

Использование специальных экранов, моделирующих рассеянное в среде излучение, для измерения эквивалентного поперечного сечения частиц

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: tumbul@iki.rssi.ru

Предложено три способа нахождения эквивалентного сечения рассеивающих частиц. Первый способ основан на сопоставлении угловому искажению пучка отношения ненормализованных моментов второго и первого порядков для поперечных сечений частиц. Второй способ основан на использовании 3d-экранов для измерения ненормализованных моментов первого и второго порядков методами фотометрии. Третий способ базируется на обработке цифровых изображений частиц. Отмеченные возможности позволяют создать промежуточный эквивалентный экран, состоящий из монодисперсных проводящих сферических частиц. Такой экран — рассеивающий объект, который можно сопоставить как рассеивающей среде, так и двумерному экрану, созданному по снимкам частиц. Этот экран порождает такие же базовые коэффициенты (коэффициент обратного рассеяния, коэффициент экстинкции) и угловую трансформацию пучка, как и исследуемый рассеивающий объект. Коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции для эквивалентного экрана можно смоделировать посредством сферического сегмента и усеченного конуса. При этом геометрия указанных фигур позволяет смоделировать отношение базовых коэффициентов в широком диапазоне. Такая особенность приводит к минимизации влияния некорректной обратной задачи, поскольку для описания эквивалентной модели рассеивающего объекта требуется минимальный набор микрофизических параметров. К таким параметрам относятся эквивалентное сечение и концентрация эквивалентных рассеивающих частиц. Отмечена применимость метода для несферических частиц, сечения которых — выпуклые геометрические фигуры. Наличие сечений в виде невыпуклых фигур может давать различные значения для эквивалентного сечения, найденного по 2d- и 3d-экранам. Вместе с тем такое несоответствие может выступать индикатором наличия невыпуклых сечений в рассеивающем слое. Предложенный подход характеризуется однозначным переходом от набора лидарных данных к эквивалентному экрану и от микроструктуры рассеивающего слоя к эквивалентному экрану.

Ключевые слова: коэффициент обратного рассеяния, коэффициент экстинкции, некорректная обратная задача, ненормализованный момент, сечение, несферические частицы, эквивалентный экран, рассеивающая среда, 3d-экран, 2d-экран

Одобрена к печати: 12.05.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-298-306

Введение

Существующие методы дистанционного определения микроструктуры рассеивающих объектов (размеры и концентрация частиц, мнимая и действительные части коэффициента преломления) ограничены рамками решения некорректной обратной задачи из-за предельно малого количества измеряемых параметров (Collis, 1970). Способы её решения активно используют методы регуляризации и значительный объём априорной информации о рассеивающей среде (Veslovskii et al., 2002), так как измеряемых лидаром коэффициентов обратного рассеяния (КОР) и экстинкции (КЭ) недостаточно для получения информации о микроструктуре рассеивающего объекта. Для задач дистанционного зондирования объектов с неизвестными оптическими свойствами указанные методы могут быть единственными, если проверка соответствия реальных микрофизических параметров и восстановленных из решения некорректной обратной задачи оказывается трудно выполнимой (Izhovkina et al., 2018). Приземный слой атмосферы — гораздо более доступный (перспективный) объект для дистанционного зондирования миниатюрными, безопасными для глаз лидарами (Bukharin et al.,

