

Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе

В.С. Козлов, М.В. Панченко, Е.П. Яушева*

*Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.02.2010 г.

На основе результатов измерений, полученных на аэрозольной станции ИОА СО РАН (г. Томск) в 1997 – 2008 гг., проанализированы особенности сезонной изменчивости суточных ходов массовых концентраций сухой основы субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое. Форма суточных ходов аэрозоля и сажи одинакова для всех сезонов года и содержит утренний и вечерний максимумы, ночной и дневной минимумы. Максимумы в суточном ходе концентрации аэрозоля сближаются в зимний и раздвигаются в летний периоды. Устойчивость формы суточного хода сажи в различные сезоны года является показателем устойчивой суточной динамики коэффициента аэрозольного поглощения в видимой области спектра. Некоторые отличия суточных ходов концентраций аэрозоля и сажи позволяют сделать предположение о присутствии определенной доли сажи в виде внешней смеси. В безоблачной атмосфере отчетливо проявляются все экстремумы суточных ходов аэрозоля и сажи, однако в сплошной облачности суточные ходы сглаживаются. При этом утренний максимум аэрозоля становится статистически не значимым в различные сезоны года.

Ключевые слова: субмикронный аэрозоль, сажа, приземный слой, суточный ход, облачность; submicron aerosol, Black Carbon, near-ground layer, diurnal behavior, cloudiness.

Введение

Важная роль атмосферного аэрозоля в радиационных процессах в атмосфере определяет необходимость изучения особенностей временной изменчивости аэрозольных характеристик (см., например, [1–23]). Суточный ход является одним из наиболее динамичных процессов в вариациях аэрозольных характеристик в приземном слое атмосферы. Сильная пространственно-временная изменчивость свойств аэрозоля обуславливает и большой разброс значений при попытках выделения среднего суточного хода на фоне всего многообразия процессов. Значительную неопределенность создает постоянно действующее наложение на суточную динамику других временных масштабов (синоптические и межсезонные колебания). Наиболее вероятными причинами искажения типичного суточного хода могут быть различные геофизические факторы: влияние облачности, лесных пожаров, смена воздушных масс, выпадение осадков и воздействие антропогенных источников.

При исследовании аэрозоля особое значение приобретает анализ рядов многолетних измерений характеристик аэрозоля в различных географических районах. Из-за трудоемкости задачи количество таких исследований невелико. В России регулярные наблюдения суточной динамики оптических и микрофизических характеристик атмосферного

аэрозоля выполняются несколькими группами исследователей в течение последних трех десятилетий (см., например, [4–21]). Эти исследования были направлены на изучение суточных ходов аэрозольных параметров и их сезонных вариаций в приземном слое воздуха [4–10, 13–21] и по всей атмосферной толще [11, 12].

В качестве анализируемых оптико-микрофизических параметров рассматривались коэффициент направленного аэрозольного рассеяния [4–9, 14–18, 20], спектральные коэффициенты ослабления [10, 21], коэффициент обратного рассеяния [11], аэрозольная оптическая толщина атмосферы [12], счетная концентрация частиц [13], концентрация сажи [4–7, 18, 19] и др. Выполненные исследования позволили получить новую экспериментальную информацию о динамике суточных ходов аэрозоля в различных географических районах (Подмосковье, Кисловодск, Западная Сибирь и др.) и проанализировать их сезонную вариабельность.

Предпринимались попытки описания суточного хода аэрозоля в приземном слое на основе моделирования процессов фотохимической генерации частиц, их трансформации в ходе коагуляции и гетерогенной конденсации, воздействия температурного режима в тропосфере на вертикальный вынос частиц и их подынверсионное накопление и др. [15, 20]. Из многолетних наблюдений, проведенных зарубежными исследователями в приземном слое, следует отметить результаты, описанные в работах [24, 25].

Основной поглощающей субстанцией в атмосферном аэрозоле является сажа [Black Carbon,

* Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Елена Петровна Яушева (helen@iao.ru).

(BC)], которая вносит определяющий вклад в радиационно-климатическое воздействие [2, 3]. В настоящей статье анализируются особенности сезонной изменчивости суточных ходов массовых концентраций сухой основы субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества BC в приземном слое воздуха по результатам измерений в Западно-Сибирском регионе. Обсуждаются различия суточных ходов аэрозоля и сажи, влияние состояния облачности, и проводится аналитическая аппроксимация суточных ходов.

Методика измерений и обработки данных

В работе используются данные приземных измерений коэффициента направленного аэрозольного рассеяния сухой основы субмикронных частиц и массовой концентрации сажи за период 1997–2008 гг. Измерения проводились на аэрозольной станции ИОА СО РАН (56.48 °с.ш., 85.05 °в.д., GMT+7:00, г. Томск) [4]. Текущие данные доступны в Интернете (<http://aerosol1.iao.ru>). Измерения аэрозольных характеристик выполнялись в автоматическом режиме, круглосуточно, с периодичностью 1 раз в час. Измерения коэффициента направленного рассеяния под углом 45 ° проводились с помощью нефелометра типа ФАН (длина волны 0,52 мкм) с чувствительностью около $1 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. По данным о коэффициенте направленного аэрозольного рассеяния $\mu(45^\circ)$ ($\text{Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) с помощью однопараметрической модели атмосферных дымок оценивалась массовая концентрация субмикронного аэрозоля M_a ($\text{мкг}/\text{м}^3$) [8, 26].

