

С.В. Самойлова, М.М. Крекова

Методы восстановления оптических параметров атмосферы по данным зондирования поляризационным лидаром.

Часть 2. Проблемы априорной неопределенности при выборе матрицы рассеяния

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 20.05.2005 г.

Рассмотрены методы обращения данных поляризационного зондирования при наличии в сигналах значительного уровня многократного рассеяния (МР). Проведено детальное исследование второго компонента вектора Стокса и показано, что простая параметризация вклада МР позволяет существенно ограничить объем априорной информации, необходимой при интерпретации сигналов. В численном эксперименте проанализированы возможные ошибки восстановления коэффициента ослабления и лидарного отношения, обусловленные некорректным заданием матрицы рассеяния, при обращении сигналов, рассчитанных методом Монте-Карло.

Введение

Обращение данных поляризационного лидарного зондирования, особенно при наличии значимого фона многократного рассеяния (МР), представляет собой некорректную задачу, поскольку ее решение требует априорного введения информации о матрице рассеяния (о лидарном отношении при одночастотном зондировании с Земли). Перспективна совместная интерпретация результатов активного и пассивного зондирования [1], в том числе с использованием различных методов активного зондирования – рамановского, многочастотного, поляризационного [2]. Многочастотное зондирование позволяет разделить облачные и аэрозольные слои для изотропных рассеивателей [3], поляризационное – выделить анизотропные частицы [1], поэтому в пределах простейшей классификации (аэрозоль – водное облако – кристаллическое облако) проблему идентификации рассеивающего объекта можно считать решенной. Однако определение конкретного типа рассеивателей (в пределах одного класса) однозначным не является [4].

При поляризационном зондировании и наличии в локационном сигнале значительного уровня МР (например, при космическом зондировании) можно рассматривать вклад МР как информативную компоненту и восстанавливать лидарное отношение [5, 6]. Совместная оценка деполяризационного и лидарного отношений позволяет, с определенной степенью достоверности, оценивать тип и размер рассеивающих частиц. Область применения метода ограничена предположением о микрофизической однородности рассеивающей среды и адекватностью математической модели, описывающей процессы кратного рассеяния. Решение задачи осложняется также отсутствием моделей полидисперсных матриц рассея-

ния для облаков как кристаллического, так и смешанного фазового состава.

Описанию аналитических моделей для поляризационных составляющих лидарного сигнала, оценке влияния основных параметров, входящих в них, на информативность вклада МР для аэрозоля и кристаллического облака посвящен разд. 1 настоящей статьи. В разд. 2 рассматривается алгоритм для восстановления профилей коэффициента ослабления и лидарного отношения однокомпонентной однородной среды. Методические вопросы, связанные с обращением поляризационных составляющих лидарного сигнала, подробно рассмотрены нами в первой части работы [7]. Проведена апробация алгоритма по восстановлению оптических параметров из сигналов, рассчитанных методом Монте-Карло для трех моделей аэрозоля и трех моделей кристаллического облака. В разд. 3 показаны примеры восстановления оптических параметров в условиях априорной неопределенности при задании матрицы рассеяния.

1. Модель лидарного уравнения

При больших расстояниях между лидаром и зондируемым объектом лидарный сигнал на выходе фотоприемника описывается лидарным уравнением, которое в приближении однократного рассеяния для линейно-поляризованного излучения имеет вид

$$F_{\parallel\perp}(z) \sim \frac{\beta_{\parallel\perp}(z)}{z^2} T^2(z_0, z), \quad (1)$$

где β – коэффициент обратного рассеяния;

$$T^2(z_0, z) = \exp\left\{-2 \int_{z_0}^z \sigma(z') dz'\right\} = \exp\{-2\tau(z_0, z)\}$$

– интегральное пропускание; σ – коэффициент ослабления излучения. Символы « \parallel » и « \perp » соответствуют параллельной и перпендикулярной составляющим лидарного сигнала; они связаны с компонентами вектора Стокса соотношениями:

$$\mathbf{S}^{(1)}(z) = \begin{pmatrix} F_{\parallel} + F_{\perp} \\ F_{\parallel} - F_{\perp} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} (\beta_{\parallel} + \beta_{\perp})T^2(z_0, z)/z^2 \\ (\beta_{\parallel} - \beta_{\perp})T^2(z_0, z)/z^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 T^2(z_0, z)/z^2 \\ \beta_2 T^2(z_0, z)/z^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Предположим, что для рассматриваемой нами задачи нормированная матрица рассеяния имеет вид

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{12} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & -a_{43} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Данное предположение справедливо как для жидкокапельных, так и для кристаллических облаков, содержащих симметричные частицы, хаотически ориентированные в пространстве [8, 9]. Уравнение космического зондирования с учетом вклада МР для компонентов вектора Стокса может быть представлено в виде [6]:

$$\mathbf{S}^{(\Sigma)} = \begin{pmatrix} S_1^{(1)} \times S_1^{(m)} \\ S_2^{(1)} \times S_2^{(m)} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1^{(1)} \exp\{m_1\} \\ S_2^{(1)} \exp\{m_2\} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Сомножитель $S_i^{(m)}$, описывающий вклад многократного рассеяния, зависит от коэффициента ослабления, лидарного отношения и функции, являющейся комбинацией элементов матрицы рассеяния:

$$m_i(z) = m_i[\sigma S_i, G_i] = 2\pi \int_{z_1}^{z_2} \sigma(x) S_i(x) \int_0^{\varphi(z,x)} G_i(\varphi) d\varphi dx, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

где $S_1 = \sigma/\beta_1 = 1/a_{11}(\pi)$ – лидарное отношение,

$$S_2 = \sigma/\beta_2 = 1/a_{22}(\pi);$$

$$G_1(\varphi) = \sin(\varphi)[a_{11}(\varphi)a_{11}(\pi - \varphi) + a_{12}(\varphi)a_{12}(\pi - \varphi)],$$

$$G_2(\varphi) = \frac{1}{2} \sin(\varphi)[a_{12}(\varphi)a_{12}(\pi - \varphi) + a_{22}(\varphi)a_{22}(\pi - \varphi) - a_{33}(\varphi)a_{33}(\pi - \varphi) + a_{34}(\varphi)a_{34}(\pi - \varphi)];$$

$$\varphi(z, x) = \arccos \frac{2ac - (a^2 + c^2)\cos(\varphi_0)}{2ac \cos(\varphi_0) - (a^2 + c^2)},$$

φ_0 – угол поля зрения приемника; параметры $a = z - x/2$ и $c = \sqrt{a^2 - b^2} = x/2$ (a, b – соответственно большая и малая полуоси эллипса, задающего геометрию рассеяния в теории [10]).