2016). Однако использование методов решения некорректной обратной задачи для этого случая неприменимо, так как частицы приземного слоя характеризуются большим разнообразием по размерам, форме и оптическим свойствам. Одним из возможных подходов для решения этой проблемы становится использование двумерных статистически неоднородных экранов, полученных по изображениям частиц, образующих рассеивающую среду. Представим себе плоский прозрачный экран, состоящий из частиц рассеивающего слоя. Этот экран порождает такую же трансформацию зондирующего пучка, как и исследуемый рассеивающий слой. Измеряемые параметры для данного экрана (обратное рассеяние, пропускание, поперечные искажения пучка) такие же, как для исследуемого рассеивающего слоя. Поскольку набор измеряемых величин ограничен, то указанный экран можно практически всегда заменить эквивалентным экраном с монодисперсными частицами. Эти частицы могут быть описаны минимальным количеством параметров (дифференциальное сечение обратного рассеяния, поперечное сечение, поверхностная плотность частиц). Если измеряемая величина — только пропускание и угловое искажение пучка, то частицы на экране можно заменить монодисперсными непрозрачными круглыми пятнами одинакового сечения ($2d_m(p)$ -экран (Арумов и др., 2014)). Такой экран (эквивалентный экран) порождает такие же КЭ и угловое искажение (ореол рассеяния вперёд), как и исследуемый слой. Для экрана и слоя ореол рассеяния вперёд определяется как угол рассеяния на отдельной частице, если эффектами многократного рассеяния можно пренебречь. Этот угол можно непосредственно измерить, если вместо полученного двумерного экрана взять его негатив ($2d(n)$ -экран), на котором непрозрачные пятна заменяются прозрачными пятнами на непрозрачном фоне. Тогда, согласно принципу Бабине, экран с непрозрачными пятнами $2d(p)$ и его негатив $2d(n)$ порождают ореолы с одинаковыми угловыми размерами. Таким образом, с помощью $2d(n)$ -экрана можно смоделировать и измерить угловой размер ореола вокруг пучка, а экраном $2d(p)$ можно моделировать пропускание и возникающее за счёт появления ореола угловое искажение пучка, прошедшего через рассеивающий слой. Промежуточный статистически неоднородный экран с монодисперсными неоднородностями ($2d_m(p)$ -экран) является эквивалентом исследуемого рассеивающего слоя по КЭ и угловому размеру ореола рассеяния вперёд. Аналогично экрану $2d_m(p)$ можно сопоставить экран $2d_m(n)$, в котором монодисперсные непрозрачные участки заменяются прозрачными монодисперсными отверстиями на непрозрачном фоне. Экран $2d_m(n)$ предназначен для измерения углового размера ореола при рассеянии вперёд. Поскольку указанные экраны порождают одинаковые угловые размеры ореола вокруг пучка при рассеянии вперёд, то такие экраны делают наглядными и однозначными переходы как от микроструктуры исследуемой среды к эквивалентному экрану, так и от набора лидарных данных к эквивалентному экрану. Появляется перспектива метрологического обеспечения дистанционных измерений микроструктуры рассеивающей среды. Для таких измерений характерны: оценка точности восстановления микроструктуры эквивалентного экрана; оптимальный выбор геометрии эквивалентного экрана для измерения углового размера ореола; наличие индикатора (угловой размер ореола), непосредственно связанного с размером (геометрическим сечением) частиц.

Ранее обоснован метод измерения угловой трансформации пучка, а также КОР и КЭ с помощью зондирующей схемы с двумя приёмными каналами (Bukharin, 2001). Такая схема включает в себя коаксиальную схему зондирования и второй приёмный канал, оптическая ось которого смещена относительно оптической оси пучка на некоторое расстояние. В этом случае приёмные каналы имеют различные геометрические форм-факторы по отношению к зондирующему пучку. При наличии поперечных искажений пучка изменяются геометрические форм-факторы, которые определяют по соотношению обратных сигналов, измеряемых этими каналами. Поперечные искажения пучка можно связать с наличием ореола рассеяния вперёд, геометрия которого определяется дифракцией на частицах слоя. Допустим, двухканальным лидаром измерены угловой размер ореола рассеяния вперёд и КЭ для локализованного вдоль трассы слоя. Тогда набор этих величин однозначно определяет эквивалентный $2d_m(p)$ -экран, и задача перехода от исследуемого слоя к эквивалентному экрану имеет единственное решение. Обратная задача — определение углового размера ореола рассеяния

вперёд и пропускания для слоя с заданным распределением частиц по размерам — также может быть решена однозначно с помощью 2d-экранов (Арумов и др., 2014). В указанной работе показано, что эквивалентное сечение определяется отношением моментов второго и первого порядков для поперечных сечений частиц. В такой постановке задача дистанционного зондирования ограничивается нахождением только сечений и концентрации частиц эквивалентного слоя. Метод эквивалентных экранов применим для несферических частиц. Особенность подхода с использованием эквивалентных экранов состоит в однозначном сопоставлении как набору лидарных данных, так и микроструктуре рассеивающего слоя эквивалентного объекта, оптические свойства которого определяются минимальным количеством микрофизических параметров.