Массовая концентрация сажи в составе аэрозольных частиц M_{BC} ($\text{мкг}/\text{м}^3$) измерялась с помощью аэталометра, по принципу действия аналогичного используемому в работе [27]. Аэталометр реализует метод измерения диффузного ослабления света слоем аэрозольных частиц непосредственно в процессе их осаждения на аэрозольный фильтр. Аэталометр позволяет измерять массовую концентрацию сажи от 0,1 до $110 \text{ мкг}/\text{м}^3$ с чувствительностью около $0,1 \text{ мкг}/\text{м}^3$ при прокачке 20 л воздуха. Вышеотмеченные приборы, особенности их калибровки и методики измерений детально описаны в [28–32].

В методическом плане важным является вопрос о том, насколько экспериментальные данные аэрозольной станции, расположенной на окраине города, отягощены влиянием антропогенного фактора

и соответственно информативны для изучения региональных фоновых характеристик аэрозоля. С этой целью нами в зимне-весенний период 2001 г. в течение 2 мес проводились в приземном слое синхронные круглосуточные измерения на аэрозольной станции и в фоновых (лесная зона в 60 км от города) условиях [33]. Было установлено, что динамика аэрозоля в основном определялась процессами синоптической циркуляции, что предопределило согласованную изменчивость и высокую корреляцию (0,75–0,91 при уровне значимости 0,31 с достоверностью 0,99) исследуемых параметров в двух пунктах. Анализ экспериментальных данных показал, что антропогенное воздействие города проявляется лишь для 20–30% реализаций суточных измерений. С учетом того, что данные в двух пунктах измерений хорошо синхронизированы и более 70% реализаций статистически неразличимы, сделан вывод о том, что измерения на аэрозольной станции ИОА информативны в первую очередь относительно динамики среднерегionalного фонового состояния аэрозоля. Подобный вывод ранее также был получен для синхронного аэрозольного эксперимента в летних условиях [34].

Предметом исследования является межсезонная изменчивость суточных ходов, для выделения и изучения которых без влияния искажающих факторов использовался ряд методических приемов. Так, были сформированы подмассивы данных, из которых исключены реализации, подверженные воздействию дымов пожаров. Для того чтобы снизить влияние межсуточной (синоптической) изменчивости концентраций и спорадического воздействия локальных источников, анализируются так называемые нормированные суточные ходы аэрозольных характеристик. С этой целью измеренные в течение суток почасовые концентрации исследуемой характеристики нормируются на ее среднесуточную концентрацию. Дальнейшая статистическая обработка выполняется именно для массивов нормированных суточных ходов. Такой подход выравнивает весовые коэффициенты различных суточных реализаций и исключает преобладающую роль реализаций с экстремальными аэрозольными концентрациями. В табл. 1 приведены среднесезонные значения коэффициента направленного светорассеяния, массовых концентраций субмикронного аэрозоля и сажи, а также их среднеквадратические отклонения (СКО) и количество суточных реализаций в каждом сезоне за 12 лет измерений.

Таблица 1

Среднесезонные значения коэффициента направленного аэрозольного рассеяния, массовых концентраций субмикронного аэрозоля и сажи, их среднеквадратических отклонений и количества суточных реализаций N за 1997–2008 гг.

Сезон	$\mu(45^\circ)$, $\text{Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	СКО	N	M_a , $\text{мкг}/\text{м}^3$	СКО	N	M_{BC} , $\text{мкг}/\text{м}^3$	СКО	N
Зима	10,24	6,25	1641	24,6	15,0	1641	1,949	1,46	1596
Весна	6,85	3,16	503	16,5	7,59	503	0,936	0,443	493
Лето	6,2	2,98	824	14,9	7,15	824	0,796	0,366	843
Осень	6,57	3,79	559	15,8	9,10	559	1,035	0,589	543

Отметим, что путем умножения среднесезонных нормированных суточных ходов на соответствующие значения среднесезонных концентраций аэрозоля и сажи (табл. 1) можно оценить суточные ходы для значений абсолютных концентраций. В свою очередь, суточный ход абсолютной концентрации сажи позволяет определить такую характеристику, как коэффициент аэрозольного поглощения субмикронных частиц в видимой области спектра, который является одной из основных характеристик поглощающих свойств аэрозоля. Из многочисленных измерений реального аэрозоля следует, что концентрация сажи обнаруживает тесную линейную корреляционную связь с коэффициентом аэрозольного поглощения. Параметр этой связи ($\sigma \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$) — удельный коэффициент поглощения, или эффективность поглощения — обычно определяется с использованием фильтровых методов и варьирует в зависимости от свойств аэрозоля в достаточно широких пределах от 1 до $10 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ (см., например, [27, 35, 36]). Так, по результатам выполненных нами на аэрозольной станции ИОА СО РАН в зимне-весенний период года одновременных измерений характеристик аэрозольного поглощения аэталометром и оптико-акустическим спектрометром значение эффективности поглощения составило $5,49 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ для длины волны $0,53 \text{ мкм}$ [29].

Особенности среднесезонных суточных ходов аэрозоля и ВС

На рис. 1, 2 приведены нормированные среднесезонные суточные ходы массового содержания аэрозоля и сажи $\tilde{M}_{\text{а,ВС}}$ ($\tilde{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{\bar{M}}$, где M_i — измеряемая характеристика; \bar{M} — среднесуточное значение; N — число измерений в сезоне).

Анализ экспериментальных данных для полных сезонных массивов (кривые 1) позволил выявить основные особенности суточных ходов.

