

С.В. Самойлова

Методы восстановления оптических параметров атмосферы по данным зондирования поляризационным лидаром. Часть 1. Проблемы априорной неопределенности при калибровке сигналов и решений

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.05.2003 г.

Рассмотрены методы обращения данных зондирования поляризационным лидаром. Основное внимание уделяется выбору оптимального алгоритма калибровки решения, в том числе при наличии значимого фона многократного рассеяния. Дается описание двух методов, которые могут быть использованы для восстановления профиля аэрозольного деполяризационного отношения из поляризационных составляющих лидарного сигнала. Особенности каждого метода анализируются при интерпретации профилей сигналов, полученных при наземном зондировании.

Введение

Лидарные поляризационные измерения являются весьма информативным средством дистанционного зондирования атмосферы, поскольку чувствительны к форме и ориентации аэрозольных частиц [1]. Состояние поляризации описывается, как известно, набором из четырех параметров Стокса, а рассеивающие свойства среды — матрицей рассеяния. Соответственно, задачей поляризационных измерений может быть определение параметров Стокса рассеянного назад излучения (см., например, [1, 2]) или определение отдельных элементов матрицы рассеяния [3].

В простейшем варианте поляризационных измерений обычно находят так называемое деполяризационное отношение δ , которое определяется комбинацией нескольких элементов матрицы рассеяния и зависит от формы частиц. Известно, что для сферических частиц $\delta = 0$, если рассеяние происходит точно в направлении назад и имеет место однократное рассеяние. Наоборот, несферические частицы в той или иной степени деполяризуют обратное рассеянное излучение, при этом деполяризация обязательно происходит, когда частицы хаотически ориентированы. Однако определенная осторожность необходима при интерпретации поляризационных измерений, поскольку деполяризация излучения может происходить и в аэрозольной среде, состоящей из сферических частиц, в условиях многократного рассеяния [4], и отсутствовать для несферических частиц, размер которых сравним с длиной волны лазерного излучения [5].

В первой части работы основное внимание уделяется методам восстановления коэффициента

обратного рассеяния и деполяризационного отношения с коррекцией вклада молекулярного рассеяния; рассмотрен алгоритм обращения поляризационных составляющих лидарного сигнала, применимый в отсутствие информации об относительной чувствительности поляризационных каналов; проводится исследование возможных ошибок при задании граничных значений (так называемые методы локальной либо интегральной калибровки решения), в том числе при наличии значимого фона многократного рассеяния.

1. Модель лидарного уравнения (приближение однократного рассеяния)

В случае достаточно больших расстояний зондирования сигнал обратного рассеяния на выходе фотоприемника описывается лидарным уравнением, которое в приближении однократного рассеяния для линейно поляризованного излучения можно представить в виде [6, 7]:

$$F_i(z) = \frac{P_i}{z^2} T^2(z_0, z) \sigma(z) \mathbf{K}_i A(z) \mathbf{S}^{(0)}, \quad i=\perp, \parallel, \quad (1)$$

где символы « \parallel » и « \perp » соответствуют параллельной и перпендикулярной составляющим параметров; P — аппаратная константа, учитывающая пропускание оптики и чувствительность фотоприемника в i -м канале; σ — коэффициент ослабления излучения;

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

– интегральное пропускание; \mathbf{K}_i – приборный вектор; A – нормированная матрица рассеяния; $\mathbf{S}^{(0)}$ – нормированный на интенсивность вектор-параметр Стокса источника излучения. Приборным вектором является первая строка матрицы Мюллера, описывающая воздействие оптических элементов приемной части лидара на параметры Стокса принимаемого излучения; для поляризатора

$$\mathbf{K}_1 = \frac{1}{2}(1 \ 1 \ 0 \ 0), \quad \mathbf{K}_2 = \frac{1}{2}(1 \ -1 \ 0 \ 0).$$

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

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

Данное предположение справедливо как для жидкокапельных облаков при условии $a_{33} = a_{44}$, $a_{12} = 0$ [8], так и для кристаллических, содержащих один вид симметричных частиц с хаотической ориентацией в пространстве [9]. Рассмотрим случай линейной поляризации источника излучения. Выберем систему отсчета таким образом, чтобы состояние поляризации источника описывалось набором параметров Стокса:

$$\mathbf{S}^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда уравнения (1) представимы в виде

$$F_i(z) = \frac{P_i}{z^2} \beta_i(z) T^2(z_0, z), \quad i = \perp, \parallel,$$

где

$$\beta(z) = \beta(z) S(z) \frac{1}{2} [a_{11}(z) + 2a_{12}(z) + a_{22}(z)],$$

$$\beta_{\perp}(z) = \beta(z) S(z) \frac{1}{2} [a_{11}(z) - a_{22}(z)],$$

$$\beta(z) = \beta(z) + \beta_{\perp}(z)$$

– суммарный коэффициент обратного рассеяния;

$$S(z) = \sigma(z)/\beta(z)$$

– лидарное отношение.

Для аэрозольно-газовой среды

$$\beta = \beta_a + \beta_m, \quad \text{и} \quad \beta_{\perp} = \beta_{a,\perp} + \beta_{m,\perp},$$

где символы « a » и « m » соответствуют вкладам аэрозольной (в том числе и облачной) и молекулярной составляющих атмосферы. Молекулярные параметры – деполаризационное отношение $\delta_m = \beta_{m,\perp}/\beta_m$, и лидарное отношение $S_m = \sigma_m/\beta_m = 8\pi/3$ – в атмосфере можно считать постоянными. Корректное

определение аэрозольного деполаризационного отношения

$$\delta_a = \beta_{a,\perp}/\beta_{a,\parallel} = (a_{11} - a_{22})/(a_{11} + 2a_{12} + a_{22})$$

является основной целью интерпретации поляризационных лидарных измерений и, совместно с оценкой лидарного отношения

$$S_a = \sigma_a/\beta_a = (a_{11} + a_{12})^{-1},$$

зачастую позволяет идентифицировать тип и размер аэрозольных частиц.

