижняя и верхняя стороны прямоугольника показывают концентрации 25 и 75 перцентилей, горизонтальная полоса — медиану, сплошные квадраты — среднее значение, «усы» — концентрации 5 и 95 перцентилей

Выявлено, что зимой 2017/2018 г., когда влияние неблагоприятных метеорологических условий было наиболее сильным, среднесезонные значения $M_A = 34$ мкг/м³ и $e_{BC} = 2,7$ мкг/м³, в ситуациях же, препятствующих переносу аэрозольных частиц,

среднесезонные значения возросли в 3 раза до $M_A = 91 \text{ мкг/м}^3$ и $eBC = 7,6 \text{ мкг/м}^3$, а при застоях воздуха со слабым С-З ветром увеличились до 236 мкг/м^3 и $20,7 \text{ мкг/м}^3$, т.е. в 7 и 8 раз относительно среднесезонных уровней.

Зимой 2019/2020 г., когда зарегистрированы самые низкие за исследуемый период среднесезонные значения $M_A = 17 \text{ мкг/м}^3$ и $eBC = 1,5 \text{ мкг/м}^3$, величины M_A и eBC при застое воздуха поднялись лишь до 35 и 6 мкг/м^3 (т.е. в 2 и 4 раза), а в этих же условиях со слабым С-З ветром — до 53 и 7,5 мкг/м^3 (т.е. в 3 и 5 раз) соответственно. Такое понижение почти всех анализируемых среднесезонных концентраций в 2019/2020 г. по сравнению с 2017/2018 г. объясняется уменьшением повторяемости случаев застоя воздуха. Уменьшилось и количество случаев многодневного застоя воздуха, когда наблюдались самые значительные увеличения исследуемых аэрозольных характеристик.

Пример такой ситуации приведен на рис. 5, где показаны увеличение среднесуточных концентраций аэрозольных характеристик в течение четырех дней застоя воздуха с 1 по 4 февраля 2018 г. и их относительный рост d по сравнению со среднесуточным значением 31 января, вычисленный по формулам: а) $d = M_{A,i}/M_{A,0}$; б) $d = eBC_i/eBC_0$, где $M_{A,0}$ и eBC_0 — концентрация 31 января, а $M_{A,i}$ и eBC_i ($i = 1 \div 4$) — концентрация в дни застоя воздуха.

Среднесуточные массовые концентрации субмикронного аэрозоля и черного углерода 31 января 2018 г. равнялись 22 и 2,3 мкг/м^3 соответственно при среднесуточных значениях в январе $M_A = 30,3 \text{ мкг/м}^3$ и $eBC = 2,6 \text{ мкг/м}^3$. В течение дня инверсия вертикального профиля температуры не наблюдалась, скорость ветра составляла около 2 м/с, что способствовало переносу аэрозольных веществ. Далее, 1 февраля, в антициклональных условиях сформировалась приземная инверсия температуры при очень слабом ветре, менее 1,5 м/с, концентрация аэрозоля возросла до 42 мкг/м^3 , а черного углерода — до 3,7 мкг/м^3 , т.е. в 1,9 и 1,6 раз соответственно по сравнению с предыдущим днем. К 4 февраля $M_A = 354$ и $eBC = 30,9 \text{ мкг/м}^3$, что в 16 и 13,3 раза выше концентраций в день, предшествующий ситуации застоя воздуха. Следует отметить, что 2 февраля несколько часов (с 00:00 до 10:00) скорость ветра составляла около 2,5 м/с, что привело к переносу аэрозольных веществ, поэтому их накопление в этот день несколько снизилось. Интересно, что 3 и 4 февраля дул С-З ветер, что способствовало увеличению концентрации исследуемых характеристик. Именно 4 февраля 2018 г. было зарегистрировано наибольшее за все зимние сезоны начиная с 1997 г. разовое значение $M_A = 791 \text{ мкг/м}^3$ (в 14:00) и самое большое за весь период мониторинга $eBC = 69 \text{ мкг/м}^3$ (в 15:00). В 2016–2019 гг. за сезон регистрировалось 4–6 случаев застоя воздуха продолжительностью два дня и более (кроме сезона 2016/2017 г.), в 2019/2020 г. их не было, а в 2020/2021 и 2021/2022 гг. они