Одним из факторов, ограничивающих область применения модели (4), (5), является мультипликативное представление вклада МР в суммарный сигнал. Определение сигнала в виде произведения однократно и многократно рассеянных компонент (так же как и, например, при малоугловом приближении) выводит из рассмотрения участки зондирования за границей облака, где $S_i^{(1)}(z) \equiv 0$. Помимо этого, для космической схемы зондирования, когда эллипс полностью попадает в поле зрения приемника, $m_i(z) \rightarrow \tau(z)$ [6]. Для первого компонента вектора Стокса модель является расширением известной модели [11, 12], учитывающей вклад МР и используемой при интерпретации наземных измерений:

$$S_1^{(\Sigma)}(z) = S_1^{(1)}(z) \exp \left\{ 2 \int_{z_0}^z [\sigma(z')(1 - \eta_1(z'))] dz' \right\}, \quad (6)$$

где $\eta_1(z) \in]0, 1[$. Если предположить, что $\eta_1(z) \equiv \text{const}$, то справедливо следующее выражение:

$$\eta_1(z) = 1 - \frac{\ln \{S_1^{(\Sigma)}(z)/S_1^{(1)}(z)\}}{2\tau(z)} = 1 - \frac{m_1(z)}{2\tau(z)},$$

где $m_1(z)$ определено соотношением (5). В работе [5] было показано, что модель (6) применима и для интерпретации космических измерений. Приведенные результаты расчетов параметра η_1 методом Монте-Карло для различных индикатрис рассеяния показали, что $\eta_1(z) \equiv \text{const}$, которая полностью определяется типом рассеивающих частиц. Запишем модельное соотношение, аналогичное (6), для второго компонента вектора Стокса:

$$S_2^{(\Sigma)}(z) = S_2^{(1)}(z) \exp \left\{ 2 \int_{z_0}^z [\sigma(z')(1 - \eta_2(z'))] dz' \right\}, \quad (7)$$

где

$$\eta_2(z) = 1 - \frac{\ln \{S_2^{(\Sigma)}(z)/S_2^{(1)}(z)\}}{2\tau(z)} = 1 - \frac{m_2(z)}{2\tau(z)};$$

$m_2(z)$ определено соотношением (5).

На рис. 1 представлены результаты расчетов параметров $\eta_1(z)$, $\eta_2(z)$ методом Монте-Карло (звездочки) и по формулам (6), (7) (сплошные линии).

При построении алгоритма метода Монте-Карло использовалась известная локальная оценка потока частиц [13]. Основные принципы и детали построения таких оценок изложены в работе [14]. Расчеты были проведены для лидара, удаленного от верхней границы рассеивающего слоя на расстояние $z_0 = 690$ км (длина волны $\lambda_0 = 532$ нм, поле зрения приемника

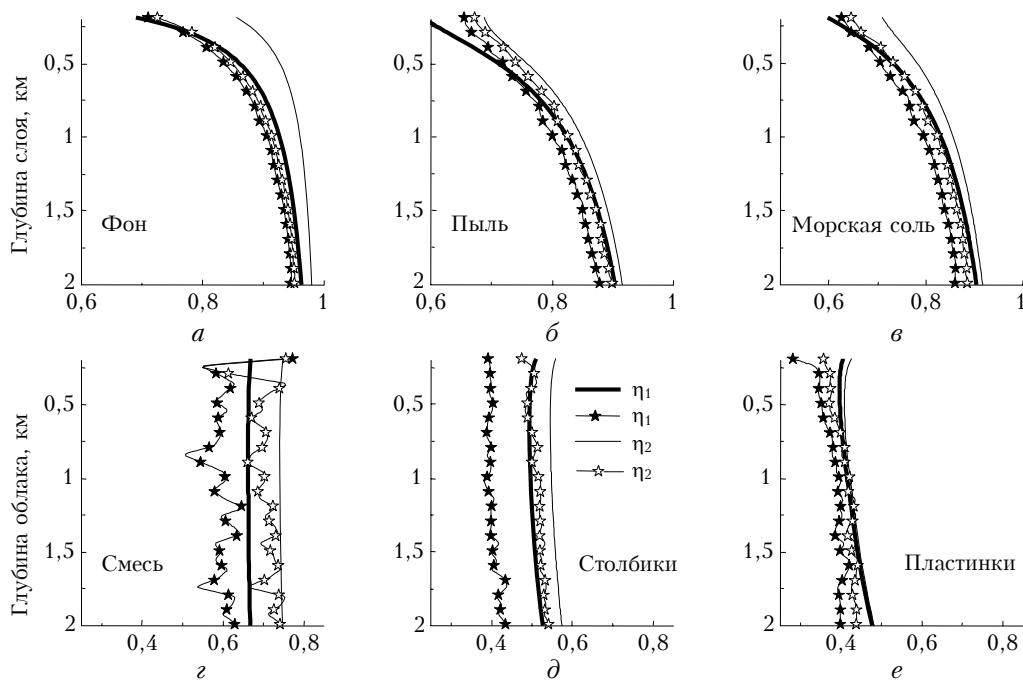


Рис. 1. Сравнение методов расчета функций, характеризующих вклад МР в поляризационные составляющие лидарного сигнала: звездочки – метод Монте-Карло; сплошные линии – аналитическая модель по формулам (6), (7)

