

Восстановление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля по данным наземных спектральных измерений прямой и рассеянной солнечной радиации.

Часть 1. Тестирование алгоритма

Т.В. Бедарева¹, М.А. Свириденков², Т.Б. Журавлева^{1*}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 28.03.2012 г.

Наземные измерения прямой и рассеянной солнечной радиации служат на сегодняшний день наиболее надежным источником информации об оптических и микрофизических характеристиках атмосферного аэрозоля в столбе атмосферы. Предлагается алгоритм, объединяющий итерационное восстановление оптических характеристик однократного рассеяния непосредственно из данных фотометрических измерений и решение линейной обратной задачи, обеспечивающее восстановление микроструктуры однородных аэрозольных частиц и комплексного показателя преломления вещества аэрозоля. Описывается программное обеспечение, разработанное с целью снижения трудозатрат при рутинной обработке эксперимента. Приводятся результаты тестирования алгоритма на различных моделях одно- и многокомпонентного аэрозоля.

Ключевые слова: численное моделирование, солнечная фотометрия, аэрозоль, альbedo и индикатриса однократного рассеяния, микроструктура аэрозоля, комплексный показатель преломления; numerical simulation, sun photometry, aerosol, single scattering albedo and scattering phase function, aerosol microstructure, complex refractive index.

Введение

Атмосферный аэрозоль, существенно влияющий на перенос излучения в атмосфере и оказывающий как прямое, так и косвенное воздействие на радиационный баланс системы «атмосфера – подстилающая поверхность», обладает значительной географической и временной изменчивостью. Химический состав и концентрация аэрозоля в приземном слое и толще атмосферы могут существенно меняться в районе наблюдения в течение нескольких суток, поэтому для адекватного учета радиационных эффектов аэрозоля необходим постоянный контроль его состояния с максимальным охватом территории Земли. С точки зрения глобального мониторинга атмосферного аэрозоля предпочтительными представляются спутниковые методы, которые, однако, не обладают необходимой точностью, особенно над сушей [1–3]. Более детальную и надежную информацию о содержании и свойствах аэрозоля в столбе

атмосферы дают наземные методы активного (лидарный мониторинг) и пассивного (солнечно-небесная фотометрия) зондирования атмосферы.

Наиболее обширной сетью наземной фотометрии является в настоящее время AERONET (AErosol RObotic NETwork) [4]. Для восстановления микрофизических и радиационных параметров аэрозоля по данным измерений спектральной прозрачности атмосферы и яркости дневного безоблачного неба в сети AERONET используется автоматизированный алгоритм О. Дубовика и М. Кинга [5]. За более чем десятилетний период оперативного использования в обработке объемных массивов данных натурных измерений алгоритм показал свою высокую эффективность, однако в условиях умеренной и высокой прозрачности атмосферы значения некоторых восстанавливаемых характеристик (комплексный показатель преломления (КПП), альbedo однократного рассеяния (АОР)) могут быть нереалистичны. В связи с этим на уровне достоверности Level 2.0 на сайте AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) указанные величины приводятся только для ситуаций, когда аэрозольная оптическая толщина (АОТ) τ_a^λ на длине волны $\lambda = 440$ нм превышает 0,4.

* Татьяна Владимировна Бедарева (btv@iao.ru); Михаил Алексеевич Свириденков (misv@mail.ru); Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru).

Кроме алгоритма [5] для восстановления оптических и микрофизических характеристик аэрозоля по данным фотометрических измерений возможно также применение и других подходов [6–10]. Разрабатываемые нами методы [8–10] не являются альтернативой [5], но, на наш взгляд, могут быть полезными при детальном анализе конкретных атмосферных ситуаций. Кроме того, в силу некорректности обратных задач светорассеяния одним из способов подтверждения адекватности получаемых решений является сравнение различных подходов. В настоящей статье проведено тестирование представляемого далее алгоритма (ранее частично описанного в [8]) без учета ошибок измерений входных параметров.

1. Описание алгоритма

Входными параметрами, в отличие от стандартного алгоритма AERONET, являются аэрозольные оптические толщи на всех длинах волн, на которых проводятся измерения, и индикатрисы яркости D_b . Индикатриса яркости в солнечном альмукантарате определяется следующим соотношением [11]:

$$D_b(\theta) = I(\theta)\exp(\tau m)/(B_0 m), \quad (1)$$

где $I(\theta)$ — яркость неба, Вт/(м²·нм·ср); θ — угол рассеяния; τ — оптическая толщина; m — воздушная масса в направлении на Солнце; B_0 — спектральная внеатмосферная солнечная постоянная, Вт/(м²·нм·ср). $D_b(\theta)$ может быть формально представлена как сумма четырех компонент (см., например, [11]):

$$D_b(\theta) = D_a(\theta) + D_m(\theta) + D_2(\theta) + D_q(\theta), \quad (2)$$

где $D_a(\theta)$ и $D_m(\theta)$ — коэффициенты направленного однократного светорассеяния на аэрозоле и молекулах воздуха; $D_2(\theta)$ и $D_q(\theta)$ соответствуют вкладу кратного рассеяния при нулевом альбедо поверхности и добавке, обусловленной отражением излучения от подстилающей поверхности (ПП), соответственно. Как следует из выражения (2), в приближении однократного рассеяния D_b имеет смысл усредненного по толще атмосферы коэффициента направленного светорассеяния. Так как D_b определяется отношением рассеянного и прямого излучения, для его измерения не требуется калибровка фотометра в энергетических единицах [Вт/(м²·нм·ср)]. Калибровка же в ср⁻¹ может быть проведена двумя способами. Если измерения прямого и рассеянного излучения проводятся одним и тем же фотометром, то достаточно знать пропускание дополнительного ослабителя и геометрическое поле зрения фотометра. Другой, более общий, метод основан на сравнении сигналов от неба и экрана с известными индикатрисой (в приближении ламбертовской поверхности — $1/\pi$) и альбедо [12].

Задача восстановления микрофизических и радиационных параметров аэрозоля решается в два этапа. На *первом этапе* из измеренных индикатрис яркости итерационно восстанавливается коэффи-

циент направленного светорассеяния (КНС) с использованием решения уравнения переноса излучения (УПИ). Подробнее эта часть алгоритма рассмотрена в [8, 10]. Отличие рассматриваемого подхода от подхода в [8, 10] состоит в том, что в качестве первого приближения аэрозольных КНС используется расчет по «синтетическому» начальному приближению спектра размеров, полученному путем объединения результатов отдельного решения двух обратных задач по данным измерений оптической толщи и рассеяния в области ореола ($\theta < 10^\circ$).

