

М.В. Панченко, М.А. Свириденков¹, А.С. Емиленко¹, В.С. Козлов,
С.А. Терпугова, В.Н. Ужегов, Т.А. Докукина

Сопоставление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в локальном объеме и на протяженной трассе

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 23.01.2007 г.

Рассмотрены результаты параллельных измерений ослабления света на горизонтальной трассе и характеристик светорассеяния в локальном объеме. Решена обратная задача светорассеяния по данным трассовых и нефелометрических измерений. В значительном числе случаев получено согласие спектров размеров аэрозольных частиц в диапазоне радиусов 0,1–0,5 мкм. Показано, что данные аэрозольной станции ИОА СО РАН можно считать репрезентативными и для трассы, расположенной на расстоянии более 500 м от нее.

Введение

Проточные нефелометры с закрытым рассеивающим объемом широко распространены в практике оптических исследований аэрозоля. Их несомненным преимуществом является возможность осуществления круглосуточных измерений и контролируемых воздействий на аэрозоль. Однако вследствие ограниченного спектрального диапазона, набора углов рассеяния, не включающего область ореола, конструктивных особенностей воздухозаборного тракта, малого рассеивающего объема измеренные оптические характеристики относятся прежде всего к субмикронной фракции аэрозоля.

Данные измерений спектральной прозрачности атмосферы в видимой и инфракрасной областях спектра позволяют расширить диапазон восстанавливаемого спектра размеров. Но их использование для решения обратной задачи требует априорного знания величины комплексного показателя преломления [1]. Эта принципиальная проблема серьезно ограничивает возможности изучения распределения частиц по размерам, особенно в приземном слое атмосферы, где хорошо проявляется суточный ход относительной влажности, которая существенно влияет на величину показателя преломления.

Развиваемый нами метод «активной спектроскопии» [2] в определенной степени способен дать необходимую информацию о показателе преломления и его внутрисуточной изменчивости для конкретных условий приземного слоя. В то же время для его ввода в практику повседневной интерпретации данных трассовых измерений необходимо было решить несколько методических задач.

Первая из них связана с проблемой сопоставления оптических характеристик, измеряемых в локальном объеме и на протяженной трассе. И вторая задача заключалась в отработке методики восстановления показателя преломления в условиях меняющейся относительной влажности воздуха и соответствующего применения полученных данных к обращению данных о спектральных коэффициентах аэрозольного ослабления.

Трехнедельный цикл измерений для решения этих методических задач был проведен в г. Томске в марте – апреле 2006 г. в кооперации сотрудников Института оптики атмосферы СО РАН и Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

В настоящей статье приводятся результаты анализа этих наблюдений и решения обратных задач по данным нефелометрических и трассовых измерений.

Характеристика аппаратуры, условий эксперимента и исходных данных

В эксперименте использовался комплекс аппаратуры, установленной в двух пунктах на территории Академгородка в г. Томске. Схема размещения измерительных установок показана на рис. 1.

Определялись следующие параметры:

1. Коэффициент ослабления $\epsilon(\lambda)$ измерялся при помощи многоволнового трассового измерителя прозрачности (ИОА) на горизонтальной приземной трассе длиной 830 м в диапазоне длин волн 0,45–3,91 мкм [3]. Затем по этим данным рассчитывались коэффициенты аэрозольного ослабления $\beta(\lambda)$ с использованием методики, описанной в [4].



Рис. 1. Схема размещения измерительных установок (звездочки) на территории Академгородка (г. Томск)

2. Коэффициент направленного рассеяния сухой основы аэрозоля $\mu_0(\varphi)$ под углом 45° на длинах волн 0,41; 0,51 и 0,63 мкм и две ортогонально поляризованные компоненты рассеянного излучения под углом 90° на длинах волн 0,45 и 0,52 мкм. Данные параметры измерялись при помощи двух нефелометров ФАН, один из которых (ИОА) был установлен на аэрозольной станции ИОА СО РАН, а второй (ИФА) находился на одном из концов трассы, на которой проводились измерения прозрачности. Расстояние между двумя пунктами измерений составляло ~ 650 м. Кроме того, нефелометр ИОА был снабжен устройством для искусственного увлажнения исследуемого аэрозоля [2] и при его помощи измерялись параметры аэрозольного свето-

рассеяния при различных значениях относительной влажности воздуха в диапазоне от 20–30 до 90%.

