

В.С. Козлов, М.В. Панченко, А.Б. Тихомиров*, Б.А. Тихомиров

Измерение аэрозольного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм в приземном слое воздуха

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

** Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 15.05.2002 г.

На основе результатов синхронных измерений коэффициента аэрозольного поглощения оптико-акустическим спектрометром с импульсным лазером на рубине и массовой концентрации сажи в воздухе аэталометром определена эффективность поглощения (массовый коэффициент поглощения) излучения с длиной волны 694,300 нм сажевым аэрозолем в воздухе: $\alpha = (3,36 \pm 1,67) \text{ м}^2/\text{г}$. Для достижения пороговой чувствительности по коэффициенту поглощения $k_{\lambda}^{\text{min}} = 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ при энергии лазерного импульса 30 мДж и давлении воздуха в ячейке 760 торр в конструкции оптико-акустического детектора применен концентратор энергии акустического импульса, состоящий из двух параболических зеркал.

В последние годы значительно возрос интерес к экспериментальным исследованиям поглощающих свойств атмосферного аэрозоля в видимой и ближней ИК-областях спектра [1–8]. Как отмечается в работах [1–3, 6], важность таких исследований в первую очередь связана с сильным влиянием сажи как основной поглощающей компоненты в составе аэрозольных частиц на перенос излучения в атмосфере и на изменение климата.

По данным Джекобсона [7], «сажевый» (содержащий кристаллический углерод) аэрозоль вносит в глобальное потепление больший вклад, чем метан, и занимает второе место после двуокиси углерода.

Согласно работе Хансена с соавторами [8] контроль сажевых частиц в атмосфере с целью изучения их влияния на климат в настоящее время, возможно, даже более необходим, чем контроль за содержанием CO_2 . Поэтому высокоточные экспериментальные данные о коэффициенте аэрозольного поглощения, полученные в условиях реальной атмосферы для видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра, крайне важны для усовершенствования радиационных и климатологических моделей.

Необходимо отметить, что поглощение коротковолнового излучения сажевым аэрозолем характеризуется эффективностью поглощения $\alpha \leq 20 \text{ м}^2/\text{г}$ [5]. Для проведения корректных и информативных исследований аэрозольного поглощения в природных условиях требуются методы и аппаратура, обеспечивающие измерения спектральных значений коэффициента аэрозольного поглощения с пороговой чувствительностью $k_{\lambda}^{\text{min}} \leq 10^{-8} \text{ см}^{-1}$. По этой причине полученные в данном направлении и опубликованные в литературе экспериментальные результаты сравнительно немногочисленны и, как отмечается авторами [5], крайне недостаточны для надежных радиационно-климатических оценок.

В работе [9] нами представлены результаты экспериментальных исследований слабого нерезонансного поглощения излучения лазера на рубине атмосферным воздухом и смесью H_2O с азотом. Было установлено, что для смеси H_2O с азотом измеренная величина коэффициента молекулярного поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300 \text{ нм}$, которая соответствует минимуму селективного поглощения перестраиваемого по частоте излучения рубинового лазера водяным паром, в пределах погрешности измерений совпадает с результатами расчета. В то же время результаты аналогичных исследований с атмосферным воздухом показали, что измеряемая величина коэффициента поглощения значительно превышает расчетную величину коэффициента молекулярного поглощения.

В результате синхронных измерений массовой концентрации сажи в атмосферном воздухе и коэффициента поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300 \text{ нм}$ воздухом было установлено [10], что наблюдаемое превышение измеряемого коэффициента поглощения над величиной коэффициента молекулярного поглощения связано с наличием в воздухе поглощающего аэрозоля. Эксперимент проводился с использованием двух приборов. С помощью аэталометра, расположенного на аэрозольной станции лаборатории оптики аэрозоля ИОА СО РАН (<http://aerosol1.iao.ru>), измерялась массовая концентрация сажи в атмосфере. Коэффициент поглощения излучения лазера на рубине воздухом измерялся с помощью импульсного оптико-акустического (ОА) спектрометра с временным разрешением сигналов.

