

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

**Исследование вертикального распределения
тропосферных аэрозольных слоев
по данным многочастотного лазерного зондирования.
Часть 1. Методы восстановления оптических параметров**

С.В. Самойлова, Ю.С. Балин, Г.П. Коханенко, И.Э. Пеннер*

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

Поступила в редакцию 16.10.2008 г.

Разработана методика интерпретации данных зондирования многочастотным рамановским лидаром. Предложен алгоритм разделения аэрозольных слоев с различными рассеивающими свойствами с последующей оценкой среднего значения лидарного отношения и параметра Ангстрема в пределах слоя, что позволяет минимум в два раза снизить погрешности восстановления коэффициента обратного рассеяния по данным дневных наблюдений. Для интерпретации ночных измерений разработан устойчивый алгоритм численного дифференцирования для определения коэффициента ослабления, основанный на преобразовании области допустимых значений и требующий решения нелинейных уравнений. Для линеаризации предусмотрена итерационная процедура, использование которой приводит к повышению разрешения по сравнению с традиционными методами. Реализация методов в условиях априорной неопределенности позволяет использовать их для обработки рутинных лидарных измерений.

Ключевые слова: рамановский лидар, аэрозоль, коэффициенты ослабления и обратного рассеяния, лидарное отношение, методы восстановления оптических параметров.

Введение

Аэрозоль является одной из ключевых атмосферных составляющих и играет существенную роль в формировании ее оптического состояния, что требует детального исследования его оптических и микрофизических свойств. Из-за высокой изменчивости времени жизни тропосферного аэрозоля, неоднородности его высотного и пространственного распределений требуются постоянные наблюдения за состоянием аэрозоля, в том числе и с использованием лидарных систем. Лидары космического базирования предназначены для исследования глобальных процессов распределения аэрозоля над поверхностью Земли [1], лидары наземного базирования (см., например, [2–4]) – для детального исследования характеристик аэрозоля в локальной точке. Одночастотный лидар предоставляет возможность идентификации рассеивающих слоев (аэрозоль/облако), их местоположения (высота/толщина) и фазового состава (лед и/или вода). Многочастотный лидар позволяет разделять аэрозольные слои различного происхождения и, определяя средний спектр размеров частиц в пределах каждого слоя, их идентифи-

цировать. Зондирование аэрозоля с помощью многочастотного лидара в настоящее время является инструментом, обеспечивающим наиболее полную и качественную информацию о вертикальном распределении оптических и микрофизических свойств аэрозоля.

В данной статье рассмотрены методы восстановления оптических характеристик для многочастотной лидарной системы, использующей в качестве источника излучения Nd:YAG-лазер. В дневное время наблюдений система позволяет регистрировать сигналы, обусловленные упругим рассеянием, для трех длин волн $\lambda_{oi} = 355, 532, 1064$ нм. В ночное время дополнительно существует возможность регистрации сигналов, обусловленных комбинационным рассеянием, для двух смещенных длин волн в ультрафиолетовом и видимом диапазонах, $\lambda_{Ri} = 387, 607$ нм. В настоящее время лидарные системы с подобными характеристиками используются для рутинных наблюдений за состоянием тропосферы в диапазоне высот от 1 до 10 км в сетях the European Aerosol Research LIdar NETwork (EARLINET) [2], the Asian Dust NETwork (AD-Net) [3] и лидарной сети на территории СНГ (CIS-LiNet) [4]. В разделе 1 приведено описание подобной лидарной системы.

Настоящая статья открывает цикл публикаций, посвященных результатам интерпретации регулярных лидарных измерений, проводившихся в Томске с марта 2006 по октябрь 2007 г. в рамках программ CIS-LiNet. Основная цель исследований – построение

* Светлана Викторовна Самойлова (ssv@seversk.tomsknet.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru).

спектральной модели высотного распределения оптических характеристик тропосферного аэрозоля. Ключевое внимание в данной работе будет уделяться методам восстановления профилей оптических параметров — коэффициентов ослабления, обратного рассеяния и лидарного отношения.

В рамках работы EARLINET регулярно проводится сопоставление алгоритмов восстановления на основе модельных сигналов, рассчитанных методом Монте-Карло и адаптированных к реальным условиям эксперимента. Первый цикл сопоставления был проведен в 2002 г. [5, 6], второй — в 2006 г. Модельные сигналы, предложенные для второго этапа тестирования алгоритмов, мы будем использовать ниже для иллюстрации работоспособности собственных методов восстановления оптических параметров.

Разнообразие алгоритмов обработки лидарных сигналов объясняется, во-первых, широким спектром атмосферно-оптических ситуаций, в которых проводятся лидарные наблюдения. Ниже мы сконцентрируем внимание на восстановлении профилей для безоблачной атмосферы. Во-вторых, результаты дневных измерений, менее обеспеченные информационно, представляют больший интерес с точки зрения исследований динамики суточного хода характеристик аэрозоля в пограничном слое и возможности совместного использования независимых фотометрических измерений [7]. Чтобы уменьшить влияние информационной неопределенности на результаты обработки сигналов, особое внимание при разработке методов мы будем уделять возможностям введения дополнительной априорной информации о свойствах аэрозоля — информации о послонной структуре вертикального распределения и ограниченном диапазоне изменчивости лидарного отношения. В-третьих, обработка больших объемов измерений подразумевает автоматизацию, включающую в себя возможность адаптивной (внутри алгоритма) оценки параметров, использование которых приводит к получению более достоверных результатов.

С математической точки зрения связь между мощностью лидарного сигнала и оптическими характеристиками на основных длинах волн λ_{0i} для двухкомпонентной среды и в приближении однократного рассеяния описывается системой так называемых лидарных уравнений:

$$P(\lambda_{0i}, z) = \frac{A_0}{z^2} [\beta_m(\lambda_{0i}, z) + \beta_a(\lambda_{0i}, z)] \times \exp \left\{ -2 \int_0^z [\sigma_m(\lambda_{0i}, z') + \sigma_a(\lambda_{0i}, z')] dz' \right\}, \quad (1)$$

где $P(\lambda_{0i}, z)$ — мощность сигнала, обусловленного молекулярным и аэрозольным рассеянием; $\beta_m(\lambda_{0i}, z)$, $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ — коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния; $\sigma_m(\lambda_{0i}, z)$, $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ — коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления для длины волны λ_{0i} соответственно; A_0 — аппаратная постоянная. Характеристики молекулярного рассеяния могут быть рассчитаны по измеряемым с помощью зондов либо модельным высотным

профилям температуры и давления. Каждое из уравнений системы (1) содержит два неизвестных параметра — коэффициент обратного рассеяния $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ и коэффициент ослабления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$. Решение системы (1) может быть получено только с использованием априорной информации о связи между коэффициентами — так называемом лидарном отношении

$$S_a(\lambda_{0i}, z) = \sigma_a(\lambda_{0i}, z) / \beta_a(\lambda_{0i}, z).$$

Спектрально *независимые* методы обращения (1) относительно $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ [8] либо относительно $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ [9, 10] основаны на точных решениях соответствующих лидарных уравнений. Ошибки восстановления параметров определяются точностью задания априорной информации — значений $\beta_a(\lambda_{0i}, z_*)$ либо $\sigma_a(\lambda_{0i}, z_*)$ в калибровочной точке z_* и спектрального хода лидарного отношения. В рамках настоящего исследования проблемы калибровки мы касаться не будем (методы калибровки решений можно найти в работе [10]). Ниже мы сконцентрируем свое внимание на проблеме априорного задания значений лидарного отношения. Предлагаемый метод относится к разряду спектрально *зависимых* методов, которые сводятся к параметризации связи между коэффициентами на различных длинах волн и определению неизвестных параметров из системы (1) [11–13]. В полном объеме аналитические решения для данной задачи пока не найдены, а применение итерационных процедур накладывает дополнительные ограничения на обоснованность используемой параметризации.

Раздел 2 посвящен методам интерпретации данных многочастотного зондирования в отсутствие КР-сигналов. Параметрическая зависимость связи между оптическими коэффициентами на различных длинах волн вводится на основе известной формулы Ангстрема [14]. Поскольку спектральный ход связан со спектром распределения частиц по размерам, в подразделе 2.1 рассматриваются возможности применения формулы Ангстрема для логарифмически нормального распределения аэрозольных частиц по размерам. Анализ параметров Ангстрема позволяет выделять аэрозольные слои с различными рассеивающими свойствами и оценивать среднее значение лидарного отношения в пределах каждого выделенного слоя (см. подраздел 2.2).

Наличие рамановских каналов в многочастотных лидарных системах позволяет дополнить систему (1) системой уравнений на смещенных длинах волн λ_{Ri} :

$$P(\lambda_{Ri}, z) = \frac{A_R}{z^2} \beta_{N_2}(\lambda_{Ri}, z) \exp \left\{ - \int_0^z [\sigma_m(\lambda_{0i}, z') + \sigma_a(\lambda_{0i}, z') + \sigma_m(\lambda_{Ri}, z') + \sigma_a(\lambda_{Ri}, z')] dz' \right\}. \quad (2)$$

Молекулярные составляющие $\beta_{N_2}(\lambda_{Ri}, z)$, $\sigma_m(\lambda_{0i}, z)$, $\sigma_m(\lambda_{Ri}, z)$ также могут быть рассчитаны из профилей температуры и давления, а совместное решение (1) и (2) дает возможность одновременно определять

профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления в видимом и ультрафиолетовом диапазонах [15]. К сожалению, регистрация сигналов, обусловленных комбинационным рассеянием (КР-сигналов), в дневное время наблюдений из-за фона солнечного излучения представляет сложную техническую проблему. Большинство же систем, основанных на Nd:YAG-лазере и используемых в лидарных сетях, обеспечивают регистрацию КР-сигналов только для измерений в темное время суток. Поэтому в дальнейшем под дневными наблюдениями мы будем иметь в виду измерения сигналов, обусловленных только упругим рассеянием на длинах волн λ_{0i} , а под ночными – сигналов, обусловленных упругим и комбинационным рассеянием, $\lambda_{0i} + \lambda_{Ri}$.