Модели эквивалентных рассеивающих частиц

В общем случае для проводящих сферических частиц размером больше длины волны КЭ и КОР можно представить в виде:

$$\alpha = \sigma_e n, \quad \beta = \frac{\sigma_\beta n}{2\pi}, \tag{1}$$

где α — коэффициент экстинкции; σ_e — сечение экстинкции на отдельной частице, $\sigma_e = 2\pi R^2$; R — геометрический радиус частицы; n — концентрация частиц; β — коэффициент обратного рассеяния; σ_β — сечение обратного рассеяния на отдельной частице, $\sigma_\beta = (\pi r^2)/2$; r — радиус кривизны передней поверхности частицы. Наличие множителя концентрации перед указанными сечениями допускает использование объёмной модели рассеивающей частицы в виде суммы указанных сечений в единице объёма ($n\sigma_e$ — суммарное сечение экстинкции в единице объёма; $n\sigma_\beta$ — суммарное сечение рассеяния назад единицей объёма). На *рис. 1* представлены модели рассеивающих частиц, которые могут быть сопоставлены соотношению КЭ и КОР в широких пределах.

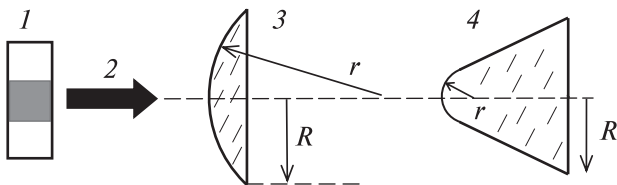


Рис. 1. Модель рассеивающей частицы: 1 — приёмо-передающий канал; 2 — направление зондирующего пучка; 3 — сферический сектор для случая $r > R$; 4 — усечённый конус для случая $r < R$

Для случая проводящей сферы произведение $4\pi\beta$ даёт оценку суммарного геометрического сечения частиц в единице объёма, $2\pi\beta$ определяет суммарное сечение рассеяния в направлении назад для единицы объёма. С учётом этого будем иметь:

$$\frac{\alpha}{2\pi\beta} = \frac{\sigma_e}{\sigma_\beta} = G \frac{R^2}{r^2}, \tag{2}$$

где G — коэффициент пропорциональности, $G = 4$ для случая сферических частиц, $G = 2$ для изотропно рассеивающего диска, $G = 1$ для диска с ламбертовой диаграммой обратного рассеяния. Для молекулярного рассеяния $G = 4/3$. В приближении проводящих сфер размерами больше длины волны сечение экстинкции σ_e в два раза больше геометрического сечения частицы, а сечение обратного рассеяния $\sigma_\beta(r)$ в два раза меньше геометрического сечения частицы. В общем случае сечение $\sigma_\beta(r)$ зависит от альbedo однократного рассеяния, мнимой и действительной частей коэффициента преломления.

При наличии параметра углового искажения пучка можно оценить суммарное геометрическое сечение частиц, которые пересекает зондирующий пучок. Если это искажение обусловлено эффектами однократного рассеяния на частицах слоя, то появляется возможность

сопоставить угловому размеру ореола эквивалентное геометрическое сечение частицы, посредством которой можно смоделировать рассеивающий слой. Этот слой (эквивалентный слой) и исследуемый рассеивающий слой дают одинаковые наборы измеряемых данных (КОР, КЭ и угловое искажение пучка). По соотношению этих коэффициентов рассеивающей частице можно сопоставить геометрическую модель в виде объёмных фигур 3, 4 на *рис. 1*. Большинство случаев соответствуют усечённому конусу в виде фигуры 4. Если определено геометрическое сечение $\sigma_g(R)$, то появляется возможность устанавливать концентрацию эквивалентных частиц по КОР. Каждая из этих частиц представляет собой усечённый конус (сферический сегмент), но в меньшем масштабе. Предложенный сценарий основан на нахождении микроструктуры промежуточного (эквивалентного) рассеивающего объекта, состоящего из монодисперсных отражающих частиц.