1. *Суточный ход сажи по форме (проявлению экстремумов) характеризуется межгодовой устойчивостью и близок к суточному ходу аэрозоля.* Рассматриваемые результаты многолетних регулярных измерений в приземном слое позволили на основе анализа статистически обеспеченного массива данных впервые установить, что сажа обладает устойчивым суточным ходом в различные сезоны года (рис. 2). Из этого следует важный вывод о том, что и коэффициент аэрозольного поглощения в видимой области спектра имеет устойчивую суточную динамику (модуляцию), в значительной степени согласующуюся с изменчивостью концентрации сухой основы субмикронного аэрозоля.

Сходство суточных вариаций следует объяснять тем, что суточная динамика аэрозоля и сажи во многом формируется общими физическими процессами трансформации, связанными с изменением температурного режима тропосферы (конвективный

вынос частиц в верхние слои, подынверсионное накопление, сухое осаждение на поверхность (почва, растительность и т.п.)).

2. *Форма суточного хода одинакова для всех сезонов года* и содержит два максимума — утренний и вечерний, а также два минимума — ночной и дневной. Проявление этой особенности обусловлено тем, что отмеченные внутрисуточные процессы, определяющие трансформацию аэрозоля, действуют во все сезоны года (естественно, с различной степенью интенсивности).

3. *Суточные ходы концентраций аэрозоля и ВС характеризуются устойчивой сезонной изменчивостью.* Как видно из рис. 1, положения максимумов в суточном ходе аэрозоля обнаруживают сезонную изменчивость, проявляющуюся в сближении максимумов в зимний период (утренний максимум наблюдается в 8 ч и вечерний — в 21–22 ч) и в их взаимном удалении в летний период (6 и 23 ч). Подобная динамика поведения максимумов в суточном ходе наблюдается и для сажи, но в меньшей степени. Для суточного хода сажи соответствующие положения максимумов зимой составляют 12 и 20 ч и летом — 9 и 22 ч. Следует отметить, что по особенностям формы весенний суточный ход близок к летнему, а осенний — к зимнему.

Рис. 3 иллюстрирует сезонную изменчивость временного интервала между утренним и вечерним максимумами в суточных ходах аэрозоля и сажи. При переходе от зимы к лету для аэрозоля и сажи наблюдается рост значений временного интервала.

4. *В весенне-летний период все экстремумы суточных ходов наиболее ярко выражены по амплитуде.* Осенью и зимой суточные ходы, как правило, становятся менее контрастными. При этом дневной максимум аэрозоля слабо выражен, а для отдельных суточных реализаций даже могут наблюдаться условия почти постоянного накопления аэрозоля и сажи в дневное время. Снижение выраженности суточных ходов следует объяснять влиянием приземных температурных инверсий, частота повторения которых в Сибирском регионе возрастает при переходе к зимнему периоду года.

5. *Положения на временной шкале ночного и дневного минимумов суточных ходов близки для аэрозоля и сажи и слабо изменяются при переходе от зимы к лету.* Минимумы наблюдаются в среднем в 4–5 ч для ночного и в 14–15 ч для дневного времени (см. рис. 1, 2). Устойчивость положений минимумов суточного хода связана с тем, что ночной и дневной минимумы в основном формируются за счет внутрисуточной перестройки температурного режима тропосферы и связанных с ним процессов осаждения частиц на поверхность или их конвективного выноса в верхние слои.

6. *Различия в положении максимумов — в суточных ходах аэрозоля и сажи.* Как видно из рис. 3, важной особенностью отличия суточных ходов аэрозоля и сажи является то, что временной интервал между максимумами для всех сезонов года для аэрозоля больше, чем для сажи. Это обусловлено тем, что утренний и вечерний максимумы для сажи