К недостаткам измерений [10] необходимо отметить следующие моменты. Спектрометр и аэталометр располагались в разных помещениях здания, на расстоянии около 100 м друг от друга. Процедуры забора воздуха в ячейки приборов не были полностью

синхронизированы. Отмеченное приводило к некоторому снижению взаимной корреляции исследуемых параметров. Коэффициент корреляции R не превышал 0,8. Пороговая чувствительность ОА-спектрометра по коэффициенту поглощения составляла $k_{\lambda}^{\min} \sim 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, которая была всего лишь в 5–7 раз меньше значений коэффициента аэрозольного поглощения. Такая чувствительность достигалась в результате накопления 25 ОА-сигналов в памяти компьютера, что увеличивало время измерений.

Цель настоящей работы состояла в определении эффективности аэрозольного поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300 \text{ нм}$ сажевым аэрозолем в воздухе из результатов проведенных в осенне-зимний период 2001 г. синхронных измерений коэффициента аэрозольного поглощения с помощью ОА-спектрометра с лазером на рубине и массовой концентрации сажи в воздухе с помощью аэталометра.

В задачи исследований входило:

- доведение пороговой чувствительности ОА-спектрометра до $k_{\lambda}^{\min} \sim 10^{-10} \text{ см}^{-1}$;
- оптимизация процедуры забора проб воздуха через фильтр аэталометра и ячейку ОА-детектора с целью обеспечения условий временной синхронизации измерений двумя приборами;
- проведение измерений с забором проб воздуха из одной точки.

Измерения массовой концентрации сажи M_S ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в атмосферном воздухе производились в реальном масштабе времени с помощью оптического измерителя [11], который по принципу действия аналогичен прибору типа «aethalometer» разработки Хансена с соавторами [12]. Работа прибора основана на непрерывных измерениях диффузного ослабления света слоем аэрозольных частиц непосредственно в процессе их осаждения на фильтр из прокачиваемого воздуха. При этом величина регистрируемого диффузного ослабления света слоем частиц прямо пропорциональна поверхностной концентрации сажи на фильтре и, следовательно, ее массовой концентрации в воздухе [13]. Применимость метода для измерения концентрации поглощающего аэрозоля обоснована результатами теоретических и экспериментальных исследований [12, 13] и опирается на то, что ослабление излучения слоем частиц, осажденных на диффузно рассеивающий фильтр, определяется поглощательной способностью частиц и не зависит от их рассеивающих свойств.

Результаты многочисленных исследований поглощающих свойств субмикронной фракции атмосферного аэрозоля за период двух последних десятилетий (см., например, [1–4]) убедительно свидетельствуют о том, что основной поглощающей компонентой в составе тонкодисперсного аэрозоля в коротковолновой области спектра является сажевая компонента, обнаруживающая характерный неселективный спектр поглощения в широком диапазоне длин волн, вплоть до ближнего и среднего ИК-диапазонов. Другие основные компоненты атмосферного субмикронного аэрозоля (сульфат аммония, органика, вода)

почти не поглощают в видимом диапазоне, т.е. в субмикронном аэрозоле сажа является доминирующим поглотителем излучения. Некоторый вклад в аэрозольное поглощение в видимой области может вносить крупнодисперсная фракция пылевых частиц размером более 1 $\mu\text{м}$. Однако массовый коэффициент поглощения таких частиц почти на три порядка меньше соответствующего саже и, как показано в работе [4], долевого вклада пыли в поглощение может достигать 10–25% лишь в условиях мощных пылевых бурь в аридной зоне.

Таким образом, если в эксперименте ограничивается поступление крупнодисперсных частиц в регистрирующий прибор, то выполняемые при этом измерения аэрозольного поглощения обусловлены содержанием сажи в аэрозоле и, следовательно, информативны только относительно ее поглощающих свойств. Отметим, что в рассматриваемом в работе аэталометре крупнодисперсный аэрозоль размером более 1 $\mu\text{м}$ в основном осаждается во входном шланге воздушной магистрали прибора. Блок-схема прибора приведена на рис. 1.

