

времени $10\tau_z$ с момента подачи излучения на приемник. Для сигнала ЭИП, показанного на рис. 4, метод привел к завышенному на 2,7 % коэффициенту α по сравнению с указанным выше. Использование алгоритма, предложенного в [1], уменьшает это расхождение до 1,7 %.

Для проверки предлагаемого метода провели процедуру сличения ЭИП с самим собой. Для этого применили последовательный метод передачи единицы мощности от ЭИП через приемник-свидетель поверяемому приемнику, в качестве которого выступал тот же ЭИП. По результатам измерений при использовании фотоэлектрического приемника-свидетеля, нестабильности мощности лазерного излучения 10 % получили относительное отличие передаваемой единицы мощности лазерного излучения от исходной 0,003 %, а для теплового приемника-свидетеля оно составило 0,03 %. Проведение аналогичной процедуры с помощью классического метода или корректирующего алгоритма [1] приводит к погрешностям порядка нескольких процентов.

Выводы. Предложенная процедура определения коэффициента передачи единицы средней мощности лазерного излучения от ЭИП к приемнику-свидетелю позволила повысить точность измерений на имеющихся поверочных установках за счет более корректного учета флуктуаций мощности лазерного излучения и без потери точности передачи использовать в поверочных установках лазеры, не имеющие специальных устройств стабилизации мощности выходного излучения.

На основе полученных результатов дальнейший интерес представляют исследования, посвященные возможности сокращения времени передачи единицы мощности вследствие уменьшения длительности квазинепрерывного излучения, полному метрологическому анализу предложенного метода, включающего изучение шумовых и паразитных составляющих обрабатываемого сигнала, а также анализу других аналогичных методов передачи единицы мощности лазерного излучения, использующих реальные импульсные функции приемников.

Л и т е р а т у р а

1. Костин А. А., Либерман А. А., Медик В. С. Оптимизированный алгоритм обработки результатов измерений при воспроизведении и передаче размера единицы СМЛИ // Метрология. 2002. № 1. С. 30—39.
2. Таблицы физических величин: Справ. пособие / Под ред. И. К. Кикоина М.: Атомиздат, 1976. С. 96.
3. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.
4. Робинсон Э. А. История развития теории спектрально-го оценивания // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 9. С. 6—32.
5. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: Прогноз и управление. М.: Мир, 1974.

Дата принятия 13.01.2014 г.

551.501.793

Использование статистически неоднородных экранов в задаче калибровки лидара по параметрам изображений частиц для приземного слоя атмосферы

Г. П. АРУМОВ, А. В. БУХАРИН, А. В. ТЮРИН

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, e-mail: tumbul@iki.rssi.ru

Найдено эквивалентное сечение полидисперсных и несферических частиц с использованием статистически неоднородных экранов. Предложен метод обеспечения дистанционных измерений концентрации частиц в приземном слое атмосферы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, двухпозиционная схема, функция распределения частиц, рассеивающий объект, несферические, поли- и монодисперсные частицы, лидар.

The equivalent section of polydisperse and non-spherical particles with use of statistically inhomogeneous screens has been found. The proposed method can be used for metrological assurance of particles concentration in the atmosphere surface layer.

Key words: remote sensing, two-position scheme, particle distribution function, scattering object, non-spherical, poly- and monodisperse particles, lidar.

Проблема дистанционного измерения микроструктуры рассеивающих сред, состоящих из полидисперсных и несферических частиц, практически не обсуждается в настоящее время. Это связано с большим разнообразием частиц приземного слоя, имеющих неопределенные оптические и физические свойства.

Для определения микроструктуры полидисперсных сферических частиц (туман, дымка и т. д.) обычно используют лидар на нескольких длинах волн с последующим решением некорректной обратной задачи (НОЗ), при решении которой необходима априорная информация о рассеивающем объекте (например, предположение о том, что функция рас-

предела близка к логнормальному распределению). Информация о диапазонах действительной и мнимой составляющих коэффициента преломления также является существенной. В качестве решения НОЗ выбирают определенную оптимальную функцию распределения частиц по размерам, которой соответствует измеренная спектральная зависимость лидарных сигналов. Для сравнения результатов моделирования с микроструктурой исследуемого рассеивающего объекта используют радиальные моменты функции распределения частиц по размерам [1]. Для решения НОЗ необходим значительный объем настроечных параметров и априорной информации о зондируемом объекте. Эти особенности не позволяют провести дистанционные измерения параметров микроструктуры рассеивающего объекта.