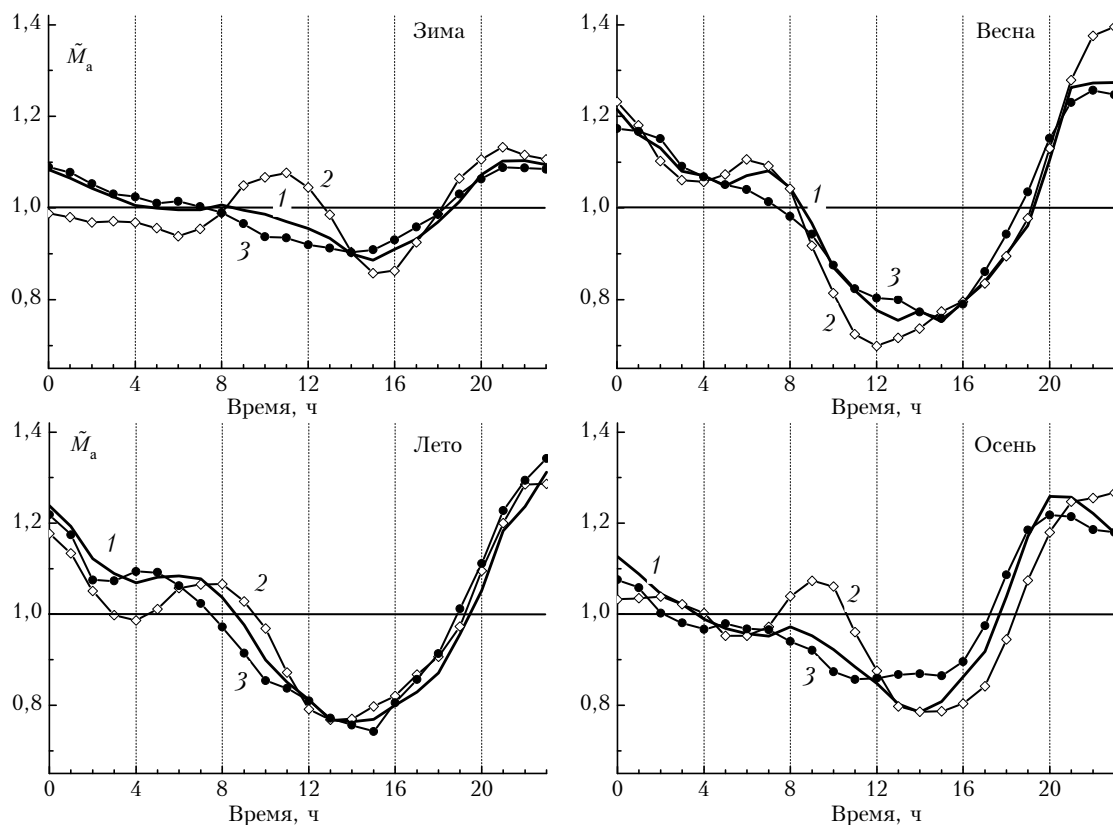


Рис. 1. Среднесезонные нормированные суточные ходы массового содержания аэрозоля при различных типах облачности в 1997–2008 гг. (1 – полный массив; 2 – безоблачная атмосфера; 3 – сплошная облачность)

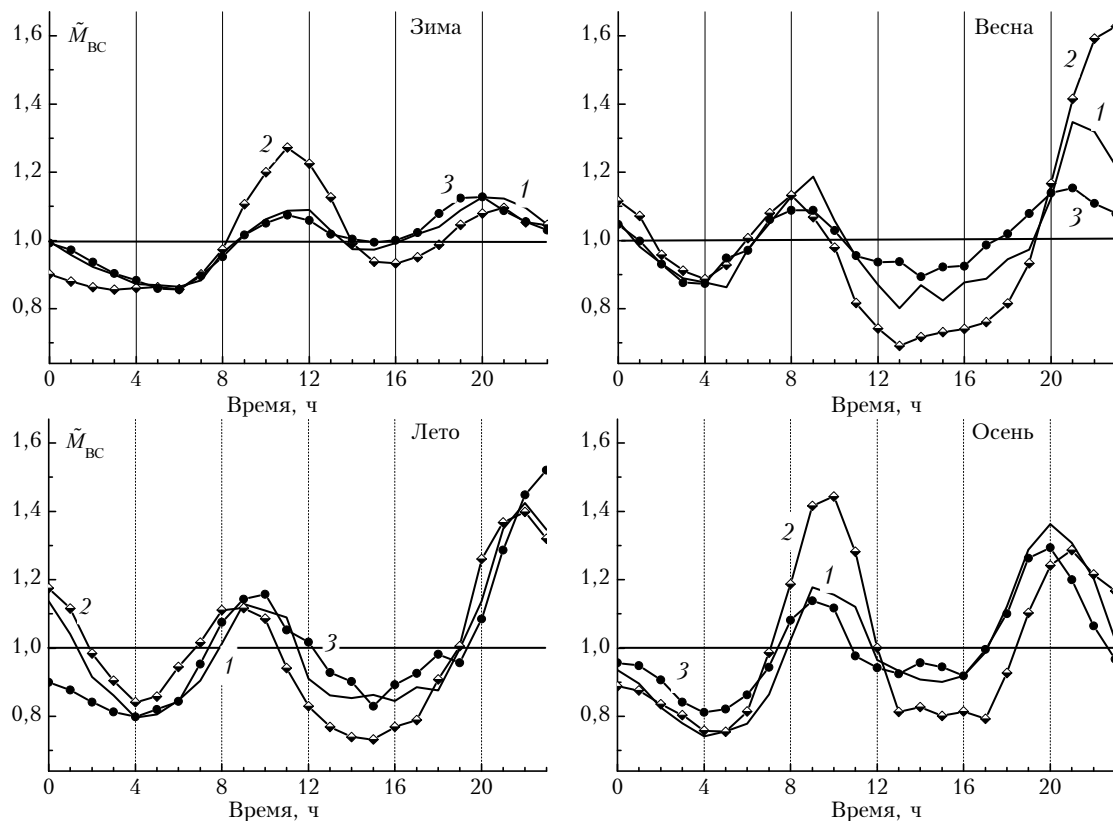


Рис. 2. Среднесезонные нормированные суточные ходы массового содержания сажи при различных типах облачности в 1997–2008 гг. (1 – полный массив; 2 – безоблачная атмосфера; 3 – сплошная облачность)

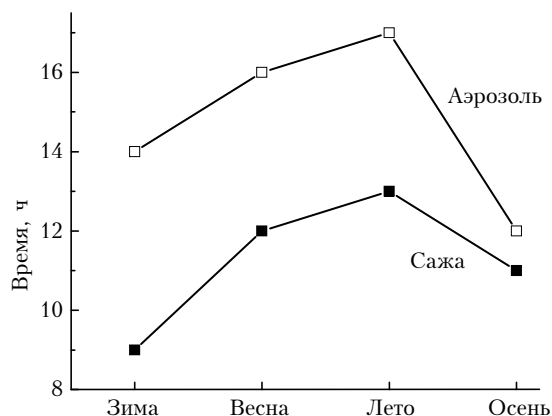


Рис. 3. Средние годовые ходы временного интервала между утренним и вечерним максимумами в среднесезонных суточных ходах аэрозоля и сажи (1997–2008 гг.)

сдвинуты относительно положения соответствующих максимумов для аэрозоля (см. рис. 1, 2).