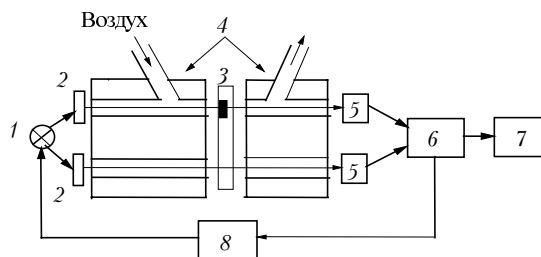


Рис. 1. Блок-схема аэталометра: 1 – галогенная лампа; 2 – диффузные рассеиватели; 3 – аэрозольный фильтр; 4 – оптическая ячейка; 5 – фотодиоды; 6 – преобразователь сигналов; 7 – компьютер; 8 – блок питания лампы

В качестве источника излучения используется галогенная кварцевая лампа мощностью 100 Вт. Свет от галогенной лампы поступает по световоду к диффузным рассеивателям и равномерно освещает два участка на аэрозольном фильтре типа АФА-ХА-20, установленном в оптической ячейке прибора. Световые потоки, прошедшие через измерительный и опорный оптические каналы, регистрируются фотодиодами. Через участок фильтра в измерительном канале прокачивается исследуемый воздух, и на нем накапливается сажа. Участок фильтра в опорном канале в процессе измерений не «экспонируется» и остается чистым. Преобразователь сигналов работает по дифференциальной схеме и в процессе почернения фильтра при депозите частиц непрерывно измеряет разность сигналов между измерительным и опорным каналами. Затем разностный сигнал преобразуется из напряжения в частоту с последующим цифровым кодированием с помощью 16-разрядного счетчика импульсов. Далее цифровая информация поступает в компьютер для обработки и документирования. Вычисление концентрации сажи в воздухе осуществляется по программе, которая также управляет автоматической работой прибора с заданием продолжительности

единичного забора пробы воздуха и периода времени между заборами проб.

В отличие от аналогов аэталометр [11] выполняет измерения в импульсном режиме с периодическим включением-выключением лампы источника с частотой 1 Гц. Кварцевый генератор стабильной частоты, входящий в состав преобразователя сигналов, не только управляет импульсным режимом источника излучения, но и обеспечивает его синхронизацию с работой электронно-регистрирующей схемы прибора. Разработанная система обработки и регистрации сигналов также выполняет функцию накопления разностных импульсов в «световую» и «темновую» паузы и их последующее вычитание. Реализация импульсного режима измерений в сочетании с процедурами накопления-вычитания импульсов позволила повысить чувствительность прибора, стабильность и воспроизводимость результатов измерений, а также в значительной степени исключить влияние температурных фоновых эффектов. В конструкции прибора предусмотрены возможности периодического выравнивания уровней измерительного и опорного сигналов (балансировка) посредством плавного введения ослабителя в опорный световой канал, а также отдельного измерения исходного оптического сигнала в измерительном канале (калибровка нулевого сигнала). Процедуры текущей калибровки нулевого сигнала и балансировки прибора создают оптимальные условия для временной стабильности чувствительности аэталометра.