Для несферических частиц (пыль, сажа, пыльца и т. п.) методы решения НОЗ неприменимы, так как для таких частиц важен вопрос о поперечном размере частицы. При этом возможны случаи нитевидных неоднородностей.

Таким образом, для имеющихся методов обоснование достоверности размеров частиц является актуальным. В настоящее время не существует индикатора размера частиц, так как оптическую схему зондирования нельзя настроить на частицы с заданными размерами. Многоволновое зондирование технически сложно для реализации поставленной задачи, поскольку калибровка сигналов на нескольких длинах волн — необходимое условие для его выполнения.

Метод с использованием лидара на одной длине волны (лидар упругого рассеяния) достаточно перспективен. Задачу можно решить при использовании эквивалентного рассеивающего объекта, состоящего из монодисперсных неоднородностей, базовые оптические параметры которого — коэффициенты обратного рассеяния и пропускания, а также искажение пучка — такие же, как для исследуемого рассеивающего объекта [1]. Тогда измеряемый сигнал обратного рассеяния будет определять концентрацию этих частиц в слое. Ключевым параметром для однозначного определения эквивалентной среды является ореол рассеяния вперед вокруг зондирующего пучка. Угловой размер этого ореола обратно пропорционален поперечному размеру отдельной микроскопической неоднородности (частицы) и может быть измерен [2].

Статистически неоднородный экран. Эквивалентом рассеивающего слоя по коэффициентам обратного рассеяния и пропускания будем считать подложку с осажденными на ней частицами. Микроструктуру частиц на подложке проанализируем по цифровым изображениям, полученным через микроскоп. Например, изображения сферических монодисперсных частиц — круглые пятна с высоким контрастом. По этим изображениям можно изготовить случайный пропускающий экран в виде пленки, на которой участки с минимальным пропусканием $p = 0$ соответствуют частицам, а с максимальным пропусканием $p = 1$ — фону. Этот экран по коэффициенту пропускания и угловому искажению пучка представляет двумерный аналог рассеивающей среды. Заметим, что, изменяя коэффициент увеличения микроскопа, можно изготовить экраны с различными размерами пятен. В этом случае отверстия можно измерить достаточно точно.

Другой тип экрана выполнен по негативу случайного пропускающего экрана (СПЭ) (далее СПЭ-негатив). На нем частицам соответствуют пятна с максимальным пропусканием, а фону — с минимальным. Если через перфорированный экран пропустить плоскую волну, то на выходе будет пучок с

угловым размером, обратно пропорциональным диаметру отверстия. Согласно принципу Бабины, указанный экран — эквивалент рассеивающего объекта по угловому размеру ореола рассеяния вперед. Изменяя коэффициент увеличения микроскопа, можно линейно менять угловой размер пучка на выходе экрана. Таким образом, основным предназначением СПЭ-негатива является то, что экран порождает ореол, служащий индикатором эквивалентного поперечного размера отверстий. Если известны коэффициент увеличения микроскопа и параметр углового увеличения пучка на выходе экрана, то можно определить эквивалентный размер частиц. По эквивалентному размеру частиц можно определить рассеивающую среду, состоящую из монодисперсных сферических частиц. Если микроструктура рассеивающего объекта не меняется, то его пропускание зависит от концентрации рассеивающих частиц. Количеству эквивалентных частиц для первоначальной подложки можно поставить в соответствие как сигнал обратного рассеяния, так и коэффициент пропускания. Такой способ может иметь перспективы для метрологического обеспечения измерений.

Полидисперсные частицы. Рассмотрим случай полидисперсных частиц. Тогда их СПЭ-негатив будет представлять темный фон с круглыми отверстиями разных размеров. Показано, что эквивалентный диаметр неоднородностей d_3 в виде полидисперсных частиц можно найти посредством двухпозиционных систем [3]. Этот метод основан на том, что при распространении зондирующего пучка через перфорированный экран вокруг пучка образуется ореол рассеяния вперед. Двухпозиционная схема зондирования позволяет измерить степень перекрытия двух приемных каналов при наличии такого ореола. В отсутствие перфорированного экрана перекрытию между двумя приемными каналами соответствует расстояние z . Наличие СПЭ-негатива увеличивает перекрытие, и ему соответствует большее расстояние z_h . Эквивалентный диаметр прозрачного пятна d_3 определяется по угловому размеру ореола рассеяния вперед следующим образом [4]:

$$d_3^{-1} = d_x^{-1} - d_0^{-1};$$

$$d_x = d_0 (z/z_h) = d_0 \sqrt{\left(1/\langle d_i^2 \rangle\right) \left(\frac{d_i^4}{(d_i + d_0)^2}\right)}, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, N$.

