

Информационная система для сетевых солнечных фотометров

Д.М. Кабанов, В.В. Веретенников, Ю.В. Воронина,
С.М. Сакерин, Ю.С. Турчинович*

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

Поступила в редакцию 2.10.2008 г.

Представлена информационная система, предназначенная для обработки и систематизированного хранения данных сетевых солнечных фотометров. Система разработана в среде Builder C++ и интегрирует отдельные программные модули, которые выполняют следующие операции: расчет аппаратных функций спектральных каналов фотометра и полосовых функций пропускания атмосферных газов, расчет значений аэрозольной оптической толщины и общего влагосодержания атмосферы, фильтрация данных, искаженных влиянием облачности, определение по спектральным данным аэрозольной прозрачности атмосферы параметров микроструктуры аэрозоля.

Ключевые слова: солнечный фотометр, аэрозольная оптическая толщина, общее влагосодержание атмосферы, микроструктура аэрозоля.

Введение

Функционирование сетей приборов, работающих в режиме круглогодичного мониторинга окружающей среды, практически невозможно без автоматизации как собственно процесса измерения, так и обработки и хранения информации. Удачным примером организации таких измерений может служить сеть солнечных фотометров AERONET [1].

В настоящее время в Институте оптики атмосферы СО РАН продолжается работа по развертыванию на территории Сибири сети солнечных фотометров SP-6(7), работающих в спектральном диапазоне 0,31–4 мкм (16 длин волн). Подробное описание устройства фотометров и их программного обеспечения представлено в работе [2]. Приборы установлены в следующих пунктах наблюдений: Томск, Иркутск, Улан-Удэ, Ханты-Мансийск, Екатеринбург.

Используемые приборы имеют отличия по ряду характеристик (обновляемые константы калибровки и аппаратные спектральные функции, координаты расположения и др.), что требует индивидуального подхода и усложняет процесс обработки результатов измерений. Поэтому эффективное функционирование сети потребовало разработки информационной системы (ИС), которая бы минимизировала рутинный процесс контроля за работой фотометров,

сбора данных из разных районов, расчета и систематизированной архивации характеристик. Кроме того, использование подобной ИС позволяет привлекать к оперативной обработке данных персонал, не обладающий специальными знаниями по оптике атмосферы.

1. Общая структура процедур обработки данных

Условно систему можно представить в виде трех взаимосвязанных блоков (рис. 1): 1) программ-диспетчер, 2) внешние программные модули, 3) банк данных (БД).

Управление всеми операциями осуществляется через программу-диспетчер, которая запускает соответствующий внешний программный модуль, а результат вычислений записывает в банк данных (с учетом того, для какого фотометра была выполнена данная операция и места его расположения).

Банк данных содержит информацию: 1) о каждом фотометре (идентификационный номер, пункт наблюдений и др.); 2) об измеренных фотометрами сигналах прямого солнечного излучения; 3) о спектральных характеристиках оптических элементов фотометров; 4) о рассчитанных (на основе данных п. 3) параметрах для обработки сигналов, 5) о физических характеристиках, полученных в результате обработки. Организация БД следующая: данные измерений и результаты их обработки архивируются по месту установки прибора, а параметры фотометров, используемые в расчетах, заносятся в архивный файл данного прибора. Такой подход позволяет

* Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Виктор Васильевич Веретенников (vvv@iao.ru); Юлия Викторовна Воронина (yulia@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru).