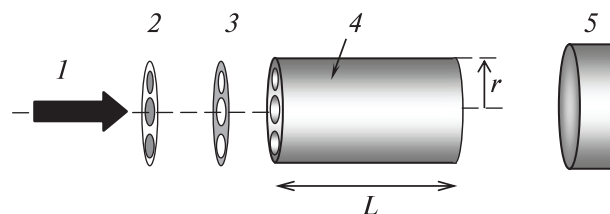
Такой подход может быть использован для дистанционных измерений микроструктуры приземного слоя атмосферы миниатюрным лидаром. Для его реализации требуются методы определения эквивалентного сечения как по лидарным данным, так и по изображениям частиц.

Способы определения эквивалентного сечения частиц

Для нахождения эквивалентного сечения можно использовать полученные с некоторым линейным увеличением микрофотографии рассеивающих частиц (Арумов, Бухарин, 2017). По этим микрофотографиям можно создать статистически неоднородный экран. На данном экране изображениям частиц соответствуют участки с минимальным пропусканием, фону — участки с максимальным пропусканием. Указанный контрастный экран мы определили как экран *p*-типа (*англ.* positive).

Другим типом экрана является экран *n*-типа (*англ.* negative), произведённый по негативу контрастного экрана *p*-типа. На этом экране изображениям частиц соответствуют пятна с максимальным пропусканием, а фону — минимальное пропускание. Экрану *n*-типа можно сопоставить перфорированный экран, на котором изображениям частиц соответствуют отверстия на непрозрачном фоне (*рис. 2*).

Рис. 2. Иллюстрация использования трёх типов экранов для моделирования угловой трансформации пучка в рассеивающей среде: 1 — направление зондирующего пучка; 2 — экран 2d(p); 3 — экран 2d(n); 4 — экран 3d(n); 5 — приёмный канал



На *рис. 2* представлены 2d- и 3d-экраны. Экраны 2d изготовлены по микрофотографиям частиц. Каждой частице на микрофотографии соответствует изображение в виде сечений S_i , $i = 1, 2, \dots, N$, где N — число сечений частиц на экране. На экране 2d(p) сечениями частиц являются тёмные участки с коэффициентом пропускания равным нулю, на перфорированном экране 2d(n) — светлые пятна с пропусканием равным единице. Экран 3d создан по экрану 2d(n) и имеет некоторый продольный размер L . Этот экран 4 представляет собой цилиндр радиуса r с отверстиями, проекция которых определяет сечение отдельной частицы на 2d(n)-экране. Отверстия оптически изолированы друг от друга материалом бруска.

Пучок света I радиусом r пересекает экран, которым оказываются упомянутые выше 2d- или 3d-экраны, и затем регистрируется приёмным каналом 5. Если для экранов 2d регистрируемый приёмным каналом сигнал пропорционален площади отдельного отверстия S_i , то для 3d-экрана регистрируемый сигнал пропорционален S_i^2 . Для минимизации влияния краевых эффектов поперечный размер каждого сечения на 2d-экране и 3d-экране должен быть существенно больше длины волны зондирующего излучения. Ниже рассмотрим три способа измерений эквивалентного сечения по изображениям частиц.

Первый способ определения эквивалентного сечения заключается в измерении поперечного искажения пучка после прохождения 2d(n)-экрана (Арумов и др., 2014). При прохождении светового пучка через перфорированный экран вокруг него в результате дифракции на отверстиях образуется ореол рассеяния вперёд. Согласно принципу Бабины, указанный экран *n*-типа становится эквивалентом экрана *p*-типа по угловому размеру ореола. Изменяя коэффициент увеличения изображения частиц на микрофотографии, которая используется для создания перфорированного 2d(n)-экрана, можно менять угловой размер ореола вокруг пучка на выходе 2d(n)-экрана. Таким образом, основным предназначением перфорированного экрана становится порождение ореола, выступающего индикатором эквивалентного поперечного размера отверстий. Зная коэффициент линейного увеличения изображения и параметр углового увеличения пучка на выходе экрана, можно определить эквивалентный размер (сечение) частиц. Эквивалентное сечение S_e выражается через моменты для поперечных сечений частиц $S_i, i = 1, 2, \dots, N$, где N — число отверстий на экране, выражением (Арумов и др., 2014):