Такой выбор начального распределения обоснован тем, что, с одной стороны, АОТ в типичных континентальных условиях средних широт определяется в видимой области спектра субмикронными частицами, а с другой — составляющие индикатрисы яркости, обусловленные кратным рассеянием и отражением от поверхности, значительно менее вытянуты в области ореола, чем индикатриса однократного рассеяния. Поэтому пренебрежение эффектами кратного рассеяния приводит к искажению спектра размеров прежде всего в субмикронной области, который заменяется решением обратной задачи для $\{\tau_a^\lambda\}$. Использование такого начального приближения аэрозольных КНС позволяет сократить необходимое количество итераций. Следует подчеркнуть, что в результате итерационного процесса мы получаем не только угловую зависимость коэффициента направленного светорассеяния, но и альбедо однократного рассеяния аэрозоля. Стандартный алгоритм AERONET [5] не предусматривает расчет характеристик однократного рассеяния непосредственно по данным наблюдений.

Второй этап — собственно решение линейной обратной задачи светорассеяния с использованием итерационного алгоритма [13], аналогичного [14]. Дополнительно предусмотрена возможность введения весовых коэффициентов для отдельных входных параметров (спектральных АОТ, АОТ рассеяния и КНС). Это связано с тем, что число угловых параметров рассеяния в несколько раз больше, чем значений аэрозольной оптической толщи, а при итерационном решении системы уравнений с единичной правой частью [13] все входные параметры равноправны. При определении действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления $n - i \times k$ предусмотрено два варианта выбора решения: на основе минимизации оптической невязки либо какого-то параметра гладкости решения (например, нормы 2-й производной). Для сокращения объема представляемых материалов далее будут показаны результаты, полученные с использованием первого из критериев. Анализ результатов большого объема численных экспериментов показал, что в случае, когда микроструктура аэрозоля имеет две и более моды, этот критерий обеспечивает более точное восстановление микрофизических характеристик. Во всех приведенных ниже примерах среднеквадратическая оптическая невязка варьировала от 1 до 5%.

В результате решения обратной задачи одновременно восстанавливаются распределение площадей

сечений частиц по размерам dS/dr , которое может быть преобразовано к любому типу распределения: счетному, объемному и т.д., и комплексный показатель преломления. При их использовании могут быть рассчитаны все необходимые оптические характеристики. Таким образом, АОР восстанавливается дважды – непосредственно из данных наблюдений (способ 1) и как результат их микрофизической экстраполяции (способ 2). На данном этапе обратная задача решается в приближении однородных сферических частиц с комплексным показателем преломления, не зависящим от длины волны и размера частиц.

Изложенный выше подход, идейно близкий к [15], в различных вариантах использовался для интерпретации данных ореольных измерений [9], а также для измерений яркости неба в солнечном альмукантарате и спектральной прозрачности в полупустынном районе Южного Казахстана [8].

Исследование чувствительности алгоритма выполнено путем сквозного тестирования: по заданным значениям комплексного показателя преломления и распределения частиц по размерам рассчитывались оптические характеристики аэрозоля, на основе которых имитировались фотометрические измерения (без учета ошибок, характеризующих натурные наблюдения). Затем осуществлялось восстановление оптических и микрофизических характеристик согласно вышеизложенному подходу без привлечения весовой модификации алгоритма.

Практическая реализация решения обратной задачи солнечно-небесной фотометрии представляет собой длительный и трудоемкий процесс, поскольку включает многократное обращение к ряду вычислительных процедур, в частности к численному решению УПИ, расчету оптических характеристик, сплайновой интерполяции и т.д. Для автоматизации процедуры восстановления микрофизических и радиационных параметров аэрозоля при сохранении возможности ее контроля на всех стадиях разработан программный комплекс SSMART (Sun-Sky Measurements for Aerosol Retrieval) с дружественным интерфейсом пользователя (см. Приложение).

2. Входные параметры для тестирования алгоритма

В этом разделе описаны модель атмосферы, диапазон изменчивости входных параметров и используемые для тестирования алгоритма микрофизические модели аэрозоля.

2.1. Модель атмосферы и диапазон изменчивости входных параметров

Численное моделирование яркости нисходящей рассеянной радиации (абсолютной индикатрисы яркости) выполнено в вертикально- и горизонтально-однородной аэрозольно-молекулярной плоскопараллельной модели атмосферы с отражающей по закону Ламберта подстилающей поверхностью. Учет молекулярного поглощения в «окнах прозрачности»

атмосферы осуществляется по аналогии с [16]. Для решения скалярного УПИ использован статистический метод Монте-Карло (алгоритм сопряженных блужданий [17]); эффективность алгоритма расчета достигается использованием предположения о симметрии задачи.

Используемый в расчетах диапазон изменения АОР $0,1 \leq \tau_a^{440} \leq 1,0$ существенно перекрывает диапазон фоновых значений АОР в г. Томске, типичных для Западной Сибири [18]. Зенитный угол Солнца во всех модельных расчетах выбран равным $\theta_0 = 70^\circ$. Спектральные значения альбедо ПП ρ соответствуют типу «мозаика» (50% трава + 50% шоссе). В качестве набора углов рассеяния θ для обращения КНС выбрана фиксированная последовательность: 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 90, 100, 120 и 140 (правая граница обусловлена тем, что $\theta \leq 2\theta_0$). Как показали численные эксперименты, выбранный переменный шаг по углу рассеяния является достаточным для решения обратной задачи.

2.2. Микрофизические модели аэрозоля

Для тестирования алгоритма мы использовали микрофизические модели аэрозоля, предложенные Рабочей группой по стандартной радиационной атмосфере Радиационной комиссии Международной ассоциации по метеорологии и физике атмосферы [19] в виде отдельных фракций [гидрофильная (г), пылевая (п), сажевая (с) и океаническая (о)]. Кроме однокомпонентных моделей с унимодальной микроструктурой для тестирования алгоритма мы также сформировали три дополнительные модели многокомпонентных аэрозольных частиц радиусом не более 12 мкм: FINE (выраженная мелкодисперсная фракция), COARSE (выраженная грубодисперсная фракция) и MEDIUM (обе фракции сопоставимы по объему между собой). Ограничение размеров частиц при формировании тестовых моделей связано с возможностями солнечного фотометра CIMEL (набор длин волн и минимальный угол рассеяния), который позволяет получать адекватную информацию об аэрозольных частицах радиусами от $r_{\min}^{\text{inf}} = 0,1$ до $r_{\max}^{\text{inf}} = 78$ мкм (см., например, [7, 20]). Вопрос о том, существенны ли ошибки восстановления в ситуациях, когда в атмосфере присутствуют частицы больших размеров, обсуждается в разд. 3.1. Микроструктура каждой аэрозольной фракции аппроксимируется логнормальным распределением вида

$$dN_i/dr = 1 / (\sqrt{2\pi}v_i r) \exp(-\ln^2(r/r_{0,i})/2v_i^2), \quad (3)$$

где dN_i/dr – счетное распределение частиц по размерам; $r_{0,i}$ и v_i – медианный радиус и стандартное отклонение логарифма радиуса (параметр ширины распределения) i -й фракции соответственно, а микроструктура аэрозоля составного типа определяется соотношением

$$dN/dr = \sum_{i=1}^M C_{N,i} dN_i/dr, \quad (4)$$

где $C_{N,i}$ – счетная концентрация, соответствующая объемной доле f_i i -й фракции; $M = 3$ – количество фракций.