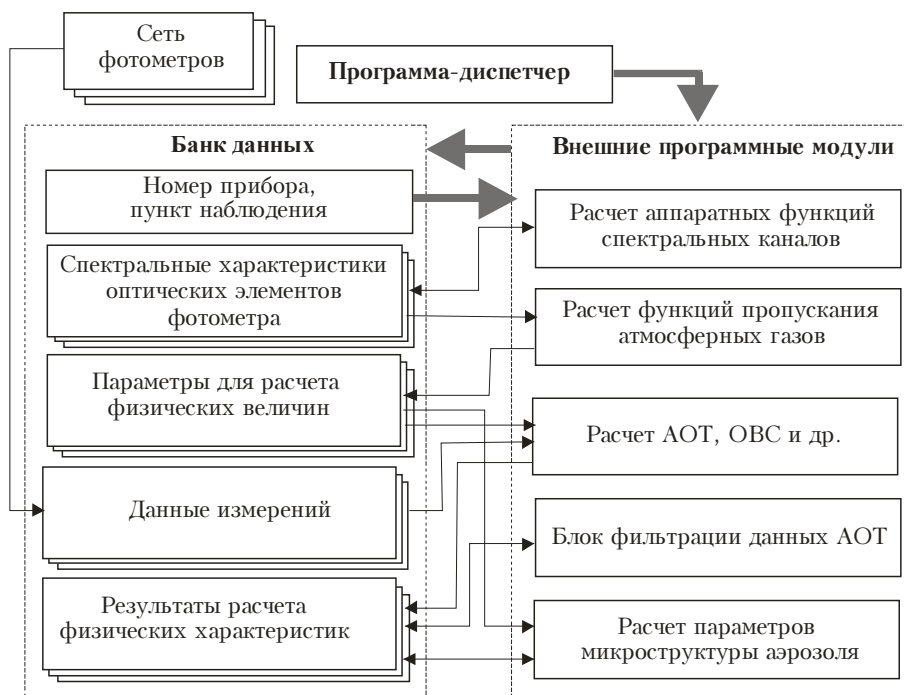


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированной системы сбора и обработки данных

достаточно просто вносить соответствующие изменения в ИС при замене оптических элементов в фотометрах или при перемещении прибора из одного пункта в другой.

Как известно, измеряемый фотометром сигнал U в спектральном интервале $\Delta\lambda$ связан с прозрачностью атмосферы следующим соотношением:

$$U_{\Delta\lambda} = \rho U_{0\Delta\lambda} T_{\Delta\lambda}^{\Sigma} = \rho U_{0\Delta\lambda} T_{\Delta\lambda}^W T_{\Delta\lambda}^X T_{\Delta\lambda}^C \exp[-M(\tau_{\lambda}^R + \tau_{\lambda}^A)], \quad (1)$$

где $U_{0\Delta\lambda}$ – внеатмосферные (калибровочные) сигналы; ρ – поправка на внутригодовое изменение расстояния до Солнца; τ_{λ}^A – аэрозольная оптическая толщина (АОТ); τ_{λ}^R – оптическая толщина рэлеевского (молекулярного) рассеяния; $T_{\Delta\lambda}^W, T_{\Delta\lambda}^X, T_{\Delta\lambda}^C$ – функции поглощения водяного пара, озона и «постоянных» газовых компонентов; M – оптическая масса атмосферы.

Учитывая конечный спектральный интервал и значительное влияние «крыльев» спектрального пропускания светофильтров, функции $T_{\Delta\lambda}^W, T_{\Delta\lambda}^X, T_{\Delta\lambda}^C$ можно рассчитать следующим образом:

$$T_{\Delta\lambda} = \left[\int A_{\lambda} T_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda / \int A_{\lambda} d\lambda \right], \quad (2)$$

где A_{λ} – аппаратная функция j -го спектрального канала фотометра; S_{λ} – спектральная солнечная постоянная.

Все операции, выполняемые информационной системой, можно разбить на два этапа. Первый этап – определение параметров, необходимых для вычисления физических характеристик (параметри-

зация полосовых функций пропускания атмосферными газами, нахождение калибровочных констант фотометра).

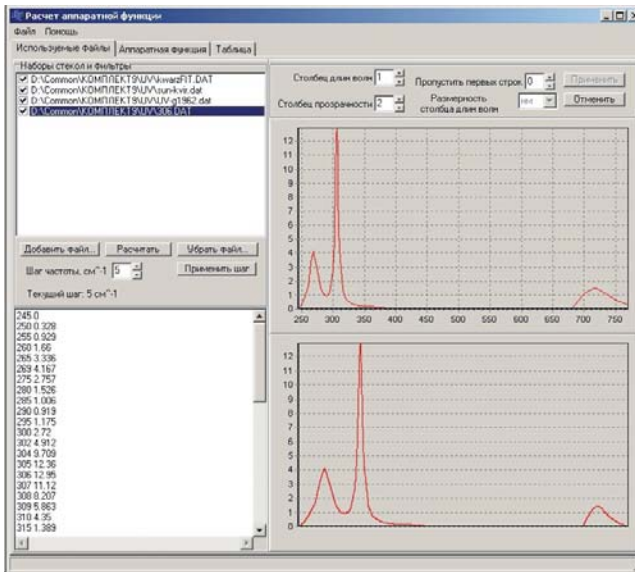
Второй – оперативная обработка результатов измерений фотометрами, установленными в разных пунктах наблюдений (вычисление аэрозольной оптической толщи и общего влагосодержания (ОВС) атмосферы, расчет параметров микроструктуры атмосферного аэрозоля).