Для двухкомпонентной среды лидарные уравнения (1) переписутся в виде

$$F_i(z) = \frac{P_i}{z^2} [\beta_m(z) C_{m,i} + \beta_a(z) C_{a,i}] T_m^2(z_0, z) T_a^2(z_0, z), \quad (2)$$

$$i = \perp, \parallel,$$

где

$$C_{a,\perp} = \frac{\delta_a}{1 + \delta_a}, \quad C_{m,\perp} = \frac{\delta_m}{1 + \delta_m}, \quad (3)$$

$$C_{a,\parallel} = \frac{1}{1 + \delta_a}, \quad C_{m,\parallel} = \frac{1}{1 + \delta_m}.$$

В приближении однократного рассеяния поляризационные составляющие лидарного сигнала связаны с компонентами вектора Стокса следующими соотношениями:

$$\mathbf{S}^{(1)}(z) = \begin{pmatrix} F(z)/P + F_{\perp}(z)/P_{\perp} \\ F(z)/P - F_{\perp}(z)/P_{\perp} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} [\beta_m(z) C_{m,1}(z) + \beta_a(z) C_{a,1}(z)] T_m^2(z_0, z) T_a^2(z_0, z) / z^2 \\ [\beta_m(z) C_{m,2}(z) + \beta_a(z) C_{a,2}(z)] T_m^2(z_0, z) T_a^2(z_0, z) / z^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$C_{a,1} = 1, \quad C_{m,1} = 1, \quad C_{a,2} = \frac{1 - \delta_a}{1 + \delta_a}, \quad C_{m,2} = \frac{1 - \delta_m}{1 + \delta_m}. \quad (5)$$

2. Методы обращения лидарного уравнения (приближение однократного рассеяния)

а) Локальная калибровка

Для двухкомпонентной среды аэрозольное деполаризационное отношение δ_a связано с компонентами матрицы рассеяния и оптическими характеристиками соотношением [10]:

$$\delta_a = \frac{\beta_{a,\perp}}{\beta_a} = \frac{a_{11} - a_{22}}{a_{11} + 2a_{12} + a_{22}} = \frac{R\delta(\delta_m + 1) - \delta_m(\delta + 1)}{R(\delta_m + 1) - (\delta + 1)}, \quad (6)$$

где $R = (\beta_m + \beta_a)/\beta_m$ – отношение рассеяния; δ – суммарное деполяризационное отношение. Коэффициент деполяризации δ_a можно получить из (6), определяя предварительно $R(z)$, либо непосредственно из уравнений (2), восстанавливая $\beta_{a,\parallel}$ и $\beta_{a,\perp}$. В первом случае необходимо знание относительной чувствительности поляризационных каналов P_{\parallel}/P_{\perp} (методы аппаратной калибровки см., например, в [7]) для корректного определения суммарного сигнала и $\delta = \beta_{\perp}/\beta_{\parallel} = (P_{\parallel}F_{\perp})/(P_{\perp}F_{\parallel})$ (отметим, что последнее равенство справедливо только в приближении однократного рассеяния). Второй случай рассмотрим подробнее.

Для обращения (2) домножим левую и правую части на

$$z^2 \exp\left\{2\left[S_m - \frac{C_{m,i}}{C_{a,i}}S_a\right] \int_{z_0}^z \beta_m(z')dz'\right\}$$

и получим уравнения для поляризационных составляющих коэффициента обратного рассеяния:

$$\psi_i(z) = P_i \beta_i(z) \exp\left\{-2S_a / C_{a,i} \int_{z_0}^z \beta_i(z')dz'\right\},$$

где

$$\psi_i(z) = F_i(z) z^2 \exp\left\{2\left[S_m - \frac{C_{m,i}}{C_{a,i}}S_a\right] \int_{z_0}^z \beta_m(z')dz'\right\},$$

$$i = \perp, \parallel. \quad (7)$$

Логарифмированием и дифференцированием они преобразуются к уравнениям Бернулли

$$\beta_i'(z) - \beta_i(z) [\ln\{\psi_i(z)\}]' = \frac{2S_a}{C_{a,i}} \beta_i^2(z),$$

устойчивые решения которых, подобно [11,12], имеют вид

$$\beta_i(z) = \frac{\psi_i(z)}{\frac{\psi_i(z^*)}{C_{m,i}\beta_m(z^*) + C_{a,i}\beta_a(z^*)} - \frac{2S_a}{C_{a,i}} \int_z^{z^*} \psi_i(z')dz'}. \quad (8)$$

Отметим, что аналогичным образом обращаются и уравнения для компонентов вектора Стокса (4), если положить

$$\psi_i(z) = S_i(z) z^2 \exp\left\{2\left[S_m - \frac{C_{m,i}}{C_{a,i}}S_a\right] \int_{z_0}^z \beta_m(z')dz'\right\}, \quad (9)$$

$$i = 1, 2.$$

Поскольку искомая величина δ_a входит в (8) в явном виде, для реализации применим итерационную процедуру:

1) зададим $\delta_a^{(0)} \in]0, 1[$;

2) согласно (3), (7) определим константы и функции, входящие в (8), и восстановим $\beta_{a,\perp}^{(i)}$, $\beta_{a,\parallel}^{(i)}$;

3) рассчитывая $\delta_a^{(i)} = \beta_{a,\perp}^{(i)}/\beta_{a,\parallel}^{(i)}$, повторяем шаги 2 и 3.

Расчеты показали устойчивость процедуры к начальному приближению, критерием сходимости итераций может служить выполнение условия $|\delta_a^{(i)} - \delta_a^{(i-1)}| < \varepsilon$.

Тестирование алгоритмов по восстановлению оптических параметров проводилось с использованием данных зондирования поляризационным лидаром в Институте тропосферных исследований (г. Лейпциг, Германия). Наличие рамановского канала для данного лидара позволяет проводить восстановление коэффициента обратного рассеяния с учетом неоднородности лидарного отношения вдоль трассы зондирования и использовать полученный профиль в качестве эталонного при сопоставлении результатов [13,14]. Зондирование проводилось в течение 35 мин (71 реализация, каждая из которых получена суммированием 9000 выстрелов) на длинах волн $\lambda_0 = 532$ нм для поляризационных аэрозольных каналов (относительная чувствительность известна) и $\lambda_R = 607$ нм для рамановского канала. Профили молекулярных составляющих рассчитывались по стандартной формуле через известные значения температуры и давления.