$$\frac{z}{z_1} = \frac{C\sqrt{S_e/S_0}}{\sqrt{S_e/S_0} + 1}, \tag{3}$$

где z — длина зондируемой трассы; z_1 — длина трассы, измеренная по перекрытиям полей зрения с зондирующим пучком, при наличии ореола, образованного рассеянием вперёд; C — калибровочный коэффициент; S_e — эквивалентное поперечное сечение, $S_e = S_{21} = E(S^2)/E(S)$; $E(S^2)$ — среднее значение квадрата площади сечения; $E(S)$ — средняя площадь сечения; $S_e = \pi d_e^2/4$ — площадь эквивалентного поперечного сечения изображения частицы; d_e — диаметр эквивалентного поперечного сечения; $S_0 = \pi d_0^2/4$ — площадь пятна диаметром d_0 , значение d_0 равно отношению длины волны источника излучения к угловому размеру пучка, выраженному в радианах. Если S_e найдено, то можно изготовить перфорированный экран с монодисперсными круглыми отверстиями с указанным сечением. При $d_e = d_0$ длина зондируемой трассы в два раза меньше длины трассы, измеренной по перекрытиям полей зрения с зондирующим пучком (угловой размер ореола от плоской волны равен угловому размеру пучка). Для достаточно малых отверстий 2d(n)-экрана ($d_e \ll d_0$) отношение z к z_1 много меньше единицы (угловой размер ореола от плоской волны много больше углового размера пучка). При $d_e \gg d_0$ отношение z к z_1 близко к единице (угловой размер ореола от плоской волны существенно меньше углового размера пучка). Оптимальный для измерения эквивалентный экран реализуется при равенстве углового размера ореола от плоской волны угловому размеру зондирующего пучка ($d_e \approx d_0$). В случае монодисперсных частиц: $S_e = S_1 = S_2 = S_3 = \dots = S_k, k = N$. В случае распределения частиц, близкого к монодисперсному, $S_e \approx E(S)$. Для гауссова распределения параметр S_{21} будет близок к значению среднего. Такие же свойства имеют, например, распределение Пуассона и гамма-распределение.

Перфорированный экран с монодисперсными отверстиями сечением S_e (2d_m(n)-экран) даёт такое же ослабление и угловое искажение пучка, как экран, созданный по микрофотографиям частиц (2d(n)-экран). Таким образом, эквивалентное сечение S_e , с одной стороны, определяет отношение ненормализованных моментов второго и первого порядков для сечений частиц, с другой — определяет угловое искажение пучка на выходе экрана *n*-типа.

Из выражения (3) следует, что эквивалентное сечение S_e зависит только от отношения второго и первого моментов функции распределения частиц по сечениям. Это делает возможным вместо обычных статистических моментов применение ненормализованных моментов $E^\Sigma(S^k)$. В простейшем случае ненормализованные моменты отличаются от обычных моментов отсутствием нормировки. Ненормализованный момент *k*-го порядка $E^\Sigma(S^k)$ равен:

$$E^\Sigma(S^k) = \sum_i S_i^k, i = 1, 2, \dots, N, \tag{4}$$

где S_i — площадь сечения отдельной *i*-й частицы; N — число частиц на экране. Физический смысл ненормализованного момента первого порядка $E^\Sigma(S)$ заключается в пропуске пер-

форированного экрана (экран n -типа). Ненормализованный момент второго порядка входит в выражение (3) для углового искажения зондирующего пучка, прошедшего через перфорированный экран $2d(n)$. Ненормализованный момент является обобщением ненормированных моментов, и его можно применять в случае рассеивающих неоднородностей, для которых нормировка может не иметь смысла. Этому случаю соответствуют, например, сечения несферических частиц, представляющих собой невыпуклые фигуры, например в виде пересекающихся ломаных линий, изогнутых полос и т.п. Через ненормализованные моменты можно выразить эквивалентное сечение S_e (см. выражение (3)) и количество эквивалентных сечений N_e как:

$$N_e = N_{21} = \frac{E^\Sigma(S)}{S_e} = \frac{E^\Sigma(S)^2}{E^\Sigma(S^2)}, \quad (5)$$

где N_e представляет собой число эквивалентных сечений, которыми можно упаковать $2d(n)$ -экран. Соответствующие индексы указывают на используемые порядки ненормализованных моментов. Таким образом, по пропусканию перфорированных экранов $2d(n)$ и $3d(n)$ можно определить эквивалентное число сечений N_e . Из выражения (3) следует первый способ определения эквивалентного сечения с использованием $2d$ -экрана. По поперечному искажению пучка (поля зрения), проходящего через $2d(n)$ -экран, определяется эквивалентное сечение частиц S_{21} . Значение S_{21} и коэффициент пропускания рассеивающего объекта делают возможным определение параметра поверхностной плотности эквивалентных сечений N_{21} на экране.

