

Эквивалентное сечение частиц в задаче определения микроструктуры приземного слоя атмосферы

Г.П. Арумов, А.В. Бухарин, А.В. Тюрин

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

Предложен способ нахождения эквивалентного сечения полидисперсных и несферических частиц через отношение среднего квадрата поперечного сечения к среднему сечению. Для этого получены цифровые изображения частиц пыли через микроскоп. Частицам соответствует эквивалентное сечение $1,4 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ (29%). С эквивалентным сечением можно сопоставить монодисперсные сферические частицы. Тогда исследуемый рассеивающий слой из несферических частиц можно заменить слоем из монодисперсных сферических частиц с указанным сечением. При зондировании приземного слоя атмосферы вклад эквивалентного поперечного сечения для молекулярной компоненты много меньше сечения на частицах пыли. Предложенный подход может быть использован как стандартный метод дистанционных измерений микроструктуры рассеивающих сред.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, двухпозиционная схема, дифракция, функция распределения частиц, ореол, рассеивающий объект, пропускание, сечение, полидисперсные частицы, монодисперсные частицы, несферические частицы.

Введение

Актуальной задачей дистанционного зондирования является получение информации о базовых параметрах микроструктуры аэрозоля в атмосфере (размеры и концентрация частиц). Для этой задачи обычно используют лидар на нескольких длинах волн с последующим решением некорректной обратной задачи. При решении такой задачи необходима априорная информация о рассеивающем объекте. Например, предположение о том, что функция распределения близка к логнормальному распределению. Существенной также является информация о диапазоне действительной и мнимой компонент коэффициента преломления. В качестве решения некорректной обратной задачи выбирают некоторую 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 по размерам частиц (Маккартни, 1979). Наиболее часто используются средний и эффективный размер частиц. Средний размер – это первый радиальный момент функции распределения. Эффективный размер частиц – это отношение третьего радиального момента функции распределения ко второму моменту. Эффективный размер с точностью до $1/3$ определяется как отношение суммарного объема к суммарной поверхности частиц. Такое определение эффективного размера частиц открывает возможность для введения эффективной среды, состоящей из монодисперсных частиц (Маккартни, 1979). Указанные параметры обладают некоторыми недостатками. При расчете среднего значения необходимо определить пределы интегрирования, для исключения мелкодисперсной фракции на уровне молекулярной составляющей. В то же время молекулярная составляющая дает существенный вклад в лидарный

сигнал, например, в чистой атмосфере. Для несферических частиц актуальным является вопрос о том, что такое поперечный размер несферической частицы. Возможны случаи, когда микроскопические неоднородности не имеют поперечного размера. В качестве примера укажем нитевидные неоднородности.

Из-за отсутствия измеряемого макроскопического индикатора для среднего и эффективного размера частиц появляется проблема обоснования достоверности для параметров размера частиц.

Многоволновое зондирование технически сложно для реализации, поскольку необходимым условием является наличие сигналов на нескольких длинах волн. Перспективным будет метод с использованием лидара на одной длине волны (лидар упругого рассеяния).

Решение задачи может быть основано на использовании эквивалентного рассеивающего объекта, состоящего из монодисперсных неоднородностей. Базовые оптические параметры этого объекта, которыми являются коэффициент обратного рассеяния, пропускания и искажение пучка такие же, как для исследуемого рассеивающего объекта (Маккартни, 1979). Тогда измеряемый сигнал обратного рассеяния будет определять концентрацию этих частиц в слое.

Статистически неоднородный экран

Основным экраном является подложка с осажденными на ней частицами. Эта подложка может выступать как оптический эквивалент исследуемого рассеивающего слоя по коэффициентам обратного рассеяния и пропускания. Микроструктуру частиц на подложке можно проанализировать по цифровым изображениям, полученным через микроскоп. Например, изображения сферических монодисперсных частиц будут представлять собой круглые пятна с высоким контрастом. По этим изображениям можно изготовить случайный пропускающий экран в виде пленки, на которой частицам соответствуют участки с минимальным пропусканием $p = 0$, фону соответствует участки с максимальным пропусканием $p \sim 1$. Этот экран представляет собой двумерный аналог рассеивающей среды по коэффициенту пропускания и угловому искажению пучка. Отметим, что можно изготовить экраны с различными размерами пятен изменяя коэффициент увеличения микроскопа. В этом случае размеры отверстий могут быть измерены достаточно точно.