Рассмотрим подробнее отдельные программные модули.

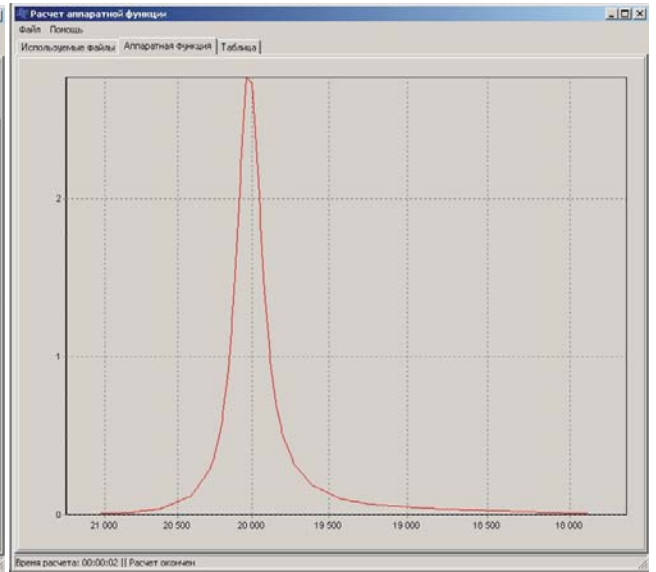
2. Параметризация полосовых функций пропускания атмосферы

Расчет аппаратных функций спектральных каналов проводится с использованием спектральных характеристик соответствующего набора оптических элементов и данных о спектре солнечного излучения. Программа позволяет оперативно менять набор оптических элементов, используемых в расчетах, легко адаптируется к формату вводимых данных, отображает результаты в графическом и табличном виде (рис. 2, а, б).

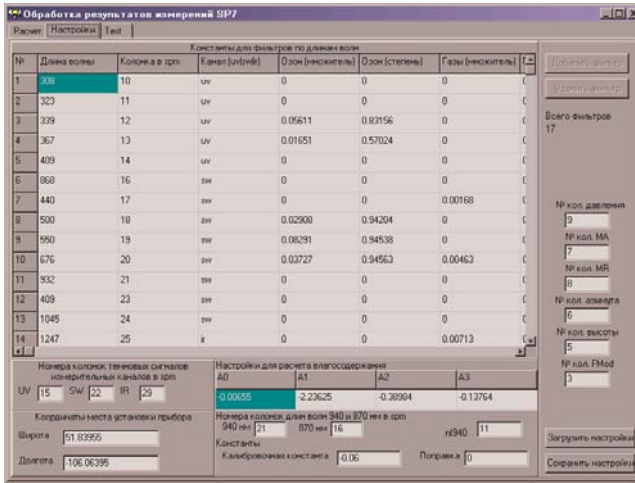
Расчет функций пропускания атмосферных газов для измерительных каналов проводится с использованием полученных аппаратных функций и архива спектроскопической информации газового поглощения со спектральным разрешением 5 см^{-1} . Архив формируется с применением базы параметров спектральных линий HITRAN-2000 (<http://www.hitran.com>) и современных моделей непрерывного поглощения (http://rtweb.aer.com/continuum_code.html) (MT_CKD) для четырех сезонов (зима полярных широт, зима и лето умеренных широт,