Наиболее отчетливо такой сдвиг проявляется для утренних максимумов и выражается в том, что как для зимы, так и для лета максимум для сажи наблюдается в среднем на 2–3 ч позднее максимума для аэрозоля. В свою очередь, вечерний максимум для сажи, наоборот, наблюдается в среднем на 1 ч раньше максимума для аэрозоля.

Следует отметить, что для сажи временной интервал между максимумами изменяется слабее, чем у аэрозольной компоненты, и в основном варьирует вблизи значения, равного 12 ч. Наблюдается и другое устойчивое отличие между собой суточных ходов содержания аэрозоля и ВС. Так, утренний максимум концентрации сажи для всех сезонов года по амплитуде выражен более отчетливо, чем для аэрозоля (см. рис. 1, 2).

Отмеченные различия в суточном ходе аэрозоля и сажи, на наш взгляд, могут приводить к весьма нетривиальному выводу. В научной литературе до сих пор не выяснен вопрос о том, в каком виде существует в атмосфере сажевая составляющая аэрозоля: либо сажевые частицы находятся на поверхности или внутри субмикронных частиц (внутренняя смесь), либо частицы сажи представляют собой отдельную фракцию (внешняя смесь). Описанные выше различия в суточном ходе аэрозоля и сажи указывают на некоторую независимость их внутрисуточной динамики. Это дает основания предполагать, что определенная часть сажи присутствует в атмосфере в качестве внешней смеси.

Очевидно, что сезонная динамика формы суточного хода обусловлена сезонными изменениями продолжительности дневной инсоляции. Устойчивую структуру формы суточного хода аэрозоля для радиационного типа погоды (безоблачная атмосфера), как правило, объясняют действием следующих факторов. Утренний максимум определяется интенсификацией процессов фотохимической генерации аэрозольных частиц после восхода солнца, а также их вторичной эмиссии в воздух с поверхности (почва, растительность и т.п.). При этом амплитуда и положение максимума непосредственно связаны

с интенсивностью инсоляции и со временем восхода солнца соответственно.

Проявление в суточном ходе (и его положение на шкале времени) вечернего максимума также в значительной степени следует связывать с процессами изменения температурной стратификации приземного слоя в период после заката солнца (вечерних сумерек). Природа дневного минимума аэрозоля и сажи вполне понятна и объясняется усилением процессов конвективного подъема частиц в более высокие слои в ходе интенсивного прогрева атмосферы в послеполуденный период. Наименее изучена и модельно обоснована природа ночного минимума концентрации. Следует предположить, что в этом случае определяющую роль играют процессы сухого вымывания – осаждения частиц на поверхность.

7. При увеличении облачности происходят снижение амплитуды вариаций в экстремумах и значительное сглаживание суточного хода. Понятно, что суточный ход температуры поверхности и приземного слоя атмосферы является ведущим фактором, определяющим динамику аэрозоля. Отсюда следует, что при наличии облачности амплитуды внутрисуточных вариаций должны снижаться. Для исследования влияния облачности на форму суточных ходов наряду с полными массивами данных были рассмотрены подмассивы для радиационного типа погоды (безоблачная атмосфера, балл облачности 0–2) и облачной атмосферы (балл облачности 8–10). При создании массивов использовались метеоданные по температуре воздуха и балле облачности (<http://meteo.infospace.ru>, сервер «Погода России») и по суммарной солнечной радиации (<http://lop.iao.ru>, ТОР-станция ИОА СО РАН) в районе г. Томска.

Результаты исследования среднесезонных суточных ходов аэрозоля и сажи для подмассивов безоблачной атмосферы (кривые 2) и сплошной облачности (кривые 3) приведены на рис. 1, 2.

За 12 лет измерений относительная частота повторяемости суточных реализаций для радиационного типа погоды и для сплошной облачности невелика (табл. 2). Следует отметить, что из подмассива сплошной облачности исключены дни с осадками и со сменой воздушных масс.

Таблица 2

Относительная повторяемость суточных реализаций с безоблачной атмосферой и со сплошной облачностью (% от полного числа измерений N (в табл. 1))

Сезон	Безоблачная атмосфера	Сплошная облачность
Зима	7	8
Весна	11	7
Лето	8	3
Осень	6	10

Как видно на рис. 1, 2, при радиационном типе погоды (кривые 2) наиболее отчетливо проявляются и статистически значимы все экстремумы суточных ходов аэрозоля и сажи. В условиях

сплошной облачности (кривые 3) происходит сглаживание суточных ходов аэрозоля и сажи. Амплитудная выраженность экстремумов может снижаться на 10–20% для аэрозоля и на 10–40% для сажи. При этом для сажи (см. рис. 2) все экстремумы суточного хода остаются статистически значимыми и слабо смещаются на временной шкале. Для аэрозольных массивов утренний максимум становится статистически незначимым в *различные* сезоны года.

Рис. 4 иллюстрирует сезонную изменчивость суточных концентраций аэрозоля и сажи в условиях облачной и безоблачной атмосферы. В качестве параметра, характеризующего полные вариации в течение суток, используется отношение концентрации в вечернем максимуме (максимальное суточное значение) I_{2max} к концентрации в дневном минимуме (минимальное суточное значение) I_{2min} : $D = I_{2max}/I_{2min}$.

Как видно из рис. 4, влияние облачности на амплитуду суточных вариаций наиболее сильно проявляется в весенний период года. При переходе от безоблачной атмосферы к сплошной облачности изменчивость концентрации аэрозоля снижается от 2,0 до 1,7 раза, а для сажи – от 2,4 до 1,3 раза, что свидетельствует о сглаживании формы суточных ходов с увеличением облачности.