Другим типом экрана является экран, произведенный по негативу случайного пропускающего экрана (СПЭ-негатив или перфорированный экран). На этом экране частицам соответствуют пятна с максимальным пропусканием, а фону соответствует минимальное пропускание. Если через перфорированный экран пропустить плоскую волну, то на выходе будет пучок с угловым размером обратно пропорциональным диаметру отверстия. Согласно принципу Бабине, указанный экран является эквивалентом 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 этот экран порождает ореол, являющийся индикатором эквивалентного поперечного размера отверстий. Зная коэффициент увеличения

микроскопа и параметр углового увеличения пучка на выходе экрана, можно определить эквивалентный размер частиц. Зная эквивалентный размер частиц можно определить рассеивающую среду, состоящую из монодисперсных сферических частиц. Если микроструктура рассеивающего объекта не меняется, то пропускание объекта зависит от концентрации рассеивающих частиц. Количеству эквивалентных частиц для первоначальной подложки можно сопоставить как сигнал обратного рассеяния, так и коэффициент пропускания. Такой способ имеет перспективы метрологического обеспечения измерений.

Случай полидисперсных частиц

Рассмотрим случай полидисперсных частиц. Тогда СПЭ–негатив указанных частиц будет представлять собой темный фон с круглыми отверстиями разных размеров. Ранее (Agutov, Bukharin, 2008) было показано, что эквивалентный диаметр неоднородностей d_e в виде полидисперсных частиц можно найти посредством двухпозиционных систем. 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 . Как было показано ранее (Bukharin, 2010), эквивалентный диаметр прозрачного пятна d_e определяется по угловому размеру ореола рассеяния вперед следующим образом:

$$d_e^{-1} = d_x^{-1} - d_0^{-1}, \text{ где } d_x = d_0 \frac{z}{z_h} = d_0 \sqrt{\frac{1}{\langle d^2 \rangle} \langle \frac{d^4}{(d + d_0)^2} \rangle}. \quad (1)$$

Здесь d_0 равно отношению длины волны источника излучения к параметру углового размера поля зрения приемного канала, z – длина трассы, z_h – трасса, измеренная по перекрытиям полей зрения с зондирующим пучком при наличии искажений.

Рассмотрим предельный случай. Пусть для диаметров отверстий выполняется приближение:

$$d_i \ll d_0; \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Здесь d_i – диаметр i -го пятна, N – количество пятен. Тогда с достаточной степенью точности выполняется равенство:

$$d_e^2 = \frac{\langle d^4 \rangle}{\langle d^2 \rangle}, \text{ при } \frac{z}{z_h} \ll 1. \quad (3)$$

Выражение (3) справедливо, когда параметр углового размера ореола рассеяния вперед много больше углового размера 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.

Выражение (3) можно выразить через площади поперечных сечений неоднородностей

$$S_e^2 = \frac{\langle S^2 \rangle}{\langle S \rangle}. \quad (4)$$

Здесь S_e – эквивалентное поперечное сечение пятен. Если S_e найдено, то можно изготовить перфорированный экран с монодисперсными круглыми отверстиями с указанным сечением. Этот экран создаст заданное увеличение углового размера пучка, прошедшего через указанный экран. Угловое увеличение пучка можно определить из выражения

$$\frac{z}{z_h} = \frac{\sqrt{S_e}}{\sqrt{S_e} + \sqrt{S_0}}, \quad S_0 = \pi \frac{d_0^2}{4}. \quad (5)$$

Из (5) следует оптимальная настройка приемного канала. Так, например, для измерения S_e следует выбрать $S_e \approx S_0$.