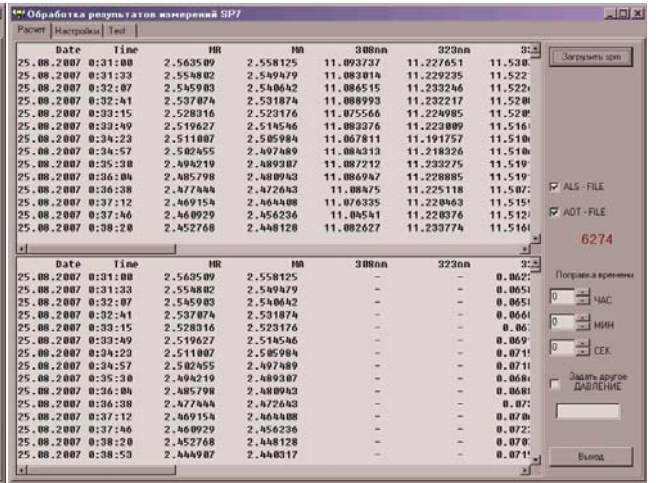
а



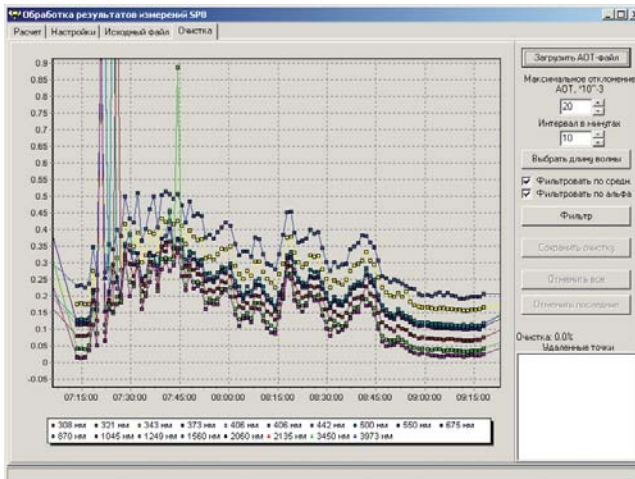
б



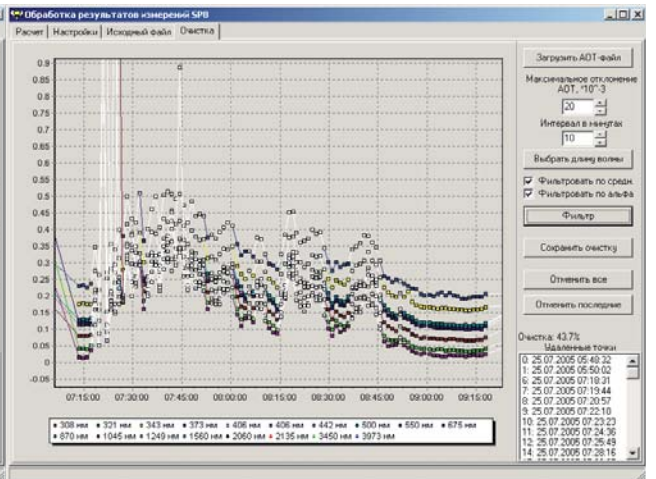
в



г



д



е

Рис. 2. Внешний вид интерфейсов пользователей программных модулей: а и б – расчет аппаратных функций; в – страница ввода параметров для расчета AOT и OVC; г – страница расчета AOT и OVC; д и е – очистка данных от влияния облачности

тропики) метеомодели AFGL [3] при различных зенитных углах Солнца. В диапазоне длин волн 0,45–5 мкм расчеты проводятся прямым методом для следующих газов: H₂O, O₃, CO₂, NO₂, SO₂, CH₄, CO в сумме с другими газами. Для длин волн короче 0,45 мкм рассчитывается пропускание, обусловленное поглощением только O₃, SO₂, NO₂ (на основе данных по сечениям поглощения).

На выходе программного модуля получаются зависимости значений функций пропускания, обусловленных молекулярным рассеянием и поглощением атмосферными газами, от оптической массы атмосферы. Расчет проводится отдельно для озона, водяного пара, содержание которых претерпевает значительные пространственно-временные изменения, и для суммы всех остальных газов. Далее проводится параметризация этих зависимостей в виде [4, 5] $\ln T_{\Delta\lambda}^W = -a_1(MW)^{b_1}$, $\ln T_{\Delta\lambda}^X = -a_2(MX)^{b_2}$, $\ln T_{\Delta\lambda}^C = -a_3M^{b_3}$, где a_i и b_i – параметры аппроксимации. Результаты заносятся в БД (см. рис. 2, б) и используются при расчете физических величин. Отдельно рассчитывается зависимость отношения функций пропускания в полосе поглощения водяного пара и соседнем «окне прозрачности» (0,94 и 0,87 мкм) для определения общего влагосодержания атмосферы [4].