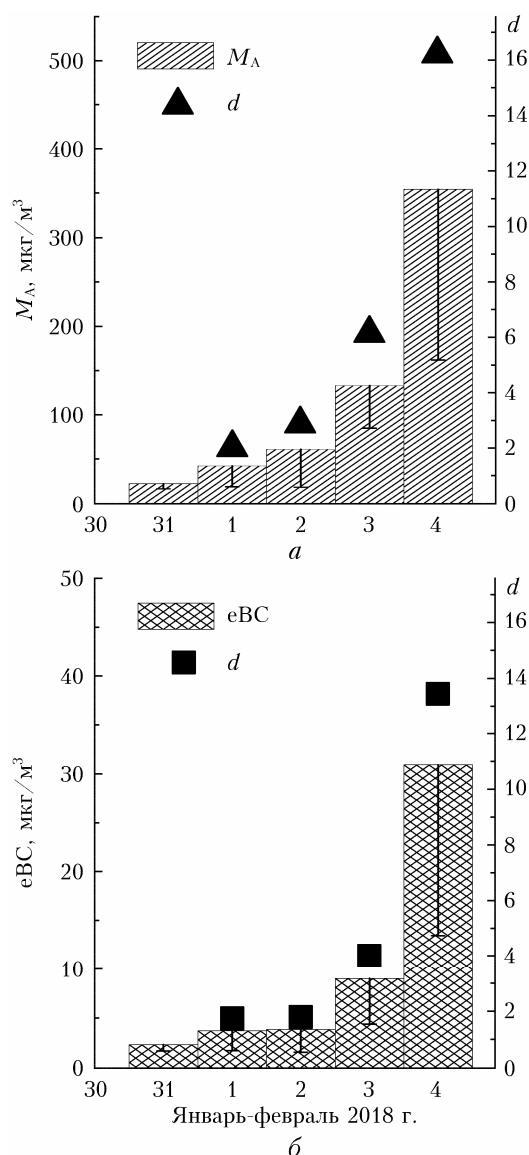


Рис. 5. Среднесуточные массовые концентрации субмикронного аэрозоля (а) и черного углерода (б) в период застоя воздуха 1–4 февраля 2018 г., их СКО и темп роста относительно 31 января 2018 г.

наблюдались всего дважды (табл. 1). Заметим, что в декабре 2016 г. и январе 2017 г. профили температуры не измерялись.

В период с 2016 по 2022 г. в Академгородке изменилась повторяемость (в процентах от общего количества ежечасных измерений) метеорологических условий и метеовеличин, способствующих накоплению аэрозольных веществ в городской атмосфере. В зимние сезоны 2016–2019 гг. приземные инверсии температуры наблюдались в 22–28% случаев от общего числа измерений в каждом сезоне, в 2020–2022 гг. их стало лишь 15–18%, в среднем снизилось и количество ситуаций со слабым ветром. Как следствие, уменьшилась и повторяемость случаев застоя воздуха от максимальных 17% в 2017/2018 гг. до 5–7% в 2020–2022 гг. В два раза

снизилась их повторяемость при С-З ветре — с 2–3% в 2016–2018 гг. до 0,5–1% в последующие годы.

Таблица 1

Повторяемость и средние значения метеорологических условий и метеовеличин, а также максимальные среднесуточные массовые концентрации субмикронного аэрозоля и черного углерода в зимние периоды 2016–2022 гг.

Параметр	Год						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Повторяемость приземных инверсий, %	28	20	22	22	15	15	18
Повторяемость слабого ветра, %	27	19	31	21	16	24	19
Повторяемость застоев воздуха, %	13	9	17	10	5	7	7
Повторяемость застоев воздуха с С-З ветром, %	2	2	3	1	0,5	1	1
Многодневные застои воздуха, количество	6	2	4	4	—	2	2
Средняя мощность приземных инверсий, м	437	337	531	522	396	538	461
Средняя интенсивность приземных инверсий, °С	5,5	4,9	6,9	8,7	5,3	7,4	5,0
$M_{\Lambda, \max}$, мкг/м ³	302	139	354	145	71	107	84
$eBC_{\max}$, мкг/м ³	16	12	31	10	6	11	8

Зависимость уровней концентраций загрязняющих веществ от неблагоприятных метеоусловий подтверждают высокие коэффициенты корреляции между ними $r = 0,73 \div 0,77$ (значимые или близкие к уровню $p = 0,05$) (табл. 2). Коэффициенты корреляции значений исследуемых аэрозольных характеристик с повторяемостью случаев застоя воздуха выше 0,9.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции среднесезонной повторяемости метеорологических условий и метеовеличин со среднесезонными массовыми концентрациями субмикронного аэрозоля и черного углерода в зимние периоды в 2016–2022 гг.