Параметры логнормальных распределений для каждой из фракций моделей FINE, COARSE и MEDIUM приведены в табл. 1.

$\Delta_1 \ln r = 0,117$ в диапазоне $0,02 \leq r \leq 1,0$ мкм и $\Delta_2 \ln r = 0,09$ – в диапазоне $1,0 \leq r \leq 12,0$ мкм ($\Delta \ln r = \ln r_{i+1} - \ln r_i$). Наш опыт проведения численных экспериментов показал, что этот набор является оптимальным как с точки зрения минимума ошибок алгебраизации, так и с позиции его универсальности, поскольку позволяет адекватно воспроизводить широкий круг спектров размеров частиц $dV/d \ln r$.

Таблица 1

Параметры логнормальных распределений моделей FINE, MEDIUM и COARSE. Индексы «г», «п» и «с» соответствуют гидрофильной, пылевой и сажевой фракциям соответственно

Модель	$r_{0,г}$	$r_{0,п}$	$r_{0,с}$	$v_{0,г}$	$v_{0,п}$	$v_{0,с}$	$C_{N,г}$	$C_{N,п}$	$C_{N,с}$	$f_г$	$f_п$	$f_с$
FINE	0,005	0,5	0,0118	1,0	0,8	0,8	0,6739	8,42E-7	0,3261	0,40	0,50	0,10
MEDIUM	0,02	4	0,0118	1,1	0,5	0,3	0,9394	2,16E-6	0,0606	0,30	0,69	0,01
COARSE	0,005	0,5	0,0118	0,6	0,8	0,8	0,6739	1,60E-5	0,3261	0,04	0,95	0,01

Общая концентрация частиц $N = \sum_{i=1}^M N_i C_{N,i}$ определялась таким образом, чтобы рассчитываемый на основе микрофизической модели коэффициент ослабления $\sigma_a^{\text{мод}}$ был равен заданному в численном эксперименте коэффициенту ослабления аэрозоля в спектральном канале $\lambda = 440$ нм: $\sigma_a^{\text{мод}} = \tau_a^{440}/H$, где H – фиксированная высота однородной атмосферы.

Поскольку возможности обсуждаемого метода таковы, что восстанавливаемые микроструктура и КПП характеризуют атмосферный аэрозоль как смесь однородных частиц, оптические характеристики моделей FINE, COARSE и MEDIUM (табл. 2) были рассчитаны в предположении о *внутренней смеси* частиц (в отличие от моделей WCP).

Таблица 2

Спектральные значения альбедо однократного рассеяния и фактора асимметрии моделей FINE, MEDIUM и COARSE

Модель	Оптич. характеристики	λ , нм						
		340	380	440	500	675	870	1020
FINE	АОР	0,966	0,965	0,962	0,960	0,940	0,871	0,806
	ФА	0,599	0,593	0,579	0,564	0,533	0,514	0,502
MEDIUM	АОР	0,932	0,935	0,939	0,943	0,936	0,902	0,875
	ФА	0,694	0,690	0,685	0,682	0,676	0,681	0,682
COARSE	АОР	0,921	0,916	0,909	0,904	0,871	0,798	0,753
	ФА	0,643	0,640	0,637	0,635	0,644	0,674	0,696

Комплексный показатель преломления для такой смеси был сформирован на основе приближения Максвелла–Гарнетта с матрицей из гидрофильного компонента и двумя сферическими включениями – частицами сажи и пыли [21, 22], значения спектральных КПП которых были взяты из модели WCP.

При восстановлении микроструктуры аэрозоля была использована *фиксированная* сетка радиусов частиц из 25 узлов r_i с логарифмическим шагом

Из численных экспериментов следует, что увеличение количества узлов сетки может привести к осцилляциям и ложным модам восстанавливаемого распределения, а уменьшение – к недостаточно подробному описанию микроструктуры (главным образом, в области крупных частиц).

3. Результаты восстановления оптических и микрофизических характеристик

3.1. Однокомпонентный аэрозоль

Восстановление характеристик однородных сферических частиц аэрозоля с одинаковыми по спектру размеров оптическими константами является упрощенным вариантом обратной задачи. Представленные в данном разделе результаты восстановления отражают возможности алгоритма при минимальном наборе ошибок, вносимых различными аппроксимациями и предположениями.

Распределение частиц по размерам. Модельные и восстановленные спектры размеров частиц для различных компонентов аэрозоля модели WCP и соответствующие им параметры Ангстрема $\alpha(440-870 \text{ нм})$ приведены на рис. 1 в логарифмическом и линейном масштабах (логарифмическая шкала позволяет следить за отклонениями восстановленного спектра во всем диапазоне его изменения, но скрывает качество восстановления в наиболее оптически эффективных диапазонах размеров частиц).

Высокое качество восстановления микроструктуры достигнуто для сажевого, пылевого и океанического типов аэрозоля. Для двух последних фракций наибольшие отклонения восстановленных значений $dV/d \ln r$ от модельных наблюдаются в области $r < 0,3$ мкм, что обусловлено приближением к границе $r_{\text{мин}}^{\text{inf}}$ и низкой оптической эффективностью субмикронных частиц этих фракций. Расхождение спектров размеров сажевых частиц $r > 1$ мкм,