3. Расчет АОТ и фильтрация данных

Расчет физических величин (спектральная аэрозольная оптическая толщина и общее влагосодержание атмосферы). Методика расчета подробно изложена в работах [4, 5]. Как упоминалось выше, особенностью данного подхода является то, что процедура исключения вклада молекулярного поглощения и рассеяния применяется непосредственно к измеренным сигналам прямого солнечного излучения:

$$\tau_{\lambda}^A = M^{-1} \ln[U_{0\Delta\lambda\rho}/Y_{\Delta\lambda}], \quad (3)$$

где

$$Y_{\Delta\lambda} = U_{\Delta\lambda} / (T_{\Delta\lambda}^W T_{\Delta\lambda}^X T_{\Delta\lambda}^C T_{\Delta\lambda}^R).$$

Таким образом, при определении калибровочных констант приборов и расчете АОТ удается избежать ошибок из-за нелинейности зависимости логарифма функций пропускания газового поглощения в ИК-диапазоне спектра от оптической массы.

Интерфейс пользователя программы показан на рис. 2, в. Программа позволяет оператору производить коррекцию времени замеров и вводить информацию об атмосферном давлении (в случае сбоя часов на компьютере фотометра или его датчика давления), рассчитывает либо АОТ и ОВС атмосферы, либо логарифмы сигналов прямого излучения с исключением молекулярного ослабления (используются при калибровке прибора).

Модуль очистки от влияния облаков («cloud screening»). Заметим, что алгоритм работы автоматизированных солнечных фотометров предусматривает селекцию облачных ситуаций [6]. Включение и выключение измерительных приборов осуществляются с учетом сигналов, поступающих с датчика интегральной освещенности, и результатов измерений прямого солнечного излучения на

длине волны 0,87 мкм. Однако полностью исключить влияние, например, полупрозрачной перистой облачности без анализа спектральной и временной изменчивости АОТ не представляется возможным.

Модуль «cloud screening» включает две процедуры автоматической (программной) фильтрации искажающего влияния облаков.

Первая основана на том, что изменение АОТ в отсутствие облаков не может претерпевать быстрых скачкообразных изменений. С этой целью из всего массива данных выделяется небольшой временной интервал (начиная с первого измерения) и для него проводится сравнение среднего и максимального значения АОТ. Если их разность превышает выбранное пороговое значение, то максимальное АОТ исключается. Данная операция повторяется до тех пор, пока искомая разность не перестанет превышать порог. Далее выборка смещается по времени на один замер (примерно 1 мин) и операции повторяются. Практика использования данного алгоритма показала, что величина выбираемого временного интервала должна составлять 10–15 мин, а величина порога 0,05.

Вторая процедура базируется на том, что влияние облачности приводит к одновременному увеличению АОТ на всех длинах волн и, соответственно, ее спектральный ход приближается к нейтральному. Критерием для отбраковки замеров в этом случае, как показал проведенный ранее анализ [7], может служить одновременное выполнение двух условий: АОТ на длине волны 0,87 мкм превышает 0,2, а показатель Ангстрема (характеризует селективность спектрального хода АОТ) меньше единицы.

Дополнительно программный модуль дает возможность оператору самому исключать и восстанавливать (например, ошибочно отфильтрованные в автоматическом режиме) замеры в загруженном массиве данных. Операции могут применяться как к отдельным замерам (спектрам), так и к последовательности замеров. Внешний вид интерфейса программы и результат отбраковки замеров в автоматическом режиме (полюе точки) представлены на рис. 2, д, е.

4. Восстановление характеристик микроструктуры аэрозоля

Наряду с определением спектрального хода АОТ программное обеспечение ИС позволяет проводить интерпретацию оптических измерений с целью извлечения из них информации о параметрах микроструктуры аэрозоля. Это существенно повышает информационную отдачу проводимых экспериментов. Как хорошо известно, определение микроструктуры аэрозоля по измерениям его оптических характеристик основано на решении некорректно поставленных задач, что требует достаточно высокой квалификации исследователя. Численные алгоритмы решения задач указанного типа обычно с трудом поддаются реализации в автоматическом режиме.

Программный модуль, предназначенный для решения обратных задач, позволяет избежать отме-

ченных затруднений. Математические методы и численные алгоритмы, использованные при его разработке, обеспечивают высокую степень автоматизации процесса восстановления микроструктурных параметров аэрозоля при обработке больших массивов экспериментальных данных и не требуют от пользователя специальных знаний. В основе разработанных алгоритмов и программ лежит использование интегральных аэрозольных распределений для характеристики дисперсного состава аэрозоля [8]. В качестве указанного распределения рассматривается функция $S(r)$, которая определяет суммарное геометрическое сечение частиц с радиусами меньше r . При переходе к дискретному аналогу задачи функции $S(r)$ заменяются векторами с компонентами $S_j = S(r_j)$, $j = 1, \dots, n$, которые удовлетворяют неравенствам

