

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 551.501.793

## Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть I. Методика решения обратной задачи

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.09.2012 г.

Развит метод интегральных распределений для определения микроструктуры атмосферного аэрозоля из спектральных измерений аэрозольной оптической толщины. Представлены численный алгоритм решения обратной задачи и программный комплекс, разработанный на его основе. Специфика алгоритма состоит в учете малой информативности обратной задачи относительно частиц из микродисперсного диапазона размеров. В результате работы программного комплекса восстанавливается интегральная функция распределения геометрического сечения частиц по размерам, по которой рассчитываются объемная концентрация и средний радиус частиц для полного ансамбля и отдельных фракций аэрозоля – субмикронной и грубо-дисперсной. Приведено описание пользовательского интерфейса. Программный комплекс удобен при массовой обработке экспериментальных данных и не требует от пользователя специальных знаний по решению обратных задач.

*Ключевые слова:* микроструктура аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, обратные задачи; aerosol microstructure, aerosol optical depth, inverse problem.

### Введение

Для определения микроструктурных параметров аэрозоля в атмосферно-оптических исследованиях уже в течение длительного времени используются спектральные измерения аэрозольной оптической толщины (АОТ) путем решения соответствующей обратной задачи. При этом не всегда обращается должное внимание на повышенную неопределенность полученного решения в микродисперсном диапазоне размеров частиц радиусом менее 0,1–0,15 мкм, которая обусловлена малой информативностью измерений АОТ относительно функции распределения частиц по размерам в указанной области. К настоящему времени накоплен достаточно обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о значительном содержании в атмосфере микродисперсных частиц [1–5]. Микроструктурные параметры аэрозоля, восстановленные при обращении измерений АОТ без учета роли таких частиц, могут существенно отличаться от истинных значений.

Авторами [6] предложен способ доопределения обратной задачи для спектральных измерений АОТ, который позволяет корректно учитывать вклад микродисперсных частиц при использовании априорной информации об их функции распределения в рамках современных модельных представлений. Эффективность такого подхода подтверждена в численных

экспериментах с использованием алгоритма обращения измерений АОТ, разработанного на основе метода интегральных распределений. Представляет интерес оценка значимости коррекции вклада микродисперсных частиц для интерпретации данных натуральных экспериментов.

Настоящая статья представляет собой первую часть работы, которая содержит описание модифицированного алгоритма обращения экспериментальных измерений АОТ по данным сетевых солнечных фотометров и программного комплекса, созданного на его основе. Во второй части работы [7] будут рассмотрены результаты применения программного комплекса к обработке натуральных измерений АОТ и проведено сравнение полученных результатов обращения с микроструктурными данными, восстановленными по обычной методике без коррекции вклада микродисперсных частиц.

### 1. Алгоритм решения обратной задачи

Дадим краткое описание модифицированного алгоритма обращения спектральных измерений АОТ с коррекцией решения в микродисперсной области размеров частиц. Основная идея метода заключена, так же как и в работе [6], в применении гибридной модели для характеристики микроструктуры аэрозоля, которая базируется на выделении микродисперсных частиц в обособленную фракцию с представлением функции распределения геометрического сечения по размерам в виде некоторой параметрической

\* Виктор Васильевич Веретенников (vuv@iao.ru);  
Светлана Сергеевна Меньщикова (mss@iao.ru).

модели  $s_0(r) = S_0 \hat{s}_0(r)$ , где  $S_0$  – суммарное сечение частиц микродисперсной фракции. Для этой цели можно использовать, например, аналитические модели, предложенные в работе [1], которые хорошо согласуются с современными экспериментальными данными о высокой концентрации указанных частиц.

Для описания дисперсного состава более крупных частиц размерами выше порогового значения  $r_p$ , определяющего верхнюю границу микродисперсной области, будем использовать, следуя [6, 8], интегральную функцию распределения  $S(r)$ . Указанная функция  $S(r)$  задает суммарное геометрическое сечение частиц радиусом, большим или равным  $r$ , которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. В частности, величина  $S(r_p)$  представляет собой суммарное сечение без учета вклада микродисперсных частиц, а геометрическое сечение полного ансамбля частиц равно  $S = S_0 + S(r_p)$ .