$\varphi_0 = 130$ мрад, расходимость излучения $\psi_0 = 100$ мрад). При расчетах кривых рис. 1, а–в задавался однородный аэрозольный слой: коэффициент ослабления $0,5 \text{ км}^{-1}$, геометрическая толщина 2 км. Результаты, представленные в нижней части рисунка, получены для однородного облака, состоящего из различного типа кристаллов, хаотически ориентированных в пространстве ($\sigma = 0,5 \text{ км}^{-1}$, $\Delta z = 2 \text{ км}$). Задавались три модели аэрозоля – «фоновый» (рис. 1, а), «пылевой» (рис. 1, б) и «морской» (рис. 1, в) [5]. Помимо этого, задавались три модели облака, состоящего из ледяных кристаллов, – «столбиков», $L/a = 50 \text{ мкм}/10 \text{ мкм}$ (рис. 1, д), «пластинок», $L/a = 8 \text{ мкм}/10 \text{ мкм}$ (рис. 1, е) и «смеси пластинок и столбиков» (рис. 1, з) [15, 16]. «Смесь пластинок и столбиков» – модельная матрица для полидисперсного кристаллического облака, скомпонованная из матриц рассеяния для монодисперсных гексагональных кристаллов заданного размера. В состав входят «пластины» размерами $L/a = 8/10, 9/15, 32/40, 24/50, 42 \text{ мкм}/100 \text{ мкм}$ и «столбики» размерами $L/a = 50/10, 100/20, 100/40, 100/50, 300 \text{ мкм}/60 \text{ мкм}$; вклад всех размеров кристаллов предполагается равноценным.

Поскольку ошибка при расчете методом Монте-Карло каждого из компонентов вектора Стокса зависит от ошибок расчета всех четырех компонентов, для полидисперсной матрицы в процессе счета не удалось достичь достаточно гладких зависимостей $\eta_1(z)$, $\eta_2(z)$ (см. рис. 1, з). Связано это с высокой степенью асимметрии индикатрисы рассеяния и резкой изменчивостью компонентов матрицы в направлениях, близких к 180° .

Анализ результатов позволяет выделить следующие интересные закономерности. Во-первых, для параметра $\eta_2(z)$ также справедливы выводы, сформулированные в работе [5], – модель (7) применима для описания второго компонента вектора Стокса, $\eta_2(z) \cong \text{const}$ и полностью определяется типом рассеивателей. Во-вторых, отношение $\eta_1(z)/\eta_2(z) \cong \text{const}$, и таким образом поляризационные характеристики лидарных сигналов в случае больших дистанций зондирования зависят, согласно (5), от лидарного отношения (данный вывод для первого компонента вектора Стокса был сделан в [5]) и интеграла от функций, зависящих от комбинации элементов матрицы рассеяния. Угловые различия в элементах матрицы, весьма существенные для различных типов кристаллов, при зондировании из космоса не являются определяющими. Последний вывод очень важен для интерпретации сигналов, поскольку существенным образом сужает объем априорной информации, необходимой при их обращении.

2. Методы обращения поляризационных сигналов

К достоинствам модели (4), (5) следует отнести простую форму поляризационного отношения:

$$p(z) = \frac{S_2^{(\Sigma)}(z)}{S_1^{(\Sigma)}(z)} = p^{(1)}(z) \exp\{m_2(z) - m_1(z)\} = p^{(1)}(z) \times \exp\left\{2\pi \int_{z_1}^{z_2} \sigma(x) \left[S_2(x) \int_0^{\varphi(z,x)} G_2(\varphi) d\varphi - S_1(x) \int_0^{\varphi(z,x)} G_1(\varphi) d\varphi \right] dx \right\}, \quad (8)$$

где

$$p^{(1)}(z) = \frac{\beta_{\parallel}(z) - \beta_{\perp}(z)}{\beta_{\parallel}(z) + \beta_{\perp}(z)}$$

— поляризационное отношение, обусловленное однократным рассеянием. Для логарифмической производной (8) справедливы соотношения [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \ln[p(z)] &\approx \frac{\partial p^{(1)}/\partial z}{p^{(1)}(z)} + \\ &+ 2\pi\sigma(z)S_1(z) \left[\frac{S_2(z)}{S_1(z)} \int_0^{\pi} G_2(\varphi) d\varphi - \int_0^{\pi} G_1(\varphi) d\varphi \right] = \\ &= \frac{\partial p^{(1)}/\partial z}{p^{(1)}(z)} + 2\pi\sigma(z)S_2(z) \left[\int_0^{\pi} G_2(\varphi) d\varphi - \frac{S_1(z)}{S_2(z)} \int_0^{\pi} G_1(\varphi) d\varphi \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Для однородной среды $\partial p^{(1)}/\partial z = 0$, и первое слагаемое в (9) обращается в нуль, функция в квадратных скобках, зависящая от матрицы рассеяния, постоянна, и, следовательно, логарифмическая производная пропорциональна произведению коэффициента ослабления на лидарное отношение:

$$\zeta_1(z) = \sigma(z)S_1(z) \approx \frac{1}{2\pi W_1} \frac{\partial}{\partial z} [\ln p(z)], \quad (10)$$

где

$$W_1 = \int_0^{\pi} \left[\frac{S_2(z)}{S_1(z)} G_2(\varphi) - G_1(\varphi) \right] d\varphi.$$

Справедливо также соотношение

$$\zeta_2(z) = \sigma(z)S_2(z) \approx \frac{1}{2\pi W_2} \frac{\partial}{\partial z} [\ln p(z)], \quad (11)$$

где

$$W_2 = \int_0^{\pi} \left[G_2(\varphi) - \frac{S_1(z)}{S_2(z)} G_1(\varphi) \right] d\varphi.$$