Подобная картина влияния облачности проявляется и для отдельных реализаций суточных ходов (рис. 5).

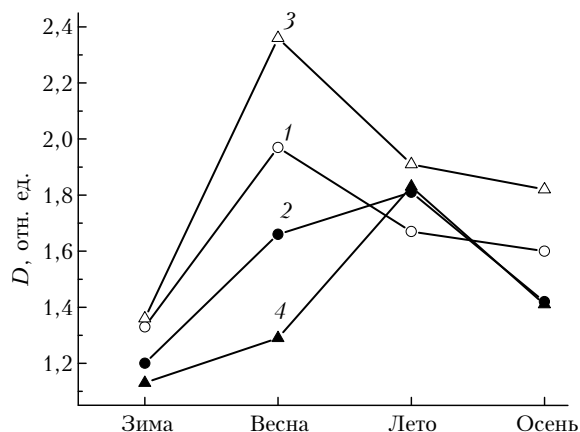


Рис. 4. Межсезонная изменчивость полных вариаций суточных ходов аэрозоля и сажи (1997–2008 гг.): 1, 2 – аэрозоль; 3, 4 – сажа (1, 3 – безоблачная атмосфера, 2, 4 – сплошная облачность)

Видно, что в безоблачной атмосфере (рис. 5, а, б) все экстремумы суточных ходов аэрозоля и сажи отчетливо выражены. При сплошной облачности выраженность экстремумов суточного хода сажи сохраняется (рис. 5, з). Однако для аэрозоля (рис. 5, в) утренний максимум практически не проявляется, как это было отмечено и для полного, и для облачного подмассивов аэрозольных данных (см. рис. 1,

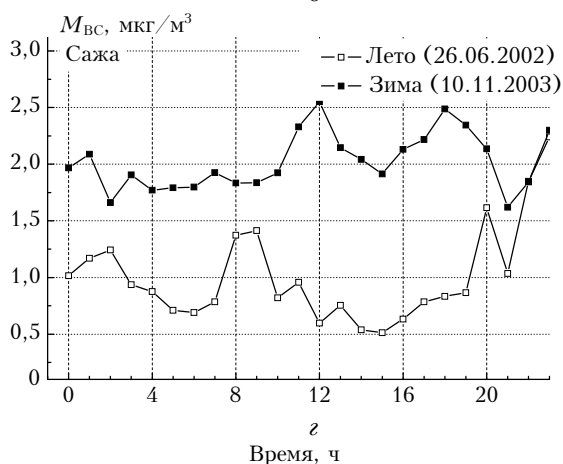
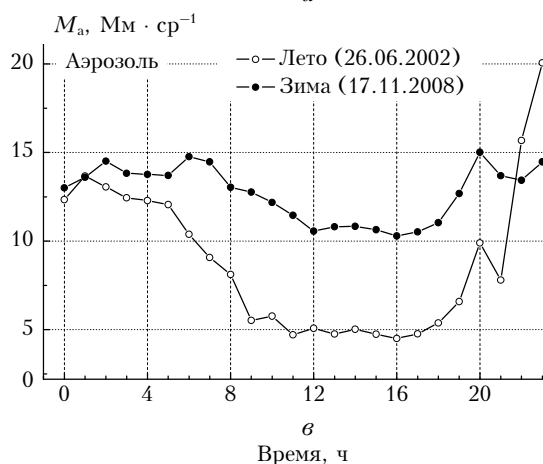
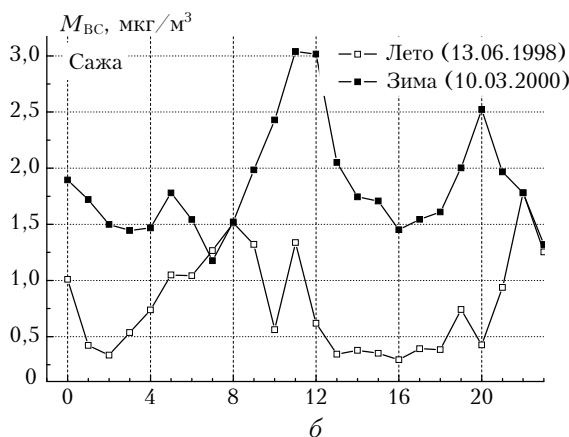
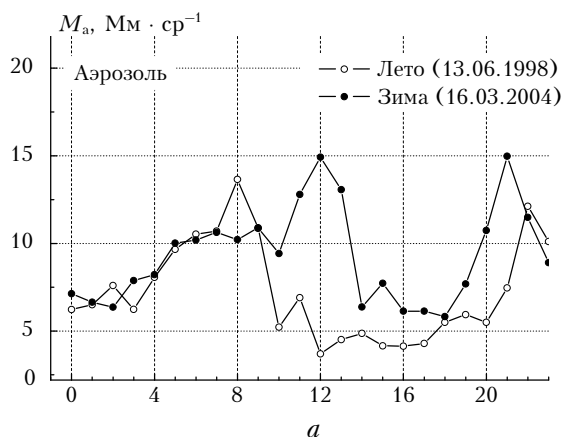


Рис. 5. Отдельные реализации суточных ходов аэрозоля и сажи в безоблачной атмосфере (а, б) и при сплошной облачности (в, з) в летний и зимний периоды года

Параметры аппроксимации суточных ходов среднесезонных значений концентрации аэрозоля и сажи для полных массивов данных

Параметр	Аэрозоль				Сажа			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
A_1	0,053	0,086	0,082	0,11	0,082	0,17	0,21	0,21
φ_1	7,9	7,6	8	7,1	7,3	6,1	7,1	6,5
T_1	10,5	10,9	10,7	10,7	11	12	11,7	11,1
A_{02}	0,99	0,97	0,97	0,96	0,99	1,01	1,2	0,99
A_2	0,067	0,21	0,21	0,15	0,075	0,088	0,25	0,12
φ_2	-1,1	-1,7	19	17	10,6	-7,5	-24	11
T_2	19,1	20	20,6	18,3	26	25,8	57	26,8

кривые 1, 3). Следует предположить, что установленная картина проявления максимума аэрозоля в значительной степени определяется ограничивающим воздействием сплошной облачности на процессы выноса аэрозоля в верхние слои тропосферы и интенсивность аэрозолеобразования в приземном слое.