Абсолютная калибровка аэталометра для измерений массовой концентрации сажи производилась на основе сопоставления данных синхронных оптических и гравиметрических измерений [14]. При калибровке использовались сажевые частицы размерами 50–200 нм, которые образовывались при пиролизе паров бутанола в атмосфере азота при температуре 1150 °С. На рис. 2 приведена калибровочная зависимость сигнала диффузного ослабления света от массовой концентрации

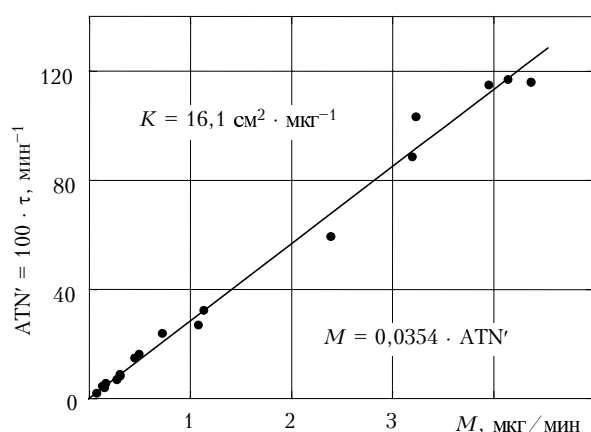


Рис. 2. Сопоставление данных гравиметрических измерений (интенсивность образования сажи M , $мкг/мин$) и синхронных оптических измерений (интенсивность роста сигнала аэталометра ATN')

сажи (для 18 различных по интенсивности режимов генерации), на основе которой была определена посто-

янная калибровки аэталометра $K = (16,1 \pm 3,2) \text{ см}^2 \cdot \text{мкг}^{-1}$ (подробнее см. [14]).

Количественные оценки (методически близкие к описанному в [14]) показали, что электронно-регистрирующая схема аэталометра с учетом значения калибровочной постоянной позволяет регистрировать минимальную поверхностную концентрацию сажи на фильтре около $1,5 \text{ нг/см}^2$. Это значит, что при прокачке через ячейку примерно 35 л воздуха минимальная регистрируемая концентрация (чувствительность прибора) составляет около $0,02 \text{ мкг/м}^3$. Для увеличения чувствительности прибора необходимо увеличить объем прокачиваемого через фильтр воздуха. В свою очередь, верхний предел измерения больших концентраций сажи лимитируется достижением значений поверхностной концентрации сажи на фильтре около 8 мкг/см^2 [14]. В этом случае при заборе 35 л воздуха допустимы значения концентрации сажи в воздухе до 110 мкг/м^3 . Верхний предел измерений можно повышать за счет уменьшения объема забираемого воздуха.

Измерения концентрации сажи в воздухе проводились нами с периодичностью 15 мин и продолжительностью забора пробы 7 мин. Скорость прокачки устанавливалась перед началом забора проб воздуха и составляла 3 л/мин. Продолжительность и скорость прокачки были определены как оптимальные для работы прибора в результате многолетней эксплуатации аэталометра в составе аэрозольной станции Института оптики атмосферы СО РАН [15]. Аэталометр находился в рабочей комнате здания Института (восточная окраина г. Томска). Наружный воздух поступал в ячейку по шлангу от заборника, расположенного на высоте 3 м от земли.

Измерения коэффициента аэрозольного поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300 \text{ нм}$ в воздухе осуществлялись с помощью импульсного ОА-спектрометра с временным разрешением сигналов, детальное описание которого приведено в работе [9]. В нашем эксперименте с целью повышения чувствительности ОА-спектрометра [9, 10] ячейка длиной 30 см и диаметром 20 см снабжалась концентратором энергии акустических импульсов. В конструкцию ячейки (рис. 3) входил концентратор, состоящий из двух параболических зеркал. Ось пучка лазерного излучения совпадала с фокальной осью цилиндрического параболоида с фокусным расстоянием 1 см и длиной 15 см. Акустический импульс, генерируемый в ячейке в результате поглощения части излучения лазерного импульса воздухом, после отражения от поверхности цилиндрического параболоида направлялся на сферический параболоид с фокусным расстоянием 10 см и площадью отражающей поверхности $15 \times 11,4 \text{ см}^2$. В фокусе сферического параболоида размещался полудюймовый конденсаторный микрофон МК-201 («Robotron»), регистрирующий усиленный в результате отражения от зеркал импульс давления.

Чувствительность ОА-спектрометра в предыдущих измерениях [9, 10] составляла $(2,8 \pm 0,6) \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{см} \cdot \text{Дж}^{-1}$.