Для построения конечно-разностного аналога интегрального уравнения относительно функции распределения  $S(r)$  в области  $r \geq r_p$  обозначим через  $S_j = S(r_j)$  – значения искомой функции в узлах  $r_j$ ,  $j = p, \dots, n$ . Определим приращение сечения на интервале  $[r_p, r_{p+1}]$ :

$$\Delta S_p = S_p - S_{p+1}, \quad (1)$$

и дополнительно потребуем, чтобы вклад в геометрическое сечение микродисперсных частиц с функцией распределения  $s_0(r)$  на том же интервале

$$\Delta S_p^0 = S_0 \delta_{p0}, \quad \delta_{p0} = \int_{r_p}^{r_{p+1}} \hat{s}_0(r) dr \quad (2)$$

совпадал с приращением  $\Delta S_p$  (1) интегральной функции распределения  $S(r)$ :

$$\Delta S_p^0 = \Delta S_p. \quad (3)$$

Это позволяет выразить сечение  $S_0$  и объем  $V_0$  микродисперсных частиц через приращение  $\Delta S_p$  (1) искомой интегральной функции распределения  $S(r)$ :

$$S_0 = \Delta S_p / \delta_{p0}, \quad (4)$$

$$V_0 = (4/3) \Delta S_p \int_{r_{\min}}^{r_p} r \hat{s}_0(r) dr / \delta_{p0}.$$

При таком подходе уравнение для определения вектора  $\bar{S} = (S_p, S_{p+1}, \dots, S_n)$  из спектральных изменений АОТ  $\tau(\lambda)$  можно записать в следующем виде:

$$\sum_{j=p}^n Q_j(\lambda) S_j = \tau(\lambda), \quad (5)$$

где коэффициенты  $Q_j(\lambda)$  вычисляются по формулам:

$$Q_j(\lambda) = \begin{cases} \bar{K}_p(\lambda) - E(\lambda), & j = p, \\ \bar{K}_p(\lambda) - \bar{K}_{p+1}(\lambda) + E(\lambda), & j = p + 1, \\ \bar{K}_{j-1}(\lambda) - \bar{K}_j(\lambda), & j > p + 1, \end{cases} \quad (6)$$

$$E(\lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_p} K(\lambda, r) s_0(r) dr / \int_{r_p}^{r_{p+1}} s_0(r) dr, \quad (7)$$

$$\bar{K}_j(\lambda) = \frac{1}{r_{j+1} - r_j} \int_{r_j}^{r_{j+1}} K(\lambda, r) dr, \quad j = p, \dots, n, \quad (8)$$

$K(\lambda, r)$  – фактор эффективности ослабления излучения на длине волны  $\lambda$  для одной частицы радиусом  $r$ . Для сферических однородных частиц функция  $K(\lambda, r)$  определяется по теории Ми [9–11] и зависит от комплексного показателя преломления  $v - ik$ , который должен быть задан априорно, например, на основе существующих оптико-микроразрешенных моделей атмосферного аэрозоля [12–15].

Обратная задача по восстановлению вектора  $\bar{S} = (S_p, S_{p+1}, \dots, S_n)$  из уравнения (5) сводится к минимизации функционала невязки

$$F^2 = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=p}^n Q_{ij} S_j - \tau_i \right)^2, \quad (9)$$

где  $Q_{ij} = Q_j(\lambda_i)$ ;  $\tau_i = \tau(\lambda_i)$ , при дополнительных ограничениях, накладываемых на компоненты искомого вектора  $\bar{S}$ :