Параметр	M_{Λ}	eBC
Повторяемость приземных инверсий, %	0,77	0,73
Повторяемость слабого ветра, %	0,73	0,76
Повторяемость застоев воздуха, %	0,94	0,97
Повторяемость застоев воздуха со слабым С-З ветром, %	0,91	0,95
Повторяемость приподнятых инверсий, %	–0,27	–0,27
Мощность приземных инверсий, м	0,17	0,17
Интенсивность приземных инверсий, °С	0,20	0,20

Примечание. Полужирным выделены коэффициенты, значимые по уровню $p = 0,05$.

Приземные и приподнятые инверсии вертикального профиля температуры, играющие значительную роль в накоплении примесей в атмосфере городов, бывают разной интенсивности и мощности. Под мощностью инверсий понимается разность высот между нижней и верхней границами инверсии, выраженная в метрах. Под интенсивностью инверсии понимается разность температур на ее нижней и верхней границах, выраженная в градусах Цельсия. Значимые корреляционные связи массовых концентраций аэрозоля и черного углерода с интенсивностью и мощностью приземных инверсий температуры, а также с повторяемостью приподнятых инверсий не обнаружены (табл. 2), что свидетельствует о преобладающем влиянии на воздух в районе пункта мониторинга местных приземных антропогенных источников аэрозольных загрязнений, таких как автотранспорт, котельные, печное отопление в домах малоэтажной застройки.

Изменение суточного хода аэрозольных характеристик в периоды экстремальных загрязнений

Как известно, суточный ход M_{Λ} и eBC характеризуется максимумами в утренние и вечерние часы и минимумами в ночное и дневное время [11, 29–32]. В периоды экстремальных загрязнений выявлено изменение их среднего суточного хода (рис. 6).

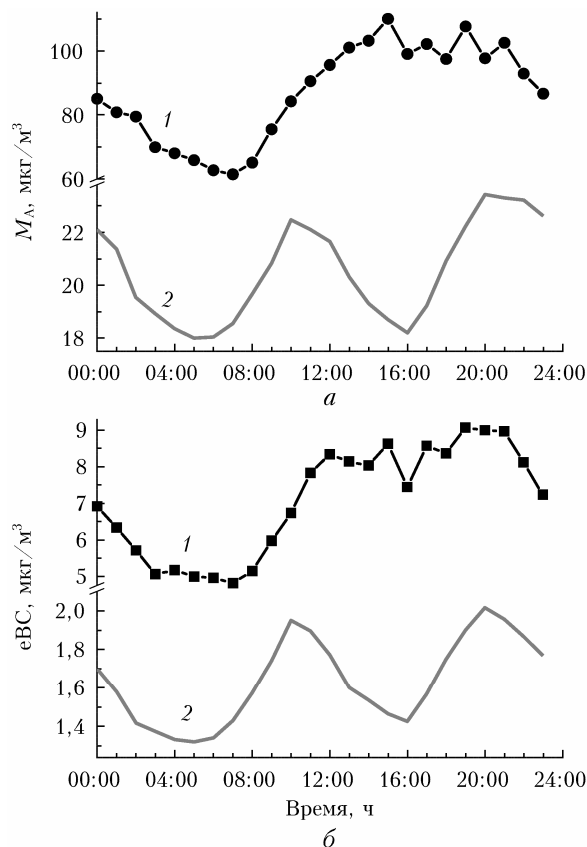


Рис. 6. Среднесуточный ход массовых концентраций субмикронного аэрозоля (а) и черного углерода (б) в дни застоя воздуха (кривые 1) и в остальные дни (кривые 2) в зимние периоды 2016–2022 гг.

Так, утренний максимум анализируемых характеристик зимой в обычных условиях наблюдается в 10:00, при этом повышение концентрации аэрозоля происходит в 1,2 раза, а черного углерода — в 1,5 раза относительно ночного минимума. При экстремальных загрязнениях рост концентраций исследуемых аэрозольных характеристик продолжается до 15:00 с увеличением значений относительно ночного минимума в 1,8 раза.