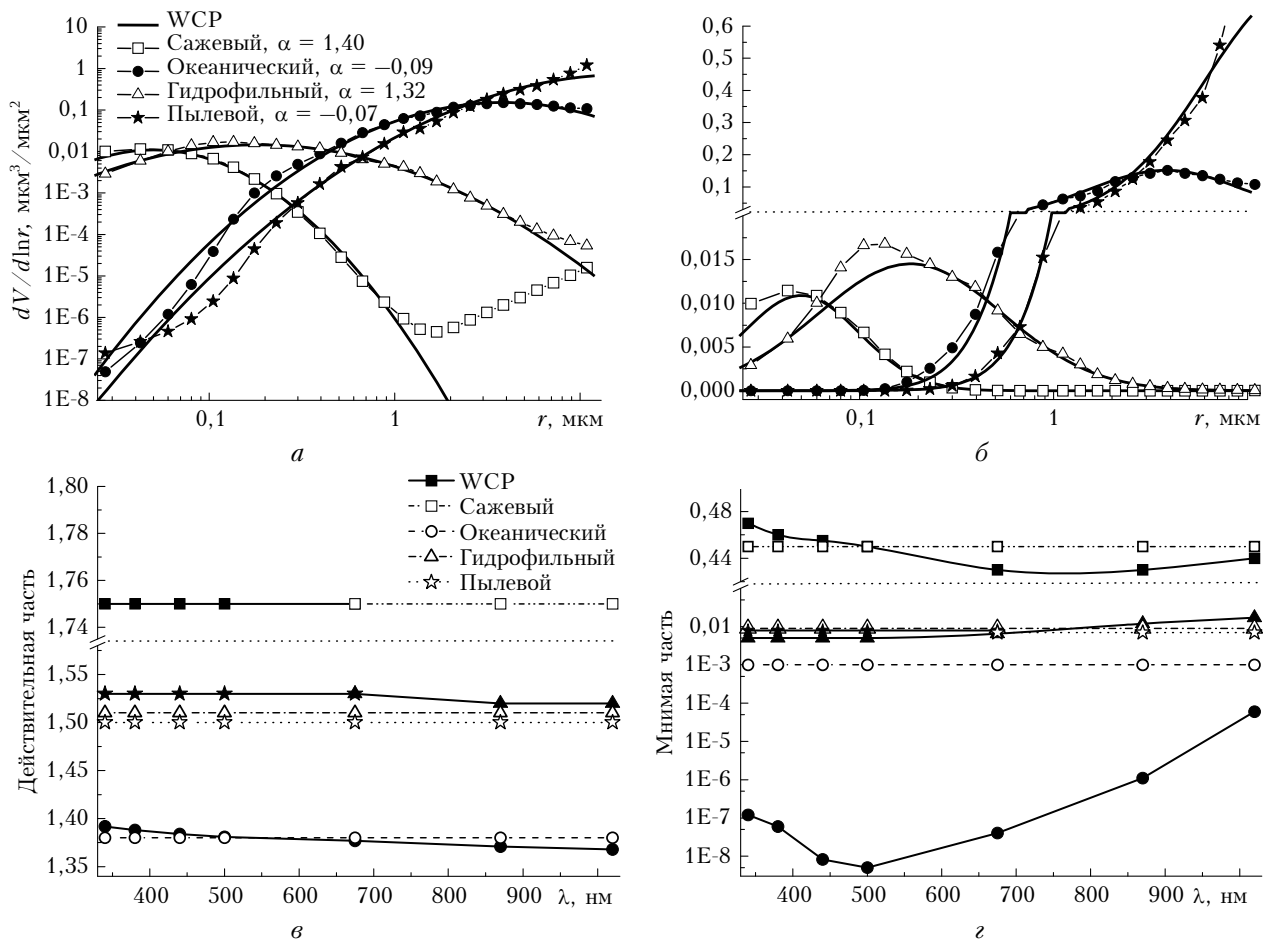


Рис. 1. Восстановленные объемные распределения частиц по размерам в логарифмическом (а) и линейном (б) масштабах и действительная (в) и мнимая (г) части комплексного показателя преломления компонентов модели WCP; $\tau_a^{440} = 0,25$

которые не несут существенного вклада в формирование оптического образа, является следствием накладываемого на восстанавливаемое распределение dS/dr ограничения $\{dS/dr = \varepsilon|dS/dr < \varepsilon, \varepsilon = 10^{-8} \text{ см}^{-2}\}$, необходимого для корректного выполнения процедуры логарифмического сглаживания dS/dr . Преобразование dS/dr в $dV/d\ln r$ дает возрастающий «хвост» спектра. Микроструктура гидрофильного компонента восстановлена с наиболее высокой погрешностью и главным образом вблизи моды ($\sim 35\%$ для частиц с радиусом в окрестности r_{\min}^{inf} , рис. 1, б). Причина такой переоценки состоит, по-видимому, в низкой информативности используемых в обращении параметров.

Примеры восстановления микроструктуры отдельных фракций моделей WCP линейными и неллинейными методами в предположении, что комплексный показатель преломления аэрозоля известен, приведены в работе [23]. Существенных отличий между нашими результатами и представленными в [23] в интервале радиусов частиц $[r_{\min}^{\text{inf}}, r_{\max}^{\text{inf}}]$ нет. Наибольшие отклонения лежат вне этой области размеров частиц и обусловлены особенностями методов.

Комплексный показатель преломления. Ввиду того что комплексный показатель преломления рассматриваемых моделей имеет спектральный ход, при оценке качества восстановления этого параметра рассмотрим *эффективный* КПП, под которым будем понимать КПП с усредненными по спектру действительной и мнимой частями. На рис. 1, в, г приведены модельные (жирные кривые с темными символами) и восстановленные значения КПП. Очевидно, что действительная часть n , слабо убывающая с длиной волны, восстанавливается во всех рассматриваемых случаях с погрешностью, сопоставимой с величиной спектральной изменчивости n (максимальная ошибка не превышает 2%, или, $\sim 0,03$). Таким образом, пренебрежение спектральным ходом действительной части КПП является оправданным. Более сложным является вопрос о погрешности восстановления мнимой части КПП (рис. 1, г). В случаях, когда спектральный ход выражен крайне слабо, ошибка ее восстановления минимальна (пылевой аэрозоль), а при выраженной спектральной селективности (сажевый, океанический аэрозоль) она значительно возрастает. Другой причиной существенных ошибок восстановления мнимой части показателя преломления (как, напри-

мер, в случае океанического аэрозоля) являются невысокие значения κ . В разд. 4 показано, что погрешность определения КПП, кроме того, однозначно зависит также от полноты информации об угловой структуре коэффициентов направленного светорассеяния аэрозоля.

Оптические характеристики. В табл. 3 приведены результаты восстановления альbedo однократного рассеяния и фактора асимметрии (ФА) для рассматриваемых фракций аэрозоля при $\tau_a^{440} = 0,25$.

моделей WSP предполагают наличие гораздо более крупных частиц.