Случай несферических частиц

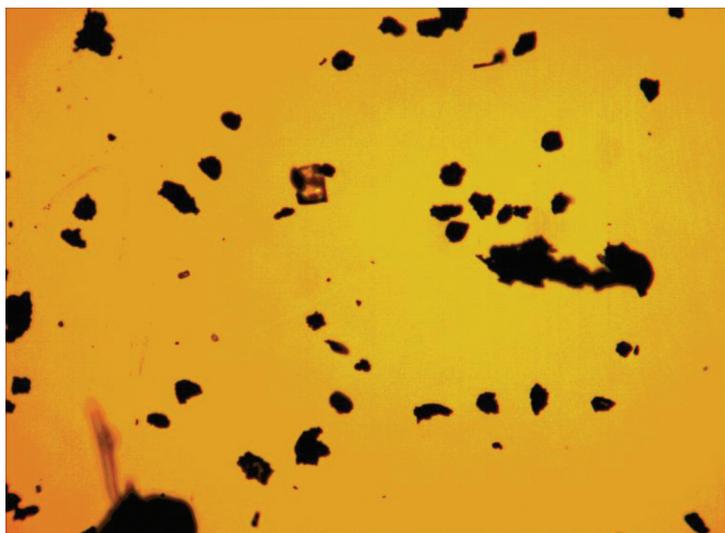
Статистически неоднородный экран создан по изображениям осажденных частиц пыли на некоторой подложке. Такие подложки были установлены в здании ИКИ РАН, которое расположено вблизи метро «Калужская» на пересечении улиц Обручева и Профсоюзной. Погода во время измерений отличалась пониженной влажностью с сильным порывистым ветром. В результате на подложке было накоплено достаточно большое количество частиц пыли с размерами до нескольких десятков микрон. На *рис. 1* в качестве примера представлено одно из цифровых изображений осажденных на подложке частиц, полученных через микроскоп. На фотографии наблюдаются несферические частицы и агломераты, представляющие собой наложение нескольких частиц. Во время обработки изображений агломераты не учитывались. Обработка заключалась в получении файла цифрового изображения частиц с максимальным контрастом. На таких файлах соответствующие сечения частиц изображены черными пятнами с резкой границей 2. На *рис. 3* представлен негатив для изображения 2. Разработан алгоритм определения площади поперечного сечения для пятен, изображенных на *рис. 2*. По результатам обработки изображений получено 144 значения для поперечного сечения частиц.

Первоначально в пикселях были найдены среднее и дисперсия:

$$\langle S \rangle = 488 (4800 \text{ мкм}^2), \quad (69 \times 69 \text{ мкм}^2) \quad D(S) = 434 \ 410. \quad (6)$$

Отметим, что на цифровой фотографии длине 100 мкм в некотором масштабе соответствует 32 пикселя. Отношение квадрата второго момента $\langle S^2 \rangle$ к квадрату среднего $\langle S \rangle^2$ составило

$$\frac{\langle S^2 \rangle}{\langle S \rangle^2} = 2,82 \quad S_e = \frac{\langle S^2 \rangle}{\langle S \rangle} = 1378 (13 \ 500 \text{ мкм}^2) \quad (116 \times 116 \text{ мкм}^2). \quad (7)$$



*Рис. 1. Изображение частиц на подложке.
Размер кадра $2,55 \times 1,91 \text{ мм}^2$*



*Рис. 2. Изображение частиц на рис. 1
с максимальной контрастностью*



Рис. 3. Негатив для изображения на рис. 1

Из (7) следует, что второй момент в 2,82 раза превышает квадрат среднего. Такими свойствами обладает логнормальное распределение, для которого среднее квадратичное отклонение поперечного сечения может быть сравнимо или больше среднего значения.

Для подтверждения гипотезы о логнормальном распределении были найдены натуральные логарифмы для соответствующих сечений. Распределение указанных логарифмов должно соответствовать гауссовой функции распределения. Для полученной выборки найдены значения среднего и дисперсии для $x = \ln S$

$$\langle x \rangle_N = 5,45 \quad D_N(x) = 1,93. \quad (8)$$

Найдены также значения коэффициентов асимметрии β_1 и эксцесса β_2

$$\beta_1 = -0,75 \quad \beta_2 = 0,69. \quad (9)$$

Отсюда следует неудовлетворительное согласие указанного распределения нормальному (Гауссову) распределению. Коэффициент асимметрии β_1 указывает на избыточное количество пятен с малыми поперечными сечениями. Допустим, указанную проблему можно решить исключением некоторого количества пятен S_i для указанной выборки.

Из ранжированных по возрастанию значений S_i были исключены первые тринадцать, соответствующие малым сечениям пятен. В результате суммарное значение площади пятен уменьшилось незначительно с 70270 до 70130. Если изготовить перфорированный экран (рис. 3), то пропускание этого экрана изменится на относительную величину менее 0,2%. Полученный новый экран имеет пятна с площадями, распределенными по логнормальному распределению.

Для нового экрана получены следующие уточненные значения для параметров распределения

$$\langle x_N \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 5,76, \quad \sigma_N^2 = D(x)_N = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle_N)^2 = 1,06, \quad (10)$$

$$\beta_1 = 1,52 \cdot 10^{-2}, \quad \beta_2 = -3,48 \cdot 10^{-2}. \quad (11)$$

Выражение (10) представляет собой оценку для выбранного случайным образом поперечного сечения x . Новый экран имеет логнормальное распределение площади поперечных сечений. Критерий χ^2 позволяет подтвердить правильность предположения о Гауссовом распределении с уровнем значимости 0,005.