На рис. 1 представлены результаты сравнения различных методов (локальная калибровка) восстановления коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, аэрозольного деполяризационного отношения и отношение рассеяния по данным зондирования 29.11.1999, начало измерений 15:51. Точность восстановления параметров для облака практически совпадает для всех трех алгоритмов, наличие осцилляций на профиле $\delta_a(z)$ для чисто аэрозольного участка за верхней границей облака объясняется тем, что восстановление $\delta_a(z)$ неустойчиво при $R(z) < 1,1$ [10].

Профиль лидарного отношения КР-лидаром восстанавливался по данным зондирования (используемый метод приведен в [15]). Значение S_a , используемое в (8) здесь и в дальнейшем, задавалось постоянным вдоль всей трассы зондирования и равным 30 ср, что соответствует среднему значению S_a в облаке (по оценкам для чисто аэрозольных участков $S_a = 55$ ср). Непостоянство лидарного отношения не оказывает существенного влияния на точность восстановления оптических параметров, по крайней мере в данном случае. В общем случае проблему априорной неопределенности в задании лидарного отношения при интерпретации данных одночастотного зондирования решить не удастся; для облака его среднее значение и градиент можно оценить [14,16], а вот для безоблачной атмосферы единственно возможным представляется задание соответствующих моделей [17].

Помимо непостоянства лидарного отношения на точность восстановления параметров оказывает влияние погрешность задания граничных значений (первое слагаемое в знаменателе (8)). Для результатов, представленных в левой части рис. 1,

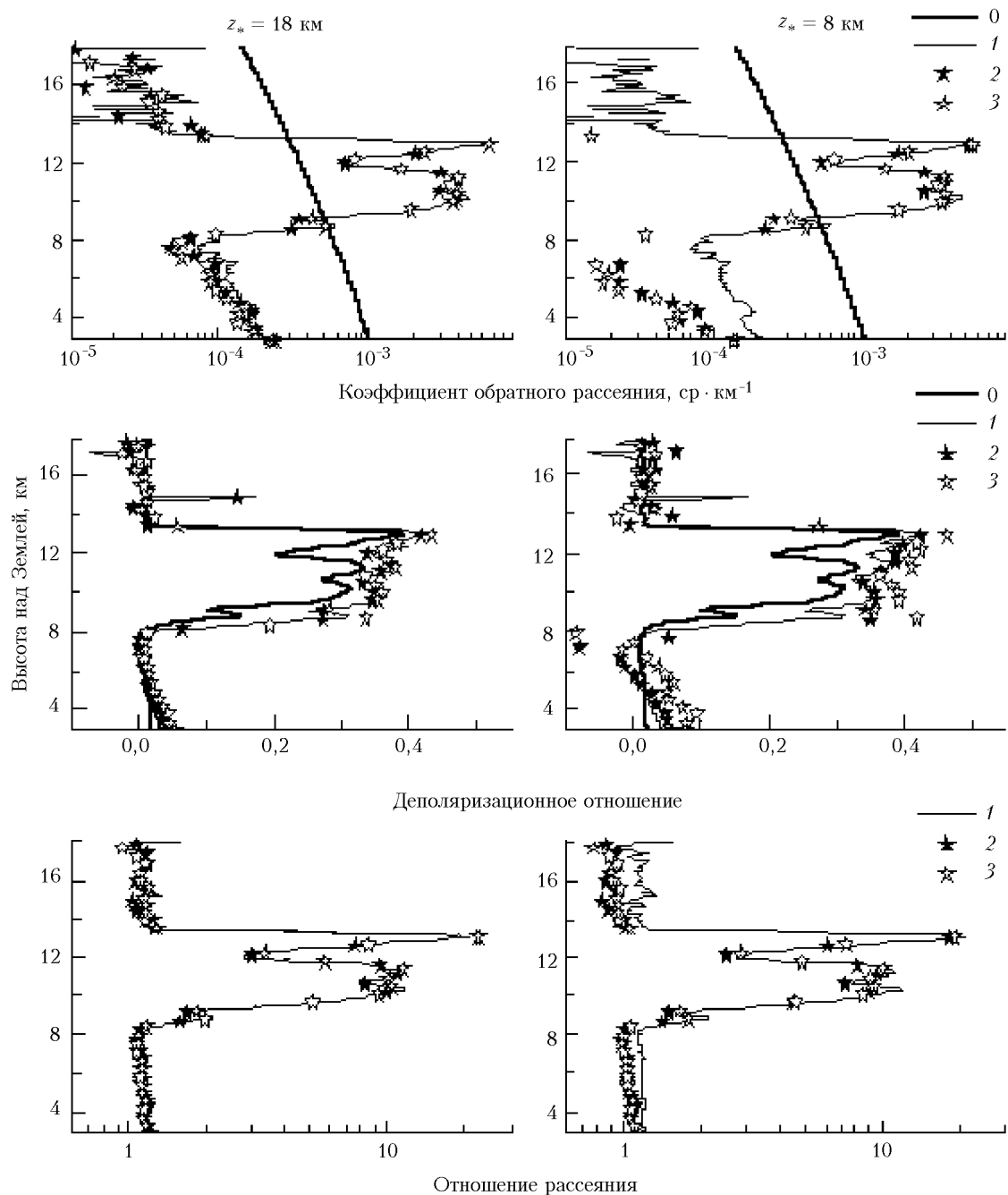


Рис. 1. Сравнение различных методов восстановления оптических параметров (локальная калибровка): кривые 1 являются эталонными и восстановлены с использованием рамановского канала, кривые 2 получены согласно (8),(9) при обращении уравнений для компонентов вектора Стокса (4) (относительная чувствительность поляризационных каналов считается известной), кривые 3 – то же, но при обращении лидарных уравнений (2) согласно (7),(8) и, соответственно, неизвестной чувствительности каналов. Кривая 0 на верхнем рисунке – профиль коэффициента молекулярного обратного рассеяния, кривая 0 на среднем рисунке – суммарное деполаризационное отношение

использовались локальная калибровка в конце трассы ($z_* = 18$ км) и предположение, что $\beta_m(z_*) + \beta_a(z_*) \cong \beta_m(z_*)$. Данное предположение можно использовать и при калибровке до облака ($z_* = 8$ км, правая часть рис. 1), однако точность восстановления оптических параметров при этом ниже, особенно на

аerosольных участках. Более неустойчивым является также восстановление коэффициента деполаризации, особенно в нижней кромке облака. И все же результаты можно признать удовлетворительными. Как будет показано ниже, целесообразность локальной калибровки до облака оправдана при наличии фона многократного рассеяния.