Второй способ нахождения эквивалентного сечения заключается в использовании $3d$ -экранов (Арумов, Бухарин, 2018). Экран $3d$ создаётся по $2d(n)$ -экрану 4 (см. рис. 2) и представляет собой набор отверстий в цилиндре радиусом r и длиной L . На таком экране основание каждого канала глубиной L — это сечение каждой частицы на $2d$ -экране. Отверстия оптически изолированы друг от друга материалом бруска.

Калиброванный экран $3d_m(n)$ представляет собой экран с M цилиндрическими отверстиями площадью S_0 и может быть произведён по эквивалентному $2d_m(n)$ -экрану с монодисперсными сечениями. Сечение каждого отверстия $3d_m(n)$ -экрана совпадает с соответствующими сечениями $2d_m(n)$ -экрана. Для отношения сигналов от $3d(n)$ -экрана $\Phi_1(3d)$ и калиброванного $3d_m(n)$ -экрана $\Phi_{k1}(3d)$ имеем выражение:

$$\frac{\Phi_1(3d)}{\Phi_{k1}(3d)} = \frac{E^\Sigma(S^2)}{MS_0^2}. \quad (6)$$

Выражение (6) даёт способ измерения ненормализованного момента второго порядка с помощью калиброванного экрана. Калиброванный экран $3d_m(n)$ можно считать оптимальным, если площадь поперечного сечения S_0 монодисперсного отверстия равна поперечному сечению S_e для эквивалентного экрана.

Калиброванный экран может быть изготовлен как для $2d(n)$ -экрана, так и для $3d(n)$ -экрана. Такие возможности позволяют определять различными способами эквивалентное сечение рассеивающих частиц и погрешность указанного сечения.

Третий способ определения эквивалентного сечения заключается в использовании цифровых изображений частиц. В работе (Арумов и др., 2014) получены снимки несферических частиц для приземного слоя атмосферы. По этим данным вычислены в пикселях (3 мкм соответствует приблизительно 1 пиксель) ненормализованные моменты первого и второго порядка для сечений частиц (см. выражение (4)):

$$E^\Sigma(S) = 70130, \quad E^\Sigma(S^2) = 9,641 \cdot 10^7. \quad (7)$$

Эквивалентный экран $2d_m(n)$ можно упаковать круглыми монодисперсными пятнами с сечением $S_e = 1,24 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ (1371 пиксель) в количестве $N_e = 51$. Такой экран создаст такое же пропускание и угловое искажение пучка, как и реальный экран $2d(n)$. Тогда погрешность S_e можно оценить как $(N_e)^{-1}$ (2 %). Эта погрешность возникает из-за неточного покрытия площади $E^\Sigma(S) = 70130$ пикселей пятнами с сечениями 1371 пиксель.

Следует обратить внимание на существенную разницу в задаче определения сечений S_M и S_e . Эквивалентное сечение S_e — измеряемый параметр, S_M определяет медиану в логнормальном распределении. Сечение S_e можно измерить по угловому размеру ореола вокруг пучка, по цифровым снимкам и по 3d-экранам (Арумов, Бухарин, 2018). Значение S_M определяется только после восстановления функции распределения. Значение эквивалентного сечения S_e устойчиво к деформации функции распределения частиц по сечениям (Арумов, Бухарин, 2017). Следовательно, S_e может быть выбрано в качестве ключевого параметра, позволяющего смоделировать исследуемую рассеивающую среду. Кроме того, для определения параметра S_e не обязательно знать вид для функции распределения частиц по сечениям.