Аппроксимация среднесезонных суточных ходов

Наличие устойчивых особенностей сезонной изменчивости нормированных суточных ходов концентраций аэрозоля и сажи создает благоприятные условия для их аппроксимации. Нами предложена аппроксимация среднесезонных суточных ходов концентраций аэрозоля и сажи в виде произведения двух функций синуса [37]:

$$y = \left(1 + A_1 \sin\left(2\pi \frac{t - \varphi_1}{T_1}\right)\right) \left(A_{02} + A_2 \sin\left(2\pi \frac{t - \varphi_2}{T_2}\right)\right),$$

где A_1 и A_2 — амплитуды; φ_1 и φ_2 — фазы; T_1 и T_2 — периоды колебаний.

В табл. 3 приведены средние значения параметров аппроксимации суточных ходов аэрозоля и сажи для различных сезонов года, которые позволяют восстановить суточные ходы, приведенные на рис. 1, 2 (кривые 1). Оценки показали, что предложенная аппроксимация отражает основные особенности формы среднесезонных суточных ходов концентраций аэрозоля и сажи и обеспечивает их количественное описание со средней погрешностью около 5%.

Заключение

По результатам многолетних измерений установлено, что форма суточного хода субмикронного аэрозоля и сажи одинакова для всех сезонов года и содержит утренний и вечерний максимумы, ночной и дневной минимумы. Положения максимумов на суточных ходах аэрозоля обнаруживают устойчивую сезонную изменчивость, проявляющуюся в сближении максимумов в зимний период и в их взаимном удалении в летний.

Впервые на основе анализа статистически обеспеченного массива многолетних данных установлено, что сажа обладает устойчивым суточным ходом в различные сезоны года. Это позволяет сде-

лать вывод о том, что и коэффициент аэрозольного поглощения в видимой области спектра имеет устойчивую суточную динамику (временную модуляцию).

Отличия суточных ходов концентраций аэрозоля и сажи проявляются в том, что для аэрозоля межсезонные изменения временного интервала между максимумами в суточном ходе более значительны, чем для сажи. Для сажи этот интервал близок к 12 ч. Это говорит о некоторой независимости изменчивости ВС и субмикронного аэрозоля и может служить одним из аргументов в пользу вывода о существовании определенной доли сажи в атмосфере в виде внешней смеси.

При радиационном типе погоды отчетливо проявляются все экстремумы суточных ходов аэрозоля и сажи. При сплошной облачности суточные ходы сглаживаются. При этом утренний максимум аэрозоля становится статистически незначимым в различные сезоны года. Однако для сажи выраженность всех экстремумов суточного хода сохраняется.

Среднесезонные суточные ходы концентраций аэрозоля и сажи удается аппроксимировать в виде произведения двух функций синуса со средней погрешностью около 5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00162).

1. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Гергиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля // Оптика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. С. 216–257.
2. Розенберг Г.В. Тонкодисперсный аэрозоль и климат // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18. № 11. С. 1192–1198.
3. Jacobson M.Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols // Nature. 2001. V. 409. N 6821. P. 695–697.
4. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Tumakov A.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P. Some peculiarities of the mutual variability of the content of soot and submicron aerosol in the near-ground air layer // J. Aerosol Sci. 1997. V. 28. Suppl. 1. P. 231–232.
5. Козлов В.С., Панченко М.В., Терпугова С.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Динамика временной изменчивости характеристик субмикронного приземного аэрозоля и сажи в Западной Сибири // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 156–164.

6. Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Сезонная и суточная изменчивость содержания аэрозоля и сажи в приземном слое // 3 Междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли». С.-Петербург, 23–27 сентября 2001. 2001. С. 71–73.
7. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Seasonal variability of diurnal behavior of concentrations of submicron aerosol and absorbing substance in coordinates of sun elevation // Proc. SPIE. 2006. V. 6522. 65221H. (9 p.).
8. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of Black Carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // Atmos. Environ. 2008. V. 42. N 11. P. 2611–2620.
9. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Временная изменчивость содержания субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 12. С. 1082–1085.
10. Рахимов Р.Ф., Ужegov В.Н., Макиенко Э.В., Пхалагов Ю.А. Микрофизическая интерпретация сезонной и суточной изменчивости спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления на приземных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 386–404.
11. Балин Ю.С., Ершов А.Д. Особенности формирования вертикальной структуры аэрозольных полей в летний период 1995 года в районе г. Томска // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 7. С. 952–962.
12. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в районе г. Томска для ряда сезонов // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 727–734.
13. Pol'kin V.V. Temporal variability of microstructural parameters of near-ground aerosol. Part 2. Diurnal behavior in different seasons // Proc. SPIE. 2004. V. 5743. P. 365–371.
14. Сидоров В.Н., Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Суточный ход оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1984. Т. 20. № 12. С. 1156–1164.
15. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Исаков А.А., Метревели Д.М., Свириденков М.А., Сидоров В.Н. Свойства приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и аэрозоль. М.: Наука, 1986. С. 42–64.
16. Gorchakov G.I., Isakov A.A., Mokhov I.I., Sviridenkov M.A., Shukurov K.A., Karpov A.V., Chernokulsky A.V. Temporal variability of the near-surface aerosol content from daily observations at IAP scientific station near Moscow during 1991–2002 // Proc. the Fourteenth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting. Albuquerque, New Mexico, USA, 22–26 March 2004. 2004. 9 p. (URL: http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf14/extended_abs/gorchakov-gi.pdf)
17. Сидоров В.Н. Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое // Труды Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 356–367.
18. Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ван Ген Чен. Вариации содержания сажи и субмикронного аэрозоля в городе // Труды Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 160–169.
19. Копейкин В.М., Капустин В.Н., Пекур М.С. Контроль сажевого аэрозоля в атмосфере города Москвы // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 213–217.
20. Куценогий К.П., Буфетов И.С., Киров Е.И., Шуйский С.И. Динамика суточных и сезонных циклов аэрозолеобразования в атмосфере по измерениям в Новосибирской области // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 1355–1365.
21. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Одинцов С.Л. Особенности дневной динамики аэрозольной оптической толщи атмосферы в инфракрасном диапазоне длин волн // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 9. С. 838–843.
22. Сакерин С.М., Горбаренко Е.В., Кабанов Д.М. Особенности многолетней изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы и оценки влияния различных факторов // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 7. С. 625–631.
23. Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Польшкин В.В., Смирнов А.В., Тащилин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б.Н., Еремина Т.А. Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22. № 6. С. 566–574.
24. Delen D.J., Ogren J.A. Variability of aerosol optical properties at four north American surface monitoring site // J. Atmos. Science. 2002. V. 59. N 3. P. 1135–1150.
25. Man C.K., Shin M.Y. Light scattering and absorption properties of aerosol particles in Hong Kong // J. Aerosol Science. 2001. V. 32. N 6. P. 795–804.
26. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
27. Hansen A.D.A., Rosen H., Novakov T. The aethalometer – an instrument for the real time measurement of optical absorption by aerosol particles // Sci. Total Environ. 1984. V. 36. N 1. P. 191–196.
28. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Terpuгова S.A., Shmargunov V.P., Burkov V.V. Simultaneous measurements of submicron aerosol and absorbing substance in the height range up to 7 km // Proc. Tenth ARM Science Team Meeting, San Antonio, Texas, 13–19 March 2000. 2000. 4 p. (URL: http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0003/panchenko-mv.pdf)
29. Tikhomirov A.B., Firsov K.M., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Ponomarev Y.N., Tikhomirov B.A. Investigation of spectral dependence of shortwave radiation absorption by ambient aerosol using time-resolved photoacoustic technique // Opt. Eng. 2005. V. 44. N 7. 071203 (11 p.).
30. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 1–3.
31. Шмаргунов В.П., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Польшкин В.В., Панченко М.В. Автоматизированный аэрозольный нефелометр на базе ФАНа // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 165.
32. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of Black Carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // Atmos. Environ. 2008. V. 42. N 11. P. 2611–2620.
33. Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Польшкин В.В., Яушева Е.П. Об изменчивости содержания аэрозоля, сажи и параметра конденсационной активности частиц в городских и фоновых условиях в весенний период года // Аэрозоли Сибири. VIII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2001. С. 18–19.

34. Панченко М.В., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П., Яушева Е.П. О формировании среднерегионального аэрозольного фона Томска // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 1112–1114.
35. Bond T.C., Covert D.S., Kramlich J.C., Larson T.V., Charison R.J. Primary particle emissions from residential coal burning: optical properties and size distributions // J. Geophys. Res. D. 2002.V. 107 N 21. 8347, doi: 10.1029/2001 JD000571.
36. Dillner A.M., Stein C., Larson S.M., Hitzenberger R. Measuring of mass extinction efficiency of elemental carbon in rural aerosol // Aerosol Sci. Technol. 2001. V. 35. N 6. P. 1009–1021.
37. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. О параметризации суточных ходов концентраций субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое // Аэрозоли Сибири. XII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. С. 10.

V.S. Kozlov, M.V. Panchenko, E.P. Yausheva. **Diurnal behavior of the submicron aerosol and Black Carbon in the ground layer.**

Peculiarities of seasonal variability of diurnal behaviors of the mass concentration of the submicron aerosol and Black Carbon (BC) in near-ground layer, based on the measurements carried out in 1997–2008 at the Aerosol station of IAO SB RAS has been analysed. The shape of the diurnal behaviors of the aerosol and BC are the same for all seasons and contains the morning and evening maxima, and the nighttime and daytime minima. Maxima in the diurnal behavior of concentration of the aerosol approach to each other in winter and move away from each other in summer. The stability of the shape of the BC diurnal behavior in different seasons of the year is a factor of stable diurnal dynamics of the aerosol absorption coefficient in the visible range of a spectrum. Certain differences in the diurnal behavior of the aerosol and BC make it possible to draw a conclusion on the presence of some soot fraction of aerosol as an external admixture. All extremums of the diurnal behaviors of the concentrations of aerosol and BC are the best pronounced in the cloudless atmosphere, however, in continuous cloudiness the diurnal behaviors are smoothed. Herewith, the morning maximum of the aerosol becomes statistically insignificant in different seasons of the year.