б) Интегральная калибровка

Если лидарные измерения проводятся в дневное время либо лидар удален от объекта зондирования на значительное расстояние (космическое зондирование), то в сигнале обязательно присутствует значимая фоновая составляющая (например, по данным измерения LITE [18] – 79-я орбита, сентябрь 1994 г., 19:15 UTC – полезный сигнал составляет всего 20% от суммарного сигнала [19]). Отсутствие сигнала от чисто аэрозольных участков может наблюдаться как до, так и после облака, и в этом случае целесообразнее использовать так называемую интегральную калибровку [20] и проводить оценку калибровочных параметров непосредственно по лидарным сигналам. Для двухкомпонентной среды при обращении сигналов относительно поляризационных составляющих коэффициента обратного рассеяния справедлива формула

$$\beta_i(z) = \frac{\psi_i(z)}{\left[\frac{2S_a}{C_{a,i}} \int_{z_0}^{z_*} \psi_i(z') dz' / (1 - V_{*,i}^2) \right] - \frac{2S_a}{C_{a,i}} \int_z^{z_*} \psi_i(z') dz'},$$

$i = \perp, \parallel$ или 1,2, (10)

где

$$V_{*,i}^2 = T_a^2(z_0, z_*) \exp \left\{ -2 \int_{z_0}^{z_*} \frac{S_a C_{m,i}}{S_m C_{a,i}} \sigma_m(z') dz' \right\}. \quad (11)$$

Соотношения для $\psi_i(z)$, $C_{a,i}$ и $C_{m,i}$ аналогичны приведенным в (3), (5), (7), (9). Для калибровки неизвестным является первый множитель в (8). Если сигнал до и после облака существует, $T_c^2(z_1, z_2)$, где z_1 и z_2 соответственно нижняя и верхняя границы облака, можно оценить [16] и восстановить $\beta_{c,i}(z)$ – профиль коэффициента обратного рассеяния в облаке – согласно (10)–(11), заменяя z_0 на z_1 и z_* на z_2 . Затем для восстановления всего профиля можно применять следующую процедуру.

Зададим семейство решений $\beta_i(z, \alpha)$, зависящих от параметра α :

$$\beta_i(z, \alpha) = \frac{\psi_i(z)}{\left\{ \frac{2S_a}{C_{a,i}} \int_{z_0}^{z_*} \psi_i(z') dz' / [1 - V_{*,i}^2(\alpha)] \right\} - \frac{2S_a}{C_{a,i}} \int_z^{z_*} \psi_i(z') dz'},$$

$i = \perp, \parallel$ или 1,2, (12)

где

$$V_{*,i}^2(\alpha) = \alpha \exp \left\{ -2 \int_{z_0}^{z_*} \frac{S_a C_{m,i}}{S_m C_{a,i}} \sigma_m(z') dz' \right\}. \quad (13)$$

Очевидно, что значение α , при котором $\beta_i(z, \alpha)$ совпадает с точным решением уравнений (2) и (4), является искомой оценкой $T_a^2(z_0, z_*)$, и для нахождения α достаточно минимизировать функционал

$$\Phi_\alpha = \int_{z_1}^{z_2} [\beta_{c,i}(z) - \beta_{a,i}(z, \alpha)]^2 dz. \quad (14)$$

Метод интегральной калибровки (10)–(11) целесообразно использовать также при наличии сопутствующих фотометрических измерений прозрачности атмосферы [21]. Самым сложным для интерпретации является случай, когда дополнительные измерения отсутствуют и отсутствует сигнал за границами облака. Тогда единственно разумным представляется предварительная оценка $\beta_{c,i}(z)$ либо методом асимптотического сигнала, либо методом логарифмической производной с последующим уточнением решения согласно (12)–(14) (данная процедура для однокомпонентной среды подробно описана нами в [19]).

На рис. 2 представлены результаты сравнения различных методов (интегральная калибровка) восстановления коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, аэрозольного деполаризационного отношения и отношение рассеяния по данным зондирования поляризационным лидаром 29.11.1999. Левая колонка соответствует профилям, восстановленным с оценкой $T_c^2(z_1, z_2)$ согласно [16], правая колонка – профилям, восстановленным в условиях полной априорной неопределенности с оценкой $\beta_i(z)$ методом асимптотического сигнала

$$\beta_i(z) = \frac{\psi_i(z)}{\frac{2S_a}{C_{a,i}} \int_z^{z_{\max}} \psi_i(z') dz'}$$

с последующим уточнением решения согласно (12)–(14).

Анализ результатов показывает, что точность восстановления параметров для облачного участка практически совпадает для всех трех методов, что подтверждает возможность независимой интерпретации поляризационных составляющих лидарного сигнала в условиях априорной неопределенности. Погрешности восстановления для аэрозольных участков существенно зависят от погрешностей в задании граничных значений, но являются более значимыми по сравнению с методами локальной калибровки (см. рис. 1). Последнее позволяет отдать предпочтение методам локальной калибровки, если, повторимся, информация об аэрозольных сигналах является доступной и отсутствуют дополнительные измерения (например, фотометрические).