Алгоритм обращения сигналов строится следующим образом: на первом этапе необходимо корректно продифференцировать логарифм поляризационного отношения. Ниже мы используем квадратичную сплайн-аппроксимацию профиля логарифма поляризационного отношения с интервалом усреднения 200 м (отметим, что подобная методика рекомендована при восстановлении профиля лидарного отношения по данным зондирования рамановским лидаром [17]). Полученная согласно (10) функция $\zeta_1(z)$ позволяет оценить вклад МР [см. (5)] и, соответственно, сигнал, обусловленный однократным рассеянием. При помощи метода локальной калибровки с известным значением $\sigma(z_*)$ в конце трассы (подробнее см. [7]) первое уравнение в (2) обращается относительно $\sigma(z)$, и профиль лидарного отношения оценивается по формуле

$$S_1(z) = \zeta_1(z)/\sigma(z).$$

На рис. 2 представлены результаты восстановления оптических параметров трех облаков, состоящих из «смеси пластинок и столбиков» (рис. 2, а, з), «столбиков» (рис. 2, б, д) и «пластинок» (рис. 2, в, е).

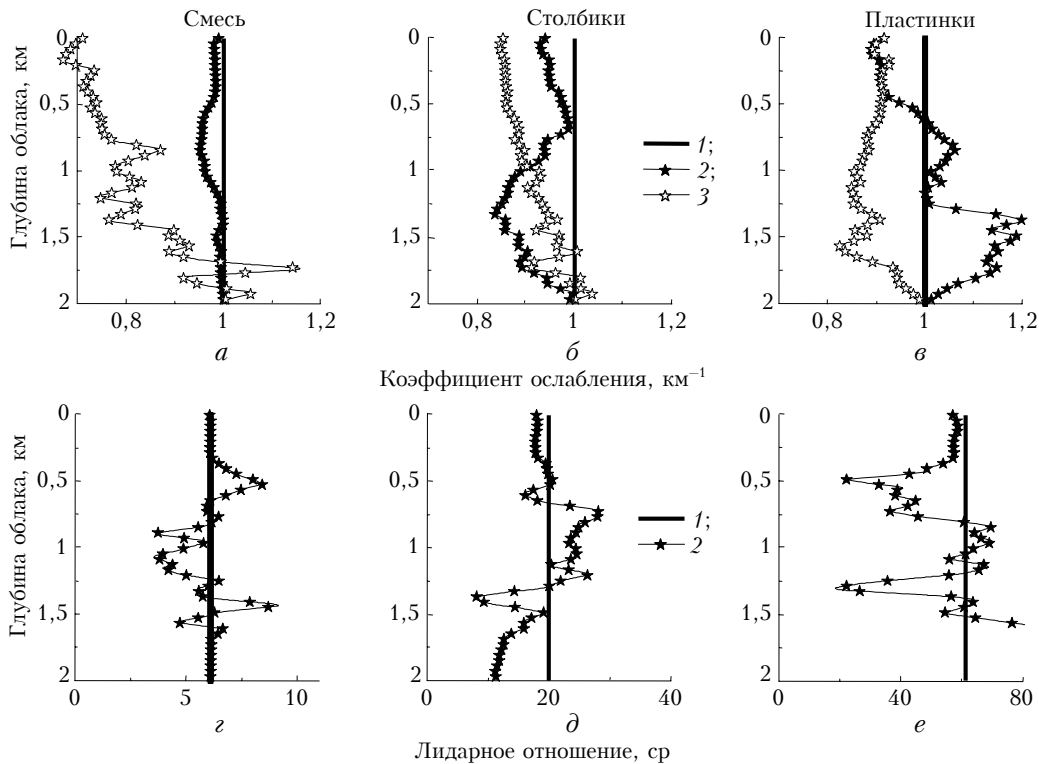


Рис. 2. Восстановление оптических параметров для трех моделей кристаллического облака. Матрицы рассеяния считаются известными

Параметры лидара, используемые при расчете сигналов методом Монте-Карло, приведены в описании рис. 1, а функции, определяющие вклад МР, представлены в нижней части рис. 1. Кривые 1 (рис. 2) соответствуют модельным профилям искомым параметрам. Кривые 2 получены из (4) методом логарифмической производной при обращении уравнения для первого компонента вектора Стокса с оценкой вклада МР согласно (5), (10), дополнительно метод позволяет оценить лидарное отношение (нижняя часть рисунка). Кривые 3 (для коэффициента ослабления – верхняя часть рисунка) также получены из (4), но с коррекцией фона МР итерационным методом. Погрешности восстановления составляют порядка 20% для коэффициента ослабления и примерно совпадают для обоих методов. Для лидарного отношения погрешности не превышают 50%, и можно оценить его среднее значение.

На рис. 3 приведены результаты восстановления оптических параметров для трех моделей аэрозоля. Лидарные сигналы рассчитывались методом Монте-Карло, и функции, описывающие вклад МР, представлены в верхней части рис. 1. Нумерация кривых аналогична нумерации на рис. 2. Для «фонов» аэрозоля (рис. 3, а, з) вклад МР совсем мал (см. рис. 1, а), и функция $\zeta_1(z)$ оценивается с большими ошибками. Это приводит к возрастанию погрешностей при обработке методом логарифмической производной (по сравнению с итерационным методом) при восстановлении $\sigma(z)$ и неустойчивому восстановлению лидарного отношения. Для «пылевого» (рис. 3, б, д) и «морского» (рис. 3, в, е) аэрозолей погрешности составляют порядка 10% для коэффициента ослабления и порядка 30% для лидарного отношения.

и «морского» (рис. 3, в, е) аэрозолей погрешности составляют порядка 10% для коэффициента ослабления и порядка 30% для лидарного отношения.