$$0 < S_1 \leq S_2 \leq \dots \leq S_n \leq C, \quad (4)$$

где C – константа, определяющая верхнюю границу суммарного сечения частиц. В результате задача обращения спектральных измерений АОТ $\tau_i^A = \tau^A(\lambda_i)$, $i = 1, \dots, m$, сводится к решению системы алгебраических уравнений вида

$$QS = \tau^A \quad (5)$$

путем минимизации функционала невязки

$$F^2 = \|QS - \tau^A\|^2 \quad (6)$$

на множестве векторов S , удовлетворяющих ограничениям (4). Построение элементов матрицы Q , зависящих от конкретной схемы алгебраизации задачи, подробно рассмотрено в [8], а для их расчета необходимо использование теории Ми [9] с апри-

орным заданием вещественной и мнимой частей показателя преломления аэрозольного вещества. Для минимизации функционала невязки (6) при ограничениях (4) применяется метод условного градиента [10].

В рассмотренной постановке обеспечивается устойчивость решения обратной задачи. В качестве приближенного решения уравнения (5) можно рассматривать любой вектор S_0 , для которого функционал $F^2 \leq \delta^2$, где δ^2 характеризует ошибку в исходных данных. Более подробно вопросы сходимости решения обратной задачи (5) обсуждаются в [8].

Информация о распределении $S(r)$, полученная в результате обращения измерений спектральной АОТ, далее используется для расчета ряда интегральных микроструктурных параметров как по всему диапазону размеров частиц $0 < r \leq R$, так и на локальных интервалах, соответствующих субмикронной и грубодисперсной фракциям частиц. В качестве таких микроструктурных параметров в ИС рассматриваются полное геометрическое сечение $S = S(R)$, средний по распределению $S(R)$ радиус частиц

$$\langle r \rangle = S^{-1} \int_0^R [S(R) - S(r)] dr$$

и объемный фактор заполнения $V = (4/3)S\langle r \rangle$. Формулы для расчета аналогичных параметров, соответствующих субмикронной и грубодисперсной фракциям, приведены в [11].

Все операции по решению обратной задачи включены в отдельный программный модуль, для работы с которым предусмотрен специальный интерфейс, изображенный на рис. 3.