3. Модель лидарного уравнения (приближение многократного рассеяния)

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при интерпретации поляризационных измерений, является вклад многократного рассеяния (МР). Для большинства наземных лидарных систем этот вклад в суммарный сигнал невелик, и его влияние можно учесть, используя, подобно [22, 23], следующую модель для компонентов вектора Стокса:

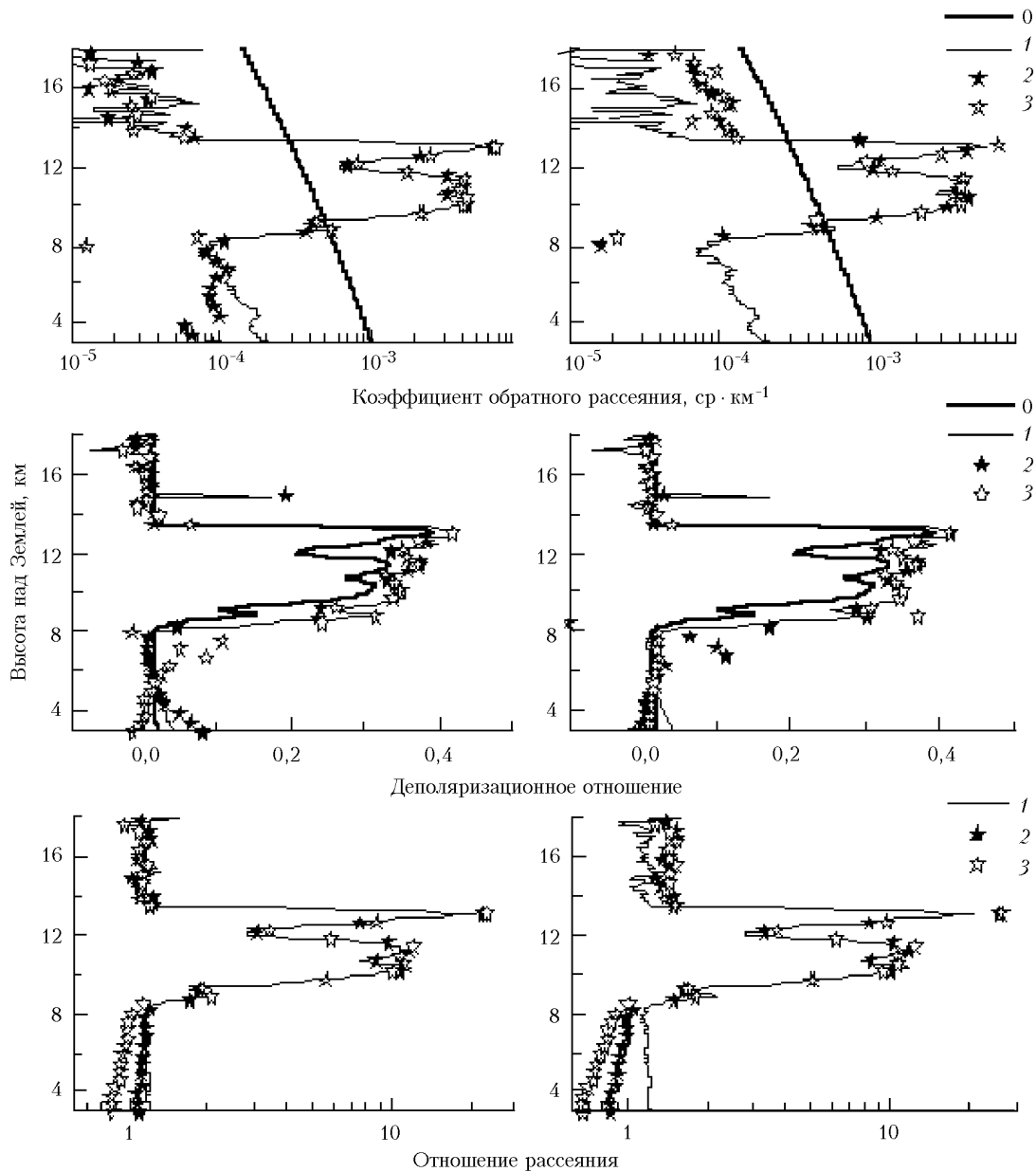


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для интегральной калибровки. Рисунки слева получены при оценке $T_c^2(z_1, z_2)$ согласно [16], справа – с адаптивной оценкой $T_c^2(z_1, z_2)$ по лидарным сигналам

$$\mathbf{S}(z) = \begin{pmatrix} F(z)/P + F_{\perp}(z)/P_{\perp} \\ F(z)/P - F_{\perp}(z)/P_{\perp} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} [\beta(z) + \beta_{\perp}(z)] T_m^2(z_0, z) \exp\left\{-2 \int_{z_0}^z \eta_1(z') \sigma_a(z') dz'\right\} / z^2 \\ [\beta(z) - \beta_{\perp}(z)] T_m^2(z_0, z) \exp\left\{-2 \int_{z_0}^z \eta_2(z') \sigma_a(z') dz'\right\} / z^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где

$$\eta_1(z) = 1 - \frac{\ln\{S_1(z)/S_1^{(1)}(z)\}}{2\tau(z)} \approx \text{const},$$

$$\eta_2(z) = 1 - \frac{\ln\{S_2(z)/S_2^{(1)}(z)\}}{2\tau(z)} \approx \text{const}.$$

Тогда сигналы обратного рассеяния для линейной поляризации излучения описываются уравнениями:

$$F_{\perp}(z) = \frac{S_1(z) - S_2(z)}{2} = \frac{\beta_{\perp}(z) T_m^2(z_0, z)}{z^2} \frac{\exp\{-2\eta_1(z)\tau_a(z)\} + \exp\{-2\eta_2(z)\tau_a(z)\}}{2} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\beta(z)T_m^2(z_0, z) \exp\{-2\eta_1(z)\tau_a(z)\} - \exp\{-2\eta_2(z)\tau_a(z)\}}{z^2}, \\
F(z) &= \frac{S_1(z) + S_2(z)}{2} = \\
&= \frac{\beta(z)T_m^2(z_0, z) \exp\{-2\eta_1(z)\tau_a(z)\} + \exp\{-2\eta_2(z)\tau_a(z)\}}{z^2} + \\
& + \frac{\beta_{\perp}(z)T_m^2(z_0, z) \exp\{-2\eta_1(z)\tau_a(z)\} - \exp\{-2\eta_2(z)\tau_a(z)\}}{z^2}.
\end{aligned} \tag{16}$$

В общем случае η_1 и η_2 не совпадают для различных типов рассеивателей, и формально обращаться уравнения (16) методами, изложенными в п. 1, нельзя. Однако, поскольку значения η_1 и η_2 близки, ниже в численном эксперименте мы проверим возможность использования модели

$$F_i(z) = \frac{P\beta_i(z)T_m^2(z_0, z)}{z^2} \exp\{-2\eta_i(z)\tau_a(z)\}, \quad i = \perp, \parallel \tag{17}$$

(важно, что $\eta_{\perp, \parallel}$ не обязательно совпадают с $\eta_{1,2}$), рассмотрим возможные ошибки восстановления параметров при наличии фона МР и влияние условия $\eta_1 \neq \eta_2$ на выбор способа калибровки для обращения уравнений (15), (17).