При отсутствии приземной инверсии температуры с дневным прогревом атмосферы увеличивается высота слоя перемешивания, в приземном слое воздуха концентрации аэрозольных веществ уменьшаются и в 16:00 наступает выраженный дневной минимум. При наличии инверсии вертикальный перенос взвешенных частиц затруднен, M_A и eBC до 21:00 варьируют около максимальных значений, а далее уменьшаются, как и в остальных ситуациях.

Заключение

Наибольшие массовые концентрации субмикронного аэрозоля и черного углерода, измеряемые на Аэрозольной станции (Академгородок, юго-восток г. Томска) в зимние сезоны 2016–2022 гг., наблюдались при слабом (менее 1,5 м/с) северо-западном ветре. Среднесезонные значения исследуемых аэрозольных характеристик в случаях застоя воздуха — сочетание приземных температурных инверсий и слабого ветра — могут увеличиваться до 3 раз относительно среднесезонных значений, а в случаях С-З ветра — до 7 и 8 раз соответственно (сезон 2017/2018 г.).

Показано уменьшение повторяемости неблагоприятных метеословий, таких как приземные температурные инверсии, слабый ветер и их совместное проявление (застой воздуха) в 2020–2022 гг. по сравнению с периодом 2016–2019 гг. Это привело к снижению уровня и частоты проявлений экстремальных аэрозольных загрязнений в 2020–2022 гг.

Наблюдаются высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,73 \div 0,77$) среднесезонных массовых концентраций субмикронного аэрозоля и черного углерода с повторяемостью приземных инверсий температуры и повторяемостью слабого ветра в этих сезонах; коэффициенты корреляции M_A и eBC с повторяемостью случаев застоя воздуха выше 0,9.

Установлено, что в условиях экстремальных загрязнений городской атмосферы, длящихся два дня и более, происходит изменение суточного хода массовых концентраций субмикронного аэрозоля и черного углерода. Увеличение концентраций исследуемых аэрозольных характеристик продолжается до 15:00 до значений, превышающих ночной минимум в 1,8 раза, в то время как в остальные дни максимум наступает в 10:00 с повышением концентрации аэрозоля в 1,2 раза, а черного углерода — в 1,5 раза относительно ночного минимума.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Измерения выполнены с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Penttinen P., Timonen K.L., Tiittane P., Mirme A., Ruuskanen J., Pekkanen J. Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics // Eur. Respir. J. 2001. V. 17, N 3. P. 428–435.
2. Delfino R.J., Sioutas C., Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health // Environ. Health Perspect. 2005. V. 113, N 8. P. 934–946.
3. Morgan T.E., Davis D.A., Iwata N., Tanner J.A., Snyder D., Ning Z., Kam W., Hsu Y.-T., Winkler J.W., Chen J.-C., Petasis N.A., Baudry M., Sioutas C., Finch C.E. Glutamatergic neurons in rodent models respond to nanoscale particulate urban air pollutants in vivo and in vitro // Environ. Health Perspect. 2011. V. 119, N 7. P. 1003–1009.
4. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 447 с.
5. Берлянд М.Е. Об опасных условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами // Тр. ГГО. 1966. Вып. 185. С. 15–25.
6. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 184 с.
7. Сонькин Л.Р. Некоторые результаты синоптико-климатологического анализа загрязнения воздуха в городах // Тр. ГГО. 1968. Вып. 207.
8. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 255 с.
9. РД 52.04.667-2005. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118> (дата обращения: 25.03.2023).
10. Виноградова А.А., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Скороход А.И. Влияние метеорологических условий и дальнего переноса воздушных масс на состав приземного аэрозоля в Москве в зимние сезоны // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 436–446; Vinogradova A.A., Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I. Effect of meteorological conditions and long-range air mass transport on surface aerosol composition in winter Moscow // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 6. P. 758–768.
11. Vouitsis I., Amanatidis S., Ntziachristos L., Kelessis A., Petrakakis M., Stamos I., Mitsakis E., Samaras Z. Daily and seasonal variation of traffic related aerosol pollution in Thessaloniki, Greece, during the financial crisis // Atmos. Environ. 2015. V. 122. P. 577–587. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.008.
12. Аюшева Е.П., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Влияние города на аэрозольные характеристики атмосферы Академгородка г. Томска в переходные сезоны // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 981–988.
13. Ячмёнева Н.В., Гольвей А.Ю. Повторяемость инверсий и их влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Челябинске // Вестн. Челябинского гос. ун-та. 2011. Т. 220, № 5. С. 84–89.
14. Короткова Н.В., Семенова Н.В. Влияние метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха в Саратове // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 168–173. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-168-173>.
15. Järvi L., Junninen H., Karppinen A., Hillamo R., Virkkula A., Mäkelä T., Pakkanen T., Kulmala M. Temporal variations in black carbon concentrations with different time scales in Helsinki during 1996–2005 // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 1017–1027.