3. Массовая концентрация сажи M_{BC} определялась при помощи аэлометра [5] (ИОА) и методом забора проб на фильтры (ИФА).

Параллельные измерения характеристик светорассеяния сухой основой аэрозоля и массовой концентрации сажи в двух пунктах позволили оценить репрезентативность данных, получаемых на аэрозольной станции ИОА для трассы.

При анализе использовались метеоданные (температура T , относительная влажность RH , скорость и направление ветра), полученные на Томской станции Росгидромета (<http://www.gismeteo.ru/weather/synarc.htm?29430>).

Оценка показателя преломления для условий реальной атмосферы

Для оптических характеристик (спектральных коэффициентов ослабления, измеренных на трассе, и семи параметров светорассеяния, полученных с помощью нефелометров ФАН) была решена обратная задача по методике, основанной на алгоритме Твитти [6] и адаптированной к обращению конкретных параметров, измеряемых в данном эксперименте [2]. По результатам решения обратных задач были определены показатель преломления аэрозольного вещества (по данным ФАН) и функции распределения частиц по размерам. Анализ чувствительности измеряемых характеристик к частицам разных размеров [2, 7] показал, что нефелометрические измерения позволяют надежно определить функцию распределения в диапазоне $r = 0,05-0,6$ мкм. При обращении данных трассовых измерений прозрачности в области $0,45-2,17$ мкм появляется возможность восстановить спектр частиц в более широком диапазоне размеров.

Однако измерения спектральной прозрачности не дают возможности определения показателя преломления аэрозольного вещества. Решение обратной задачи в этом случае возможно лишь при его априорном задании. В нашем случае определение n осуществлялось с использованием данных нефелометра, включающих угловые и поляризационные характеристики рассеяния. Это делалось как для сухой фракции (при $RH \sim 20-30\%$), так и при $RH \sim 90\%$ (полный набор измерений на всех длинах волн осуществлялся только при этих значениях влажности, а в промежутке фиксировался лишь коэффициент направленного рассеяния $\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$). Здесь следует заметить, что, как показали наши предыдущие исследования, набор измеряемых параметров и используемая методика обращения не дают возможности отдельного определения вещественной и мнимой частей комплексного показателя преломления, а только их линейной комбинации [2]. Поэтому определение оптических констант и спектров размеров проводилось в предположении непоглощающего аэрозоля. Однако это не имеет принципиального значения для данной работы. Различным значениям показателей преломления и поглощения при сохранении их разности соответствует практически одно и то же распределение по размерам (с точностью до ошибок восстановления) [2]. Следовательно, все выводы, сделанные ниже из сравнения спектров размеров, полученных по результатам обращения нефелометрических и трассовых измерений, будут справедливы и при учете аэрозольного поглощения.

Также предполагалось, что показатель преломления не имеет спектральной зависимости в пределах видимого и ближнего ИК-диапазонов длин волн. По данным [8] это допущение справедливо для основных компонентов атмосферного аэрозоля.

Затем оценивался показатель преломления *in situ*, т.е. при относительной влажности воздуха,

наблюдавшейся в атмосфере в момент проведения измерений спектральных коэффициентов рассеяния и ослабления.

Для этого рассчитывались объемные концентрации субмикронного аэрозоля при начальной влажности и $RH = 90\%$ путем интегрирования объемного распределения частиц по размерам dV/dr , полученного в результате решения соответствующей обратной задачи. Затем проверялось соответствие изменения показателя преломления приращению объема аэрозоля при конденсационном процессе, т.е.

$$n_{a,90} = (n_{a,0}V_{a,0} + n_bV_b)/V_{a,90}, \quad (1)$$

где $n_{a,0}$ – показатель преломления вещества аэрозоля и $V_{a,0}$ – объемная концентрация аэрозоля при начальной влажности; $n_{a,90}$ – показатель преломления вещества аэрозоля и $V_{a,90}$ – объемная концентрация аэрозоля при влажности 90% ; $n_b = 1,33$ – показатель преломления жидкой воды; V_b – объем конденсированной воды (т.е. приращение объема аэрозольных частиц, $V_b = V_{a,90} - V_{a,0}$). Ошибка определения показателя преломления для нашего набора данных и используемой методики решения обратной задачи зависит от ошибки измерений характеристик светорассеяния, которые, в свою очередь, различны для разных значений направленного коэффициента рассеяния $\mu(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$. Так, при $\mu = 20 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ погрешность восстановления n составляет $\sim 0,01$ и возрастает до $\sim 0,08$ при $\mu = 1 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ [7, 9]. При анализе результатов эксперимента из рассмотрения исключались те данные, для которых отклонение показателя преломления $n_{a,90}$, рассчитанного по формуле (1), от значения, полученного из решения обратной задачи, превосходило ожидаемую ошибку. Следует сказать, что для тех данных, оптическая невязка при обращении которых не превышала 5% , соотношение (1), как правило, выполнялось за исключением, может быть, единичных случаев.