Отметим, что проблемы априорной неопределенности в задании W_i , $G_i(\varphi)$ здесь не рассматривались, типы рассеивателей и матрицы рассеяния предполагались известными. Осцилляции на профилях коэффициента ослабления, восстановленных итерационным методом (см. кривые 3), совпадают с осцилляциями сигналов, рассчитанных методом Монте-Карло (мы сознательно не проводили их сглаживание, поскольку случайные ошибки всегда присутствуют в реальных сигналах). Сплайн-аппроксимация применялась для сглаживания профилей $\ln p(z)$, для которых средние относительные ошибки варьировались от 30% для «пластинок» до 120% для «фонов» аэрозоля. Методические вопросы устойчивого численного дифференцирования логарифма экспериментально измеряемой функции (отношения двух измеряемых функций для нашего метода) подробно проанализированы в [17], в рамках данного исследования они не рассматриваются.

3. Восстановление оптических параметров при неизвестной матрице рассеяния

Проблема априорной неопределенности по типу рассеивателей является, наверное, самой сложной проблемой при интерпретации данных лидарного зон-

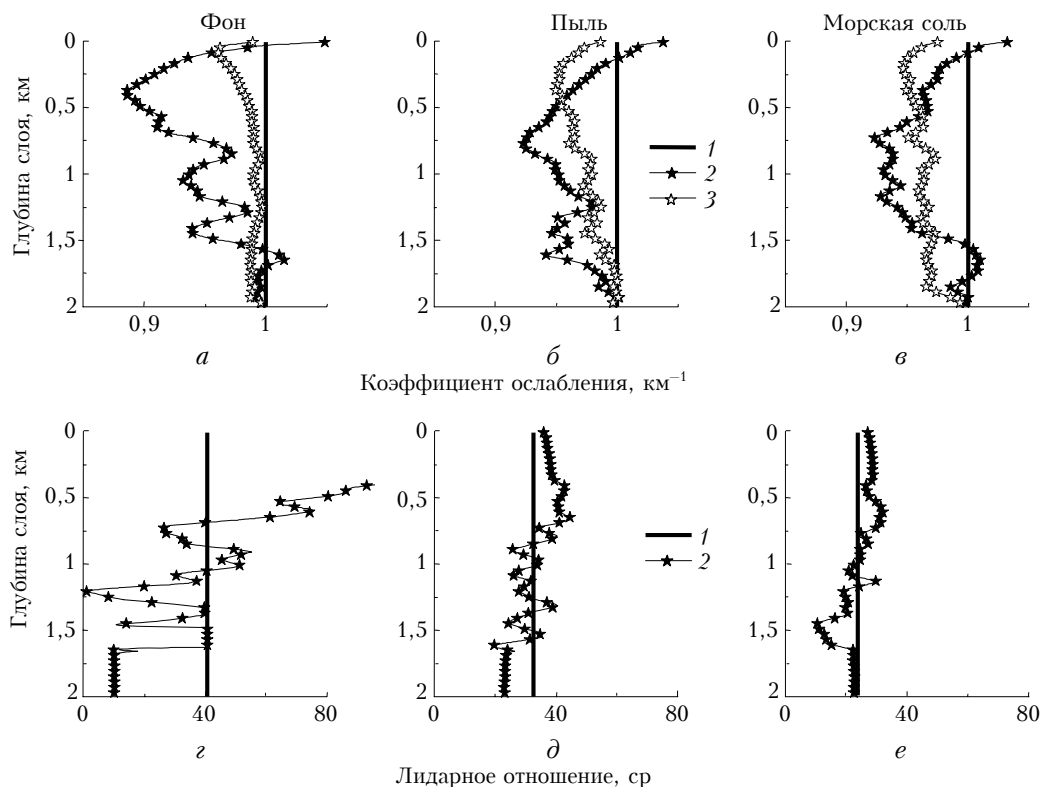


Рис. 3. Восстановление оптических параметров для трех моделей аэрозоля. Матрицы рассеяния считаются известными

дирования. Простейшей иллюстрацией является проблема априорного задания лидарного отношения при обращении уравнений (1) для двухкомпонентной среды, полное решение которой возможно только при рамановском зондировании. В рамках настоящей работы мы не ставили задачу идентификации типа рассеивающего объекта по лидарным измерениям: в пределах классификации «аэрозоль – водное облако – кристаллическое облако» проблема считается решенной. Наша цель – в численном моделировании показать, к каким ошибкам при восстановлении оптических параметров из поляризационных измерений приводит неверное задание матрицы рассеяния, и, возможно, дать рекомендации по использованию конкретного алгоритма. Отметим, что для водных облаков выбор матрицы рассеяния при обработке не является критичным, поскольку диапазон изменчивости лидарного отношения невелик, матрицы близки, а восстановление параметров при наличии фона МР устойчиво [18].

3.1. Кристаллическое облако

На рис. 4 представлены результаты восстановления оптических параметров полидисперсного облака, состоящего из «смеси пластинок и столбиков». Условия численного эксперимента аналогичны условиям рис. 1, а поляризационные характеристики, описывающие вклад МР, представлены на рис. 1, г.

Кривые 1 соответствуют модельным профилям искомых параметров. Кривые 2 получены методом логарифмической производной, кривые 3 (для коэффициента ослабления) – итерационным методом. Анализ результатов показывает, что, во-первых, некорректность в задании матрицы рассеяния практически не влияет на точность восстановления лидарного отношения – имеется лишь небольшое завышение результатов, в пределах погрешностей восстановления при известной матрице. Во-вторых, и метод логарифмической производной, и итерационный метод дают примерно равную погрешность восстановления коэффициента ослабления при известной матрице рассеяния и для аэрозоля, и для облаков (см. рис. 2 и 3). Исключение составляет как раз результат для смешанного облака (см. рис. 2, а и 4, а), где восстановление итерационным методом дает большую погрешность. Поэтому лучшее восстановление $\sigma(z)$ в условиях априорной неопределенности итерационным методом (рис. 4, б и в), по нашему мнению, следует интерпретировать как завышение значений при использовании индикатрис с большим лидарным отношением. Для метода логарифмической производной, наоборот, – с возрастанием лидарного отношения в используемых матрицах значение восстановленного $\sigma(z)$ падает, однако в целом погрешности определения параметра находятся в пределах погрешностей восстановления при известной матрице рассеяния (порядка 20%).