16. Hristova E., Georgieva E., Veleva B., Neykova N., Naydenova S., Gonsalvesh-Musakova L., Neykova R., Petrov A. Black carbon in Bulgaria – observed and modelled concentrations in two cities for two months // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 213. DOI: 10.3390/atmos13020213.
17. Rattigan O.V., Civerolo K., Doraiswamy P., Felton H.D., Hopke P.K. Long term black carbon measurements at two urban locations in New York // *Aerosol Air Qual. Res.* 2013. V. 13. P. 1181–1196. DOI: 10.4209/aaqr.2013.02.0060.
18. Ziola N., Blaszcak B., Klejnowski K. Long-term eBC measurements with the use of MAAP in the polluted urban atmosphere (Poland) // *Atmosphere*. 2021. V. 12. P. 808. DOI: 10.3390/atmos12070808.
19. Yausheva E.P., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Comparison of the year-to-year and seasonal variability of aerosol characteristics under urban and background conditions from measurements at the Aerosol Station and the Fonovaya Observatory in 2014–2018 // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11208. P. 11208–358.
20. Kucbel M., Corsaro A., Švédová B., Raclavský K., Juchelková D. Temporal and seasonal variations of black carbon in a highly polluted European city: Apportionment of potential sources and the effect of meteorological conditions // *J. Environ. Manag.* 2017. V. 203, Part 3. P. 1178–1189. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.038.
21. *Климат Томска* / под ред. С.Д. Кошинского, Л.И. Трифоновой, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 176 с.
22. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана*. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
23. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 5. С. 1–3.
24. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Физматкнига, 2015. 171 с.
25. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы*. 2009. № 7. С. 21–25.
26. Одинцов С.Л. Развитие и применение акустических средств диагностики атмосферного пограничного слоя // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 9. С. 786–791; Odintsov S.L. Development and use of acoustic tools for diagnostics of the atmospheric boundary layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 1. P. 104–108.
27. Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Высота области интенсивного турбулентного теплообмена в устойчиво стратифицированном пограничном слое атмосферы. Часть 1: Методика оценок и статистика // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 10. С. 782–790; Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Nevzorova I.V. Height of the region of intense turbulent heat exchange in a stably stratified atmospheric boundary layer: Part 1 – Evaluation technique and statistics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 1. P. 34–44.
28. *Топографическая карта Томска*. URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/maps/em1u/%D0%A2%D0%BE%D0%BC%D1%81%D0%BA/>.
29. Козлов В.С., Пanchenko М.В., Яушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–569; Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Diurnal variations of the submicron aerosol and black carbon in the near-ground layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 1. P. 30–38.
30. Сидоров В.Н., Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Суточный ход оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана*. 1984. Т. 20, № 12. С. 1156–1164.
31. Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ван Ген Чен. Вариации содержания сажи и субмикронного аэрозоля в городе // *Тр. Межд. конф. «Физика атмосферного аэрозоля»*. М., 1999. С. 160–169.
32. Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов А.В. Исследование суточной динамики характеристик воздуха в г. Томске в холодный период года // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 782–789.

E.P. Yausheva, V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, V.P. Shmargunov. Extreme events of aerosol pollution of the atmosphere in winter in Tomsk Akademgorodok.

The conditions for the occurrence of extreme concentrations of submicron particles and black carbon in their composition in the surface air layer are analyzed on the basis of monitoring measurements of aerosol characteristics and acoustic sounding of the lower air layer in the winter periods of 2016–2022 in Akademgorodok, Tomsk. It is shown that with a combination of surface air temperature inversion and weak (up to 1.5 m/s) wind (air stagnation), the average aerosol characteristics under study increase by up to 3 times, and with a weak northwestern wind, up to 7–8 times relative to the season averages. It is found that under several-day air stagnation conditions, the typical daily variation, characterized by the afternoon minimum, is transformed. The increase in the concentrations continues until 15:00; the values exceed nighttime minimum by 1.8 times. On other days of the winter season, the maxima occur at 10:00 am, with the excess of the concentrations of submicron particles by 1.2 times, and of black carbon, by 1.5 times over the nighttime minima.