В разделе 3 рассматриваются методы интерпретации ночных измерений. Обработка ночных измерений (при наличии КР-каналов) является более обеспеченной информационно и предпочтительной с точки зрения восстановления параметров и построения модели высотного распределения оптических характеристик аэрозоля. Используемые алгоритмы включают устойчивый метод численного дифференцирования (2). Преобразование области допустимых значений коэффициента ослабления сводит задачу к восстановлению профиля лидарного отношения, что приводит к повышению разрешения по сравнению с традиционными методами.

В разделе 4 обсуждаются перспективы использования разработанного блока алгоритмов для рутинной обработки многочастотных лидарных измерений в рамках программ CIS-LiNet.

1. Описание лидарной системы

В Институте оптики атмосферы СО РАН разработан и создан стационарный лидар ЛОЗА-С, в котором полностью реализована схема одновременного наблюдения лидарных сигналов упругого и комбинационного рассеяния при облучении среды на лазерных длинах волн 1064, 532 и 355 нм. Лидар построен на основе лазера LOTIS-2135 на Nd:YAG и приемного зеркального телескопа системы Кассегрена диаметром 300 мм. Основные параметры лидара: энергия излучения на длинах волн 355, 532, 1064 нм равна соответственно 40, 120, 140 мДж, диаметр зондирующего пучка 50 мм, расходимость 0,5 мрад, поле зрения приемника 1 мрад. Кроме эхосигналов упругого рассеяния лидар регистрирует сигналы комбинационного рассеяния на молекулярном азоте (387 и 607 нм) и в водяном паре (407 нм). Расстояние от основного зеркала до излучателя (база лидара) составляет 0,6 м. При выбранных базе и поле зрения лидара рабочая зона лидара начинается с расстояния 700 м, что позволяет устранить сигнал от ближней зоны, выходящий за рамки динамического диапазона фотоприемников. Кроме указанного на схеме зеркала, вблизи излучателя (база 20 см) установлен второй приемный телескоп с объективом диаметром 20 мм для приема сигналов из ближней зоны (70–1500 м).

Принципиальная оптическая схема лидара приведена на рис. 1.

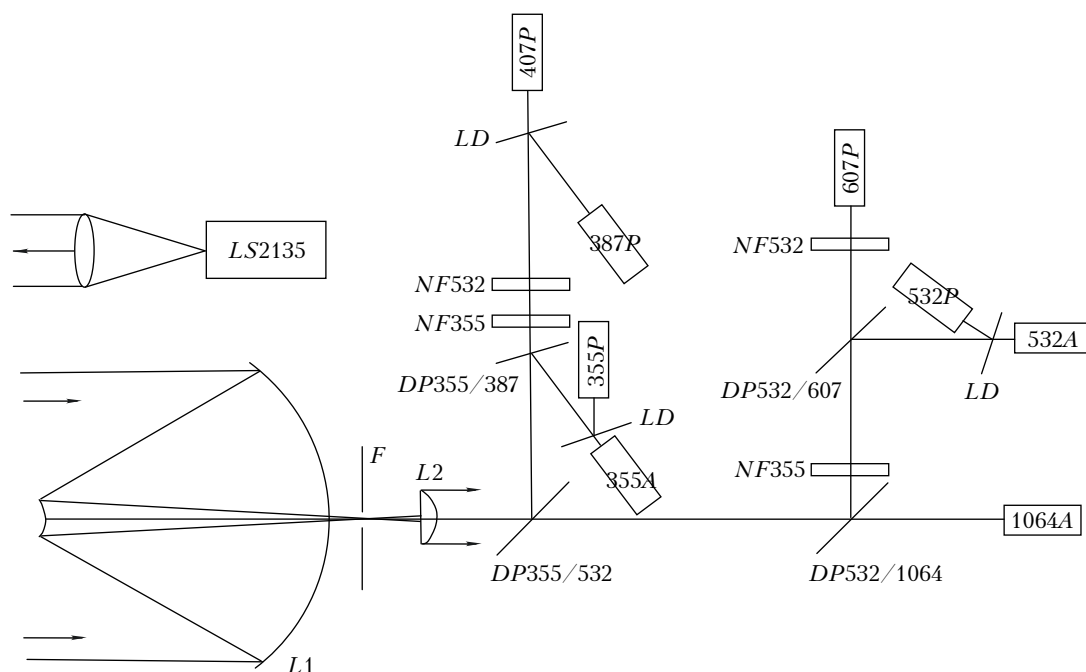


Рис. 1. Оптическая схема лидара ЛОЗА-С: $L1-L2$ – приемный телескоп с диафрагмой поля зрения F ; NF – заградительные фильтры на указанную длину волны; DP – дихроичные зеркала, до косой линейки указана длина волны преимущественно отражающегося излучения, после – проходящего; LD – неселективные спектроделители. Буквы A и P после указанных длин волн фотоприемников обозначают соответственно аналоговый и счетнофотонный режимы работы ФЭУ

Система спектрального разделения принимаемых сигналов основана на последовательном расщеплении пучка с помощью дихроичных пластинок (*DP*). Ослабление излучения возбуждающей линии с помощью обрезających (*NF*) фильтров в сумме с интерференционными светофильтрами, установленными на каждом фотоприемнике, позволяет осуществить подавление возбуждающего излучения (355 и 532 нм) на каналах комбинационного рассеяния на уровне 10^{-10} для 387 и 407 нм и 10^{-6} для 607 нм.

Сигналы упругого рассеяния на 355 и 532 нм регистрируются в токовом режиме фотоэлектронными умножителями ФЭУ-84 с оригинальными (разработка ИОА) блоками питания, позволяющими устранять влияние фоновых солнечных засветок на чувствительность ФЭУ. Постоянная засветка при этой схеме питания не изменяет межэлектродных напряжений. ФЭУ запирается с помощью электронного ключа, синхронизованного по времени с моментом поджига лампы накачки. Это предохраняет ФЭУ от избыточного анодного тока в промежутках между лидарными сигналами. Испытания показали, что до засветок, соответствующих среднему анодному току 10 мА, коэффициент усиления ФЭУ неизменен.

Оцифровка аналоговых сигналов на длинах волн 355 и 532 нм производится 12-разрядными АЦП (ЛА10-12USB-У фирмы «Руднев–Шиляев») с пространственным разрешением от 1,5 м. Сигнал на длине

волны 1064 нм регистрируется фотоприемным модулем ЛФД-30956-TE разработки ИФ НАНБ, в состав которого входит лавинный фотодиод С30956Е фирмы «Perkin & Elmer» с микрохолодильником и 14-разрядным АЦП. Сигналы комбинационного рассеяния регистрируются фотоприемными модулями Н5783Р фирмы «Hamamatsu», с усилителями разработки ИОА и счетной платой PMS-400А фирмы «Becker & Hickl GmbH», позволяющей проводить счет фотонов до частоты 800 МГц с пространственным разрешением 37,5 м. Для корректного сравнения сигналов комбинационного и упругого рассеяния часть (около 5%) излучения на 355 и 532 нм отводится в аналогичные счетные каналы. При частоте повторения импульсов лазера 10 Гц и накоплении фотонов в течение 30 мин сигналы КР на молекулярном азоте в отсутствие облачности уверенно регистрируются до высоты тропопаузы. Пробные сигналы КР водяным паром на длине волны 407 нм показывают возможность регистрации водяного пара до высот 2–4 км в зависимости от синоптических условий.

На рис. 2 показаны примеры регистрации лидарных сигналов 05.05.07 г. в 16:20 дня в почти безоблачных условиях и в 22:30–23:30 в условиях облачных слоев среднего и высокого ярусов. Сигналы КР регистрируются в режиме счета фотонов в темное время суток.

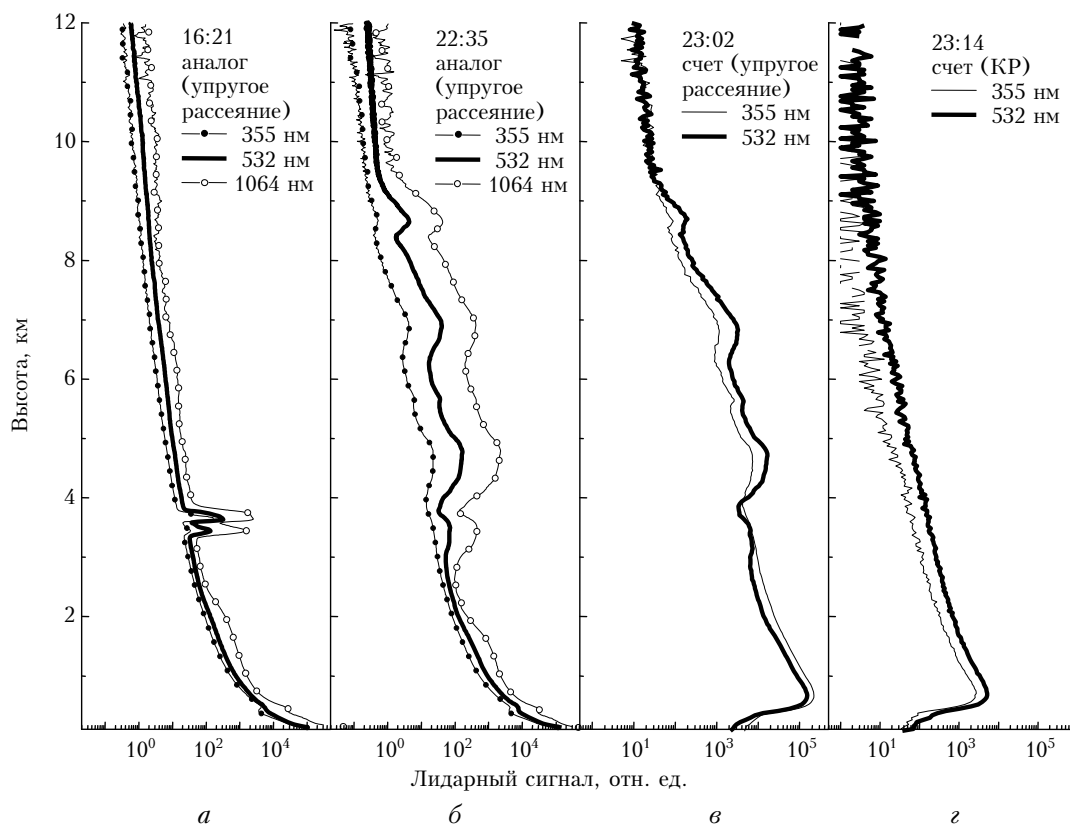


Рис. 2. Лидарные сигналы, зарегистрированные 5 мая 2007 г. в дневное (а) и ночное (б–г) время