$$C \geq S_p \geq S_{p+1} \geq \dots \geq S_n \geq 0. \quad (10)$$

Величина  $C$  в (10) определяет верхнюю границу суммарного сечения частиц  $S$  и должна задаваться априорно. Практические рекомендации по выбору границы  $C$  приведены в работе [16]. В качестве приближенного решения уравнения (5) выбирается любой вектор  $\bar{S}_\delta$ , для которого функционал  $F^2 \leq \delta^2$ , где  $\delta^2$  характеризует ошибку в исходных данных. В рассмотренной постановке обеспечивается устойчивое решение обратной задачи [17]. Для минимизации функционала невязки  $F^2$  (9) при ограничениях (10) применяется метод условного градиента. Вектор восстановленного решения  $\bar{S}_\delta$  затем используется для вычисления других микроструктурных параметров аэрозоля. Например, суммарный объем  $V_{ij}$  и средний радиус частиц  $\bar{r}_{ij}$  на отрезке  $r_i \leq r \leq r_j$  при  $r_i \geq r_p$  определяются по формулам:

$$V_{ij} = (4/3) \left( r_i S_i - r_j S_j + \int_{r_i}^{r_j} S(r) dr \right), \quad (11)$$

$$\bar{r}_{ij} = (3/4) V_{ij} / (S_i - S_j).$$

Учет вклада микродисперсных частиц на отрезке  $r_{\min} \leq r \leq r_p$  в указанных параметрах аэрозоля производится по формулам (4). При  $r_p = r_{\min}$

область определения интегральной функции распределения  $S(r)$  включает в себя весь диапазон размеров частиц аэрозоля, в том числе его микродисперсной фракции. В этом случае вклад микродисперсных частиц в параметрах микроструктуры аэрозоля учитывается на основе общих формул (11) без использования для таких частиц модельных функций распределения по размерам.

## 2. Обсуждение и анализ

Отметим основные отличия представленного алгоритма от рассмотренного в работе [6]. В обоих случаях постановка задач базируется на одинаковых предпосылках. Однако для нахождения вектора  $\bar{S}$  в [6] используется уравнение (19) (по нумерации [6]), правая часть которого содержит в явном виде слагаемое, обусловленное вкладом в ослабление микродисперсных частиц. В процессе решения обратной задачи это слагаемое корректируется итерационным путем. В уравнении (5), которое рассматривается в настоящей статье, учет вклада микродисперсных частиц осуществлен путем включения в матрицу системы  $\|Q_{ij}\|$  дополнительных элементов, определяющих связь между функцией распределения указанных частиц и дисперсным составом остального аэрозоля. Это позволяет восстанавливать решение без использования итерационной процедуры и приводит к повышению быстродействия алгоритма в 2–3 раза.

Как видно из формулировки основных уравнений, при одинаковых входных данных оба алгоритма приводят практически к одному и тому же решению обратной задачи, что подтверждают результаты тестовых расчетов. Расхождение результатов, обусловленное применением разных вычислительных схем, становится пренебрежимо малым уже после трех итераций в алгоритме [6].

По данным численных экспериментов, применение гибридной модели для описания дисперсного состава аэрозоля обеспечивает более точное определение микроструктурных параметров аэрозоля в сравнении с базовым алгоритмом [8]. В частности, для субмикронной фракции частиц погрешность восстановления геометрического сечения уменьшилась с 29 до 5,4%, объемной концентрации – с 16 до 1,6%, а среднего радиуса – с 35 до 7% (см. подробности в [6]). Указанные оценки получены в случае, когда показатель преломления был известен точно. Влияние ошибок в априорном задании показателя преломления на результаты обращения спектральных измерений АОТ  $\tau(\lambda)$  можно оценить исходя из приближенной формулы Хюльста [9] для фактора эффективности ослабления. С использованием данного приближения в [18] определены соотношения подобия, которым должны удовлетворять микроструктурные характеристики рассеивающих сред, эквивалентных по спектральному ослаблению при вариациях показателя преломления аэрозоля.