Перечисленные способы определения эквивалентного сечения имеют ряд особенностей. Методы с использованием цифровых изображений на 2d-экране применимы для монодисперсных и полидисперсных частиц. Угловой размер ореола на выходе пучка из 2d-экрана определяет S_e . Поскольку этот экран сделан по цифровому снимку частиц, то S_e можно определить также по цифровым фотографиям. Таким образом, по цифровой фотографии и по 2d-экрану можно найти сечение S_e и оценить погрешность этого сечения. Однако в случае несферических частиц цифровая обработка фотоснимка может быть затруднена, особенно для вытянутых неоднородностей. Фотометрические методы с использованием 3d-экранов могут давать для S_e заниженные значения, не соответствующие методам с использованием 2d-экранов и цифровых фотографий (Арумов, Бухарин, 2018). Однако эти расхождения могут быть выявлены посредством калибровок. Кроме того, различия S_e , найденные посредством 2d- и 3d-экранов, становятся индикатором наличия вклада несферических рассеивающих частиц. Следует отметить возможность определения более высоких порядков для функции распределения частиц по сечениям при использовании нескольких 3d-экранов.

Обсуждение результатов

Предложенный подход имеет перспективы для задач зондирования приземного слоя атмосферы миниатюрными, безопасными для глаз лидарами. В общем случае таким лидаром могут быть измерены КОР, КЭ и угловой размер ореола вокруг пучка, прошедшего рассеивающий слой. Такая ситуация характерна для трасс с фиксированной дальностью, ограниченной поверхностью топографического объекта. Указанный набор параметров (КОР, КЭ и угловой размер ореола) однозначно определяет сечение и концентрацию эквивалентных (монодисперсных) частиц в рассеивающем слое. Предложенная концепция эквивалентного экрана допускает метрологическое обеспечение дистанционных измерений, поскольку проверка соответствия параметров микроструктуры слоя набору лидарных данных осуществляется через эквивалентный экран. В случаях, когда измерение углового размера ореола вокруг пучка затруднено, основными параметрами будут КОР, КЭ и эквивалентное геометрическое сечение частиц для зондируемого слоя. Эквивалентное сечение частиц может быть измерено контактными методами (аэрозольные фильтры, нефелометры, микрофотографии частиц, анализаторы размеров частиц и т. д. (Градус, 1979)). Реализация таких сценариев даёт возможность описывать микроструктуру исследуемого рассеивающего слоя посредством монодисперсных частиц без использования методов решения некорректной обратной задачи. Преимущество такого сценария заключается в определении концентрации эквивалентных частиц в слое с помощью минимального набора измеряемых данных (например, в случаях, когда измеряемый параметр — только КОР). Предложенная концепция с использованием эквивалентного экрана применима для рассеивающего слоя, состоящего из несферических частиц.

Выводы

Предложен подход, определяющий микроструктуру рассеивающего объекта, являющегося эквивалентом исследуемого рассеивающего слоя по основным базовым коэффициентам (обратного рассеяния и экстинкции) и угловой трансформации пучка. Такой объект (экви-

валентный экран) состоит из монодисперсных рассеивающих частиц. Эквивалентные поперечные сечения указанных частиц выражаются через отношения моментов второго и первого порядков для поперечных сечений частиц. Эти моменты могут быть измерены по цифровым снимкам, а также посредством фотометрии с помощью 2d-, 3d-экранов. Преимущество данного подхода заключается в возможности минимального использования априорной информации о рассеивающей среде при описании эквивалентного экрана (функция распределения по сечениям частиц, мнимая и действительные части коэффициента преломления). Предложенный метод имеет перспективы метрологического обеспечения, так как переход от набора лидарных данных к эквивалентному экрану — однозначный и переход от исследуемого рассеивающего объекта к эквивалентному экрану также однозначен.