2. Интерпретация данных зондирования в дневное время

Рассмотрим более подробно интерпретацию данных зондирования в дневное время (в отсутствие КР-каналов). Дневные наблюдения очень важны, поскольку основное изменение аэрозольных характеристик в пограничном слое происходит в светлое время суток. Если под коэффициентом $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ иметь в виду не «истинный» коэффициент ослабления, относительно которого методы обращения уравнений (1) не информативны [15], а произведение коэффициента обратного рассеяния на среднее значение лидарного отношения, то *независимые* решения (1) согласно [8, 9] имеют вид

$$\sigma_a(\lambda_{0i}, z) = S_a(\lambda_{0i})\beta_a(\lambda_{0i}, z) = S_a(\lambda_{0i}) \left[-\beta_m(\lambda_{0i}, z) + \frac{\psi(\lambda_{0i}, z)}{\frac{\psi(\lambda_{0i}, z_*)}{\beta_a(\lambda_{0i}, z_*) + \beta_m(\lambda_{0i}, z_*)} + 2 \int_z^{z_*} S_a(\lambda_{0i})\psi(\lambda_{0i}, z') dz'} \right], \quad (3)$$

где

$$\psi(\lambda_{0i}, z) = P(\lambda_{0i}, z)z^2 \times \exp \left\{ 2 \int_z^{z_*} [S_a(\lambda_{0i}) - S_m(\lambda_{0i})] \beta_m(\lambda_{0i}, z') dz' \right\}.$$

Решения (3) являются точными решениями (1), однако их практическое использование требует априорного задания средних значений лидарного отношения, $S_a(\lambda_{0i}) \neq S_a(\lambda_{0j})$. Если учесть, что различная природа накопления аэрозоля в пограничном слое и свободной атмосфере предполагает различные значения $S_a(\lambda_{0i})$ в каждом из слоев, то решение системы (1) требует спектрального хода лидарного отношения. Таким образом, связь между рассеивающими свойствами аэрозольных частиц на различных длинах волн должна быть введена (или оценена) *a priori*. Когда число рабочих длин волн невелико, удобной является аппроксимация зависимостей $\ln \sigma_a(\lambda_{0i}, z)$, $\ln \beta_a(\lambda_{0i}, z)$ рядом Тейлора по степеням приращений $\Delta \ln(\lambda)$ [11]:

$$\begin{aligned} \ln \beta_a(\lambda_{0j}, z) &= \ln \beta_a(\lambda_{0i}, z) + \frac{\partial \ln \beta_a(\lambda_{0i}, z)}{\partial \ln \lambda} \times \\ &\times \ln \left[\frac{\lambda_{0j}}{\lambda_{0i}} \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \ln \beta_a(\lambda_{0i}, z)}{\partial (\ln \lambda)^2} \ln^2 \left[\frac{\lambda_{0j}}{\lambda_{0i}} \right] + \dots, \\ \ln \sigma_a(\lambda_{0j}, z) &= \ln \sigma_a(\lambda_{0i}, z) + \frac{\partial \ln \sigma_a(\lambda_{0i}, z)}{\partial \ln \lambda} \times \\ &\times \ln \left[\frac{\lambda_{0j}}{\lambda_{0i}} \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \ln \sigma_a(\lambda_{0i}, z)}{\partial (\ln \lambda)^2} \ln^2 \left[\frac{\lambda_{0j}}{\lambda_{0i}} \right] + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Если достаточно ограничиться первыми двумя членами разложения (4), то параметры $\partial \ln \beta_a / \partial \ln \lambda = \eta_\beta$ и $\partial \ln \sigma_a / \partial \ln \lambda = \eta_\sigma$ являются показателями убывания по длине волны коэффициентов $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ и $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ в формуле Ангстрема [14], $\beta = \text{const} / \lambda^{\eta_\beta}$ и $\sigma = \text{const} / \lambda^{\eta_\sigma}$ соответственно.

Формула Ангстрема — возможность использования только линейных членов в разложении (4) — применима для степенной модели функции распределения аэрозольных частиц по размерам [16], но, как показали исследования [17], для тропосферного аэрозоля более обоснованным является логарифмически нормальное распределение. Таким образом, на первом этапе необходимо оценить возможность использования модели (4) для параметризации связи между оптическими коэффициентами.

2.1. Особенности изменения параметров Ангстрема для трех моделей аэрозоля

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов параметров Ангстрема; расчеты были выполнены по теории Ми [18] для трех моделей аэрозоля. Предполагалось, что аэрозоль состоит из частиц мелкодисперсной (МДФ) и грубодисперсной (ГДФ) фракций и функция распределения частиц по размерам для каждой фракции соответствует логарифмически нормальному распределению

$$\begin{aligned} F(r) &= \frac{dV(r)}{d \ln r} = \\ &= \sum_{i=\text{МДФ, ГДФ}} \frac{V_i}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_i} \exp \left\{ -\frac{(\ln r - \ln r_i)^2}{2(\ln \sigma_i)^2} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

конкретные значения параметров (таблица) для каждого типа аэрозоля были взяты нами из работ [19, 20].

Модели аэрозоля [19] были выделены на основе статистического анализа многочисленных измерений, включающих в себя данные AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) [20], и ряда международных программ по исследованию физических и химических свойств аэрозоля. Одним из ключевых параметров, определяющих разницу аэрозольных типов, является отношение между вкладом в объемный спектр частиц мелкодисперсной и грубодисперсной фракций. Из шести моделей аэрозоля — «desert dust», «biomass burning», «rural background», «polluted continental», «marine» и «dirty pollution» — были выбраны три: «polluted continental» (вклад МДФ является определяющим), «biomass burning» (вклады обеих мод сравнимы) и «rural background» (вклад ГДФ является определяющим). Мы не стали рассматривать модели пылевого аэрозоля, поскольку пылевые частицы имеют несферическую форму и их рассеивающие свойства не могут быть описаны в рамках теории Ми.

Недостатком моделей являются фиксированные значения комплексного показателя преломления $m = m_R - im_I$ и параметров, входящих в (5).

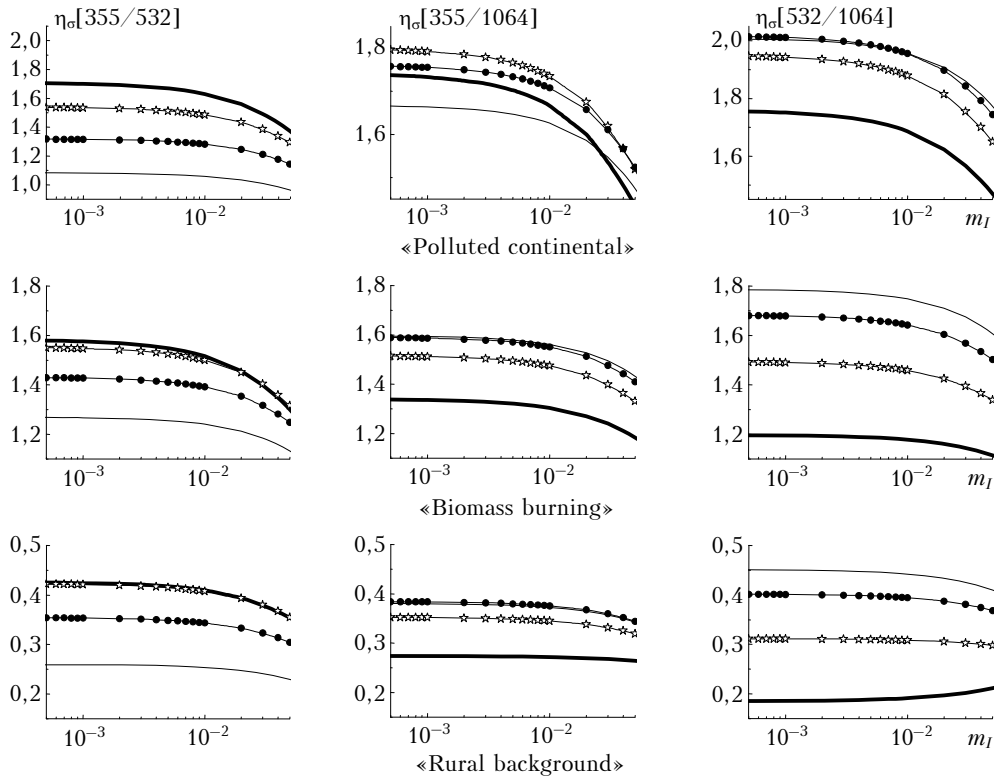


Рис. 3. Изменения параметров Ангрстрема $\eta_{\sigma}(\lambda_i/\lambda_j)$ для коэффициента ослабления в зависимости от комплексного показателя преломления $m = m_R - im_I$ (для трех моделей аэрозоля). Кривые показывают вариации $\eta_{\sigma}(\lambda_i/\lambda_j)$ при фиксированном значении $m_R = 1,35$ (—); 1,45 (—☆—); 1,55 (—●—); 1,65 (—)