В частности, если некоторая рассеивающая среда образована частицами с показателем преломления

$v_0$  и объемной концентрацией  $V_0$ , то для оптически эквивалентной среды с показателем преломления частиц  $v$  и тем же коэффициентом ослабления объемная концентрация будет иметь значение

$$V(v) = \frac{v_0 - 1}{v - 1} V_0. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что для оптически эквивалентных сред с уменьшением показателя преломления ( $v < v_0$ ) объемная концентрация  $V$  возрастает. На основании (12) в [19] получено следующее выражение среднего квадрата ошибки восстановления объемной концентрации  $V$  в зависимости от ошибок в задании показателя преломления:

$$\delta_V^2 = V^2(v_0) \frac{\delta_v^2}{(v_0 - 1)^2} + [V(v_0) - V_0]^2, \quad (13)$$

где  $v_0$  и  $V_0$  – точные значения показателя преломления и объемной концентрации аэрозольных частиц;  $\delta_v^2$  – средний квадрат ошибки задания показателя преломления  $v$ . Как видно из (13), относительная погрешность оценки объемной концентрации, обусловленная, например, ошибкой в показателе преломления  $\delta_v = 0,05$ , составляет 10% при точном значении  $v_0 = 1,5$ . Соотношения, аналогичные формулам (12), (13), справедливы также для среднего радиуса частиц. Полученные оценки находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования [20]. Величина восстановленного геометрического сечения частиц, в отличие от остальных параметров, не зависит от выбранного значения показателя преломления.

При обсуждении вопроса о влиянии выбора показателя преломления также нельзя оставить без внимания следующие два обстоятельства. Первое из них касается связи между размером частиц и показателем преломления, обусловленной различиями в природе, химическом составе, процессах трансформации частиц разных фракций. Эта связь учитывается в современных оптических моделях аэрозоля. Обобщая результаты [18], нетрудно установить условия эквивалентности по спектральному ослаблению для аэрозоля, образованного несколькими фракциями с различным показателем преломления. В частности, применяя формулы вида (12) для отдельных фракций, можно оценить изменения в их объемной концентрации при переходе к некоторому усредненному показателю преломления, общему для всех фракций.

Наконец, необходимо отметить существование спектральной зависимости показателя преломления в реальных аэрозольных средах, что также отражается на результатах решения обратной задачи. В наибольшей степени данный фактор имеет значение в ИК-диапазоне спектра. В видимой области для большинства естественных аэрозольных сред спектральный ход показателя преломления можно считать квазипостоянным. Для примера в табл. 1 представлена спектральная зависимость вещественной и мнимой частей комплексного показателя преломления

для субмикронной (м) и грубодисперсной (г) фракций аэрозоля при относительной влажности воздуха  $RH = 65\%$  по данным [13].

Таблица 1

Пример спектральной зависимости комплексного показателя преломления аэрозоля при относительной влажности воздуха  $RH = 65\%$  для модели [13]

$i$	$\lambda_i$	$v^{(m)}(\lambda)$	$\kappa^{(m)}(\lambda)$	$v^{(r)}(\lambda)$	$\kappa^{(r)}(\lambda)$
1	0,371	1,4450	-0,2429E-02	1,4913	-0,3623E-02
2	0,408	1,4445	-0,2036E-02	1,4913	-0,3293E-02
3	0,438	1,4426	-0,2036E-02	1,4913	-0,3143E-02
4	0,475	1,4402	-0,2036E-02	1,4913	-0,2958E-02
5	0,500	1,4386	-0,2036E-02	1,4913	-0,2833E-02
6	0,547	1,4386	-0,1964E-02	1,4912	-0,2262E-02
7	0,675	1,4386	-0,1421E-02	1,4904	-0,1729E-02
8	0,871	1,4386	-0,1357E-02	1,4896	-0,1667E-02
9	1,052	1,4386	-0,1357E-02	1,4887	-0,1667E-02
10	1,246	1,4363	-0,2036E-02	1,4875	-0,1987E-02
11	1,557	1,4286	-0,2430E-02	1,4839	-0,2791E-02
12	2,203	1,4068	-0,4149E-02	1,4637	-0,5773E-02

Эти данные были использованы в численном эксперименте при расчете спектральной зависимости АОТ  $\tau(\lambda)$ , для которой затем решалась обратная задача с помощью алгоритма, представленного в разд. 1. Параметры микроструктурной модели аэрозоля, использованной в расчетах, приведены в табл. 2 (вторая строка). Модельная среда была образована из частиц субмикронной и грубодисперсной фракций и подобна модели, рассмотренной в работе [6].