Изменение объема аэрозольных частиц аппроксимировалось формулой Хенела [10]:

$$V_{a,RH} = V_{a,0}(1 - RH/100)^{-\chi}, \quad (2)$$

где RH – текущая величина относительной влажности. Параметр χ вычислялся с помощью значений объемной концентрации аэрозольных частиц при начальной относительной влажности и $RH = 90\%$:

$$\chi = -\frac{\ln V_{a,90} - \ln V_{a,0}}{0,1}. \quad (3)$$

Значение показателя преломления вычислялось как

$$n_{is} = \frac{n_{a,0}V_{a,0} + 1,33(V_{a,is} - V_{a,0})}{V_{a,is}}, \quad (4)$$

где индекс «*is*» соответствует относительной влажности воздуха в атмосфере *in situ*. Полученная таким образом величина n_{is} использовалась для обращения трассовых данных.

В рассматриваемом эксперименте диапазон вариаций показателя преломления сухой фракции аэрозоля составил $1,46 \pm 1,62$ (среднее значение $1,57 \pm 0,04$), *in situ* – $1,42 \div 1,57$ ($1,50 \pm 0,04$).

Результаты исследований

В табл. 1 приведены средние, максимальные и минимальные значения измеряемых параметров и их среднеквадратические отклонения, зафиксированные в период эксперимента. Для сравнения приведем средние значения и диапазоны вариаций некоторых аэрозольных параметров в 2005 г.: $\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм}) = (11,32 \pm 9,65) \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (0,22–108), $M_{\text{BC}} = (1,55 \pm 1,22) \text{ мкг/м}^3$ (0,11–12,1), $\beta(0,5 \text{ мкм}) = (270 \pm 120) \text{ Мм}^{-1}$ (42–1200). Таким образом, диапазоны вариаций и среднеквадратические отклонения параметров, реализовавшиеся в период проведения эксперимента, всего в 1,5–2 раза меньше наблюдавшихся в течение всего предыдущего года. Данное обстоятельство позволяет считать, что полученные экспериментальные данные являются достаточно представительными и статистически обеспеченными.

Таблица 1

Средние значения, среднеквадратические отклонения и диапазоны изменчивости измеряемых параметров

Параметр	Среднее	СКО	Min	Max
$\mu_0(45^\circ, \lambda = 0,51 \text{ мкм})$, $\text{Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	7,58	4,82	0,34	41,15
$\beta(0,5 \text{ мкм})$, Мм^{-1}	212	96	15	676
M_{BC} , мкг/м^3	1,24	0,90	0,048	10,3
T , $^\circ\text{C}$	–3,2	6,4	–22,0	11,0
RH , %	77,4	20,0	37	100

В табл. 2 показаны коэффициенты корреляции между различными измеряемыми параметрами.

Из табл. 2 следует, что, несмотря на пространственную разнесенность двух пунктов измерений, наблюдается высокая корреляция между значениями коэффициентов направленного рассеяния сухой основы аэрозольных частиц, измеренными при по-

мощи нефелометров. На уровне $\approx 0,9$ коррелируют между собой величины массовой концентрации сажи, полученные двумя методами в двух пунктах измерений. Это говорит о достаточно хорошей пространственной однородности поля субмикронной фракции аэрозоля.

В то же время корреляция между рассеянием и аэрозольным ослаблением на трассе значительно ниже. Здесь может быть несколько причин.

Первая причина заключается в том, что измерение семи параметров рассеянного излучения при помощи нефелометра занимает всего 4–5 мин, в то время как для измерения всего спектра коэффициентов ослабления в диапазоне длин волн 0,45–3,91 мкм требуется ~ 25 –30 мин. В течение этого времени концентрация аэрозоля и, как следствие, компоненты рассеянного излучения могут изменяться в нескольких раз.