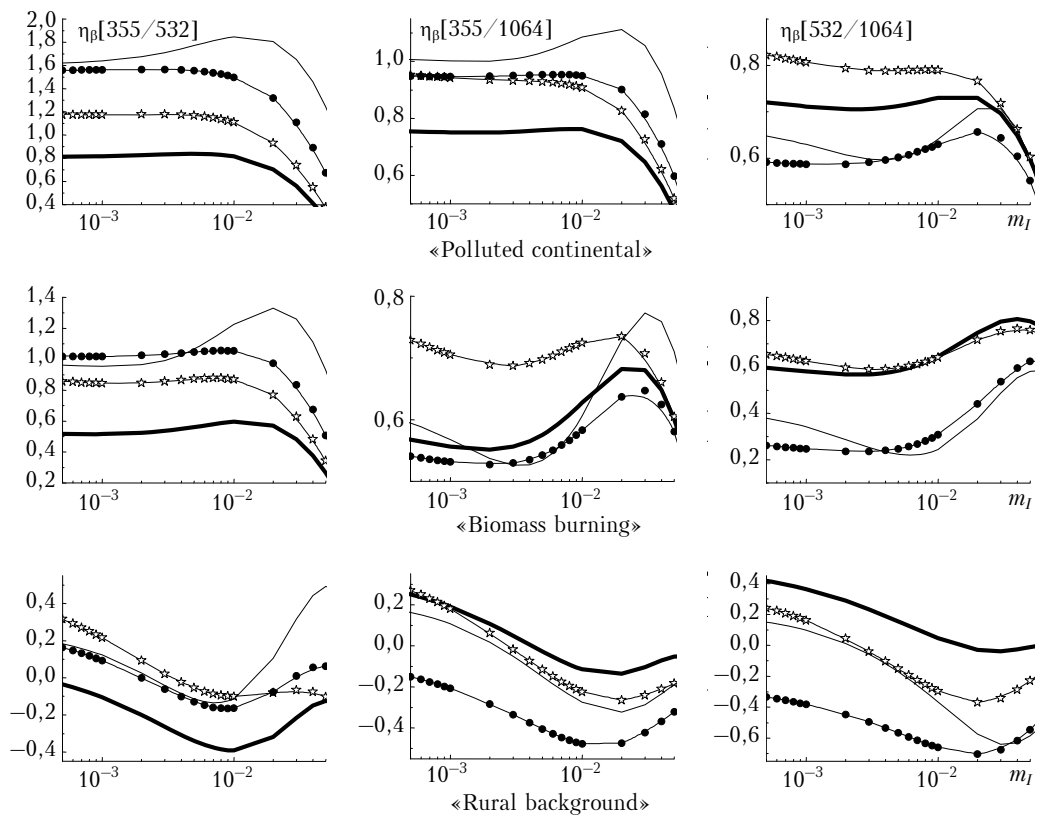


Рис. 4. Изменения параметров Ангрстрема $\eta_{\beta}(\lambda_i/\lambda_j)$ для коэффициента обратного рассеяния в зависимости от комплексного показателя преломления $m = m_R - im_I$ (для трех моделей аэрозоля). Кривые показывают вариации $\eta_{\beta}(\lambda_i/\lambda_j)$ при фиксированном значении $m_R = 1,35$ (—); 1,45 (—☆—); 1,55 (—●—); 1,65 (—)

Параметры распределения частиц по размерам для различных моделей аэрозоля [19]

Параметр	«Polluted continental»	«Biomass burning»	«Rural background»
Средний радиус частиц для мелкодисперсной фракции (МДФ), $r_{\text{МДФ}}$, мкм	0,16	0,14	0,21
Средний радиус частиц для грубодисперсной фракции (ГДФ), $r_{\text{ГДФ}}$, мкм	3,55	3,73	2,63
Ширина спектра для МДФ, $\ln\sigma_{\text{МДФ}}$	0,425	0,45	0,48
Ширина спектра для ГДФ, $\ln\sigma_{\text{ГДФ}}$	0,73	0,76	0,64
Отношение вкладов двух фракций в спектр, $V_{\text{МДФ}}/V_{\text{ГДФ}}$	0,53/0,47 (1,13)	0,33/0,67 (0,49)	0,065/0,935 (0,07)
Действительная часть показателя преломления, m_R	1,404	1,517	1,38 (МДФ) 1,455 (ГДФ)
Мнимая часть показателя преломления, m_I	0,0063	0,0234	0,0001(МДФ) 0,0034 (ГДФ)

Нам хотелось не только оценить разброс значений параметров Ангстрема для различного набора длин волн и конкретной модели аэрозоля, но и посмотреть, существуют ли закономерности изменения $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$ и $\eta_\beta(\lambda_i/\lambda_j)$ при изменении параметров модели. Конкретные значения диапазона изменчивости параметров (5), полученные на основе анализа различных литературных источников, можно найти, например, в [21].

Рис. 3 иллюстрирует изменения параметров Ангстрема для коэффициента ослабления в зависимости от комплексного показателя преломления. Мнимая часть показателя преломления варьировалась в диапазоне $m_I \in [0,005; 0,5]$. Семейство кривых на рис. 3 получено при фиксированных значениях действительной части показателя преломления $m_R \in [1,35; 1,65]$ с шагом $\Delta m_R = 0,1$. Выбранные нами границы изменения показателя преломления достаточно широки и полностью охватывают границы изменения $m = m_R - im_I$ для каждой модели аэрозоля. Для всех моделей аэрозоля возрастание m_I приводит к уменьшению значений $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$, в то же время с увеличением m_R параметры Ангстрема для $(\lambda_{0i}/\lambda_{0j}) = (355/1064)$ и $(\lambda_{0i}/\lambda_{0j}) = (532/1064)$ монотонно возрастают, а для $(\lambda_{0i}/\lambda_{0j}) = (355/532)$ убывают.

При фиксированном показателе преломления возрастание вклада МДФ аэрозоля (увеличение параметра $V_{\text{МДФ}}/V_{\text{ГДФ}}$) приводит к монотонному возрастанию параметров Ангстрема $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$ для всех трех рассмотренных моделей. Возрастание среднего радиуса для МДФ приводит к убыванию $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$ для моделей «polluted continental» и «biomass bur-

ning» и не меняет $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$ для модели «rural background». Изменение остальных параметров, входящих в (5), практически не влияет на ход $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что $\eta_\sigma(355/1064) \cong \eta_\sigma(532/1064)$ и разброс $\eta_\sigma(\lambda_i/\lambda_j)$ в пределах одного класса аэрозоля составляет не более 10%.

Рис. 4 показывает границы изменения параметров Ангстрема для коэффициентов обратного рассеяния $\eta_\beta(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$ при тех же моделях аэрозоля, структура рис. 4 совпадает со структурой рис. 3. Для коэффициентов обратного рассеяния изменчивость параметров Ангстрема в пределах одной модели аэрозоля выше, и монотонного изменения $\eta_\beta(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$ в зависимости от изменения показателя преломления мы не наблюдаем.

Таким образом, для коэффициента ослабления связь между рассеивающими свойствами аэрозоля на различных длинах волн может быть введена *a priori* на основании формулы Ангстрема [только линейных членов в разложении (4)]. Для коэффициента обратного рассеяния применение формулы Ангстрема требует большей осторожности. Ниже мы используем соотношение $\eta_\sigma(355/1064) \cong \eta_\sigma(532/1064)$ в алгоритме оценки спектрального хода лидарного отношения при восстановлении коэффициентов ослабления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$.

2.2. Выделение аэрозольных слоев с различными рассеивающими свойствами и оценка среднего лидарного отношения

Представленный ниже алгоритм основан на следующих свойствах тропосферного аэрозоля: послойной структуре вертикального распределения оптических характеристик аэрозоля и ограниченном диапазоне изменчивости лидарного отношения, $S_a(\lambda_{0i}, z) \in [10; 150 \text{ ср}]$ (см., например, [22, 23]). Суть алгоритма состоит в следующем. Формально, соотношение (3) дает нам семейство решений $\sigma_a(\lambda_{0i}, z, S_a(\lambda_{0i}))$, зависящих от значений $S_a(\lambda_{0i})$. Чтобы пояснить это, обратимся к рис. 5, на котором представлены профили коэффициента ослабления (рис. 5, а–в) и лидарного отношения (рис. 5, г–е).

В качестве данных многочастотного зондирования использовались модельные сигналы, рассчитанные методом Монте-Карло и предложенные для второго этапа тестирования алгоритмов интерпретации [24]. При обработке сигналов согласно (3) значения $\sigma_a(\lambda_{0i}, z_*)$ в калибровочной точке ($z_* = 8 \text{ км}$) и составляющие молекулярного рассеяния предполагались известными. Кривые показывают границы изменения $\sigma_a(\lambda_{0i}, z, S_a(\lambda_{0i}))$ в зависимости от заданных значений лидарного отношения. Чтобы выделить из семейства $\sigma_a(\lambda_{0i}, z, S_a(\lambda_{0i}))$ единственное решение, по возможности близкое к истинному, необходимо указать какой-то признак, отличающий искомого решение от остальных. Таким признаком может служить выполнение условия $\eta_\sigma(355/1064) \cong \eta_\sigma(532/1064)$.