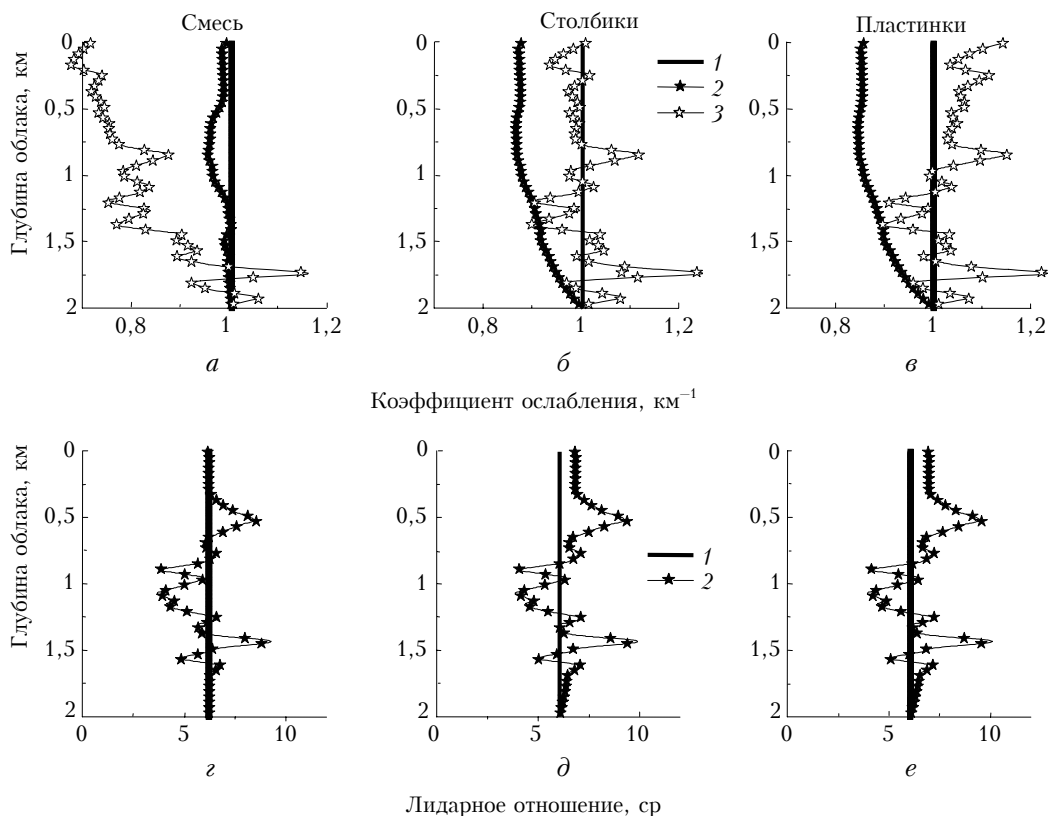


Рис. 4. Восстановление оптических параметров полидисперсного кристаллического облака при известной матрице рассеяния (а, г), а также при «ошибочных» матрицах для «столбиков» (б, д) и «пластинок» (в, е)

На рис. 5 показаны результаты определения оптических параметров монодисперсного облака, состоящего из «столбиков»; функции, характеризующие вклад МР в лидарный сигнал, представлены на рис. 1, *д*.

Восстановление проводилось при известной матрице рассеяния, а также при «ошибочных» матрицах для «пластинок» и «смеси пластинок и столбиков». Нумерация кривых аналогична нумерации на рис. 4.

Точности восстановления как коэффициента ослабления, так и лидарного отношения практически совпадают, если использовать при обработке матрицу для «пластинок», а не «столбиков». Заметно искажаются восстанавливаемые профили при обращении сигналов с «ошибочной» матрицей для полидисперсного облака — по лидарному отношению происходит примерно 40%-е занижение результатов, а по коэффициенту ослабления погрешности возрастают до 50%. Причем, как уже отмечалось при анализе рис. 4, априорная неопределенность по матрице рассеяния приводит к противоположным искажениям при восстановлении $\sigma(z)$ разными методами (см. рис. 5, *в*).

Мы не приводим здесь результаты восстановления оптических параметров для облака, состоящего из «пластин», поскольку они практически дублируют результаты рис. 5. Поводя итоги, можно отметить, что, во-первых, профиль лидарного отношения более устойчив при восстановлении с «ошибочной» матрицей рассеяния. Во-вторых, большие рас-

хождения при восстановлении коэффициента ослабления различными методами явно указывают на «ошибочность» матрицы, используемой при обработке.

3.2. Аэрозоль

Рис. 6 иллюстрирует результаты определения оптических параметров «морского» аэрозоля. Структура рис. 6 аналогична рис. 4 и 5. Анализ результатов показывает, что аэрозольные параметры в меньшей степени по сравнению с облачными подвержены ошибкам восстановления в условиях априорной неопределенности — точность определения обоих параметров находится в пределах точности восстановления при известной матрице рассеяния. Мы не приводим результаты обработки сигналов для «пылевого» аэрозоля, поскольку они практически дублируют результаты рис. 6. Для «фоновое» аэрозоля из-за незначительного уровня вклада МР в локационный сигнал при оценивании $\zeta_1(z)$ согласно (10) возникают значительные ошибки и восстановление оптических параметров неустойчиво; результаты мы также здесь не приводим.