4. Методы обращения лидарного уравнения (приближение многократного рассеяния)

Возможность использования моделей (15) для компонентов вектора Стокса и (17) для поляризационных составляющих лидарного сигнала позволяет легко трансформировать формулы (8), (10) и восстанавливать оптические параметры с учетом вклада МР. Заменяя в (8) и (10) S_a на $S_{a,i} = S_a \eta_i$ ($i = \perp, \parallel$ или 1, 2), получим профили поляризационных составляющих коэффициента обратного рассеяния, удовлетворяющие соотношениям (15), (17).

Для проверки эффективности методов при наличии значимого фона МР осуществлялась следующая процедура моделирования лидарных сигналов. Данные измерений, использовавшиеся при интерпретации в п. 2, принимались за сигналы, обусловленные однократным рассеянием. С помощью восстановленного из рамановского канала профиля коэффициента ослабления на компоненты вектора Стокса накладывалась помеха многократного рассеяния при заданных значениях $\eta_1 = 0,5$ и $\eta_2 = 0,6$ (МР от аэрозоля не учитывалось), а затем F_{\parallel} и F_{\perp} рассчитывались по формуле (16). На рис. 3 и 4 представлены результаты сравнения различных методов восстановления коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, аэрозольного деполаризационного отношения и отношения рассеяния из модельных сигналов, рассчитанных согласно процедуре, изложенной выше. Кривые 1 являются эталонными при тестировании алгоритмов и получены с использованием рамановского канала

в приближении однократного рассеяния. Кривые 2 получены согласно (8) и (10) при обращении уравнений для компонентов вектора Стокса (15) (относительная чувствительность поляризационных каналов считается известной), кривые 3 – то же, но при обращении лидарных уравнений (17) согласно (8), (10) и, соответственно, неизвестной чувствительности каналов.

Рис. 3 соответствует результатам восстановления параметров без коррекции фона МР, при расчетах использовался метод локальной калибровки (7), (8) – $z_* = 18$ км (левая часть рис. 3) и $z_* = 8$ км (правая часть рис. 3) в предположении, что

$$\beta_m(z_*) + \beta_a(z_*) \equiv \beta_m(z_*).$$

Очевидно, что наличие фона МР оказывает влияние на точность восстановления всех параметров (сравните результаты, представленные на рис. 1) – приводит к занижению значений для коэффициента аэрозольного обратного рассеяния и отношения рассеяния и завышению для аэрозольного деполаризационного отношения. Выбор точки калибровки за верхней границей облака, обоснованный с точки зрения устойчивости получаемых результатов, нецелесообразен – при восстановлении $\delta_a(z)$ из F_{\parallel} и F_{\perp} профиль полностью разрушается, а при восстановлении $\beta_a(z)$ приводит к существенным ошибкам на аэрозольных участках. Отметим, что адекватные результаты восстановления получаются при обращении сигналов, когда $\eta_1 = \eta_2$ и модели (16) и (17) совпадают; данные мы здесь не приводим, поскольку предположение $\eta_1 = \eta_2$ не выполняется для различных матриц рассеяния (мы подробно будем рассматривать данный вопрос во второй части статьи). В то же время при калибровке до облака, где влияние МР не сказывается, обоснованные результаты получаются для любого метода восстановления – исключение составляют завышенные значения для всех параметров за верхней границей облака. Еще большее разрушающее влияние оказывает фон МР на точность определения профилей методом интегральной калибровки (10), поскольку $S_{a,i} = S_a \eta_i$ согласно (11) входит в явном виде в калибровочный параметр, и результаты неустойчивы для любого метода восстановления. Применение интегральной калибровки оправдано только при коррекции фона МР и одновременной коррекции $V_{*,i}^2$, что обязательно необходимо учитывать, если используются сопутствующие измерения [21].

Рис. 4 соответствует результатам восстановления параметров с коррекцией фона МР при известных η_1 и η_2 (для обработки сигналов F_{\parallel} и F_{\perp} задавались $\eta_{\perp} = \eta_{\parallel} = \eta_1 = 0,5$). В левой части рисунка представлены профили, восстановленные методом локальной калибровки ($z_* = 8$ км). В правой части – методом интегральной калибровки с оценкой $T_c^2(z_1, z_2)$ согласно [16] и последующим уточнением решения по алгоритму (12)–(14). Анализ результатов показывает, что точность восстановления параметров для облачного участка