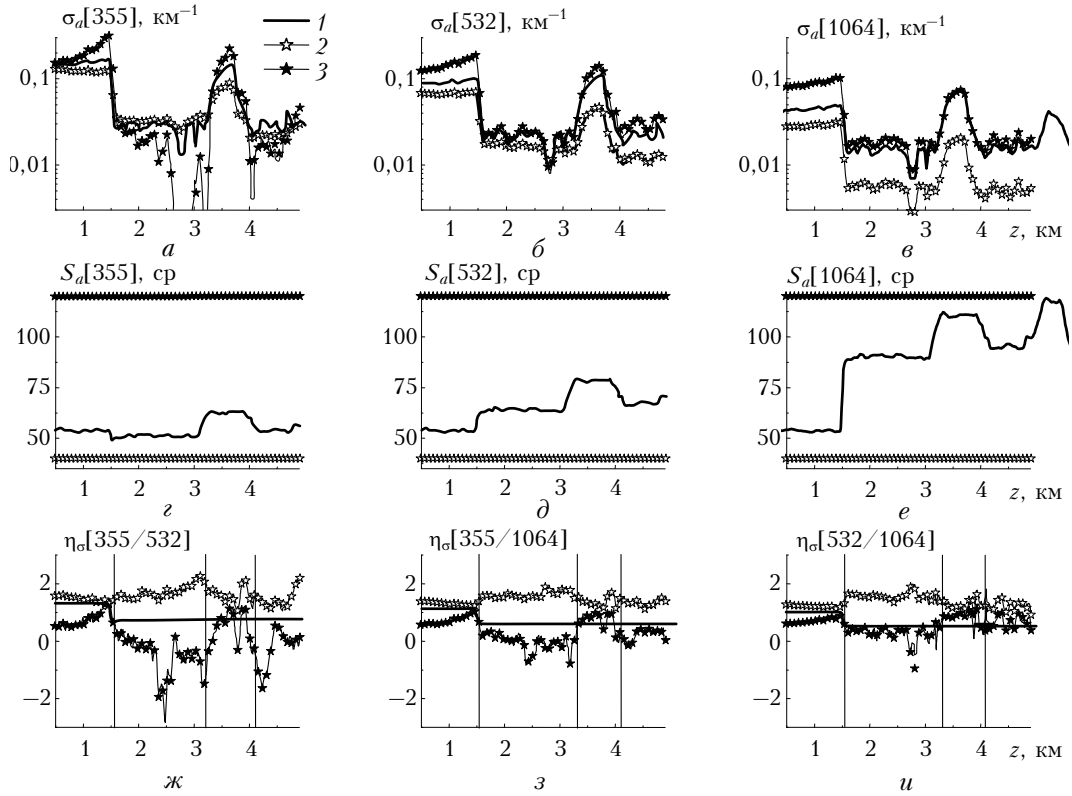


Рис. 5. К проблеме априорной неопределенности по лидарному отношению при обращении лидарных уравнений в отсутствие КР-сигналов: а–в – профили коэффициентов ослабления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$, з–е – лидарного отношения $S_a(\lambda_{0i})$, ж–и – параметров Ангрстрема $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$; кривые 1 – модельные профили, кривые 2 – результат восстановления при $S_a(\lambda_{0i}) = 40$ ср, кривые 3 – 120 ср

Чтобы включить данное условие в алгоритм восстановления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z, S_a(\lambda_{0i}))$, на интервале $[z_0, z_{\max}]$ можно использовать следующую процедуру обработки сигналов:

1. Задаем набор $[S_a(\lambda_{01}), S_a(\lambda_{02}), S_a(\lambda_{03})]$.
2. По нему согласно (3) рассчитываем $\sigma_a(\lambda_{0i}, z, S_a(\lambda_{0i}))$ и $\eta_\sigma[\lambda_{0i}/\lambda_{0j}, S_a(\lambda_{0i}), S(\lambda_{0j})]$.
3. Оцениваем

$$\Phi(S_a(\lambda_{01}), S_a(\lambda_{02}), S_a(\lambda_{03})) = \int_{z_0}^{z_{\max}} \left\{ \frac{\eta_\sigma[355/1064, S_a(355), S_a(1064)]}{\eta_\sigma[532/1064, S_a(532), S_a(1064)]} - 1 \right\}^2 dz. \quad (6)$$

4. Повторяя шаги 1–3 для всего набора $[S_a(\lambda_{01}), S_a(\lambda_{02}), S_a(\lambda_{03})]$:

$$S_a(\lambda_{0i}) \in [S_{\min} = 10 \text{ ср}, S_{\max} = 150 \text{ ср}], \quad \Delta S_a(\lambda_{0i}) = 5 \text{ ср},$$

не обязательно $S_a(\lambda_{0i}) = S_a(\lambda_{0j})$, находим значения функционала (6). Его минимальное значение дает набор значений $S_a(\lambda_{0i})$, при которых среднее квадратическое отклонение $\eta_\sigma(355/1064)$ от $\eta_\sigma(532/1064)$ на интервале $[z_0, z_{\max}]$ минимально.

Выполнив шаги 1–4, оценим среднее значение лидарного отношения, с помощью которого согласно (3) можно восстанавливать коэффициенты ослабления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z, S_a(\lambda_{0i}))$.

Рассмотрим более подробно нижнюю часть рис. 5. Порядок кривых совпадает с кривыми для профилей $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ и $S_a(\lambda_{0i}, z)$. В диапазоне высот от 0,5 до 5 км можно выделить четыре интервала – $[0,5; 1,5 \text{ км}]$, $[1,5; 3,2 \text{ км}]$, $[3,2; 4,2 \text{ км}]$ и $[4,2; 4,7 \text{ км}]$ – различного поведения параметров Ангрстрема. Внутри интервалов профили примерно постоянны (не обязательно равны между собой); на границе интервалов происходит скачкообразное изменение значений $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$, наиболее выраженное для параметра $\eta_\sigma(355/532)$. Подобное поведение параметров Ангрстрема является характерным не только для данного модельного примера. Проведенные нами исследования показывают, что при переходе от пограничного слоя к свободной атмосфере почти всегда наблюдается похожая картина.

Скачкообразное изменение значений $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$ мы считаем тем критерием, по которому можно разделять слои с различными рассеивающими свойствами. Действительно, если в (5) положить $V_i = V_i(z) = A(z)M_i(z)$; где $A(z)$ – счетная концентрация аэрозольных частиц; $M_i(z)$ – весовой вклад i -й фракции в спектр, то можно показать, что равенство параметров Ангрстрема в некотором высотном интервале $[z_k, z_{k+1}]$ означает, что внутри интервала рассеивающие свойства аэрозоля остаются неизменными, т.е. $M_i(z)$, комплексный показатель преломления и лидарное отношение не меняются.

С другой стороны, формула (3) получена в предположении $S_a(\lambda_{0i}, z) = \text{const}$. Формально в знаменателе (3) еще должно присутствовать слагаемое, зависящее от производной $dS_a(\lambda_{0i}, z)/dz$. Традиционно его не принято учитывать, поскольку для аэрозоля его вклад имеет значение только на границе изменения лидарного отношения, а введение дополнительной априорной информации о спектральном поведении $dS_a(\lambda_{0i}, z)/dz$ может привести к большим ошибкам при обработке сигналов. Однако анализ параметров Ангстрема $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j}, S_a(\lambda_{0i}), S(\lambda_{0j}))$, чувствительных к любым погрешностям обработки сигналов, позволяет определять границы аэрозольных слоев с различными рассеивающими свойствами.

Итак, предположим, что мы разделили трассу зондирования на интервалы $[z_k, z_{k+1}]$, где функции $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$ примерно постоянны (не обязательно равны между собой, см. рис. 5, ж–и). Предположим также, что интервал $[z_k, z_{k+1}]$ является достаточно протяженным и погрешности регистрации сигналов не оказывают существенного влияния на средние значения восстанавливаемых параметров. Выполняя шаги 1–4 для каждого $[z_k, z_{k+1}]$, мы получим высотный профиль лидарного отношения. Одновременно оценивается профиль параметров Ангстрема, имеющий самостоятельное значение при дальнейшей интерпретации результатов.

На рис. 6 представлены результаты и ошибки восстановления оптических характеристик, полученные после реализации разработанного алгоритма.

В нижней части рисунка представлены ошибки восстановления коэффициента ослабления по формуле

$$\delta\{\sigma_a(\lambda_{0i}, z)\} = \frac{\sigma_a(\lambda_{0i}, z) - \hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z)}{\sigma_a(\lambda_{0i}, z)} \cdot 100,$$

где $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$, $\hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z)$ – модельный и восстановленный профили соответственно. Кривые 1 показывают ошибки восстановления коэффициента ослабления без разбиения трассы на слои; значения $S_a(355) = 50$, $S_a(532) = 70$, $S_a(1064) = 80$ ср определены минимизацией (6) на интервале $[z_0, z_{\text{max}}]$. Кривые 2 иллюстрируют погрешности $\delta\{\sigma_a(\lambda_{0i}, z)\}$ для значений $S_a(\lambda_{0i}, z)$, представленных на рис. 6, z–e кривыми 2.

Анализ результатов позволяет сделать некоторые выводы относительно возможностей разработанного метода. Во-первых, мы избавились от произвола в задании спектрального хода лидарного отношения. Разбиение трассы зондирования на слои с различными рассеивающими свойствами позволяет внутри каждого слоя оценить средние значения $S_a(\lambda_{0i})$, $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$ и уменьшить ошибки восстановления коэффициента ослабления согласно (3). Во-вторых, выражена чувствительность алгоритма к погрешностям регистрации лидарных сигналов (возрастание ошибок восстановления лидарного отношения к концу трассы зондирования). Значит, его использование эффективно для сигналов с аналоговой системой регистрации, и он может применяться для измерений в дневное время в отсутствие КР-сигналов.