Заключение

Рассмотрен метод интерпретации данных поляризационного зондирования при наличии в локационном сигнале значительного уровня МР. По данным

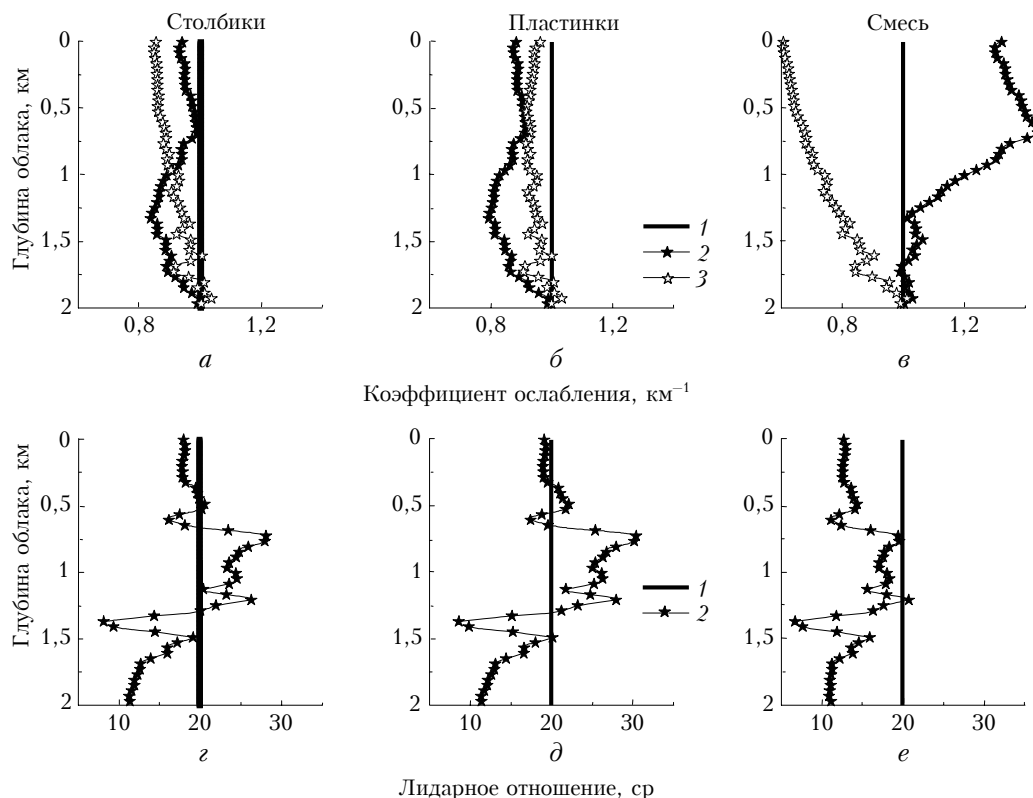


Рис. 5. Восстановление оптических параметров монодисперсного («столбики») кристаллического облака при известной матрице рассеяния (*а, г*), а также при «ошибочных» матрицах для «пластинок» (*б, д*) и полидисперсного облака (*в, е*)

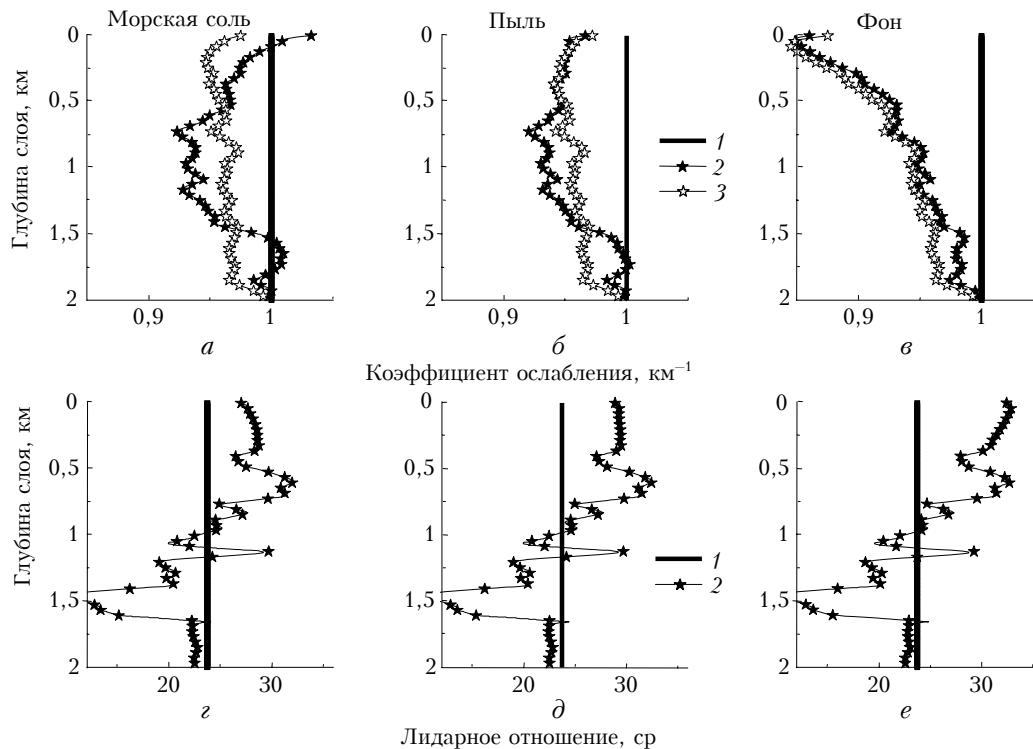


Рис. 6. Восстановление оптических параметров «морского» аэрозоля при известной матрице рассеяния (а, г), а также при «ошибочных» матрицах для «пылевого» (б, д) и «фоновое» (в, е) аэрозолей

численного моделирования методом Монте-Карло, выполненным для космического лидара, исследована информативность вклада МР. Для однокомпонентной однородной среды показана существенная зависимость фона МР от значения индикатрисы рассеяния в направлении назад и подтверждена информативность кратного рассеяния относительно типа рассеивателей.