На рис. 2 показаны примеры временной изменчивости сигнала $\mu_0(45^\circ, \lambda = 0,51 \text{ мкм})$ (в относительных единицах), реализовавшиеся в процессе измерений при помощи нефелометра, расположенного вблизи трассы зондирования. Видно, что наблюдаются ситуации как с высокой стабильностью сигнала, так и с его значительной изменчивостью.

Второй причиной может быть пространственная изменчивость аэрозольного ослабления на трассе. Сигналы, регистрируемые фотоприемником, являются осредненными вдоль трассы зондирования и, естественно, могут отличаться от тех, которые наблюдались бы непосредственно вблизи воздухозаборника нефелометра.

Третьей причиной может быть изменчивость относительного вклада грубодисперсной фракции в ослабление в видимой области спектра. Как следует из табл. 2, разность между коэффициентами ослабления на длинах волн 0,45 и 1,22 мкм, которая может рассматриваться как коэффициент ослабления субмикронной фракцией аэрозоля, несколько лучше коррелирует с коэффициентом рассеяния, чем сам коэффициент ослабления на длине волны 1,22 мкм.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между параметрами, измеренными в разных точках

Параметр 1	Параметр 2	Коэффициент корреляции	Количество измерений
$\mu_0(45^\circ, 0,41 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(45^\circ, 0,41 \text{ мкм})$, ИФА	0,97	65
$\mu_0(90^\circ \perp, 0,41 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(90^\circ \perp, 0,41 \text{ мкм})$, ИФА	0,96	65
$\mu_0(90^\circ \parallel, 0,41 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(90^\circ \parallel, 0,41 \text{ мкм})$, ИФА	0,95	65
$\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$, ИФА	0,97	65
$\mu_0(90^\circ \perp, 0,51 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(90^\circ \perp, 0,51 \text{ мкм})$, ИФА	0,96	65
$\mu_0(90^\circ \parallel, 0,51 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(90^\circ \parallel, 0,51 \text{ мкм})$, ИФА	0,97	65
$\mu_0(45^\circ, 0,63 \text{ мкм})$, ИОА	$\mu_0(45^\circ, 0,63 \text{ мкм})$, ИФА	0,96	65
$\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$, ИФА	$\beta(0,45 \text{ мкм})$	0,68	63
$\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$, ИОА	$\beta(0,45 \text{ мкм})$	0,62	89
$\mu_0(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$, ИФА	$\beta(0,45 \text{ мкм}) - \beta(1,22 \text{ мкм})$	0,72	63
M_{BC} , аэталометр, ИОА	M_{BC} , фильтры, ИФА	0,88	23