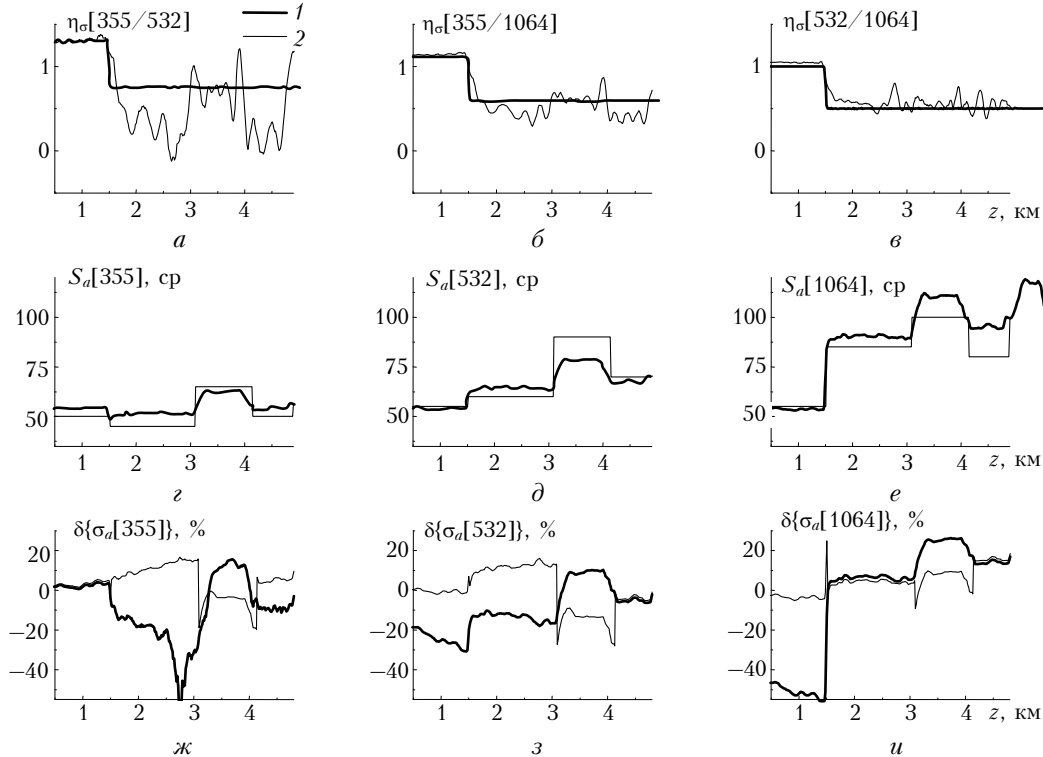


Рис. 6. Восстановление оптических характеристик по данным дневных наблюдений в отсутствие КР-сигналов: параметров Ангстрема $\eta_\sigma(\lambda_{0i}/\lambda_{0j})$ (а–в) и лидарного отношения $S_a(\lambda_{0i}, z)$ (z–e) (кривые 1 соответствуют модельным профилям, кривые 2 – результат их оценки минимизацией (6) при разбиении трассы зондирования на слои); ж–и – ошибки восстановления коэффициента ослабления. Кривые 1 получены для значений $S_a(\lambda_{01} = 355 \text{ нм}) = 50$; $S_a(\lambda_{02} = 532 \text{ нм}) = 70$; $S_a(\lambda_{03} = 1064 \text{ нм}) = 80$ ср, кривые 2 – для профилей $S_a(\lambda_{0i}, z)$, представленных кривыми 2 (z–e)

Еще раз подчеркнем, что под коэффициентом ослабления здесь подразумевается не «истинный» коэффициент ослабления, а произведение коэффициента обратного рассеяния на среднее значение лидарного отношения. Кроме того, существует неоднозначность калибровки профилей в (3). Поэтому интерпретация ночных измерений (при наличии КР-каналов) является более обеспеченной информацией и предпочтительной с точки зрения восстановления параметров и построения спектральной модели высотного распределения оптических характеристик тропосферного аэрозоля.

3. Интерпретация данных зондирования в ночное время

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает возможность одновременно определять профили коэффициентов ослабления и обратного рассеяния в видимом и ультрафиолетовом диапазонах [15]. Согласно [25] преобразуем (1) и (2) к виду

$$\begin{aligned} \Psi(\lambda_{0i}, z, z_*) &= \frac{P(\lambda_{0i}, z)z^2}{P(\lambda_{0i}, z_*)z_*^2} \times \\ &\times [\beta_a(\lambda_{0i}, z_*) + \beta_m(\lambda_{0i}, z_*)] \exp \left\{ -2 \int_z^{z_*} \sigma_m(\lambda_{0i}, z') dz' \right\}, \\ \Psi(\lambda_{Ri}, z, z_*) &= \frac{P(\lambda_{Ri}, z)z^2}{P(\lambda_{Ri}, z_*)z_*^2} \frac{\beta_{N_2}(\lambda_{Ri}, z_*)}{\beta_{N_2}(\lambda_{Ri}, z)} \times \\ &\times \exp \left\{ -2 \int_z^{z_*} [\sigma_m(\lambda_{0i}, z') + \sigma_m(\lambda_{Ri}, z')] dz' \right\}. \end{aligned}$$

Тогда профили оптических параметров могут быть получены из соотношений

$$\begin{aligned} \sigma_a(\lambda_{0i}, z) &= \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{1+\mu} \ln \Psi(\lambda_{Ri}, z, z_*) \right] = \frac{d}{dz} \tau_a(\lambda_{0i}, z), \quad (7) \\ \beta_a(\lambda_{0i}, z) &= -\beta_m(\lambda_{0i}, z) + \frac{\Psi(\lambda_{0i}, z, z_*)}{[\Psi(\lambda_{Ri}, z, z_*)]^{1+\mu}}, \quad (8) \end{aligned}$$

где $\mu = [\lambda_{0i}/\lambda_{Ri}]^{1\sigma}$. Отметим, что никакой априорной информации при определении коэффициента ослабления согласно (7) не требуется и погрешности восстановления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ обусловлены точностью используемых методов численного дифференцирования.

С математической точки зрения задача нахождения первой производной функции $\tau_a(\lambda_{0i}, z)$ сводится либо к вычислению значений оператора дифференцирования $D = d/dz$ в точке [10, 26]:

$$\sigma_a(\lambda_{0i}, z) = \frac{d}{dz} \tau_a(\lambda_{0i}, z), \quad (9)$$

либо к решению интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода [25, 27, 28]:

$$\int_{z_0}^z \sigma_a(\lambda_{0i}, z') dz' = \tau_a(\lambda_{0i}, z). \quad (10)$$

Поскольку численное дифференцирование экспериментальных данных является некорректно поставленной задачей, для обеспечения устойчивости решения (9) или (10) к погрешностям измерения $P(\lambda_{Ri}, z)$ используют априорные предположения об ожидаемых свойствах $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ – о гладкости (как в методе регуляризации Тихонова [27]), либо о статистических характеристиках решения и помех (как в методе оптимальной линейной фильтрации [29]). Если вводимая для регуляризации априорная информация одинакова, то и реализация методов приводит к одинаковым результатам. Проблема лишь в том, что не всякую информацию можно методически использовать.

Для рассматриваемой нами задачи восстановления коэффициента ослабления уравнения (9) и (10) принципиально различаются. Дело в том, что коэффициент ослабления может иметь значительные (несколько порядков) вариации вдоль трассы зондирования. В то же время лидарное отношение изменяется в ограниченных известных пределах (напомним, что мы уже акцентировали на этом внимание в начале раздела 2). Соответственно, при интерпретации КР-сигналов априорные предположения о гладкости и т.п. целесообразно вводить не на коэффициент ослабления, а на лидарное отношение, и использовать его в качестве искомой функции при дифференцировании. Эта идея, впервые в явном виде сформулированная в работе [25], позволяет переходить к другим погрешностям при обработке КР-сигналов.

В собственных алгоритмах мы используем другой подход [28]: формально решаем уравнение (10), но, преобразуя область допустимых значений коэффициента ослабления, задаваемую соотношением

$$\begin{aligned} \sigma_{\min}(z) &= \beta_a(\lambda_{0i}, z) S_{\min} \leq \\ &\leq \hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z) \leq \beta_a(\lambda_{0i}, z) S_{\max} = \sigma_{\max}(z), \quad (11) \end{aligned}$$

где S_{\min} , S_{\max} – нижняя и верхняя границы диапазона изменения $S_a(\lambda_{0i}, z)$, фактически сводим задачу к восстановлению профиля лидарного отношения.

Отметим, что соотношение (8), которое может быть использовано для восстановления коэффициента обратного рассеяния при совместной интерпретации (1) и (2), отличается от общепринятого. Оно в явном виде выражает зависимость значений $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ от отношения сигналов на основной и смещенной длинах волн, без дополнительной коррекции аэрозольного ослабления. Чтобы уменьшить влияние ошибок измерения $P(\lambda_{Ri}, z)$ (особенно значимых для коротких волн) и расширить высотный диапазон восстановления коэффициента обратного рассеяния, в расчетах вместо (8) мы предпочитаем использовать менее точную, но более простую формулу:

$$\beta_a(\lambda_{0i}, z) = -\beta_m(\lambda_{0i}, z) + \frac{\Psi(\lambda_{0i}, z, z_*)}{\exp \left\{ -2 \int_{z_*}^z \hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z') dz' \right\}}, \quad (12)$$

где $\hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z)$ – «пробный» профиль коэффициента ослабления, полученный из (10) без ограничений на область определения $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$.

Процедура обработки сигналов (1) и (2) при интерпретации ночных измерений состоит из следующих шагов:

1. Из (7) согласно (10) определяем $\hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z)$.

2. Из (12) восстанавливаем профиль $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$.

Поскольку профиль оптической толщины

$$\hat{\tau}_a(\lambda_{0i}, z_0, z) = \int_{z_0}^z \hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z') dz'$$

является гладкой функцией, ошибки восстановления коэффициента обратного рассеяния определяются точностью априорного задания значений в калибровочной точке, $\beta_a(\lambda_{0i}, z_*)$.

3. Задаем ограничения на область допустимых значений (11).

4. Для восстановления коэффициента ослабления, удовлетворяющего ограничениям вида (11), применяем итерационную процедуру (подробно она описана в [28]). Выход из итерационной процедуры производится, когда невязка

$$\int_{z_0}^{z_{\max}} \left[\tau_a(\lambda_{0i}, z) - \int_{z_0}^z \sigma_a(\lambda_{0i}, z') dz' \right]^2 dz$$

достигает минимума.