Новые значения среднего и дисперсии согласно (6) составили

$$\langle S \rangle = 513(5010 \text{ мкм}^2), \quad (71 \times 71 \text{ мкм}^2) \quad D(S) = 466 \ 458. \quad (12)$$

Без первых 13 значений S_i значения выражений (7) составят

$$\frac{\langle S^2 \rangle}{\langle S \rangle^2} = 2,78, \quad S_e = \frac{\langle S^2 \rangle}{\langle S \rangle} = 1425(13 \ 900 \text{ мкм}^2) \quad (117 \times 117 \text{ мкм}^2). \quad (13)$$

Значение S_e изменилось на 3,5%. Выражения (10) определяют параметры функции распределения логарифмов сечений от большого количества прозрачных пятен. Выражения (10) зависят от случайных величин, следовательно, среднее и дисперсия являются

также случайными величинами. Это позволяет (Чистяков, 1987) оценить погрешности соответствующих величин $\langle x \rangle_N$ и σ_N^2 по выборке из 131 значения как

$$D\langle x_N \rangle = \frac{\sigma^2}{N} = 8,1 \cdot 10^{-3}, \quad D(\sigma_N^2) = \frac{2\sigma^4}{N-1} = 1,73 \cdot 10^{-2}. \quad (14)$$

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

$$\langle x \rangle = \langle x \rangle_N \pm \sqrt{D\langle x \rangle_N} = 5,76 \pm 0,09 (1,6\%), \quad \sigma = \sigma_N \pm \sqrt{D(\sigma_N^2)} = 1,03 \pm 0,13 (12,8\%). \quad (15)$$

Для первого и второго моментов логнормального распределения имеем следующие значения

$$\langle S \rangle = \exp(\langle x \rangle + \frac{\sigma^2}{2}), \quad \langle S^2 \rangle = \exp(2\langle x \rangle + 2\sigma^2). \quad (16)$$

Здесь $\langle x \rangle$ и среднее квадратичное отклонение σ определяются выражениями (15).

Выражение (7) определяется через параметры распределения как

$$S_e = \frac{\langle S^2 \rangle}{\langle S \rangle} = \exp(\langle x \rangle + \frac{3}{2}\sigma^2). \quad (17)$$

Погрешность (17) оценим как относительную погрешность функции многих переменных

$$\delta S_e = \frac{\Delta S_e}{S_e} = \sqrt{\frac{\sigma_N^2}{N} + \frac{9\sigma_N^4}{N-1}} = 0,29. \quad (18)$$

Таким образом, эквивалентное сечение пылевых частиц составляет $1,4 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ (29%) (см выражение (13)). Если линейное увеличение микроскопа составляет ~ 10 , то S_e будет составлять 1 мм^2 . Тогда по изображению негатива на *рис. 3* можно изготовить перфорированный экран, для которого отверстиям соответствует максимальное пропускание $P = 1$, фону соответствует минимальное пропускание $P = 0$. Этот экран будет порождать ореол от плоской волны с $\lambda \sim 1 \text{ мкм}$ с угловым размером близким к 10^{-3} рад. Поскольку поперечные сечения частиц имеют различные размеры и формы и случайным образом ориентированы, то можно ожидать, что угловой размер ореола будет одинаков при любом повороте перфорированного экрана в плоскости перпендикулярной оптической оси пучка. Для перфорированного экрана с круглыми отверстиями одинаковых размеров с 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 выражением (4). В приближении однократного рассеяния среда из монодисперсных частиц с такими сечениями будет также ослаблять, искажать геометрию зондирующего пучка, как исследуемая среда.

Дальнейшее увеличение точности параметров логнормального распределения требует увеличения выборки N . При этом относительная погрешность уменьшается обратно пропорционально \sqrt{N} . Для монодисперсных пятен значение, полученное из (4), совпадает с поперечным сечением неоднородности экрана.

Отметим два случая. В первом случае $\sigma \geq 1$. Тогда второе слагаемое в (18) существенно превышает первое. Погрешность углового размера ореола определяется погрешностью ширины распределения. Во втором случае $\sigma \ll 1$. Тогда значение первого слагаемого много больше второго. В этом случае целесообразнее использовать гауссово распределение. Этому случаю соответствует монодисперсное распределение поперечных сечений неоднородностей.