Для оценки влияния эффекта крупных частиц ($r \leq 40$ мкм) на точность решения обратной задачи был проведен численный эксперимент применительно к пылевой фракции. При учете крупных частиц оптические характеристики, используемые в качестве входных параметров в решении УПИ, изменились: значения АОР уменьшились на 3,5 и 5%, а вытянутость индикатрисы рассеяния в направлениях,

Таблица 3

Спектральные значения альbedo однократного рассеяния (а) и фактора асимметрии (б): модельные (М) и восстановленные способами 1 и 2; $\tau_a^{440} = 0,25$

λ , нм	Аэрозоль											
	сажевый						океанический					
	М		Способ 1		Способ 2		М		Способ 1		Способ 2	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
340	0,298	0,435			0,309	0,430	0,999	0,794			0,938	0,822
380	0,281	0,414			0,288	0,408	0,999	0,792			0,943	0,816
440	0,255	0,385	0,255	0,382	0,259	0,379	1,000	0,792	1,000	0,785	0,950	0,809
500	0,231	0,359			0,233	0,354	1,000	0,789			0,955	0,803
675	0,173	0,295	0,174	0,298	0,170	0,293	0,999	0,780	1,000	0,771	0,966	0,792
870	0,122	0,245	0,124	0,246	0,121	0,244	0,999	0,779	1,000	0,776	0,973	0,787
1020	0,093	0,215	0,094	0,217	0,093	0,215	0,998	0,780	1,000	0,776	0,976	0,784
λ , нм	пылевой						гидрофильный					
340	0,632	0,894			0,634	0,916	0,963	0,648			0,937	0,661
380	0,643	0,886			0,644	0,908	0,963	0,643			0,937	0,954
440	0,658	0,877	0,668	0,846	0,659	0,897	0,963	0,636	0,964	0,638	0,937	0,646
500	0,673	0,869			0,674	0,886	0,964	0,628			0,936	0,637
675	0,708	0,845	0,720	0,823	0,710	0,861	0,952	0,613	0,955	0,616	0,934	0,621
870	0,741	0,824	0,750	0,810	0,742	0,839	0,910	0,607	0,911	0,610	0,930	0,605
1020	0,762	0,810	0,768	0,803	0,762	0,826	0,872	0,599	0,873	0,601	0,926	0,595

Практически во всех случаях полученные способом 1 оценки этих параметров несущественно отличаются от модельных (относительные различия не превышают ~3%). Точность решения обратной задачи зависит от типа аэрозоля: наиболее высокие погрешности восстановления оптических характеристик выявлены для океанического и гидрофильного типов. Однако и в этом случае ошибки в оценке АОР и ФА не превосходят 5–6 и 2% соответственно (табл. 3, океанический аэрозоль).

Крупные частицы. В соответствии с используемым способом тестирования вычисление оптических характеристик аэрозоля выполнялось дважды. Во-первых, оптические характеристики рассчитывались на основе заданных микрофизических моделей и затем использовались при имитации радиационных измерений. Второй расчет производился на основе микрофизических характеристик, полученных в результате обращения этих измерений. Поскольку фотометрические наблюдения не несут полной информации об аэрозоле с размерами вне интервала $[r_{\min}^{\text{inf}}; r_{\max}^{\text{inf}}]$, в наших расчетах не учитывались частицы радиусом более 12 мкм. В то же время, например, океанический и пылевой компоненты

близких к направлению «вперед» ($0-2^\circ$), увеличилась на 1,5 и 2,5% в спектральных каналах 440 и 1020 нм соответственно. Результаты решения обратной задачи показали, что ошибки восстановления микрофизических и рассчитанных на их основе оптических характеристик сопоставимы с ошибками для случая, когда мы ограничились частицами радиусом до 12 мкм. Объяснить этот факт можно тем, что обращение КНС выполняется для углов рассеяния, начиная от $2-3^\circ$, и не затрагивает область значений КНС, за формирование которых отвечают наиболее крупные частицы. В то же время ошибки восстановления оптических характеристик способом 1 возросли от десятых долей процента до 1 и 1,5 (АОР) и 3,5 и 1% (ФА) в спектральных каналах 440 и 1020 нм соответственно.

3.2. Многокомпонентный аэрозоль

Рассмотрим результаты восстановления оптико-микрофизических характеристик моделей FINE, COARSE и MEDIUM, отличающихся, кроме ряда иных параметров, своими модальными радиусами.

Первая мода распределения частиц по размерам моделей FINE и COARSE расположена в зоне,

падающей в диапазон размеров частиц $r < r_{\min}^{\text{inf}}$ (рис. 2, а), что, по-видимому, и является причиной переоценки моды на величину ~40%. Первый модальный радиус в модели MEDIUM принадлежит высокоинформативной области размеров частиц, и ошибка восстановления моды спектра снижается до ~15%. Аналогичная ситуация наблюдается и для второй моды $dV/d\ln r$ модели COARSE.

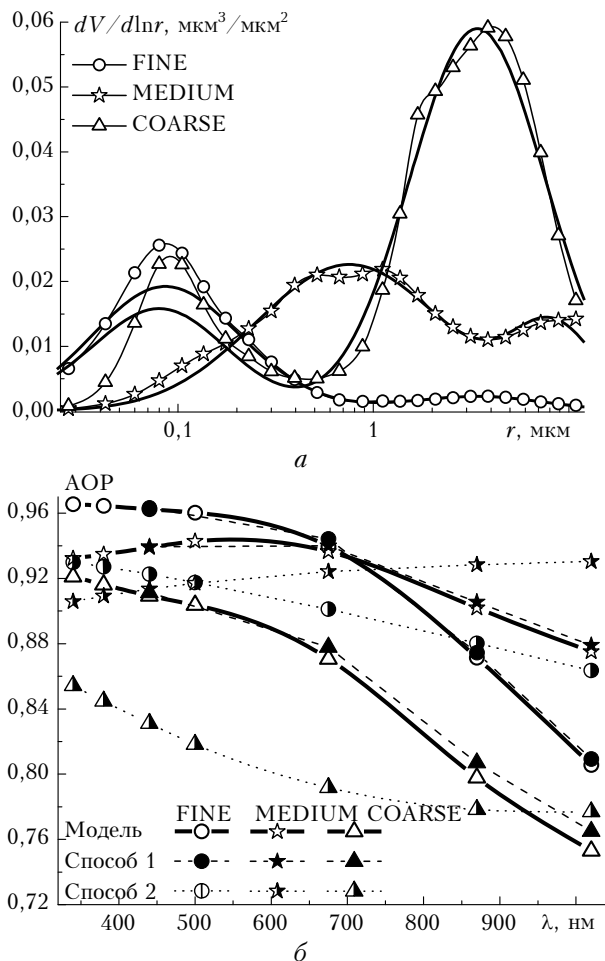


Рис. 2. Объемное распределение частиц по размерам (а) и альбедо однократного рассеяния (б) аэрозоля, восстановленные для моделей FINE, MEDIUM и COARSE

Численные эксперименты показали, что при $\tau_a^{440} = 0,25$ абсолютные погрешности восстановления n и k относительно их эффективных значений составили $-0,04$ и $0,0$, $0,0$ и $0,003$, $-0,03$ и $0,006$ для моделей FINE, COARSE и MEDIUM соответственно.

Оценки AOP и ФА, полученные способом 1, отличаются высокой точностью. Например, относительные ошибки восстановления AOP не превышали 0,5 (модели FINE, COARSE) и 1,5% (модель MEDIUM), фактора асимметрии — не более 0,5 (модели FINE, COARSE) и 1,0% (модель MEDIUM). Модельные и восстановленные спектральные зависимости AOP приведены на рис. 2, б.