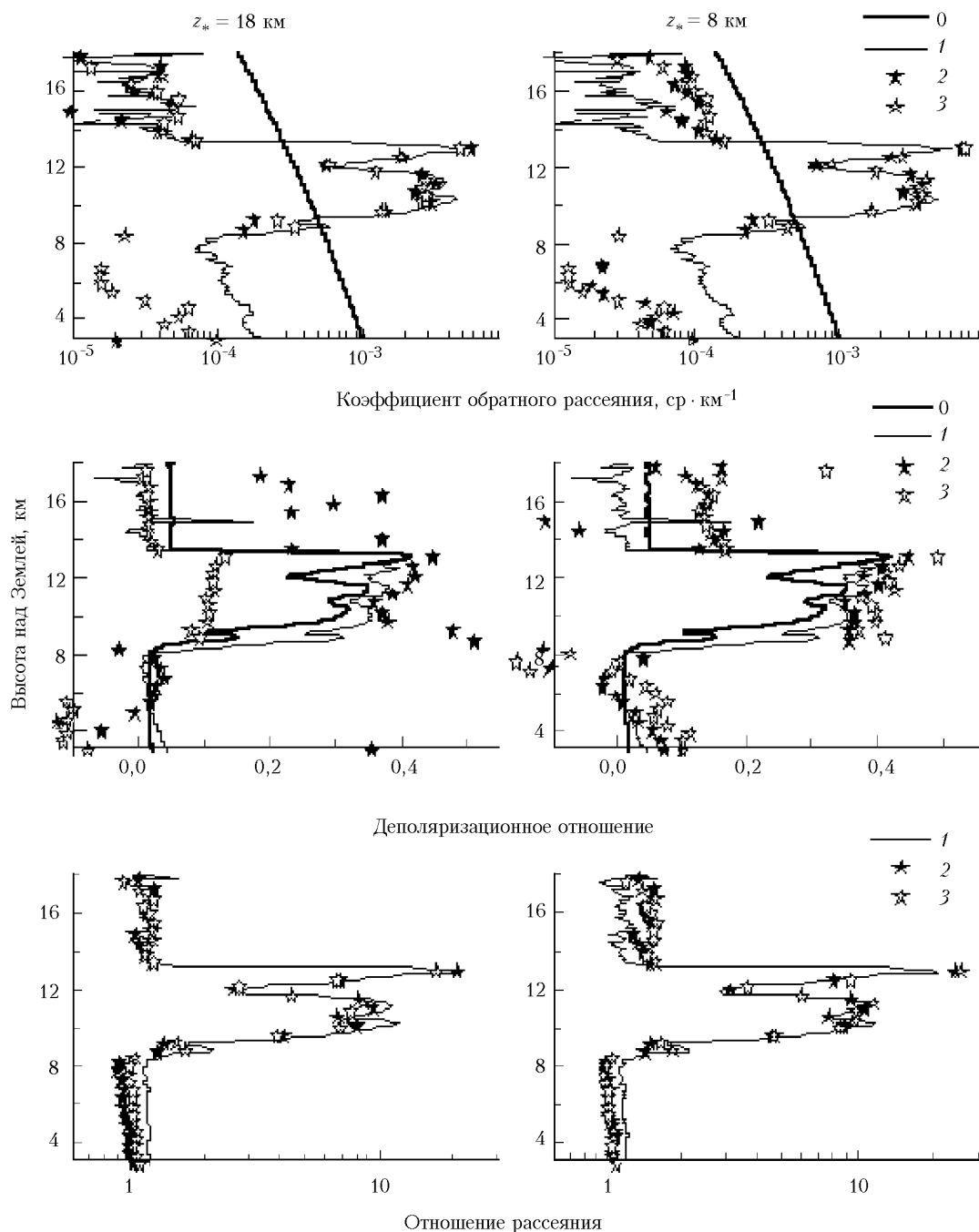


Рис. 3. Сравнение различных методов восстановления оптических параметров при наличии фона МР ($\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,6$). Структура рисунка и нумерация кривых совпадают с рис. 1. Коррекция фона МР не проводилась

практически совпадает для всех трех методов и сравнима с точностью восстановления в отсутствие фона МР. Восстановление для аэрозольных участков менее устойчиво для метода интегральной калибровки, но практически совпадает как при обращении уравнений для компонентов вектора Стокса, так и при обращении F_{\parallel} и F_{\perp} .

Результаты, представленные на рис. 3 и 4, показывают возможность независимой интерпретации

поляризационных составляющих лидарного сигнала и применимости модели (17) при $\eta_1 \neq \eta_2$. Во второй части мы подробно рассмотрим закономерности изменения $\eta_1(z)$ и $\eta_2(z)$ для различных типов рассеивающих частиц и различной геометрии зондирования (в том числе и для лидара космического базирования), а также методы оценивания вклада МР и профиля лидарного отношения для адекватного восстановления оптических параметров.