Калибровка спектрометра осуществлялась по поглощению в максимуме линии поглощения H_2O 694,380 нм. Для этого использовались экспериментальные данные о параметрах линии поглощения H_2O 694,380 нм, взятые

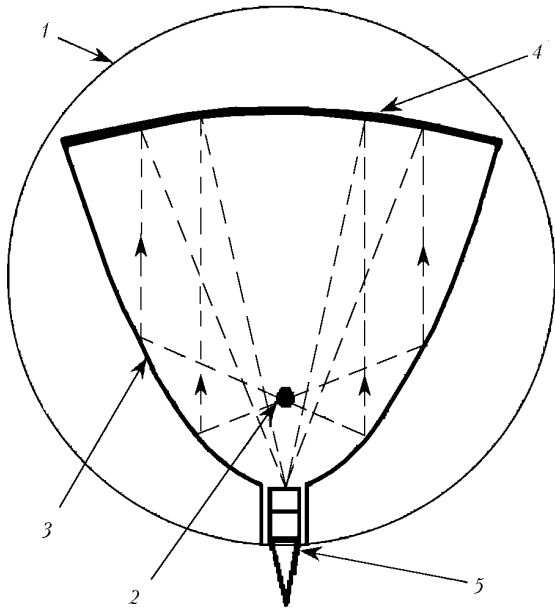


Рис. 3. Конструкция ячейки ОА-спектрометра с концентратором энергии акустических импульсов: 1 – корпус ОА-ячейки; 2 – лазерный пучок; 3 – цилиндрический параболоид; 4 – сферический параболоид; 5 – микрофон

из работы [16]. Расчет величины эффективного коэффициента поглощения (см. [9]) в максимуме линии поглощения производился с использованием пакета программ [17]. Относительная погрешность определения чувствительности α_1 составляла 23%. Измеренное по такой же методике значение чувствительности α_2 спектрометра в настоящей работе составило $(3,7 \pm 0,9) \cdot 10^7 \text{ В} \cdot \text{см} \cdot \text{Дж}^{-1}$ при атмосферном давлении воздуха.

Увеличение чувствительности спектрометра обусловлено следующими факторами. На рис. 4 представлена осциллограмма электрического сигнала ОА-детектора, из которой видно, что амплитуда усиленного акустического импульса давления (обозначен

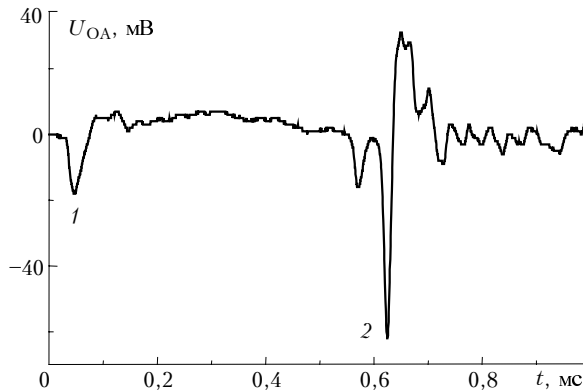


Рис. 4. Временная развертка сигнала ОА-детектора, генерируемого в ячейке с параболическими отражателями акустического импульса

цифрой 2) в 5 раз превышает амплитуду первоначального импульса 1. В экспериментах [9, 10] лазерный пучок находился на расстоянии ~ 2 см от микрофона, что позволяло отделить паразитный сигнал, обусловленный попаданием рассеянного излучения на микрофон, от полезного сигнала. При использовании ячейки с концентратором и работе с усиленным сигналом мешающее воздействие паразитного сигнала не проявляется. Лазерный пучок находится в фокусе цилиндрического параболоида на расстоянии 1 см от микрофона, что позволяет увеличить чувствительность ОА-спектрометра еще примерно в 2,8 раза. Данная оценка увеличения чувствительности в 14 раз хорошо согласуется с результатами калибровки спектрометров с различными ячейками: $\alpha_2/\alpha_1 = 13,2$.