Здесь d_0 — отношение длины волны источника излучения к параметру углового размера поля зрения приемного канала; z_h — трасса, измеренная по перекрытиям полей зрения с зондирующим пучком при наличии искажений; d_i — диаметр i -й частицы; N — количество частиц.

Рассмотрим предельный случай. Пусть для диаметров отверстий выполняется приближение $d_i \ll d_0$, $i = 1, \dots, N$, где d_i — диаметр i -го пятна; N — количество пятен. Тогда с достаточной степенью точности выполняется равенство

$$d_3^2 = \langle d^4 \rangle / \langle d^2 \rangle, \quad \text{при } z/z_h \ll 1. \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо, когда параметр углового размера ореола рассеяния вперед много больше углового раз-

мера поля зрения приемного канала. Физический смысл эквивалентного размера пятен СПЭ-негатива заключается в создании такого эквивалента перфорированного экрана с монодисперсными отверстиями, который производит ореол рассеяния вперед такого же углового размера, как исследуемый СПЭ-негатив с полидисперсными отверстиями.

Выразим (2) через площади поперечных сечений неоднородностей:

$$S_3 = \langle S^2 \rangle / \langle S \rangle. \quad (3)$$

Здесь S_3 — эквивалентное поперечное сечение пятен.

Используя (3), можно изготовить перфорированный экран с круглыми монодисперсными отверстиями с указанным сечением, создающий заданное увеличение углового размера пучка, прошедшего через него. Угловое увеличение пучка определим из выражения

$$z/z_h = \sqrt{S_3} / (\sqrt{S_3} + \sqrt{S_0}),$$

$$S_0 = \pi d_0^2 / 4. \quad (4)$$

Из (4) следует оптимальная настройка приемного канала. Так, для измерения S_3 следует выбрать $S_3 \approx S_0$.

Несферические частицы. По изображениям осажденных частиц пыли на некоторых подложках, установленных в здании Института космических исследований РАН, создали статистически неоднородный экран. Во время измерений отмечалась пониженная влажность воздуха и сильный порывистый ветер. В результате на подложке было накоплено достаточно большое количество частиц пыли размерами до нескольких десятков микрометров. На рисунке, а представлено цифровое изображение осажденных на подложке частиц, полученное через микроскоп. На фотографии видны несферические частицы и агломераты, представляющие наложение нескольких частиц. Во время обработки изображений, заключающейся в получении файла цифрового изображения частиц с максимальным контрастом, агломераты не учитывались. На таких файлах соответствующие сечения частиц изображены черными пятнами с резкой границей (рисунок б). На рисунке, в представлен негатив для изображения, показанного на рисунке, б.

Для определения площади поперечного сечения пятен, изображенных на рисунке, б, разработали алгоритм. По ре-

зультатам обработки изображений получили 144 значения поперечного сечения частиц. Первоначально в пикселах рассчитали среднее и дисперсию:

$$\langle S \rangle = 144; D(S) = 434410. \quad (5)$$

Отметим, что на цифровой фотографии длине 100 мкм в некотором масштабе соответствует 32 пиксела. Тогда $\langle S \rangle = 4800 \text{ мкм}^2$ ($69 \times 69 \text{ мкм}$). Отношение квадрата второго

момента $\langle S^2 \rangle$ к квадрату среднего $\langle S \rangle^2$ составило

$$\langle S^2 \rangle / \langle S \rangle^2 = 2,82; S_3 = \langle S^2 \rangle / \langle S \rangle = 1378. \quad (6)$$

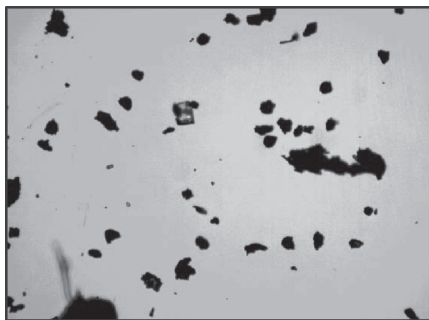
В этом выражении 1378 пиксела соответствует $S_3 = 13500 \text{ мкм}^2$ ($116 \times 116 \text{ мкм}$). Из (6) следует, что второй момент в 2,82 раза превышает квадрат среднего. Такими свойствами обладает логнормальное распределение, для которого среднее квадратичное отклонение поперечного сечения сравнимо или больше среднего значения.