Остановимся подробнее на способе определения параметров функции распределения по сечениям. В произведенных измерениях стандартное логнормальное распределение получено путем исключения 13 пятен, соответствующих малым сечениям. При этом пропускание перфорированного экрана и эквивалентное сечение пятен практически не изменились. Можно предположить, что если логнормального распределения можно достичь посредством минимального уменьшения любой выборки, то, согласно (18), увеличение выборки N приводит к увеличению точности определения S_e . Если функцию распределения нельзя привести к стандартному логнормальному распределению минимальным уменьшением выборки, то в этом случае рассеивающие частицы нельзя охарактеризовать погрешностью (18).

Рассмотрим стационарную рассеивающую среду, неоднородности которой нельзя охарактеризовать поперечным сечением. Для этой среды эквивалентное поперечное сечение определяется по пропусканию и угловому размеру ореола. Угловой размер ореола может быть измерен достаточно точно, поскольку перфорированный экран можно создать посредством наложения нескольких фрагментов разных изображений. Для полученного экрана количество прозрачных неоднородностей может быть достаточно велико. Это позволяет сопоставить со средой 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 может являться индикатором постоянства микрофизических свойств среды. Если микроструктура такой среды во время измерений не меняется, то такой рассеивающий объект можно охарактеризовать эквивалентной концентрацией неоднородностей.

Отметим случаи, когда статистические неоднородности рассеивающей среды имеют более сложный вид поперечных сечений, например, в виде переплетения нитей. В этом случае также существует эквивалентный перфорированный экран с круглыми прозрачными пятнами, который производит такое же искажение прошедшего через него пучка, как исследуемый экран. Отсюда следует возможность использования метода 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 двумерного аналога рассеивающей среды. Двумерные статистические неоднородности позволяют получить информацию о микроструктуре эквивалентной среды, состоящей из круглых трехмерных монодисперсных неоднородностей.

Заключение

Анализ цифровых изображений несферических частиц в приземном слое атмосферы показал, что распределение частиц по поперечным сечениям близко к логнормальному с параметрами распределения $\langle x \rangle = 5,76$ (1,6%); $\sigma = 1,03$ (12,8%). Для этих частиц эквивалентное сечение составило $1,4 \times 10^{-8} \text{ м}^2$ (29%). Если среда содержит только такие частицы и концентрация этих частиц меняется во времени, то лидарному сигналу однозначно можно поставить в соответствие концентрацию частиц. Эта концентрация относится к эквивалентной среде, состоящей из монодисперсных сферических частиц с указанными эквивалентными сечениями. Эквивалентная рассеивающая среда производит такое же искажение и ослабления светового пучка, как и исследуемая среда. Следует особо 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 микроскоп с большим увеличением для определения эквивалентного сечения по изображениям частиц. Для атмосферы, в которой микроструктура частиц во время измерений не меняется, возможна разработка стандартного метода для дистанционных измерений концентрации частиц с помощью лидара.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН) Семиногову В.Н., Соколову В.И. и Хайдукову Е.В. за помощь в выполнении работы.

Литература

1. Маккартни Э. Оптика атмосферы / Пер. с англ. М.: МИР, 1979. 419 с.
2. Чистяков В.П. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1987. 240 с.
3. Arumov G.P., Bukharin A.V., Perfilova 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 // *Physics of Wave Phenomena*. 2008. Vol. 16. No. 4. P. 312–316.
4. Bukharin A.V. Boundary diffraction waves and the effective size of the inhomogeneities of the scattering object // *Physics of Wave Phenomena*. 2010. Vol. 18. No. 1. P. 23–26.

Equivalent section of the particles in the problem of determining the microstructure of the ground layer of the atmosphere

G.P. Arumov, A.V. Bukharin, A.V. Turin

Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru

Equivalent cross section polydisperse and non-spherical particles found as the ratio of the mean square cross-section of the middle cross section. To do this, get a digital image of dust particles through a microscope. Particles corresponds to the cross-section $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (29%). Equivalent cross section can be compared monodisperse. Then analyzed the scattering layer of non-spherical particles can be replaced by a layer of monodisperse with this cross section. In probing the surface layer of the atmosphere contribute to the equivalent cross-section of a molecular component is much smaller than the cross section on the dust particles. The proposed approach can be used as a standard method for remote measurements of the microstructure of scattering media.

Keywords: remote sensing, two-position scheme, diffraction, particle size distribution, a halo, a scattering object, transmission, cross section, polydisperse particles, monodisperse particles, non-spherical particles.