Увеличение чувствительности спектрометра позволило достичь минимально измеряемого коэффициента поглощения $k_\lambda^{\text{min}} = 6,8 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ с накоплением 10 ОА-сигналов при энергии лазерного импульса $E = 30$ мДж. Данное значение пороговой чувствительности по коэффициенту поглощения было определено на основе сравнения амплитуды ОА-сигнала, соответствующего коэффициенту молекулярного поглощения излучения рубинового лазера водяным паром в центре линии поглощения H_2O 694,380 нм, с уровнем шума ОА-детектора $U_{\text{ш}} = \pm 2,5$ мВ.

Забор проб воздуха в ячейку ОА-спектрометра производился из той же точки, что и в ячейку аэталометра. Расход воздуха при прокачке составлял 10 л/мин. Прокачка воздуха через ОА-ячейку началась на 3 мин раньше включения прокачки воздуха через аэталометр и продолжалась в течение 10 мин. В этом случае корреляция между показаниями приборов была наилучшей.

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300$ нм воздухом от массовой концентрации

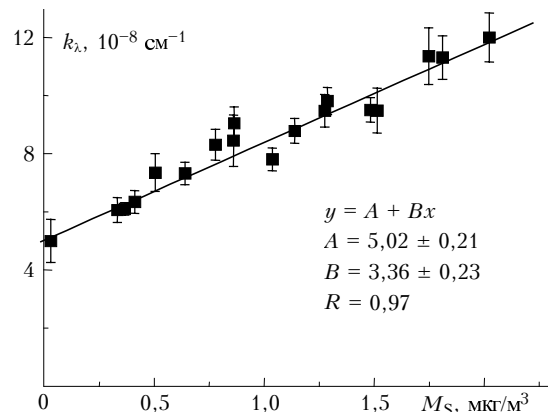


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм от концентрации сажи в атмосферном воздухе. Прямая линия – результат линейной аппроксимации (с коэффициентом корреляции R)

сажи, полученная с использованием описанного комплекса аппаратуры. Экспериментальные результаты аппроксимируются линейной зависимостью с коэффициентом корреляции $R = 0,97$. Определенная из

этой зависимости эффективность поглощения излучения с длиной волны $\lambda = 694,300$ нм сажевым аэрозолем в воздухе составляет $(3,36 \pm 1,67) \text{ м}^2/\text{г}$. Погрешность определения эффективности аэрозольного поглощения включает в себя погрешности калибровки спектрометра (23%), аэталомета (20%) и погрешности аппроксимации ($0,23 \text{ м}^2/\text{г}$). Наблюдаемое на рис. 5 остаточное поглощение при отсутствии сажи в воздухе обусловлено водяным паром. Измеренный коэффициент молекулярного поглощения излучения водяным паром $k_{\text{H}_2\text{O}} = 5,02 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$. Данная величина хорошо согласуется с расчетным значением коэффициента молекулярного поглощения $k_{\text{H}_2\text{O}} = 4,85 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ для абсолютной влажности исследуемого воздуха $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 6,26 \text{ г}/\text{м}^3$.

Рис. 6 демонстрирует изменение содержания сажи в воздухе и коэффициента аэрозольного поглощения во времени. При построении временного хода коэффициента аэрозольного поглощения вклад от поглощения излучения водяным паром был исключен.