Пренебрежение спектральной селективностью к (см., например, рис. 4, б для модели FINE) отражается на результате микрофизической экстрапо-

ляции AOP: точность восстановления тем выше, чем ближе спектральный ход к нейтральному. Для рассматриваемых моделей значения AOP существенно занижены в видимом диапазоне спектра и завышены в ближней ИК-области (см. рис. 2, б). Например, для модели COARSE относительная ошибка изменяется по спектру от 1 до 7%. Что касается фактора асимметрии, то относительные ошибки восстановления его значений для каждой из моделей незначительны: в моделях FINE и COARSE они не превышают 2%, в модели MEDIUM они возрастают до 5% в УФ-области спектра.

4. Влияние величины AOT и углового диапазона КНС на точность решения обратной задачи

Как упоминалось выше, основными входными параметрами обратной задачи являются данные измерений спектральных AOT и яркости нисходящей рассеянной радиации в альмукантарате Солнца $I(\theta)$, а также выделенные из $I(\theta)$ коэффициенты направленного светорассеяния. На примере модели FINE рассмотрим зависимость качества восстановления микрофизических характеристик от величины AOT ($0,1 \leq \tau_a^{440} \leq 1$) и углового диапазона КНС.

Аэрозольная оптическая толщина. От значений AOT зависит прежде всего результат итерационного восстановления оптических характеристик однократного рассеяния способом 1. Следствием увеличения AOT является действие двух противоположных факторов: с одной стороны, это приводит к росту количества актов светорассеяния, а значит, к уменьшению доли однократно рассеянного излучения; с другой стороны, при более высоких значениях AOT влияние погрешности измерений ($\Delta = \pm 0,01$) становится менее значимым [24]. Как следует из полученных результатов, при отсутствии такой погрешности ошибка восстановления спектра размеров частиц зависит от значений AOT достаточно слабо (рис. 3),

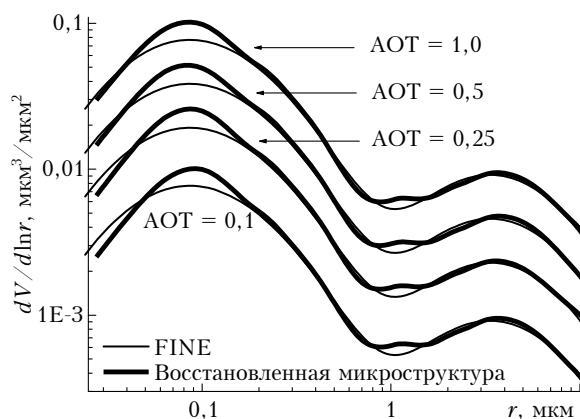


Рис. 3. Объемное распределение частиц по размерам (модель FINE), восстановленное при разных значениях AOT: $0,1 \leq \tau_a^{440} \leq 1,0$

а абсолютные ошибки восстановления действительной и мнимой частей КПП нечувствительны к ее

величине и составляют $-0,02$ и $+0,003$ (относительно эффективного КПП) соответственно, даже в ситуациях, когда $\tau_a^{440} = 0,1$ и $\tau_a^{1020} = 0,02$.

Погрешность восстановления оптических характеристик аэрозоля также малочувствительна к степени аэрозольного замутнения (табл. 4) и в гораздо большей мере зависит от способа их определения (способы 1 или 2).

Таблица 4
Относительные ошибки (%) восстановления оптических характеристик при разном аэрозольном замутнении атмосферы

Способ	λ , нм	АОТ							
		АОР				ФА			
		0,1	0,25	0,5	1,0	0,1	0,25	0,5	1,0
1	440	0,05	0,1	0,01	0,01	1,0	0,2	0,05	0,3
	1020	0,6	0,5	0,5	0,2	0,1	0,2	0,04	0,4
2	440	4,0	4,1	4,2	4,2	1,5	1,0	0,6	0,8
	1020	7,4	7,2	7,0	7,0	0,3	0,1	0,1	0,1

Угловой диапазон КНС. На рис. 4 показано, что при прочих равных условиях наилучшее качество восстановления микроструктуры аэрозоля достигается при обращении КНС в угловом интервале от 2 до 30° , где ошибки восстановления КНС минимальны.

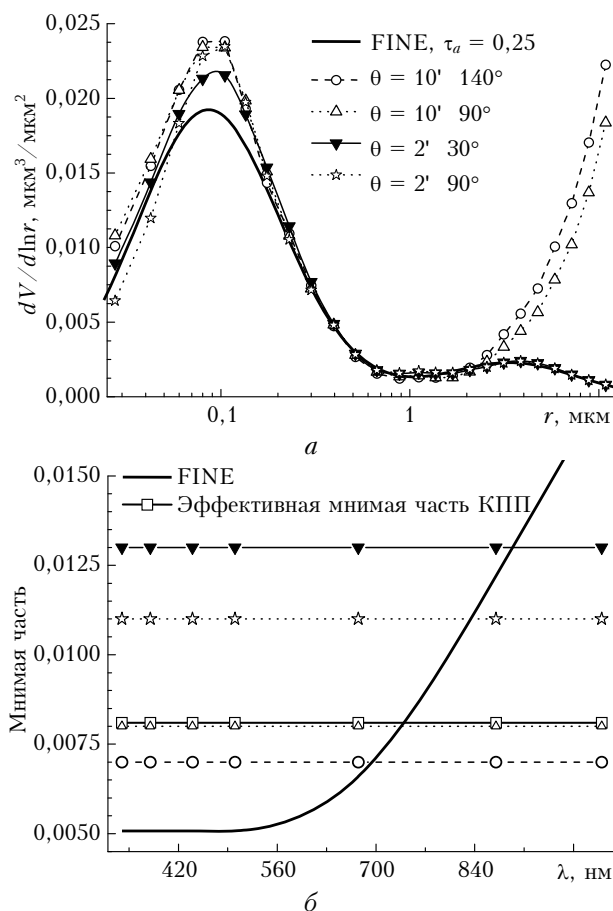


Рис. 4. Объемное распределение частиц по размерам (а) и мнимая часть показателя преломления (б), восстановленные при обращении коэффициентов направленного светорассеяния в различных интервалах углов рассеяния

При этом имеет место большая погрешность восстановления мнимой части КПП, что обусловлено потерей информации о k , содержащейся в задней полусфере КНС. Использование угловых интервалов $10-90$ и $10-140^\circ$ приводит к существенному возрастанию ошибок восстановления микроструктуры грубодисперсной фракции в связи с пренебрежением информацией о частицах, содержащейся в ореольной части КНС. В то же время ошибка восстановления k (относительно эффективного значения) в этом случае минимальна.