Работа выполнена в рамках программы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Использование ненормализованных моментов для определения статистических параметров несферических частиц по их изображениям // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 22–26. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-11-22-26.
2. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Трехмерные экраны для измерения ненормализованных моментов // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 44–48. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-9-44-48.
3. Арумов Г. П., Бухарин А. В., Тюрин А. В. Использование статистически неоднородных экранов в задаче калибровки лидара по параметрам изображений частиц для приземного слоя атмосферы // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 36–40.
4. Градус Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. М.: Химия, 1979. 232 с.
5. Bukharin A. V. Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes // Physics of Vibrations. 2001. V. 9. No. 4. P. 246–255.
6. Bukharin A. V., Arumov G. P., Blikh Yu. M., Makarov V. S., Turin A. V. Modulation of diode laser radiation for the formation of a distance-independent backscattered signal // Quantum Electronics. 2016. V. 46. No. 10. P. 877–882.
7. Collis R. T. H. Lidar // Applied Optics. 1970. V. 9. No. 8. P. 1782–1788.
8. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A. Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54. No. 11. P. 1513–1524.
9. Veslovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Wandinger U., Whiteman D. N. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding // Applied Optics. 2002. V. 41. No. 18. P. 3685–3699.

Use of special screens simulating scattered radiation by a medium to measure the equivalent cross-section of particles

G. P. Arumov, A. V. Bukharin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: tumbul@iki.rssi.ru

Three methods for measuring the equivalent cross section of scattering particles are proposed. The dependence of the angular transformation of the beam on the ratio of the unnormalized moments of the second and first orders for the particle cross sections is the basis for the first method. The use of 3D screens to measure unnormalized first and second order moments by photometry is the basis for the second method. Processing of digital imaging of particles is the basis for the third method. An intermediate equivalent screen, consisting of monodisperse specular spherical particles, can be created as a result of such measurements. This screen has the same basic coefficients (backscatter coefficient,

extinction coefficient) and angular distortion of the beam as the investigated scattering object. The ratio between the backscatter and extinction coefficients for an equivalent screen can be modeled using a spherical segment and a truncated cone. With this approach, the use of methods for solving the ill-posed inverse problem is minimal, since only two microphysical parameters are applied to describe the equivalent model of a scattering object. These parameters are the equivalent cross section and concentration of equivalent scattering particles. It is noted that the method is applicable for non-spherical particles with cross-sections in the form of convex geometric figures. Different values for the equivalent cross section of the non-convex geometric figures can be measured by means of 2D and 3D screens. Such a discrepancy may indicate the presence in the scattering layer of cross sections from nonspherical particles in the form of intersecting curved lines. The proposed approach is characterized by unambiguous transitions both from the lidar dataset to the equivalent screen and from the microstructure of the scattering layer to the equivalent screen.

Keywords: backscattering coefficient, extinction coefficient, ill-posed inversion problem, unnormalized moment, cross section, non-spherical particles, equivalent screen, scattering medium, 3D screen, 2D screen

Accepted: 12.05.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-298-306

References

1. Arumov G. P., Bukharin A. V., Usage of nonnormalized moments to determine the statistical parameters of nonspherical particles based on their images, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2017, No. 11, pp. 22–26 (in Russian), DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-11-22-26.
2. Arumov G. P., Bukharin A. V., Three-dimensional screens for measuring non-normalized moments, *Measurement Techniques*, 2018, Vol. 61, pp. 908–913.
3. Arumov G. P., Bukharin A. V., Tyurin A. V., Use of statistically inhomogeneous screens in calibration of lidar from the parameters of images of particles for the bottom layer of the atmosphere, *Measurement Techniques*, 2014, Vol. 57, pp. 287–293.
4. Gradus L. Ya., *Rukovodstvo po dispersionnomu analizu metodom mikroskopii* (Guide to dispersion analysis by the microscopy method), Moscow: Khimiya, 1979, 232 p. (in Russian).
5. Bukharin A. V., Method for measurement of beam lateral distortions with two-position sensing schemes, *Physics of Vibrations*, 2001, Vol. 9, No. 4. pp. 246–255.
6. Bukharin A. V., Arumov G. P., Blikh Yu. M., Makarov V. S., Turin A. V., Modulation of diode laser radiation for the formation of a distance-independent backscattered signal, *Quantum Electronics*, 2016, Vol. 46, No. 10, pp. 877–882.
7. Collis R. T. H., Lidar, *Applied Optics*, 1970, Vol. 9, No. 8, pp. 1782–1788.
8. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 11, pp. 1513–1524.
9. Veslovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Wandinger U., Whiteman D. N., Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding, *Applied Optics*, 2002, Vol. 41, No. 18, pp. 3685–3699.