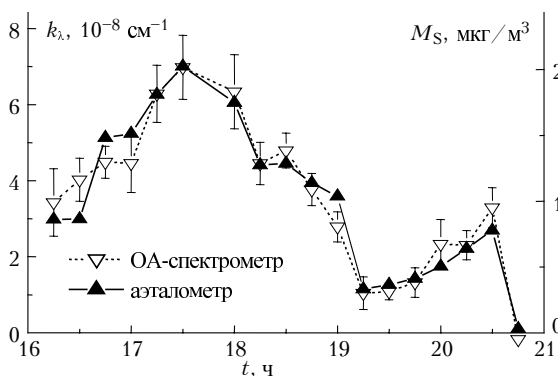


Рис. 6. Данные синхронных измерений концентрации мелкодисперсного сажевого аэрозоля (M_s) и коэффициента аэрозольного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм (k_a) в атмосферном воздухе, полученные методами диффузного ослабления (аэталометр) и ОА-лазерной спектроскопии (ОА-спектрометр) соответственно

Последние по времени точки на графиках (рис. 6) соответствуют показаниям приборов, когда забор воздуха в ячейки осуществлялся через аэрозольные фильтры. Как видно, временные ходы коэффициента аэрозольного поглощения и концентрации сажи хорошо согласуются между собой.

Вертикальные отрезки, приведенные на рис. 5 и 6, показывают величину максимального отклонения измеряемых ОА-методом значений коэффициента поглощения при воздействии одного лазерного импульса от значений коэффициента поглощения, получаемых в результате усреднения данных по 10 лазерным импульсам.

В работе [5] авторы использовали аэталометр для измерения концентрации сажи и резонансный ОА-спектрометр с AlGaInP-диодным лазером для измерения коэффициента поглощения излучения ($\lambda = 685$ нм) сажевым аэрозолем – кристаллическим углеродом (BC – «black carbon» [5]) в воздухе. В зависимости от времени (серии) измерений значение α для длины

волны $\lambda = 685$ нм варьировалось от 4,14 до 10,51 $\text{м}^2/\text{г}$. На основе анализа всей совокупности данных авторы определили величину α (685 нм) = 5 $\text{м}^2/\text{г}$ как наиболее достоверную. Полученная нами величина эффективности поглощения излучения рубинового лазера сажевым аэрозолем в воздухе несколько меньше, чем в [5] для длины волны 685 нм.

Одной из возможных причин расхождения значений α для близких длин волн $\lambda = 685$ и 694 нм может являться то, что использование высокочувствительного резонансного ОА-детектора для регистрации слабого аэрозольного поглощения не позволяет полностью исключить вклад в ОА-сигнал от поглощения стенками ячейки излучения, рассеянного в объеме исследуемого воздуха. Из анализа результатов собственных измерений и экспериментальных данных других исследований аэрозольного поглощения с помощью метода резонансной ОА-спектроскопии авторы работы [5] установили, что эффективность аэрозольного поглощения в области 400 – 1000 нм зависит от длины волны излучения как $\alpha \sim \lambda^{-2,7}$. Такой спектральный ход эффективности аэрозольного поглощения сильно отличается от данных работы [6], авторы которой на основе фильтровых измерений получили зависимость $\alpha \sim \lambda^{-1}$.

Одним из достоинств импульсных ОА-спектрометров с временным разрешением сигналов является возможность регистрации полезного сигнала от поглощения излучения исследуемым газом на нулевом фоне. В связи с этим представляет большой интерес провести измерения эффективности аэрозольного поглощения импульсного излучения с другими длинами волн с использованием ОА-метода с временным разрешением сигналов и определить спектральную зависимость $\alpha(\lambda)$ в атмосферных условиях. В ближайшем будущем планируем провести такие измерения с YAG-лазером для излучения с длинами волн $\lambda = 1064$ и 532 нм.

Авторы выражают благодарность К.М. Фирсову за компьютерные программы, предоставленные для расчета эффективного коэффициента молекулярного поглощения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 00-05-65204 и 02-05-06121).

1. Розенберг Г.В. О природе аэрозольного поглощения в коротковолновой области спектра // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1979. Т. 15. № 12. С. 1280–1292.
2. Розенберг Г.В. Тонкодисперсный аэрозоль и климат // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1982. Т. 18. № 11. С. 1192–1198.
3. Любовцева Ю.С., Юдин Н.И., Яскович Л.Г. Состав и оптические свойства субмикронной фракции атмосферного аэрозоля // Оптика атмосферы и аэрозоль. М.: Наука, 1986. С. 65–81.
4. Хансен А.Д.А., Капустин В.Н., Копейкин В.М., Жилет Д.А., Бодейн В.А. Оптическое поглощение аридным аэрозолем в регионах Средней Азии // Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля. Санкт-Петербург: ЛГУ, 1992. С. 84–90.