Таким образом, для минимизации ошибок при одновременном восстановлении микроструктуры и КПП необходимо обращать КНС в как можно более широком интервале углов рассеяния, ограничивая его лишь там, где в значениях КНС могут присутствовать значительные погрешности.

Заключение

Представлен алгоритм, позволяющий получать информацию одновременно о микроструктуре и комплексном показателе преломления, а также об оптических характеристиках аэрозоля, которые восстанавливаются непосредственно из радиационных наблюдений (способ 1), либо получаются как результат микрофизической экстраполяции в предположении о сферичности частиц (способ 2). Благодаря высокой точности восстановления оптических характеристик первым способом, восстанавливаемые значения АОР могут служить неким ориентиром в выборе оптимального решения обратной задачи, что выгодно отличает предложенный алгоритм от [5].

Тестирование алгоритма на различных микрофизических моделях одно- и многокомпонентного аэрозоля показало высокую точность восстановления микроструктуры в пределах размеров частиц $[r_{\min}^{\text{inf}}; r_{\max}^{\text{inf}}]$, а также комплексного показателя преломления (абсолютные погрешности не превысили $0,04$ при восстановлении действительной части КПП, мнимой — $0,006$), если он имеет слабую спектральную селективность и не варьирует в области малых абсолютных значений. Погрешности восстановления АОР и ФА способом 1 не превышают $2-3\%$, тогда как рассчитанные по восстановленным микрофизическим характеристикам значения этих параметров имеют более существенные погрешности. Последнее вызвано, главным образом, пренебрежением спектральной зависимостью КПП: ошибки восстановления АОР (ФА) составляют соответственно 6% ($3,5\%$) для океанического и 7% (5%) — для многокомпонентного аэрозоля. Анализ результатов решения обратной задачи с учетом присутствия в атмосфере более крупных частиц сферической формы ($12 \leq r \leq 40$ мкм) свидетельствует о незначительном их влиянии на точность восстановления.

Все основные результаты были получены в условиях умеренной прозрачности атмосферы ($\tau_a^{440} < 0,4$). Численные эксперименты показали, что увеличение

АОТ не является существенным фактором, определяющим погрешности восстановления искомым параметров. Более важным для минимизации ошибок обращения является выбор углового интервала КНС.

Рассмотренные аэрозольные модели не охватывают многообразие ситуаций, наблюдаемое в природе, однако позволяют получить представление о возможности алгоритма. Результаты исследования чувствительности алгоритма к различным погрешностям в измерениях и апробация алгоритма на данных натурных измерений на Томской станции AERONET приведены в работе [24].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Программный комплекс SSMART создан с использованием объектно-ориентированного языка C++ в среде Builder 5.0 и интегрирует отдельные – реализованные на языке Фортран – вычислительные модули, подключаемые в процессе решения без участия пользователя. Разработанный комплекс представляет собой гибкий инструмент, позволяющий работать с данными солнечных фотометров любого типа. Система обеспечивает пользователя всей информацией об оптико-микрофизических свойствах аэрозоля, извлекаемой из фотометрических измерений, и подкрепляет эту информацию

как табличным, так и графическим представлением входных и выходных данных. Пример графического интерфейса системы – окно ввода исходных данных – представлен на рис. 5.

Программное обеспечение спроектировано таким образом, чтобы вести обработку измерений как в автоматическом, так и «ручном» режимах. В «ручном» режиме работы предусмотрена возможность возврата на каждый предыдущий шаг алгоритма восстановления. Например, итерационный процесс восстановления с использованием решения УПИ для всего набора длин волн может занимать значительное время в зависимости от степени замутненности атмосферы. Решение обратной задачи для разных угловых диапазонов КНС без повторного решения УПИ существенно повышает эффективность системы.

Еще одной – наиболее затратной по времени и занимаемым ресурсам вычислительной техники – процедурой является расчет факторов эффективности рассеяния, поглощения и ослабления или расчет ядра для определенного набора значений комплексного показателя преломления, длин волн, радиусов частиц и углов рассеяния. В системе предусмотрена возможность однократного расчета ядра, его сохранения и последующей загрузки при очередном решении обратной задачи.

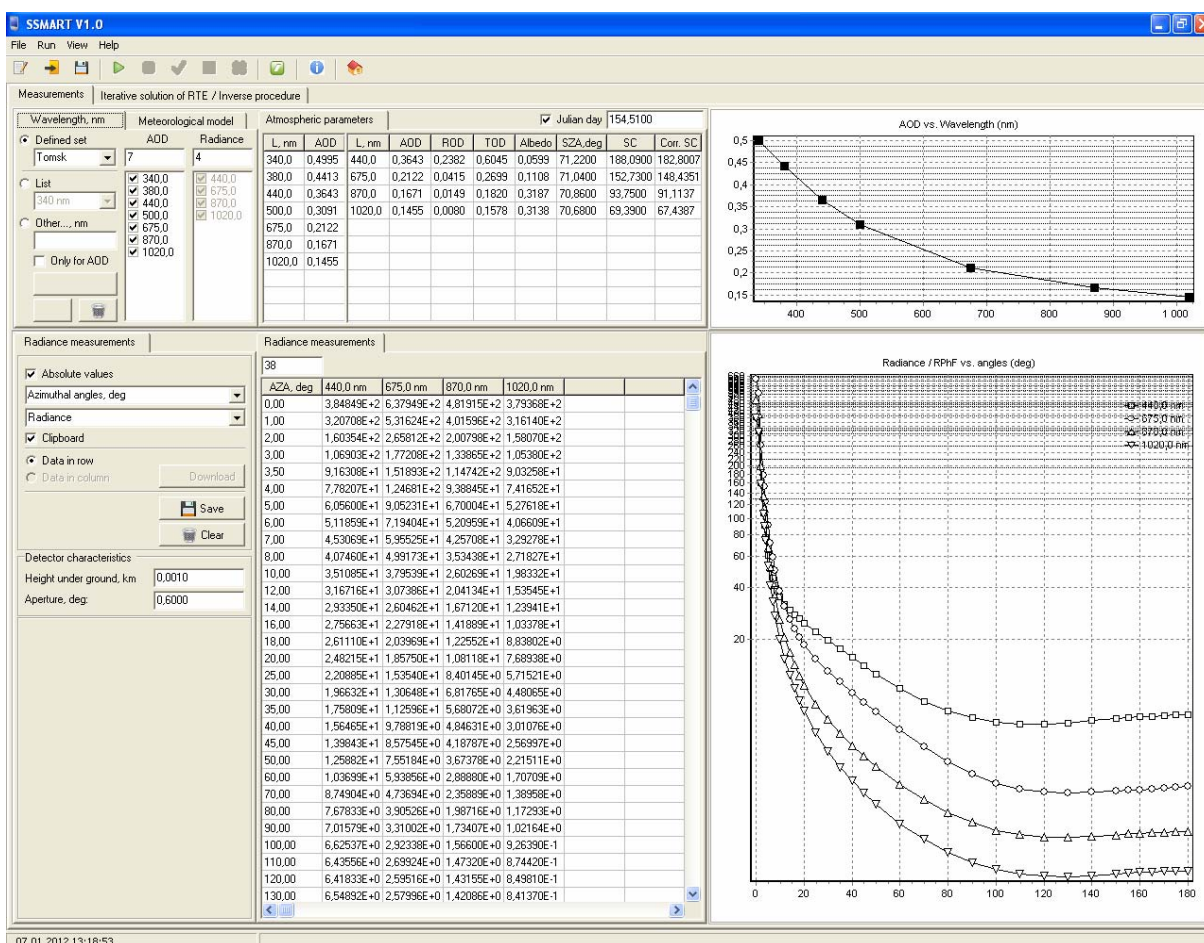


Рис. 5. Пример графического интерфейса программного комплекса «SSMART»