Для подтверждения гипотезы о логнормальном распределении к соответствующим сечениям применяли натуральные логарифмы. Известно, что распределение указанных логарифмов должно соответствовать гауссовой функции распределения. В полученной выборке вычисляли значения среднего и дисперсии для $x = \ln S$:

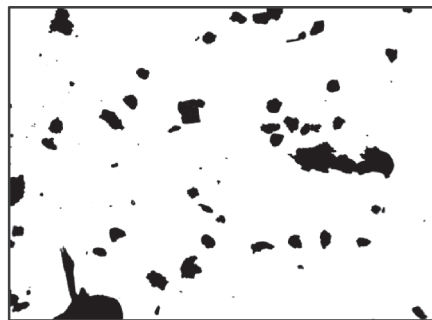
$$\langle x_N \rangle = 5,45; D_N(x) = 1,93.$$

Значения коэффициентов асимметрии β_1 и эксцесса β_2 равны соответственно $-0,75$ и $0,69$. Отсюда следует неудовлетворительное согласие указанного распределения нормальному (гауссову) распределению. Значение коэффициента асимметрии β_1 указывает на избыточное количество пятен с малыми поперечными сечениями. Допустим, указанную проблему можно решить исключением некоторого количества пятен S_i для данной выборки.

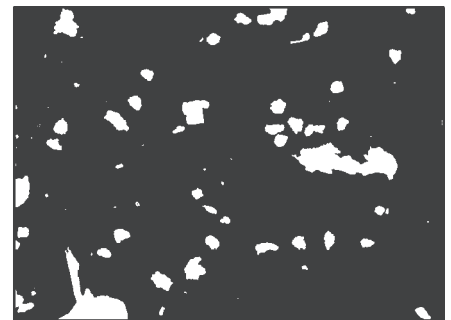
Из ранжированных по возрастанию значений S_i исключили первые тринадцать значений, соответствующих малым сечениям пятен. В результате суммарная площадь пятен уменьшилась незначительно: с 70270 до 70130 мкм^2 . Было принято решение изготовить перфорированный экран (см.



а



б



в

Изображения частиц на подложке: а — через микроскоп; б — с максимальной контрастностью; в — негатив

рисунок в). Его пропускная способность изменилась менее чем на 0,2 %. Полученный новый экран имел пятна, площади поперечного сечения которых были распределены по лог-нормальному закону.

Для нового экрана получили следующие уточненные параметры распределения:

$$\begin{aligned}\langle x_N \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 5,76; \\ \sigma_N^2 &= D(x)_N = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x_N \rangle)^2 = 1,06;\end{aligned}\quad (7)$$

$$\beta_1 = 1,52 \cdot 10^{-2}, \beta_2 = -3,48 \cdot 10^{-2}.$$

Правильность предположения о гауссовом распределении с уровнем значимости 0,005 позволяет подтвердить критерий χ^2 . Новые значения среднего и дисперсии согласно (5) составили

$$\langle S \rangle = 513; D(S) = 466458.$$

В этом выражении $\langle S \rangle = 5010 \text{ мкм}^2 (71 \times 71 \text{ мкм})$. Без первых тринадцати значений S_p , соответствующих малым сечениям пятен, согласно (6) получим

$$\langle S^2 \rangle / \langle S \rangle^2 = 2,78; S_9 = \langle S^2 \rangle / \langle S \rangle = 1425. \quad (8)$$

В (8) площади 1425 в пикселах соответствует площадь сечения $S_9 = 13900 \text{ мкм}^2 (117 \times 117 \text{ мкм})$. Значение S_9 изменилось на 3,5 %. Выражения (7) определяют параметры функции распределения логарифмов сечений от большого количества прозрачных пятен и зависят от случайных величин; следовательно, среднее и дисперсия являются также случайными величинами. Это позволяет оценить погрешности соответствующих величин $\langle x_N \rangle$ и σ_N^2 по выборке из 131 значения [5]:

$$D\langle x_N \rangle = \sigma^2 / N = 8,1 \cdot 10^{-3}; D\langle \sigma_N^2 \rangle = 2\sigma^4 / (N-1) = 1,73 \cdot 10^{-2}.$$