Алгоритм одновременного восстановления профилей коэффициента ослабления и лидарного отношения – так называемый метод логарифмической производной коэффициента поляризации – протестирован при оценивании трех моделей аэрозоля и трех моделей кристаллического облака. Главной методической трудностью реализации алгоритма является необходимость корректного численного дифференцирования экспериментальных данных. Показана неустойчивость определения профилей для «фоновое» аэрозоля, дающего малый вклад МР в локационный сигнал. Для остальных моделей точность восстановления оптических параметров удовлетворительна и сравнима с традиционными методами.

При исследовании возможных ошибок, возникающих в условиях априорной неопределенности по определению типа рассеивателей, показано, что, во-первых, профиль лидарного отношения более устойчив при восстановлении с «ошибочной» матрицей рассеяния. Во-вторых, априорная неопределенность приводит к противоположным искажениям при восстановлении коэффициента ослабления методом логарифмической производной и итерационным методом. Целесообразно проводить оценивание $\sigma(z)$ обоими методами, поскольку большие расхождения яв-

но указывают на «ошибочность» матрицы, используемой при обработке.

Рассмотренные три модели матриц рассеяния, безусловно, не охватывают существующей «ботаники» кристаллических облаков. Проведение специалистами систематического анализа с выявлением особенностей в поведении компонентов матриц рассеяния для однотипных кристаллов различного размера либо разнотипных кристаллов близкого размера (если таковой анализ вообще возможен) представляет колоссальный интерес. Мы также отдаем отчет, что проведенные исследования носят, скорее, качественный характер, поскольку не учитывают непостоянства оптических параметров вдоль трассы зондирования. Более того, условием применимости (10) является однородность поляризационного отношения, что для реальных кристаллических облаков нарушается практически всегда. Чтобы корректно использовать метод для оценивания параметров, из суммарного профиля поляризации целесообразно выделять компоненту, обусловленную многократным рассеянием. Для этого предварительно необходимо оценить поляризационное отношение, обусловленное однократным рассеянием (возможность подобного оценивания даже без учета вклада МР показана нами ранее [7]), а затем суммарный профиль поляризации разделить на полученную оценку. Конкретная реализация алгоритма приведена в работе [19]. Там же для лидара космического базирования проведены расчеты поляризационных составляющих лидарного сигнала для двухкомпонентной, неоднородной вдоль трассы зондирования среды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта INTAS-01-0239.

1. Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1991. V. 72. P. 1848–1866.
2. Noel V., Chepfer H., Leganois G., Delafal A., Flamant P.H. Classification of particle effective shape ratios in cirrus clouds based on the lidar depolarization ratio // Appl. Opt. 2002. V. 41. N 21. P. 4245–4257.
3. Young S.A. The Hybrid extinction retrieval algorithms (HERA) for analysis of lidar data from space // CSIRO Atmospheric Research Technical Paper (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Collingwood, Victoria, Australia) 2002. N 54. P. 3–28.
4. Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate process: A global perspective // Mon. Weather Rev. 1986. V. 114. P. 1167–1195.
5. Winker D.M. Accounting for multiple scattering in retrievals from space lidar // Proc. SPIE. 2003. V. 5059. P. 128–139.
6. Samoilova S.V. An approximate equation for multiple scattering of spaceborne lidar returns and its application of extinction and depolarization // Proc. SPIE. 2003. V. 5059. P. 106–115.
7. Самойлова С.В. Методы восстановления оптических параметров атмосферы по данным зондирования поляризационным лидаром. Часть 1. Проблемы априорной неопределенности при калибровке сигналов и решений // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 903–912.
8. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
9. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 198 с.
10. Samokhvalov I.V. Double scattering approximation of lidar equation for inhomogeneous atmosphere // Opt. Lett. 1979. V. 4. P. 12–14.
11. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Наац И.Э. Теоретические аспекты проблемы лазерного зондирования облаков // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 3–33.
12. Platt C.M.R. Remote sounding of high cirrus clouds. III: Monte-Carlo calculations of multiple-scattered lidar returns // J. Atmos. Sci. 1981. V. 38. P. 156–167.
13. Marchuk G.I., Mikhailov G.M., Nazaratiev T.A., Darbinyan R.A., Kargin B.A., Elepov E.P. Monte Carlo algorithms for solving nonstationary problems on propagation of narrow light beams in the atmosphere and ocean // Monte-Carlo methods in atmospheric optics. Berlin: Springer-Verlag, 1980. Chap. 5.
14. Krekov G.M., Krekova M.M., Shamanaev V.S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. I. Effect of atmosphere and wind-driven sea waves // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 1589–1595.
15. Ромаилов Д.Н. Матрица обратного рассеяния для монодисперсных ансамблей гексагональных ледяных кристаллов // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 392–400.
16. Ромаилов Д.Н. Рассеяние света гексагональными ледяными кристаллами // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 116–124.
17. Pappalardo G., Amodeo A., Pandolfi M., Wandinger U., Ansmann A., Bosenberg J., Matthias V., Amiridis V., De Tomasi F., Frioud M., Iarlori M., Komduem L., Pappayanis 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.
18. Oppel U. G. A hierarchy of models for lidar multiple scattering and its applications for simulation and analysis of spaceborne lidar returns // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 237–250.
19. Samoilova S.V., Balin Yu.S., Krekova M.M., Winker D.M. Method for reconstructing atmospheric optical parameters from the data of polarization lidar sensing // Appl. Opt. 2005. V. 44. N 17. P. 3499–3509.

S.V. Samoilova, M.M. Krekova. Methods for reconstruction of atmospheric optical parameters from polarization lidar sensing data. Part 2. Problems of *a priori* uncertainty in selection of the scattering matrix.

Methods of inversion of polarization sensing data are considered for the case of a significant level of multiple scattering in signals. The second component of the Stokes vector is studied in detail, and it is shown that the simple parameterization of the contribution from multiple scattering significantly reduces the *a priori* information needed for interpretation of signals. A numerical experiment is conducted to analyze possible errors of reconstruction of the extinction coefficient and the lidar ratio, caused by the incorrectly defined scattering matrix, for inversion of signals calculated by the Monte Carlo technique.