Как уже отмечалось, недостаточное информационное содержание спектральных измерений АОТ ставит эффективность решения обратной задачи в зависимость от адекватности априорного задания показателя преломления. Дополнительную информацию о микрофизических свойствах аэрозоля можно получить, расширяя набор измеряемых оптических характеристик [18, 21]. Например, оптико-микрофизические взаимосвязи, установленные в [18] между спектральными измерениями АОТ и яркостью рассеянного излучения в области солнечного ореола, позволили разработать методику совместного восстановления дисперсного состава и показателя преломления аэрозоля. Было показано, что предложенная методика дополнительно обеспечивает определение вещественной и мнимой частей комплексного показателя преломления с ошибками  $\Delta v < 0,05$  и  $\Delta \kappa < 0,03$  соответственно.

Аналогичная задача рассмотрена в более общей постановке в работе [21]. Здесь в качестве входных данных помимо спектральной прозрачности атмосферы рассматривается яркость безоблачного неба в солнечном альмукантарате, что привело к усложнению алгоритма восстановления микрофизических параметров аэрозоля ввиду необходимости учета вклада многократного рассеяния.

Следует отметить, что основы методологии совместного определения микроструктуры и показателя

Таблица 2

Микроструктурные параметры модельной среды, восстановленные при точно заданной спектральной зависимости  $m = m_0(\lambda)$  и приближенном значении показателя преломления  $m = 1,45 - i \cdot 0$

Параметр	$S$	$S^{(m)}$	$S^{(r)}$	$V, \text{см}^3/\text{м}^2$	$V^{(m)}, \text{см}^3/\text{м}^2$	$V^{(r)}, \text{см}^3/\text{м}^2$	$r_s, \text{мкм}$	$r_s^{(m)}, \text{мкм}$	$r_s^{(r)}, \text{мкм}$
Модель	0,866	0,749	0,117	0,337	0,132	0,204	0,292	0,133	1,308
$m = m_0(\lambda)$	0,893	0,775	0,119	0,337	0,133	0,204	0,283	0,129	1,291
$m = 1,45 - i \cdot 0$	0,899	0,779	0,121	0,361	0,131	0,230	0,301	0,126	1,432

При решении обратной задачи были рассмотрены два варианта. В первом варианте, который являлся контрольным, значения показателя преломления были известны точно и заданы согласно данным табл. 1. Во втором варианте не учитывалась спектральная зависимость комплексного показателя преломления, который считался одинаковым для обеих фракций и равным  $1,45 - i \cdot 0$  на всех длинах волн.

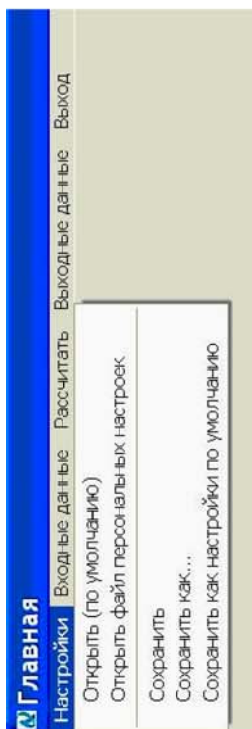
Значения микроструктурных параметров, восстановленные при указанных условиях, представлены в двух последних строках табл. 2. Из приведенных данных видно, что ошибка, допущенная при априорном выборе показателя преломления, в целом не приводит к заметному увеличению погрешности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля. Повышенное отклонение от точных значений, полученное для объемной концентрации  $V^{(r)}$  и среднего радиуса  $r_s^{(r)}$  частиц грубодисперсной фракции, объясняется более высокой погрешностью, допущенной при задании вещественной и мнимой частей показателя преломления частиц данной фракции.

преломления аэрозоля по данным измерений различных оптических характеристик были заложены в 70-е гг. [22, 23] и нашли применение при исследовании микрофизических характеристик аэрозолей различной природы [24, 25]. В последние годы методология получила дальнейшее развитие при изучении дымовых аэрозолей [26–28].