Автоматизированный цикл работы системы однозначно соответствует этапам алгоритма, подробно рассмотренным выше. В настоящий момент в системе не предусмотрена автоматизированная обработка поступающих от фотометра измерений (в частности, симметризация яркостей полуплоскостей альмукантарата [16]). Такая обработка ведется при помощи дополнительных не встроенных в систему программных средств.

Дальнейшее развитие системы непосредственно связано с расширением области применимости алгоритма, например за счет учета несферичности частиц и спектральной селективности КПП. Внедрение программного продукта в автоматизированный процесс обработки реальных измерений позволит получать своевременную информацию о состоянии аэрозоля. Благодаря разработке комплекса SSMART эффективность обработки фотометрических измерений (по сравнению с ручной обработкой) возросла в десятки раз. На процессоре AMD Athlon с тактовой частотой 2,17 ГГц обработка (без расчета ядра) одного набора экспериментальных данных при умеренном замутнении атмосферы занимает примерно 15 мин, тогда как на двухъядерном процессоре Intel Core 2 Duo с тактовой частотой 2,93 ГГц время обработки составляет ~7 мин.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-05-01019), программы ОНЗ-12 РАН и государственных контрактов 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204.

1. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanré D., Deuzé J.L., Ducos F., Sinyuk A., and Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations // Atmos. Meas. Technol. 2011. V. 4, N 5. P. 975–1018.
2. Kokhanovsky A.A., Deuzé J.L., Diner D.J., Dubovik O., Ducos F., Emde C., Garay M.J., Grainger R.G., Heckel A., Herman M., Katsev I.L., Keller J., Levy R., North P.R.J., Prikhach A.S., Rozanov V.V., Sayer A.M., Ota Y., Tanré D., Thomas G.E., Zege E.P. The intercomparison of major satellite aerosol retrieval algorithms using simulated intensity and polarization characteristics of reflected light // Atmos. Meas. Technol. 2010. V. 3, N 4. P. 909–932.
3. Deuzé J.-L., Brünn F.-M., Devaux C., Goloub P., Herman M., Lafrance B., Maignan F., Marchand A., Pery G., Tanré D. Remote Sensing of aerosols over land surfaces from POLDER/ADEOS-1 polarized measurements // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106, N 5. P. 4913–4926.
4. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanré D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote. Sens. Environ. 1998. V. 66, iss. 1. P. 1–16.
5. Dubovik O., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
6. Веретенников В.В. Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по

данным солнечной фотометрии // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 214–221.

7. Romanov P., O'Neil N.T., Royer A., McArthur B.L.J. Simultaneous retrieval of aerosol refractive index and particle size distribution from ground-based measurements of direct and scattered solar radiation // Appl. Opt. 1999. V. 38, N 36. P. 7305–7320.
8. Павлов В.Е., Свириденков М.А., Журавлева Т.Б., Ошлаков В.К., Суковатов К.Ю. Аэрозольная индикатриса рассеяния для аридной территории юго-востока Казахстана // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1062–1066.
9. 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.
10. Бедарева Т.В., Журавлева Т.Б. Восстановление индикатрисы и альбеда однократного рассеяния аэрозоля по данным радиационных измерений в альмукантарате Солнца: численное моделирование // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 2. С. 128–138.
11. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 334 с.
12. Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Павлов В.Е., Ташенов Б.Т., Тейфель Я.А. Рассеяние света в атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1968. 116 с.
13. Аникин П.П., Свириденков М.А. Оптические характеристики и микроструктура аэрозоля по данным измерений индикатрис рассеяния в области солнечного ореола // Сб. трудов Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М., апрель 1999. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 20–28.
14. Twitty J.T. The inversion of aureole measurements to derive aerosol size distributions // J. Atmos. Sci. 1975. V. 32, iss. 3. P. 584–591.
15. Nakajima T., Tonna G., Rao R., Boi P., Kaufman Y., Holben B. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions // Appl. Opt. 1996. V. 35, N 15. P. 2672–2686.
16. Бедарева Т.В., Журавлева Т.Б. Оценка аэрозольного поглощения в летних условиях Западной Сибири по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1023–1030.
17. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
18. Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниченко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Полькин В.В., Смирнов А., Тащилин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б., Еремлина Т.А. Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.
19. A preliminary cloudless standart atmosphere for radiation computation. World Climate Research Programme. WCP-112. WMO/TD N 24. 1986. 60 p.
20. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 8. P. 9791–9806.
21. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
22. Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N., Clothiaux E.E. Inferring black carbon content and specific absorption

- from Aerosol Robotic Network (AERONET) aerosol retrievals // J. Geophys. Res. 1997. V. 110. D10S17.
23. *Dubovik O.V., Lapyonok T.V., Oshepkov S.L.* Improved technique for data inversion: optical sizing of multicomponent aerosols // Appl. Opt. 1995. V. 34, N 36. P. 8422–8436.
24. *Бедарева Т.В., Свириденков М.А., Журавлева Т.Б.* Восстановление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля по данным наземных спектральных измерений прямой и рассеянной солнечной радиации. Часть 2. Апробация алгоритма // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9.

T.V. Bedareva, M.A. Sviridenkov, T.B. Zhuravleva. **Retrieval of aerosol optical and microphysical characteristics from ground-based spectral measurements of direct and diffuse solar radiation. Part 1. Algorithm testing.**

Ground-based measurements of direct and diffuse solar radiation are the most reliable source of information on aerosol optical and microphysical characteristics in the total atmospheric column. The algorithm integrating iterative retrieval of single scattering optical characteristics from photometric data and linear inverse problem solution on homogeneous aerosol particle microstructure and complex refractive index is presented. The software, developed with the aim to decrease labor expenditures during routine experiment processing, is described. Results of algorithm testing on the models of aerosol with one and more fractions are presented.