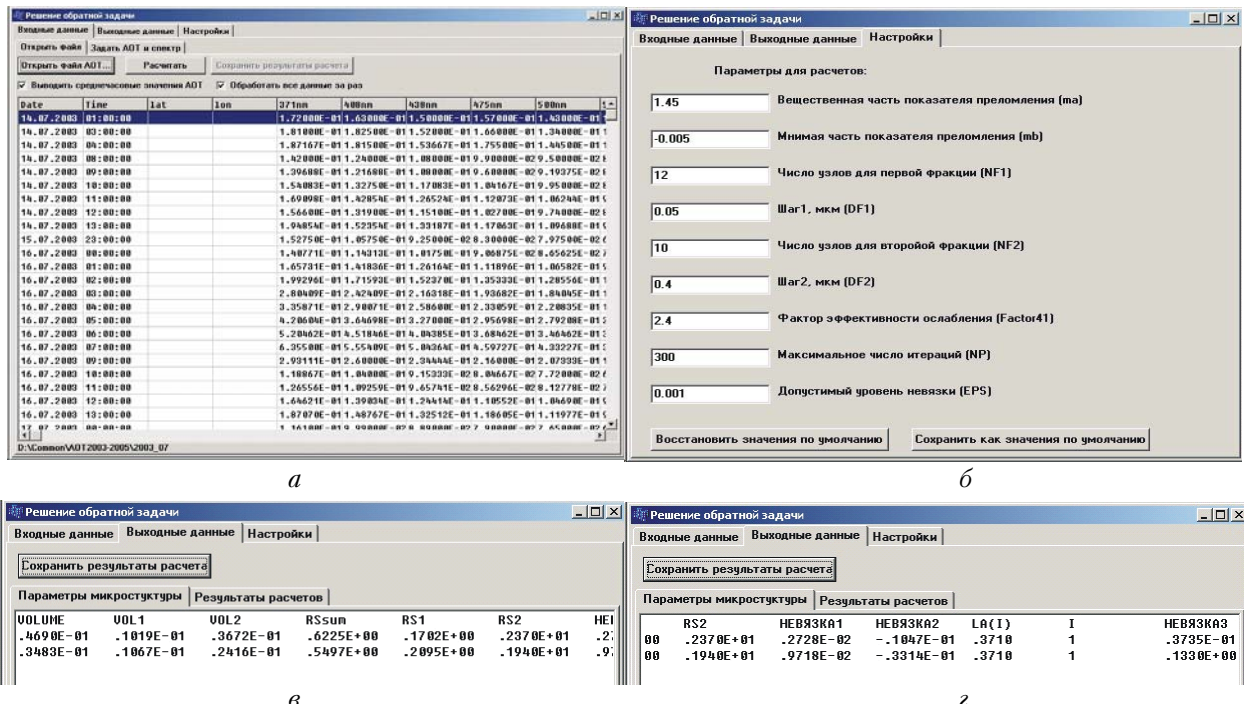


Рис. 3. Интерфейс пользователя программы определения микрофизических характеристик аэрозоля: а – страница ввода данных АОТ атмосферы; б – страница установки параметров расчетов; в и з – вывод результатов расчетов

Интерфейс содержит набор блоков (оконных форм), предназначенных для выполнения следующих действий:

- выбор и загрузка из БД файлов, содержащих данные (записи) со спектральными зависимостями АОТ, полученными из измерений солнечным фотометром. Эти данные могут быть предварительно усреднены по заданному временному интервалу;
- просмотр содержимого файлов данных и выбор записей, предназначенных для решения обратной задачи. Предусмотрена возможность обработки как выделенных записей, так и полного массива данных в целом.

Помимо этого имеется возможность загружать и редактировать файлы, содержащие спектральные зависимости АОТ, которые получены пользователем из других источников.

Следующее окно – окно настроек, которое предназначено для просмотра и, при необходимости, редактирования параметров, которые требуются для решения обратной задачи и должны быть заданы априори. К числу таких параметров относятся вещественная и мнимая части комплексного показателя преломления, параметры сетки (число узлов и шаг сетки), допустимое число итераций, уровень невязки и др. Имеется возможность использования значений параметров, установленных по умолчанию либо задаваемых пользователем.

Наконец, имеется окно отображения результатов решения обратной задачи. Для каждой записи входных данных в окно выводятся соответствующий вектор восстановленного решения S и рассчитанные по нему микроструктурные параметры. Здесь же представлена дополнительная информация, которая может быть полезна для анализа результатов решения (достигнутый уровень невязки и ее распределение по измерениям, количество выполненных итераций и др.). В отдельную закладку выделена таблица, в которую заносятся значения объемного фактора заполнения V и среднего радиуса $\langle r \rangle$, рассчитанные как для полного восстановленного ансамбля частиц аэрозоля, так и для его отдельных фракций – субмикронной и грубодисперсной.

По окончании работы модуля все результаты сохраняются в банке данных системы.

Примеры обращения данных натурального эксперимента. Для иллюстрации на рис. 4 представлены результаты, полученные с помощью программного комплекса. На рис. 4, а изображен дневной ход объемного фактора заполнения V , восстановленный по спектральным измерениям АОТ в летний период над г. Томском в условиях чистой атмосферы.

Индексами 1 и 2 обозначены зависимости, соответствующие субмикронной и грубодисперсной фракциям частиц. В качестве условной границы между фракциями было выбрано значение $r = 0,55$ мкм.

Как видно из рис. 4, а, в промежуток времени с 11 до 16 ч в атмосфере происходило монотонное увеличение концентрации субмикронных частиц V_1

с 0,0026 до 0,011 мкм. В этот же период наблюдается укрупнение частиц субмикронной фракции, характеризуемое изменением их среднего радиуса от 0,17 до 0,26 мкм (рис. 4, б, кривая 1).