### 3. Описание программного комплекса

Рассмотренный алгоритм реализован в виде программного комплекса (ПК), который удобен при массовой обработке больших объемов экспериментальных данных и не требует от пользователя специальных знаний по решению обратных задач. Интерфейс программного комплекса разработан с использованием интегрированной среды Delphi. Модули и процедуры, предназначенные для решения вычислительных задач, написаны на языке Фортран.

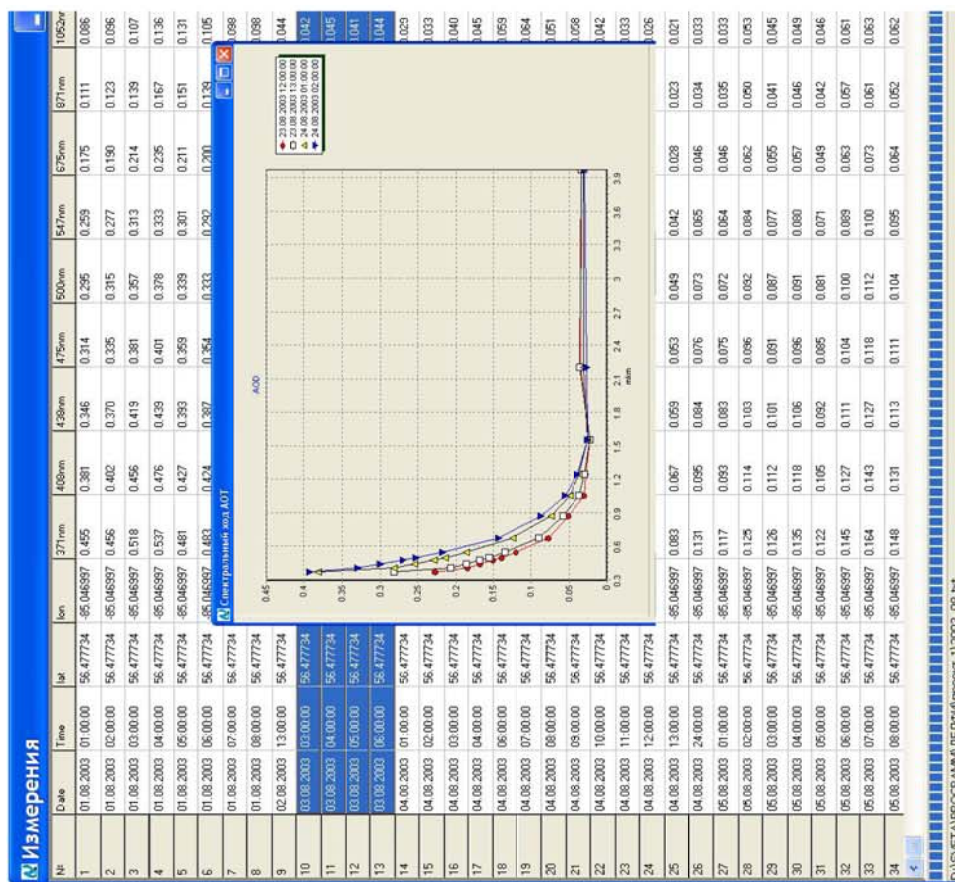
Пользовательский интерфейс включает главное меню (рис. 1, а), из которого можно обратиться к специальным оконным формам. На рис. 1, б изображен скриншот оконной формы, предназначенной



а



б



в

Рис. 1. Оконные формы интерфейса программного комплекса

для настройки параметров и режимов работы комплекса, которые устанавливаются перед запуском алгоритма обращения спектральных зависимостей АОТ. В перечень задаваемых параметров включены параметры сетки, на которой ищется решение (число узлов и шаг дискретизации по радиусу для двух фракций аэрозоля, субмикронной и грубодисперсной), максимально допустимое число итераций, уровень невязки и др.