Отсюда следует оценка для $\langle x \rangle$ и σ как

$$\begin{aligned}\langle x \rangle &= \langle x_N \rangle \pm \sqrt{D\langle x_N \rangle} = 5,76 \pm 0,09 (1,6 \%); \\ \sigma &= \sigma_N \pm \sqrt{D\langle \sigma_N^2 \rangle} = 1,03 \pm 0,13 (12,8 \%).\end{aligned}\quad (9)$$

Для первого и второго моментов логнормального распределения имеем следующие значения:

$$\langle S \rangle = \exp(\langle x \rangle + \sigma^2 / 2); \langle S^2 \rangle = \exp(2\langle x \rangle + 2\sigma^2).$$

Здесь $\langle x \rangle$ и σ вычисляли с помощью выражения (9).

Через параметры распределения (6) определяли

$$S_9 = \langle S^2 \rangle / \langle S \rangle = \exp(\langle x \rangle + 3\sigma^2 / 2). \quad (10)$$

Погрешность (10) оценили как относительную погрешность функции многих переменных:

$$\delta S_9 = \Delta S_9 / S_9 = \sqrt{(\sigma_N^2 / N) + [9\sigma_N^4 / (N-1)]} = 0,29. \quad (11)$$

Для различных типов аэрозолей наблюдаются характерные параметры распределения. Так, для крупнодисперсной фракции индустриального аэрозоля, продуктов горения биомассы, морского и пустынного аэрозоля $\sigma \leq 0,8$. Соответствующее значение для мелкодисперсной фракции, как правило, $\sigma \leq 0,5$ [6]. Тогда оценку погрешности для эквивалентного сечения можно проводить при $\sigma_N = 1$, и (11) в этом случае преобразуется к виду

$$\delta S_9 = \Delta S_9 / S_9 \approx \sqrt{10 / (N-1)}. \quad (12)$$

Остановимся подробнее на способе определения параметров функции распределения по сечениям. В проведенных измерениях стандартное логнормальное распределение получили путем исключения тринадцати пятен, соответствующих малым сечениям. При этом пропускная способность перфорированного экрана и эквивалентное сечение пятен практически не изменились. Допустим, что если логнормальное распределение достигается минимальным уменьшением любой выборки, то согласно (11) увеличение выборки N приводит к увеличению точности определения S_9 . Если функцию распределения нельзя привести к стандартному логнормальному распределению минимальным уменьшением выборки, то рассеивающие частицы нельзя охарактеризовать погрешностью (11).

Следует отметить принципиальные отличия логнормального распределения от гауссова [7]. Так, сумма случайных величин, распределенных по логнормальному распределению, очень медленно стремится к гауссову. Кроме того, наличие моментов распределения в общем случае не является достаточным для определения плотности логнормального распределения. Следовательно, не всегда на основе экспериментальных данных по отбору проб возможна корректная оценка параметров логнормального распределения. Возможно, что формулы (3) и (12) применимы для распределений, существенно отличающихся от логнормального.

При решении обратной задачи по данным многоволнового зондирования различие между реальными и модельными параметрами распределения частиц по размерам характеризует точность восстановления параметров микроструктуры среды. Это различие определяется теоретически по критерию минимума невязки. Значительное количество настроечных параметров в алгоритмах решения НОЗ практически исключает даже в перспективе метрологическое обеспечение для дистанционных измерений размеров и концентрации частиц.

Полученные результаты. Таким образом, эквивалентное сечение пылевых частиц, рассчитанное по (8), составляет $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (29 %). Если линейное увеличение микроскопа порядка 10, то $S_9 \approx 1 \text{ мм}^2$. Тогда по изображению негатива на

рисунке, в можно изготовить перфорированный экран, для которого отверстиям соответствует максимальное пропускание $p = 1$, а фону — минимальное $p = 0$. Этот экран будет порождать ореол от плоской волны с $\lambda \approx 1$ мкм, угловой размер которого близок к 10^{-3} рад. Поскольку поперечные сечения частиц имеют различные размеры, формы и случайным образом ориентированы, то можно ожидать, что угловой размер ореола будет одинаковым при любом повороте перфорированного экрана в плоскости, перпендикулярной оптической оси пучка. Для перфорированного экрана с круглыми отверстиями одинаковых размеров и сечениями 1 мм^2 угловой размер ореола от плоской волны будет близок к 10^{-3} рад. Тогда можно сделать предположение об обоснованности замены несферических частиц сферическими с поперечными сечениями, определяемыми по (3). В приближении однократного рассеяния среда из монодисперсных частиц с такими сечениями будет так же ослаблять, искажать геометрию зондирующего пучка, как и исследуемая среда.