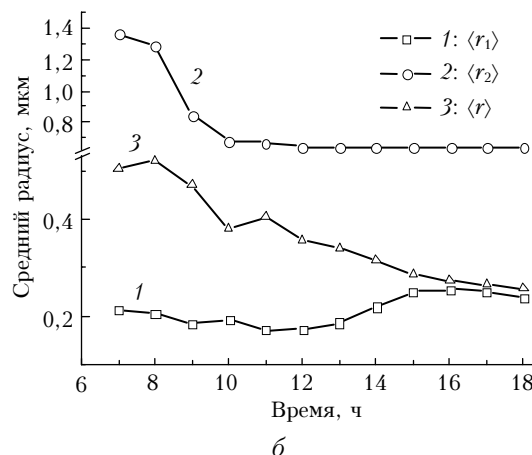
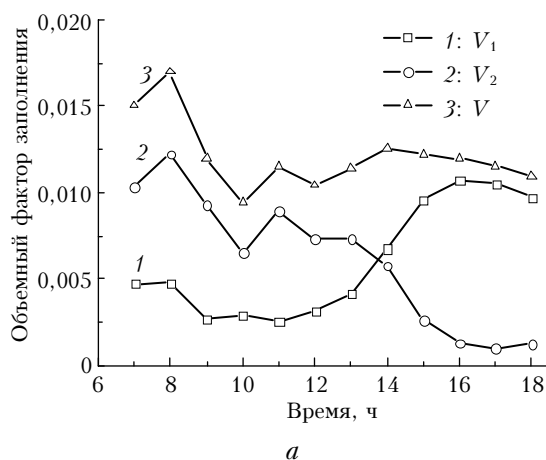


Рис. 4. Временной ход объемного фактора заполнения V (а) и среднего радиуса частиц $\langle r \rangle$ (б) с разделением на субмикронную (кривые 1) и грубодисперсную (кривые 2) фракции по результатам обращения натуральных измерений АОТ

Содержание частиц грубодисперсной фракции в течение дня преимущественно убывает. Максимальное количество частиц было в утренний период ($V_2=0,012$ мкм), когда их доля V_2/V составляла 72%. К 17 ч отношение V_2/V понизилось до 8,6%. Примечательно, что противоположные тенденции в поведении содержания частиц обеих фракций приводят к тому, что суммарный фактор заполнения V после 10 ч изменяется незначительно, испытывая лишь слабые колебания в интервале 0,01–0,012 мкм.

В утренний период грубодисперсная фракция наиболее быстро теряет самые крупные частицы, что проявляется в уменьшении среднего радиуса $\langle r_2 \rangle$ частиц грубодисперсной фракции от 1,37 до 0,7 мкм (см. рис. 4, б, кривая 2). Отмеченный фактор является определяющим в уменьшении среднего радиуса частиц $\langle r \rangle$ по всему ансамблю (кривая 3) в период до 10 ч. Уменьшение $\langle r \rangle$ в более поздний

период обусловлено увеличением в это время относительной доли частиц субмикронной фракции.

Из приведенного примера видно, что включение в систему программного модуля для решения обратных задач позволяет получать из экспериментальных данных обширную дополнительную информацию о микроструктурных параметрах аэрозоля, которая может быть использована для дальнейшего анализа процессов, протекающих в аэрозольной атмосфере.

В заключение отметим, что основные программы информационной системы разработаны в среде Borland C++ Builder. Организация ИС предусматривает возможность регулярного обновления базы спектроскопических данных, а также расширения ее информативных возможностей за счет подключения дополнительных программных модулей. В частности, планируется включить в систему блок определения общего содержания озона в атмосфере по данным измерений солнечного излучения в диапазоне длин волн 0,31–0,37 мкм, а также расширить количество восстанавливаемых характеристик аэрозоля за счет оснащения фотометров режимом измерения яркости неба в области солнечного ореола.

Работа выполнена при поддержке интегрального проекта СО РАН № 3.23 и проекта Федерального агентства по науке и инновациям (контракт № 02.518.11.7088).

1. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote. Sens. Environ. 1998. V. 66. N 1. P. 1–16.
2. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонент атмосферы.

Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 354–360.

3. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km), Air Force Geophysics Laboratory // AFGL-TR-86-0110. Environmental Research Paper. 1986. N 954.
4. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 866–874.
5. Sakerin S.M., Kabanov D.M. Spatial inhomogeneities and the spectral behavior of atmospheric aerosol optical depth over the Atlantic Ocean // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 3. P. 1. P. 484–500.
6. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полюкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.
8. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 294–300.
9. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
10. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
11. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 301–307.

D.M. Kabanov, V.V. Veretennikov, Yu.V. Voronina, S.M. Sakerin, Yu.S. Turchinovich. Information system for network sunphotometers.

An information system is presented destined for processing and systematized storage of the data of network sunphotometers. The system is designed in Builder C++ medium and includes individual program modules performing the following operations: calculation of instrumental functions of the photometer spectral channels, the transmission band functions of atmospheric gases, the aerosol optical depth, and columnar water vapor of the atmosphere; as well as filtration of the data distorted by cloudiness, determination of the aerosol microstructure parameters from the data on spectral transparency of the atmosphere.