Значения комплексного показателя преломления, необходимые для расчета элементов матрицы  $\|Q_{ij}\|$ , генерируются автоматически по данным предустановленной оптической модели аэрозоля [13] или могут быть заданы пользователем самостоятельно. При использовании модели [13] необходимо определить значение относительной влажности воздуха, которая является входным параметром модели. Для заданных значений длин волн  $\lambda_i$ , на которых выполнены измерения АОТ  $\tau(\lambda_i)$ , и относительной влажности воздуха генерируются массивы значений вещественных  $v(\lambda_i)$  и мнимых  $k(\lambda_i)$  частей комплексного показателя преломления отдельно для субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля.

В нижней части оконной формы расположена панель, предназначенная для определения среднего фактора эффективности ослабления  $\bar{K}(\lambda)$  на длине волны  $\lambda = 0,41$  мкм. Указанный параметр необходим для оценки верхней границы  $S$  суммарного сечения частиц (10) по методике, предложенной в работе [16]. Для большинства практических ситуаций достаточно осуществлять выбор  $\bar{K}(\lambda)$  в автоматическом режиме.

С помощью опции «Настройки» в главном меню предусмотрена возможность загрузки из файла и сохранения значений параметров и режимов, установленных по умолчанию либо задаваемых пользователем.

К числу других сервисных возможностей, доступ к которым обеспечивается посредством опции «Входные данные» из главного меню, относятся выбор и загрузка файлов, содержащих данные (записи) с измеренными спектральными зависимостями АОТ (рис. 1, в). Предусмотрена возможность получения среднечасовых значений измерений. Также имеется возможность просмотра и редактирования содержимого файлов данных и выбора записей, предназначенных для решения обратной задачи. Панель «Метод решения» позволяет задать алгоритм решения обратной задачи. Опция «С коррекцией» соответствует выбору алгоритма, который описан в первом разделе настоящей статьи. Опция «Без коррекции» указывает на выбор базового алгоритма, разработанного ранее [8].

Наконец, имеется меню отображения результатов решения обратной задачи. Меню обеспечивает доступ к окну, в которое для каждой записи входных данных заносятся восстановленные значения микроструктурных параметров аэрозоля, таких как суммарное геометрическое сечение, объемная кон-

центрация, средний радиус частиц, рассчитанные для полного ансамбля частиц, а также для его субмикронной и грубодисперсной фракций. В окно протокола выводятся данные, отображающие более полно весь процесс работы ПК. В нем помимо входных данных и вектора восстановленного решения  $\bar{S}$  представлена дополнительная информация, которая может быть полезна для анализа результатов решения (достигнутый уровень невязки и ее распределение по измерениям, количество выполненных итераций и др.).

## Заключение

Нами рассмотрены численный алгоритм и программный комплекс на его основе, предназначенные для восстановления микроструктурных параметров аэрозоля с помощью решения обратной задачи для спектральных измерений аэрозольной оптической толщины. Специфика алгоритма состоит в учете малой информативности обратной задачи относительно частиц из микродисперсного диапазона размеров. С этой целью для описания дисперсного состава аэрозоля предложено использовать гибридную модель, в которой микродисперсные частицы выделены в отдельную фракцию, а за ее пределами применяется метод интегральных распределений, хорошо зарекомендовавший себя ранее. Функция распределения частиц по размерам в микродисперсной области задается в параметрическом виде, с учетом современных модельных представлений. За счет указанной параметризации обеспечивается более точная оценка вклада микродисперсных частиц в восстанавливаемых параметрах аэрозоля.

Особое внимание было уделено повышению быстродействия алгоритма, что существенно при массовой обработке больших объемов экспериментальных данных. Также рассмотрен вопрос учета ошибок восстановления микроструктурных параметров аэрозоля, обусловленных неточным заданием показателя преломления аэрозольных частиц разных фракций. В численных экспериментах для аэрозольных моделей, включающих зависимость комплексного показателя преломления от длины волны, установлена возможность использования при обращении постоянного по спектру приближенного значения показателя преломления.