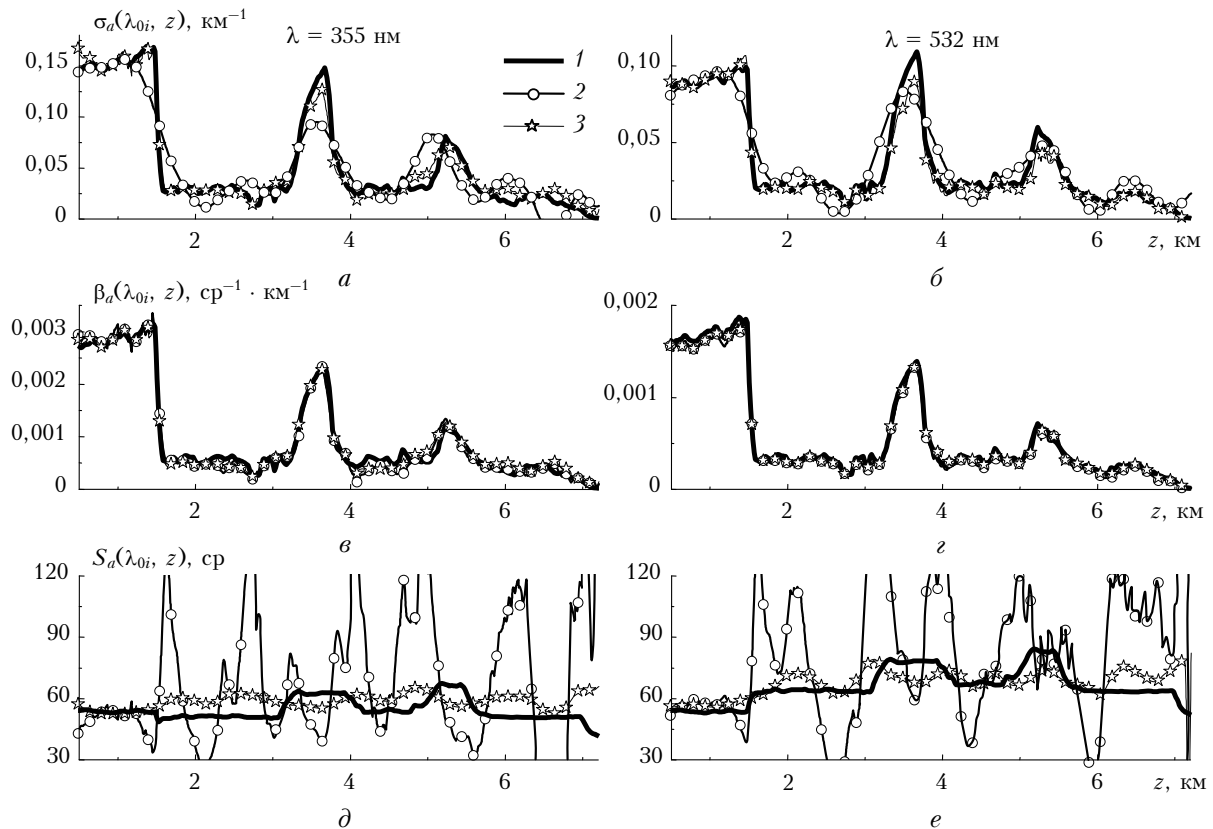


Рис. 7. Восстановление оптических характеристик по данным ночных наблюдений. Кривые 1 соответствуют модельным профилям. Для коэффициента ослабления (а, б) и лидарного отношения (д, е) кривые 2 – результат восстановления методом оптимальной линейной фильтрации, кривые 3 – методом, учитывающим область допустимых значений. Для коэффициента обратного рассеяния (в, г) кривые 2 получены из отношения сигналов, обусловленных упругим и комбинационным рассеянием, кривые 3 – из соотношения (12)

На рис. 7 приведены результаты численного эксперимента по определению коэффициентов ослабления (рис. 7, а, б), обратного рассеяния (рис. 7, в, г) и лидарного отношения (рис. 7, д, е) при совместной интерпретации сигналов (1) и (2). В качестве данных многочастотного зондирования использовались модельные сигналы, рассчитанные методом Монте-Карло и предложенные для второго этапа тестирования алгоритмов интерпретации [24]. При обработке сигналов значения $\sigma_a(\lambda_{0i}, z_*)$ в калибровочной точке ($z_* = 8$ км) и составляющие молекулярного рассеяния предполагались известными. Модельным профилям соответствуют кривые 1. Профили $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$, используемые в (12), представлены на рис. 7, а, б кривыми 2. Кривые 3 иллюстрируют результаты восстановления коэффициента ослабления после окончания итераций. В (11) задавались $S_{\min} = 1$ ср, $S_{\max} = 150$ ср, при этом сходимость итерационной процедуры достигалась при выполнении не более 50 итераций.

В работе [26] можно найти подробное описание методов восстановления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$, основанных на применении регуляризирующих алгоритмов при реализации (9). На рис. 7, а, б [26] приведены результаты восстановления $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ для тестового примера, используемого нами на протяжении всей статьи. Они примерно совпадают с кривыми 2.

Из сопоставления кривых 2 и 3 можно сделать вывод о значительном улучшении качества восстановления коэффициента ослабления при учете его области допустимых значений, что проявляется в отсутствии осцилляций, отрицательных выбросов и более детальном восстановлении тонкой структуры профилей.

На рис. 7, в, г приведены результаты восстановления коэффициента обратного рассеяния. Кривые 2 соответствуют результатам восстановления $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ из отношения сигналов (1) и (2) по методике, предложенной в работе [25], кривые 3 – согласно (12) на выходе из итерационной процедуры. В обоих случаях задавались точные значения параметров в калибровочной точке и проводилось одинаковое сглаживание получаемых профилей. Сопоставление кривых 2 и 3 показывает возможность использования

$$\hat{\tau}_a(\lambda_{0i}, z_0, z) = \int_{z_0}^z \hat{\sigma}_a(\lambda_{0i}, z') dz'$$

для коррекции аэрозольного ослабления. В знаменателе (12) стоит гладкая функция, что приводит к естественному уменьшению «случайных» погрешностей определения $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$. При одновременной регистрации сигналов (1) в аналоговом режиме и режиме счета фотонов остаются только «систематические» погрешности, обусловленные корректностью априорного задания $\beta_a(\lambda_{0i}, z_0)$ и параметра Ангстрема η_σ в (7).

Более подробно преимущества алгоритма численного дифференцирования, учитывающего область допустимых значений, иллюстрируют восстановленные профили лидарного отношения (рис. 7, д, е)

$$S_a(\lambda_{0i}, z) = \sigma_a(\lambda_{0i}, z) / \beta_a(\lambda_{0i}, z).$$

Модельные профили представлены кривыми 1. Кривые 2 – результат оценки лидарного отношения при обращении (10) без ограничений. Кривые 3 получены после выхода из итерационной процедуры; профилям $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$, $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$ соответствуют кривые 3 на рис. 7, а, б и 7, в, г соответственно. Удовлетворительные результаты определения профиля лидарного отношения итерационным методом характерны для всей дистанции зондирования. Мы рекомендуем специалистам, занимающимся вопросами интерпретации данных рамановского лидара, с осторожностью относиться к осцилляциям на профиле коэффициента ослабления, особенно, если они не коррелируют с осцилляциями на профиле коэффициента обратного рассеяния. Критерием отбора может служить профиль лидарного отношения, чувствительный к искажению структуры $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ за счет погрешностей дифференцирования.

4. Дискуссия

В настоящей работе представлены два метода, пригодные для создания пакета алгоритмов обработки данных рутинных лидарных измерений. Опыт авторов при интерпретации лидарных сигналов позволил сформулировать два ключевых требования

к методам восстановления оптических параметров: во-первых, минимизация «случайных» и «систематических» погрешностей; во-вторых, возможности реализации методов в условиях априорной неопределенности.

Изложенный в разделе 2 алгоритм выделения аэрозольных слоев с одинаковыми рассеивающими свойствами и оценкой среднего лидарного отношения в пределах слоя позволил решить проблему априорной неопределенности при задании спектрального хода лидарного отношения, важную для интерпретации дневных измерений (в отсутствие КР-каналов). Параллельно алгоритм позволяет оценить среднее значение параметра Ангстрема в пределах слоя. По нашему мнению, анализ параметров Ангстрема является удобным и чувствительным инструментом для идентификации «систематических», приводящих к смещенным оценкам искомого параметра погрешностей при интерпретации многочастотных измерений. Он позволяет оценить границы влияния геометрической функции лидара, выделить фоновую составляющую для аналоговых сигналов. При наличии перистых облаков появляется возможность полностью решить проблему калибровки, в том числе и для длинных волн.

Помимо этого, разделение трассы зондирования на слои, где меняется концентрация частиц, но не их рассеивающие свойства, важно для следующего этапа интерпретации многочастотных измерений – восстановления спектра распределения аэрозольных частиц по размерам и оценки комплексного показателя преломления. Появляется возможность перехода к «ансамблю» измерений с последующей оценкой первых моментов распределений «случайных» погрешностей и искомого спектра и применения методов статистической регуляризации. Определение спектра размеров выходит за рамки настоящей публикации, однако необходимо отметить, что «истинный» профиль коэффициента ослабления является необходимым входным параметром при решении данной задачи [30, 31].

Существует основной принцип решения некорректных обратных задач: чем хуже обусловлена исходная задача, тем большее влияние на качество восстановления оказывает вводимая априорная информация о решении и, следовательно, тем жестче требования к точности ее задания. Методы определения производной согласно (9) или (10) для рассматриваемой задачи различаются возможностью введения априорной информации. При сглаживании сигналов информация о гладкости коэффициента ослабления учесть можно, а о гладкости лидарного отношения нет. Поэтому, с нашей точки зрения, алгоритмы, основанные на решении интегрального уравнения, предпочтительнее.