Рассмотрим стационарную рассеивающую среду, неоднородности которой нельзя охарактеризовать поперечным сечением. Для этой среды эквивалентное поперечное сечение определим по пропусканию и угловому размеру ореола. Угловой размер ореола можно измерить достаточно точно, поскольку перфорированный экран создается наложением нескольких фрагментов разных изображений. Для полученного экрана количество прозрачных неоднородностей может быть достаточно велико. Это позволяет поставить в соответствие стационарной рассеивающей среде эквивалентное поперечное сечение с достаточной степенью точности. Если микроструктура слоя меняется, то меняется угловой размер ореола от перфорированного экрана. Следовательно, угловой размер ореола рассеяния вперед является индикатором постоянства микрофизических свойств среды. Если микроструктура такой среды во время измерений не меняется, то такой рассеивающий объект характеризуется эквивалентной концентрацией неоднородностей.

Отметим случаи, когда статистические неоднородности рассеивающей среды имеют более сложный вид поперечных сечений, например, в виде переплетения нитей. Тогда существует эквивалентный перфорированный экран с круглыми прозрачными пятнами, так же искажающий прошедший через него пучок, как и исследуемый экран. Значит, данный метод можно использовать для определения эквивалентного сечения любых неоднородностей, даже если указанные неоднородности не имеют локализованного поперечного сечения.

Таким образом, особенность предлагаемого метода основана на обработке цифровых изображений микрофизических неоднородностей среды посредством создания двухмерного аналога рассеивающей среды. Двухмерные статистические неоднородности позволяют получить информацию

о микроструктуре эквивалентной среды, состоящей из круглых трехмерных монодисперсных неоднородностей. Для реализации метода достаточно иметь лидар, цифровой микроскоп и прозрачные подложки для создания базового эквивалента рассеивающего слоя.

Заключение. Анализ цифровых изображений несферических частиц в приземном слое атмосферы показал, что их распределение по поперечным сечениям близко к логнормальному с параметрами распределения $\langle x \rangle = 5,76$ (1,6 %); $\sigma = 1,03$ (12,8 %). Эквивалентное сечение для этих частиц составило $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (29 %). Если среда содержит только такие частицы и их концентрация меняется во времени, то лидарному сигналу можно поставить в соответствие концентрацию. Она относится к эквивалентной среде, состоящей из монодисперсных сферических частиц с указанными эквивалентными сечениями. Эквивалентная рассеивающая среда так же искажает и ослабляет световой пучок, как исследуемая среда. Следует отметить, что в этом примере рассматриваются частицы достаточно больших размеров. Во многих случаях приземный слой атмосферы содержит частицы размером 1 мкм и менее. Тогда необходимо использовать измерительные средства с большим увеличением для определения эквивалентного сечения по изображениям частиц (электронный микроскоп). Для атмосферы, в которой микроструктура частиц во время измерений не меняется, можно применить метрологическое обеспечение дистанционных измерений концентрации частиц с помощью лидара.

Л и т е р а т у р а

1. **Мак Картни Э.** Оптика атмосферы / Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
2. **Bukharin A. V.** Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes // Phys. Vibrat. 2001. V. 9. N. 4. P. 246—255.
3. **Arumov G. P., Bukharin A. V., Perfil'eva I. M.** Refinement of the Method for Determining of the Angular Size of the Halo from the Plane Wave Passed Through a Statistically Inhomogeneous Screen // Phys. Wave Phenomena. 2008. V. 16. N. 4. P. 312—316.
4. **Bukharin A. V.** Boundary Diffraction Waves and the Effective Size of the Inhomogeneities of the Scattering Object // Phys. Wave Phenomena. 2010. V. 18. N. 1. P. 23—26.
5. **Чистяков В. П.** Курс теории вероятностей, М.: Наука, 1987.
6. **Dubovik O. e. a.** Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. P. 590—608.
7. **Гудман Дж.** Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.

Дата принятия 30.12.2013 г.