На базе разработанного алгоритма создан программный комплекс, который оснащен удобным пользовательским интерфейсом, позволяющим легко осуществлять настройку параметров и режимов работы комплекса, просмотр и редактирование входных данных, отображение и сохранение результатов решения обратной задачи. ПК удобен при обработке данных натуральных экспериментов в автоматическом режиме и не требует от пользователя специальных знаний по решению обратных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП (государственные контракты № 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204).

1. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1997. 334 с.
2. Tunved P., Hansson H.-C., Kulmala M., Aalto P., Viisanen Y., Karlsson H., Kristensson A., Swietlicki E., Dal Maso M., Ström J., Komppula M. One year boundary layer aerosol size distribution data from five nordic background stations // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3, N 6. P. 2183–2205.
3. Hussein T., Puustinen A., Aalto P. P., Mäkelä J.M., Hämeri K., Kulmala M. Urban aerosol number size distributions // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4, N 2. P. 391–411.
4. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д. Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 11. С. 983–990.
5. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д. Исследование дисперсного состава аэрозоля в периоды весенней дымки и лесных пожаров // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 468–477.
6. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Микрофизическая экстраполяция в задаче обращения аэрозольной оптической толщины // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 880–886.
7. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Особенности восстановления микроструктурных параметров аэрозоля из измерений аэрозольной оптической толщины. Часть II. Результаты обращения // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 313–324.
8. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 294–300.
9. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
10. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
11. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
12. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 199 с.
13. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы // Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
14. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. 360 с.
15. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. Моделирование оптических характеристик аэрозолей приземного слоя атмосферы в области спектра 0,3–15 мкм. Ч. 2. Модель состава и структуры аэрозолей // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 8. С. 1227–1235.
16. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Об ограничении интегральных аэрозольных распределений в обратных задачах солнечной фотометрии // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 759–764.
17. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
18. Веретенников В.В. Совместное определение микроструктуры и показателя преломления аэрозоля по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 214–221.
19. Веретенников В.В., Меньщикова С.С. Применение блочно-итерационного алгоритма для восстановления интегральных аэрозольных распределений по данным солнечной спектрофотометрии // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 259–264.
20. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 301–307.
21. 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 1. Тестирование алгоритма // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 602–612.
22. Веретенников В.В., Наац И.Э. Исследования по численному обращению элементов полидисперсной матрицы рассеяния // I Всесоюз. совещание по атмосферной оптике (Тезисы докл.). Ч. 1. Томск, 1976. С. 342–345.
23. Веретенников В.В., Наац И.Э. Исследования по методам обращения поляризационных измерений в задаче оптического зондирования атмосферного аэрозоля // Методика ракетных и спутниковых исследований в верхней атмосфере. М.: Гидрометеоздат, 1979. С. 129–142.
24. Веретенников В.В., Наац И.Э., Панченко М.В., Фадеев В.Я. К определению микроструктуры и показателя преломления атмосферных дымок из поляризационных характеристик светорассеяния // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14, № 12. С. 1313–1317.
25. Veretennikov V.V., Kozlov V.S., Naats I.E., Fadeev V.Ya. Optical studies of smoke aerosols: inversion method and its applications // Opt. Lett. 1979. N 12. P. 411–413.
26. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В. Некоторые методические дополнения к решению обратной задачи для восстановления параметров дисперсной структуры дымов смешанного состава // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 183–190.
27. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.В. Оптико-микрофизические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 675–684.
28. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофотометрических измерений в смешанных дымах // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897.

**V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Peculiarities of determining the aerosol microstructure parameters from measurements of the aerosol optical depth. Part I. Inverse problem solution technique.**

The integral distribution method for determining the aerosol microstructure from spectral measurements of the aerosol optical depth is developed. A numerical algorithm for solving the inverse problem is presented. The software package based on this algorithm is described. The special feature of the algorithm is allowance for a low information content of the solution in the fine aerosol region. The integral cross section size distribution function is restored as output software package computation. The volume concentration and mean particle radius are calculated both for the total ensemble of particles and its submicron and coarse fractions using the restored size distribution function. The user interface of the software package is presented. The software package is easy-to-use when processing large arrays of experimental data and does not require specific knowledge from the user.