Обратим внимание на гармоническую структуру профилей лидарного отношения (см. рис. 7, д, е). Осцилляции $S_a(\lambda_{0i}, z)$ практически совпадают с осцилляциями при восстановлении $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ методом оптимальной линейной фильтрации (кривые 2 рис. 7, а, б). Фактически введение ограничений вида (11) дает возможность свести задачу восстановления коэффициента

ослабления к задаче восстановления профиля лидарного отношения и выйти на следующий уровень обработки сигналов, поскольку существенно уменьшает влияние «случайных» погрешностей на точность восстановления оптических параметров. Отметим, что ошибки оценивания $\beta_a(\lambda_{0i}, z_*)$ не сказываются на точности определения коэффициента ослабления при определении ограничений вида (11). Это позволяет использовать результаты рутинных наблюдений $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ для построения региональной модели распределения аэрозольных слоев в тропосфере.

Заключение

Целью настоящей работы являлась разработка методов восстановления оптических характеристик аэрозоля — коэффициентов ослабления, обратного рассеяния и лидарного отношения — по данным вертикального зондирования многочастотным рамановским лидаром. Чтобы уменьшить влияние информационной неопределенности на результаты обработки сигналов, особое внимание при разработке методов уделялось возможностям введения априорной информации о свойствах аэрозоля — информации о послонной структуре вертикального распределения и ограниченном диапазоне изменчивости лидарного отношения. На каждом этапе обработки сигналов мы предусмотрели адаптивную оценку параметров, использование которых приводит к получению более достоверных результатов.

Для дневных наблюдений, важных для исследования трансформации аэрозоля в пограничном слое, предложен алгоритм для разделения слоев с различными рассеивающими свойствами и оценки среднего значения лидарного отношения и параметра Ангстрема в пределах каждого слоя. Применение алгоритма позволяет избежать произвола в задании спектрального хода лидарного отношения и уменьшить погрешности восстановления оптических параметров. Для интерпретации ночных измерений рассмотрен алгоритм восстановления коэффициентов ослабления, достоинством которого является улучшенное разрешение за счет сужения класса возможных решений. Реализация алгоритма в условиях априорной неопределенности по области допустимых значений $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$ и параметрам регуляризирующего фильтра позволяет восстанавливать высотную изменчивость коэффициента ослабления и лидарного отношения.

Авторы считают своим долгом выразить искреннюю признательность А.П. Чайковскому и Gelso-mina Pappalardo за возможность участия в очередном этапе тестирования алгоритмов восстановления оптических параметров, проводимого в 2006 г.

Мы также приносим благодарность В.В. Веретенникову, критические замечания которого помогли существенно улучшить структуру статьи и представление полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов CRDF # 2871, РФФИ № 06-05-89500-ННС_а, 07-05-91102-АФГПР_а.

1. Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P. The CALIPSO mission: Spaseborne lidar for observations of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2003. V. 4893. P. 1–11.
2. Bösenberg J., Ansmann A., Baldasano J.M., Balis D., Böckmann C., Calpini B., Chaikovskiy A., Flamant P., Hågård A., Mitev V., Papayannis A., Pelon J., Resendes D., Schneider J., Spinelli N., Trickl T., Vaughan G., Visconti G., Wiegner M. EARLINET: a European aerosol research lidar network // Advances in Laser Remote Sensing / A. Dabas, C. Loth, and J. Pelon, eds. Editions de L'Ecole Polytechnique. 2001. P. 155–158.
3. Murayama T., Sugimoto N., Uno I., Kinoshita K., Aoki K., Hagiwara N., Liu Z., Matsui I., Sakai T., Shibata T., Arao K., Sohn B.-J., Won J.-G., Yoon S.-C., Li T., Zhou J., Hu H., Abo M., Iokibe K., Koga R., Iwasaka Y. Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 16. P. 18345–18359.
4. Chaikovskiy A.P., Ivanov A.P., Balin Yu.S., Elnikov A.V., Tulinov G.F., Plusnin I.I., Bukin O.A., Chen B.B. CIS-LINET — Lidar Network for Monitoring Aerosol and Ozone in CIS Regions // Reviewed and Revised Papers Presented at the 23d ILRC / C. Nagasava and N. Sugimoto, eds. Nara, Japan. 2006. P. 671–672.
5. Böckmann C., Wandinger U., Ansmann A., Bösenberg J., Amiridis V., Boselli A., Delaval A., De Tomasi F., Frioud M., Videnov Grigorov I., Hågård A., Horvat M., Iarlori M., Komguem L., Kreipl S., Larcheveque G., Matthias V., Papayannis A., Pappalardo G., Rocadenbosch F., Rodrigues J.A., Schneider J., Shcherbakov V., Wiegner M. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms // Appl. Opt. 2004. V. 43. N 4. P. 977–989.
6. Pappalardo G., Amodeo A., Pandolfi M., Wandinger U., Ansmann A., Bösenberg J., Matthias V., Amiridis V., De Tomasi F., Frioud M., Iarlori M., Komguem L., Papayannis A., Rocadenbosch F., Wang X. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project: 3. Raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio // Appl. Opt. 2004. V. 43. N 28. P. 5370–5385.
7. Chaikovskiy A.P., Bril A.I., Barun V.V., Dubovik O., Holben B.N., Goloub P., Sobolewski P. Methodology and sample results of retrieving aerosol parameters by combined multiwavelength lidar and Sun-sky scanning measurements // Proc. SPIE. 2004. V. 5397. P. 146–157.
8. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 5. P. 1609–1613.
9. Kovalev V.A. Lidar measurements of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios // Appl. Opt. 1993. V. 32. N 30. P. 6053–6065.
10. Kovalev V.A., Eichinger W.E. Elastic Lidar. Theory, Practice, and Analysis Methods. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 615 p.
11. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
12. Ackermann J. Two-wavelength lidar inversion algorithm for two-component atmosphere // Appl. Opt. 1997. V. 36. N 21. P. 5134–5143.
13. Spinhirne J.D., Chudamani S., Cavanaugh J.F., Bufon J.L. Aerosol and cloud backscatter at 1.06, 1.54, and 0.53 μm by airborne hard-target calibrated Nd:YAG/methane Raman lidar // Appl. Opt. 1997. V. 36. N 15. P. 3475–3490.
14. Ångström A. Circumsolar radiation as a measure of the turbidity of the atmosphere. Part 2 // Appl. Opt. 1974. V. 13. N 6. P. 1477–1480.

15. Ansmann A., Wandinger U., Riebesell M., Weitkamp C., Michaelis W. Independent measurement of the extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. N 33. P. 7113–7131.
16. Юнге Х.Е. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
17. Розенберг Г.В. Восстановление микрофизических параметров аэрозоля по данным комплексных оптических измерений // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1976. Т. 12. № 11. С. 1159–1167.
18. Bohren F.C., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1983. 530 p.
19. Omar A.H., Winker D.M., Won J.-G. Aerosol models for the CALIPSO lidar inversion algorithms // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5240. P. 153–164.
20. Omar A.H., Won J.-G., Winker D.M., Yoon S.-C., Dubovik O., McCormick M.P. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D10S14, doi:10.1029/2004JD004874.
21. Veselovskii I., Kolgotin A., Griaznov V., Muller D., Franke K., Whiteman D.M. Inversion of multiwavelength Raman lidar data for retrieval of bimodal aerosol size distribution // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. N 5. P. 1180–1195.
22. Ackerman J. The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study // *J. Atmos. Ocean. Techn.* 1998. V. 15. N 4. P. 1043–1050.
23. del Guasta M., Morandi M., Stefanutti L., Brechet J., Piquad J. One year of cloud lidar data from d'Urville (Antarctica). 1. General overview of geometrical and optical properties // *J. Geophys. Res. D.* 1993. V. 98. N 10. P. 18575–18587.
24. www.earlinet.org
25. Shcherbakov V. Regularized algorithm for Raman lidar data processing // *Appl. Opt.* 2007. V. 46. N 22. P. 4879–4889.
26. Pornsawad P., Böckmann C., Ritter C., Rafler M. Ill-posed retrieval of aerosol extinction coefficient profiles from Raman lidar data by regularization // *Appl. Opt.* 2008. V. 47. N 10. P. 1649–1661.
27. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 287 с.
28. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Ершов А.Д. Устойчивый метод восстановления оптических характеристик аэрозольных полей по данным комбинационного лазерного зондирования // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2003. Т. 39. № 3. С. 395–404.
29. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов. М.: Сов. радио, 1979. 292 с.
30. Müller D., Wandinger U., Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 12. P. 2346–2357.
31. Böckmann C., Mironova I., Müller D., Schneidembach L., Nessler R. Microphysical aerosol parameters from multiwavelength lidar // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2005. V. 22. N 3. P. 518–528.

S.V. Samoilova, Yu.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner. Investigation of the tropospheric aerosol layer vertical distribution from the data of sensing with a multifrequency Raman lidar. Part 1. Methods for the reconstruction of optical parameters.

The technique is developed for interpretation of the data of sensing by multi-frequency Raman lidar. The algorithm is proposed for separation of aerosol layers with different scattering properties, with subsequent estimation of the mean value of the lidar ratio and the Angstrom exponent inside a layer, which enables a minimum twice decrease of the errors in reconstruction of the backscattering coefficient from the data of daytime measurements. The stable algorithm is developed for interpretation of nighttime measurements, which lies in numerical differentiation for determination of the extinction coefficient. The algorithm is based on transform of the range of permissible values and requires solution of non-linear equations. The iteration procedure is provided for linearization, the use of which leads to increase of resolution in comparison with traditional methods. Realization of the methods under conditions of *a priori* uncertainty enables the use of them for processing of routine lidar measurements.