5. Moosmuller H., Arnott W.P., Rodgers C.F., Chow J.C., Frazier C.A., Sherman L.E., Dietrich D.L. Photoacoustic and filter measurements related to aerosol light absorption during the Northern Front Range Air Quality Study (Colorado 1996/1997) // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103. N 21. P. 28 149–28 157.
6. Bergstrom R.W., Russel P.B., Hignett P.J. Wavelength dependence of the absorption of black carbon particles: prediction and results from TARFOX experiment and implications for aerosol single scattering albedo // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. P. 567–577.
7. Jacobson M.Z. Strong radiative heating due to the mixing slate of black carbon in atmospheric aerosols // Nature. (Gr. Brit.) 2001. V. 409. P. 695–697.
8. Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lacis A., Oinas V. Global warming in the 21st century: An alternative scenario // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2000. V. 97. P. 9875–9880.
9. Тихомиров Б.А., Тихомиров А.Б., Фирсов К.М. Нерезонансное поглощение импульсного излучения лазера на рубине атмосферным воздухом и смесью H₂O с азотом // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 9. С. 740–747.
10. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tikhomirov A.B., Tikhomirov B.A. Simultaneous measurements of aerosol absorption coefficient and soot concentration in the near-ground air layer by methods of optical-acoustical spectrometry and diffuse extinction // Abstr. of VIII joint International symposium «Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics». 2001. Irkutsk. P. 181–182.
11. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Terpugova 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. of Tenth ARM Science Team Meeting. San-Antonio, Texas, 13–19 March 2000. http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0003/panchenko-mv.pdf
12. 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. № 1. P. 191–196.
13. Rosen H., Novakov T. Optical transmission through aerosol deposits on diffusely reflective filters – a method for measuring the absorbing component of aerosol particles // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 1. P. 1265–1267.
14. Baklanov A.M., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Ankilov A.N. and Vlasenko A.L. Generation of soot particles in submicron range // J. Aerosol Sci. 1998. V. 29. Suppl. 1. P. 919–920.
15. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P., and Yausheva E.P. Some peculiarities of the mutual variability of the content of soot and submicron aerosol in the near-ground air layer // J. Aeros. Sci. 1997. V. 28. Suppl. 1. P. 231–232.
16. Тырышкин И.С. Исследование уширения линий атмосферного водяного пара в видимом диапазоне методом лазерной спектроскопии высокого разрешения: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО АН СССР, 1983. 19 с.
17. Мицель А.А., Пташник И.В., Фирсов К.М., Фомин Б.А. Эффективный метод полинейного счета пропускания поглощающей атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1547–1548.

V.S. Kozlov, M.V. Panchenko, A.B. Tikhomirov, B.A. Tikhomirov. Measurement of aerosol absorption of radiation at the wavelength of 694.300 nm in the near-ground air layer.

Efficiency of absorption (mass absorption coefficient) of radiation at the wavelength of 694.300 nm by soot aerosol in air is determined from synchronous measurements of the aerosol absorption coefficient by the use of an opto-acoustic spectrometer with pulse ruby laser and the mass concentration of soot in air using an aethalometer, as $\alpha = (3.36 \pm 1.67) \text{ m}^2/\text{g}$. A concentrator of the acoustic pulse energy consisting of two parabolic mirrors was applied in the design of the opto-acoustic detector in order to reach the threshold sensitivity to the absorption coefficient $k_{\lambda}^{\text{min}} = 6.8 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^{-1}$ at the laser pulse energy of 30 mJ and air pressure of 760 Torr in the cell.