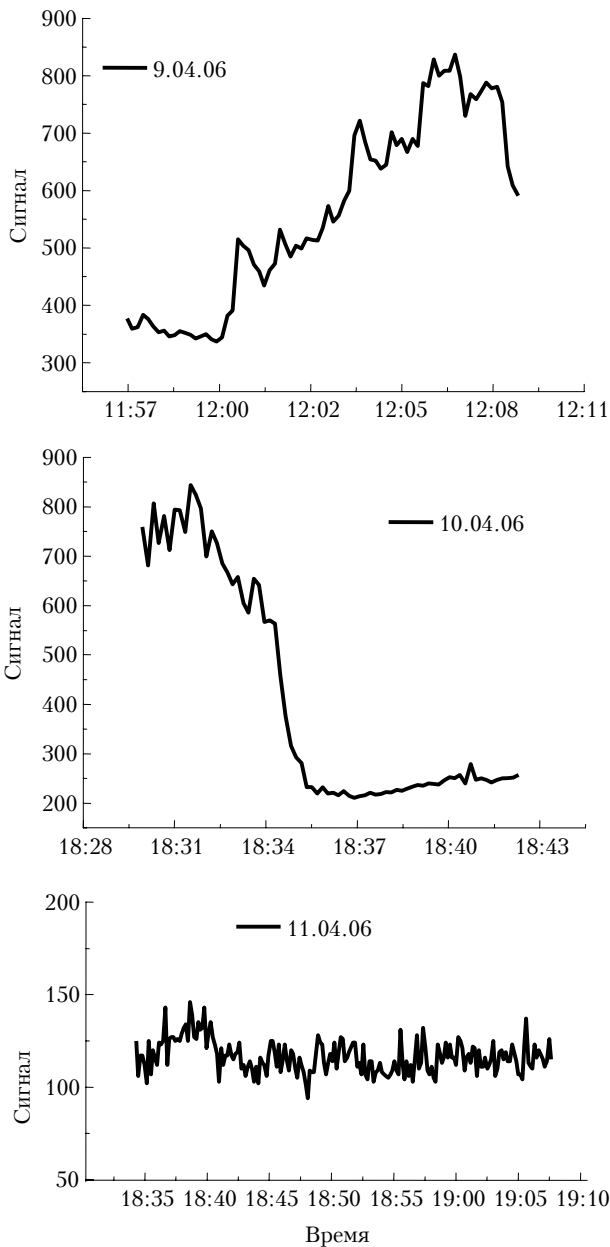


Рис. 2. Временная изменчивость рассеяния в районе трассы

При исследованиях атмосферного аэрозоля, в силу большого диапазона размеров его частиц (от сотых долей до десятков микрометров), одними из принципиальных являются выбор средств и методов измерений, адекватных определенному интервалу размеров, и оценка его границ для каждого из методов. Теоретический анализ и численное моделирование частично снимают эту проблему. Тем не менее и они нуждаются в подтверждении данными натурных измерений. Сравнение результатов решения обратной задачи для трассовых и локальных измерений (рис. 3) показало, что спектры размеров, восстановленные по измерениям на трассе, обычно превышает значения, полученные при обращении нефелометрических данных для сухой основы.

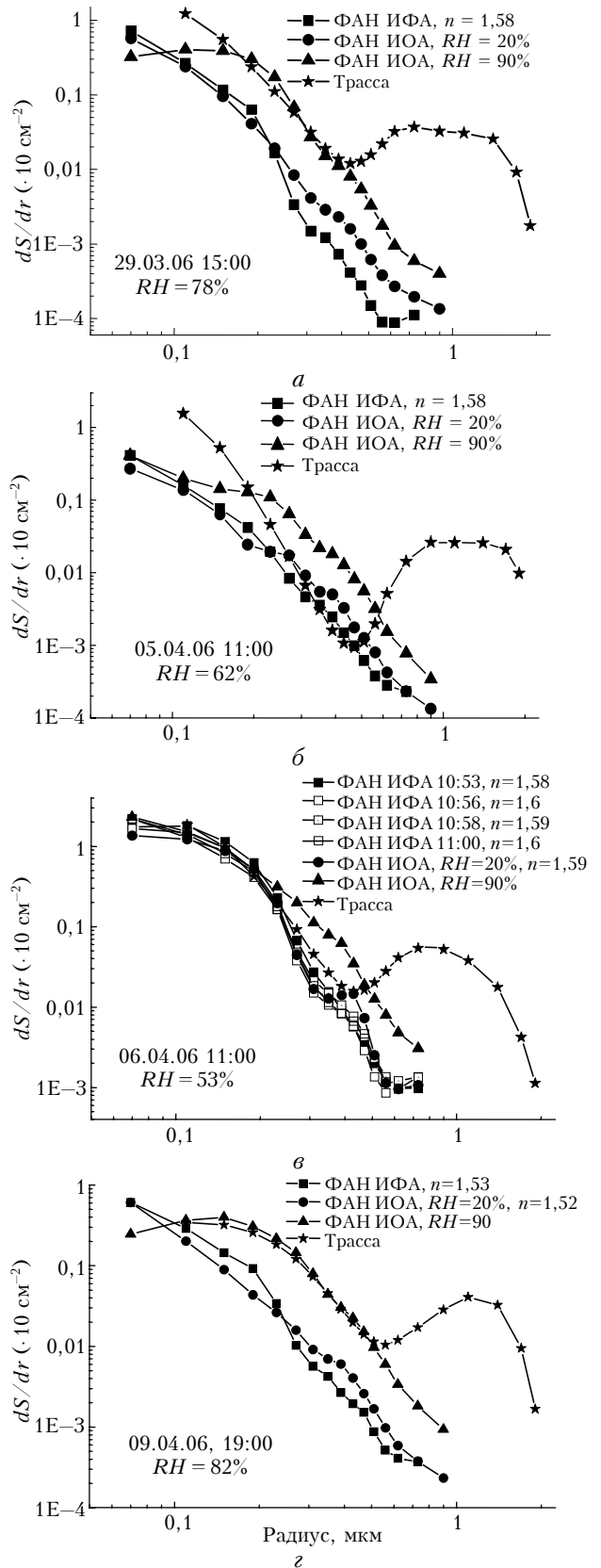


Рис. 3. Функции распределения частиц по размерам и значения показателя преломления, восстановленные с помощью решения обратной задачи для данных измерений с помощью нефелометров и трассового измерителя прозрачности

Распределения по размерам и значения показателя преломления, полученные по данным двух нефелометров для сухой фракции частиц, достаточно хорошо совпадают в том диапазоне размеров, где измеряемые параметры позволяют достаточно надежно восстанавливать параметры микроструктуры.