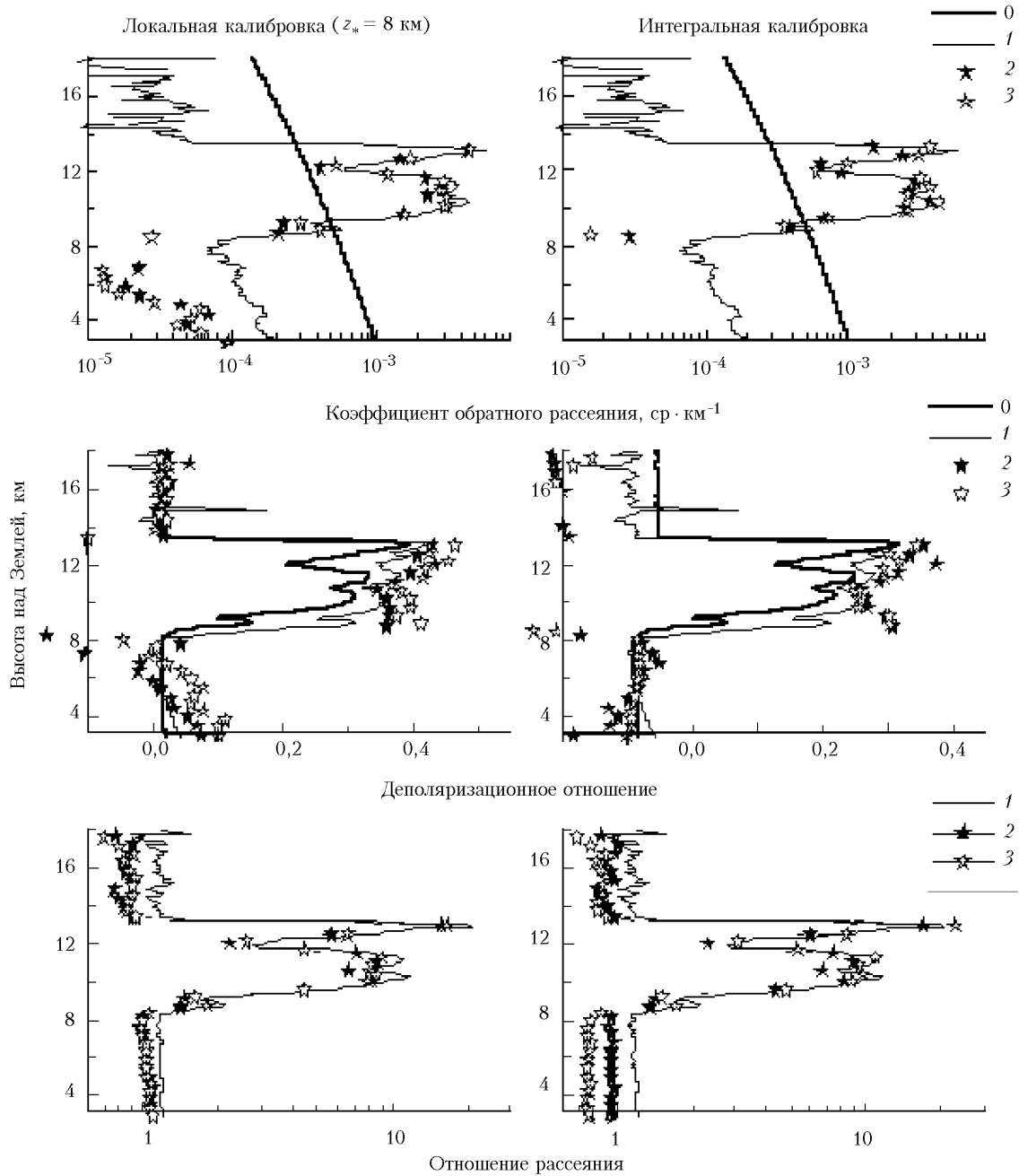


Рис. 4. То же, что на рис. 3, с коррекцией фона МР. Левая часть рисунка получена при локальной калибровке в $z_* = 8$ км, правая часть – при оценке $T_c^2(z_1, z_2)$ по лидарным сигналам согласно [16]

Заключение

В работе рассмотрены различные методы восстановления оптических параметров по данным зондирования поляризационным лидаром. Для наземных лидаров, когда в большинстве ситуаций лидарные сигналы описываются лидарным уравнением в приближении однократного рассеяния, предложен алгоритм восстановления профилей аэрозольных коэффициента обратного рассеяния и деполаризационного отношения, применимый при отсутствии информации об относительной чувствительности поляризационных каналов. Проведена

апробация для методов локальной и интегральной калибровок, даны рекомендации по использованию методов в условиях априорной неопределенности. Проведено исследование возможных ошибок и оптимального метода калибровки при наличии значимого фона МР.

Автор выражает благодарность Альберту Ансманну и Юрию Аршинову за любезно предоставленные данные поляризационного зондирования, составившие основу настоящей статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 02-05-64486, CRDF № RG2-2357-TO-02 и 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. № 21. P. 4245–4257.
3. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследования кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 354–361.
4. Pal S.R., Carswell A.I. Polarization anisotropy in lidar multiple scattering from atmospheric clouds // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 21. P. 3464–3471.
5. Toon O., Broweel E.V., Kinne S., Jordan J. Analysis of lidar observation of polar stratospheric clouds // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 393–396.
6. Кауль Б.В., Кузнецов А.Л., Половцева Е.Р., Самохвалов И.В. Исследование кристаллических облаков на основе локационных измерений матриц обратного рассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 4. С. 423–430.
7. Хмелевцов С.С., Кауфман Ю.Г., Коршунов В.А., Светогоров Е.Д., Хмелевцов А.С. Лазерное зондирование атмосферных параметров на Обнинской лидарной станции НПО «Тайфун» // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеонздат, 1998. С. 358–393.
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.: Гидрометеонздат, 1984. 198 с.
10. Cairo F., Donfrancesco G.Di., Adriani A., Pulvirenti L., Fierli F. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 21. P. 4425–4432.
11. Klett J.D. Lidar inversion with variable backscatter / extinction ratios // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 11. P. 1638–1643.
12. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23. № 5. P. 1609–1613.
13. Ansmann A., Reibessel M., Weitcamp C. Measurements of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar // Opt. Lett. 1990. V. 15. № 13. P. 746–748.
14. Ansmann A., Wandinger U., Reibessel M., Weitcamp C., Michaelis M. Independent measurements of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar // Appl. Opt. 1992. V. 31. № 33. P. 7113–7131.
15. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Еришов А.Д. Устойчивый метод восстановления оптических характеристик аэрозольных полей по данным комбинационного лидарного зондирования // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 3. С. 395–404.
16. Young S.A. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin clouds // Appl. Opt. 1995. V. 34. N 30. P. 7019–7031.
17. Еришов А.Д., Балин Ю.С., Самойлова С.В. Обращение лидарных данных при исследовании оптических характеристик слабозамутненной атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 894–899.
18. Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P. An overview of LITE: NASA's Lidar In-space Technology Experiment // Proc. IEER. 1996. P. 164–180.
19. Balin Yu.S., Samoilova S.V., Krekova M.M., Winker D.M. Retrieval of cloud optical parameters from space-based backscatter lidar data // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 30. P. 6365–6373.
20. Kovalev V.A. Lidar measurements of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios // Appl. Opt. 1993. V. 32. № 30. P. 6053–6065.
21. Kovalev V.A. Stable near-end solution of the lidar equation for clear atmospheres // Appl. Opt. 2003. V. 42. № 3. P. 585–591.
22. Platt C.M.R. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds // J. Atmos. Sci. 1973. V. 30. № 6. P. 1191–1204.
23. 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. № 1. P. 156–167.

S.V. Samoilova. Methods for retrieving atmospheric optical parameters from polarization lidar sensing data. Part 1. Problems of *a priori* uncertainty at calibration of signals and solutions.

Methods for interpretation of polarization lidar measurements are considered. The aim of papers is the selection of an optimal algorithm for calibration of solution, in particular, in the presence of significant multiple scattering background. Two methods for retrieving the profile of the aerosol depolarization ratio from polarization components of lidar return are described. The peculiarities of each method are analyzed when inverting the profiles of signals in the case of ground-based sensing.