Распределения, полученные при обращении данных аэрозольного коэффициента ослабления на трассе, в значительном числе случаев в диапазоне размеров $r = 0,1 \pm 0,5$ мкм близки к распределениям, восстановленным по измерениям на аэрозольной станции при относительной влажности $RH = 90\%$. Это верно по крайней мере для тех ситуаций, когда относительная влажность воздуха в атмосфере больше 75% (см. рис. 3, а, з). При более низких значениях влажности в распределениях могут наблюдаться значительные различия (рис. 3, б, в). Причиной наблюдающихся различий может также служить обсуждавшаяся выше пространственно-временная неоднородность аэрозольных оптических характеристик вдоль трассы.

Таким образом, из приведенных данных следует, что при известном показателе преломления результаты измерений спектральной прозрачности в видимом и ИК-диапазонах длин волн позволяют надежно восстанавливать спектр размеров вплоть до $r \approx 1$ мкм. Формально решение обратной задачи дает возможность восстановить спектр и среднедисперсной фракции (см. рис. 3). В то же время следует отметить, что корректность описания функции распределения в диапазоне среднедисперсных частиц будет зависеть от того, насколько их показатель преломления окажется близким к значению, полученному для субмикронных частиц.

Заключение

Сравнение данных измерений характеристик светорассеяния и содержания сажи на аэрозольной станции ИОА и в районе горизонтальной трассы, а также результатов решения обратной задачи свидетельствует о высокой корреляции значений рассматриваемых параметров в двух пунктах измерений. Следовательно, данные аэрозольной станции можно считать репрезентативными и для трассы, расположенной на расстоянии более 500 м.

M.V. Panchenko, M.A. Sviridenkov, A.S. Emilenko, V.S. Kozlov, S.A. Terpugova, V.N. Uzhegov, T.A. Dokukina. Comparison of aerosol optical and microphysical characteristics in local volume and on long path.

The results of parallel measurements of light extinction on a horizontal path and the light scattering parameters in a local volume are considered. The inverse problem of light scattering is solved using the data of path and nephelometric measurements. Agreement of the aerosol particle size spectra is obtained in the majority of events in the radius range 0.1–0.5 μm . It is shown that the data obtained at the Aerosol monitoring station of IAO SB RAS are also representative for the path located more than 500 m far from it.

Спектры размеров, восстановленные по данным спектрополяриметрических измерений в локальном объеме и измерений спектральной прозрачности на горизонтальной трассе, удовлетворительно согласуются в диапазоне от 0,1–0,15 до 0,4–0,5 мкм. Полученные результаты носят предварительный характер и требуют подтверждения на более обширном экспериментальном материале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 06-05-64393 и 07-05-00860).

1. Свириденков М.А. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по спектральным измерениям прозрачности и малоуглового рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1115–1118.
2. Панченко М.В., Свириденков М.А., Терпугова С.А., Козлов В.С. Активная спектронефелометрия в исследовании микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 428–436.
3. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Автоматизированный многоволновой измеритель спектральной прозрачности приземной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 667–671.
4. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. Статистический метод разделения коэффициентов общего ослабления ИК-радиации на компоненты // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 10. С. 3–11.
5. Козлов В.С., Бурков В.В., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Оптический измеритель массовой концентрации поглощающего вещества аэрозоля (сажи) в воздухе // Наука – производству. 2003. С. 15–19.
6. Twitty J.T. The inversion of aureole measurements to derive aerosol size distributions // J. Atmos. Sci. 1975. V. 32. С. 584–591.
7. Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Terpugova S.A. Sensitivity of nephelometric method for investigation of condensation processes in submicron aerosol // Proc. SPIE. 2003. V. 5397. P. 43–49.
8. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
9. Терпугова С.А., Панченко М.В. Исследование точности восстановления микрофизических характеристик аэрозоля по данным нефелометрических измерений // Междунар. симп. стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-04): Тез. докл. СПб., 22–25 июня 2004. С. 82–83.
10. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Adv. in Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.