

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ  
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.551.1:551.501

А.Д. Ершов, Ю.С. Балин, С.В. Самойлова

Обращение лидарных данных при исследовании оптических характеристик слабозамутненной атмосферы

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 4.06.2002 г.

Исследуется эффективность методов решения уравнения лазерного зондирования в условиях фонового аэрозоля и априорной неопределенности. В численном эксперименте рассматривается влияние вклада молекулярного рассеяния и высотного хода лидарного отношения на точность восстановления атмосферных параметров. Приведены результаты сравнения различных методов восстановления оптических параметров атмосферы с данными зондирования СКР-лидаром.

Интерпретация данных зондирования одночастотного аэрозольного лидара в задачах исследования пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля основывается на обращении уравнения лазерного зондирования (УЛЗ) в приближении однократного рассеяния, связывающего мощность принимаемого сигнала  $P(z)$  с параметрами среды:

$$P(z) = CP_0G(z)z^{-2}(\beta_{aer}(z) + \beta_{mol}(z)) \times \exp \left\{ -2 \int_0^z [\sigma_{aer}(z') + \sigma_{mol}(z')] dz' \right\}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – мощность излучаемого импульса;  $\beta_{mol}(z)$ ,  $\beta_{aer}(z)$  – соответственно коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния;  $\sigma_{mol}(z)$ ,  $\sigma_{aer}(z)$  – коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления;  $C$  – аппаратная постоянная, включающая характеристики приемопередатчика лидара;  $G(z)$  – геометрическая функция, описывающая перекрытие его конусов.

Целью настоящей работы является развитие метода устойчивого восстановления параметров природного аэрозоля в условиях априорной неопределенности.

Уравнение лазерного зондирования преобразуется к уравнению Бернулли

$$\frac{d\sigma(z)}{dz} - \sigma(z) \frac{d \ln \psi(z)}{dz} = 2\sigma^2(z), \quad (2)$$

где

$$\psi(z) = \sigma(z) \exp \left\{ -2 \int_0^z \sigma(z') dz' \right\},$$

решение которого

$$\sigma(z) = \frac{X(z)}{C^*(z_0) + 2 \int_z^{z_0} X(z') dz'}, \quad (3)$$

где

$$\sigma(z) = \sigma_{aer}(z) + \sigma_{mol}(z),$$

для метода Клетта [4]:

$$X(z) = P(z) z^2, \quad (3a)$$

а в предположении двухкомпонентной среды для метода Ферналда [5, 6]:

$$X(z) = S_a(z)P(z)z^2 \times \exp \left\{ 2 \int_z^{z_0} \left[ \frac{S_a(z')}{S_m} - 1 \right] \sigma_{mol}(z') dz' \right\}, \quad (3b)$$

где  $S_a(z) = \sigma_{aer}(z) / \beta_{aer}(z)$  – лидарное отношение;  $S_m = 8\pi/3$ .

Основная проблема, возникающая при использовании (3), – это определение константы калибровки  $C^*(z_0)$  и (для (3б)) задание высотного хода  $S_a$ . В формулу (3), (3а)  $S_a$  в явном виде не входит в силу предположения о степенном виде зависимости между  $\beta$  и  $\sigma$  при выводе формулы Клетта [4]. Популярность применения метода Клетта объясняется в основном использованием опорной точки  $z_0$  на удаленных участках трассы, что позволяет избежать расхождения решения, а также тем, что при условии  $\sigma_{aer} \gg \sigma_{mol}$  (горизонтальные трассы, сильнозамутненная атмосфера) метод дает удовлетворительные результаты. Способ определения константы калибровки заключается в использовании априорной информации об оптических параметрах среды в зависимости от возможностей получения этой информации. При локальной калибровке информация берется в некоторой точке  $z_0$ , где  $z_0 \in [z_{min}, z_{max}]$ , тогда  $C^*(z_0) = P(z_0) z_0^2 / [\sigma_{\Sigma}(z_0)]$  [4] или  $C^{**}(z_0) = P(z_0) z_0^2 / \beta_{\Sigma}(z_0)$  [3]. Существует ряд работ, посвященных методам оценки константы калибровки в условиях априорной неопределенности [13–15].

При интегральной калибровке применяют оценку величины оптического пропускания всего участка  $[z_{\min}, z_{\max}]$ , тогда  $C^{***} = T^2(z_{\min}, z_{\max})$  [1], где

$$T^2(z_{\min}, z_{\max}) = \exp \left\{ -2 \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \sigma_{\Sigma}(z') dz' \right\}.$$

В принципе возможна разработка алгоритмов обработки сигналов, когда описанные калибровки используются одновременно. При этом опорную точку  $z_0$  можно брать в начале трассы, что, конечно, предпочтительней с точки зрения независимой оценки оптических параметров среды с помощью дополнительной аппаратуры (фотометр, нефелометр и т.д.).

Здесь мы не рассматриваем методы, использующие абсолютную калибровку лидара, в связи с наибольшей погрешностью восстанавливаемых данных [1].

Для оценки эффективности и погрешностей восстановления оптических параметров атмосферы различными методами проведем численное моделирование лидарных сигналов, используя модель оптических параметров атмосферы рабочей группы MUSCLE для фонового аэрозоля [19] (рис. 1). Лидарный сигнал для последующего обращения рассчитывался аналитически в предположении двухкомпонентной среды. При восстановлении оптических характеристик использовались следующие алгоритмы: а) метод Клетта [4]; б) метод Ферналда [3, 5]; в) итерационный вариант метода Ферналда:

$$\sigma_{aer}^{(n)}(z) = \frac{S_a^{(n-1)}(z)P(z)z^2 \exp \left\{ 2 \int_z^{z_0} \left[ \frac{S_a^{(n-1)}(z')}{S_m} - 1 \right] \sigma_{mol}(z') dz' \right\}}{C^*(z_k) + 2 \int_z^{z_0} S_a^{(n-1)}(z)P(z)z^2 \exp \left\{ 2 \int_z^{z_0} \left[ \frac{S_a^{(n-1)}(z')}{S_m} - 1 \right] \sigma_{mol}(z') dz' \right\}} - \sigma_{mol}(z), \quad (4)$$

где для  $n = 1$   $S_a^{(0)} = \text{const}$ , при  $n > 1$   $S_a^{(n)}$  рассчитывается в соответствии с формулой (7а), приведенной ниже. В расчетах условие выхода из итерационной процедуры

$$\delta = \left| \frac{\int_z^{z_0} \sigma_{aer}^{(n-1)}(z') dz' - \int_z^{z_0} \sigma_{aer}^{(n)}(z') dz'}{\int_z^{z_0} \sigma_{aer}^{(n)}(z') dz'} \right| \leq 10^{-4}$$

достигалось за 5–7 итераций.

Опорное значение для  $\sigma_{aer}(z_0)$  выбиралось на максимально удаленном участке трассы, где  $\sigma_{mol}(z_0) \gg \sigma_{aer}(z_0)$ , при этом значение константы калибровки задавалось точное. Таким образом, погрешность вос-

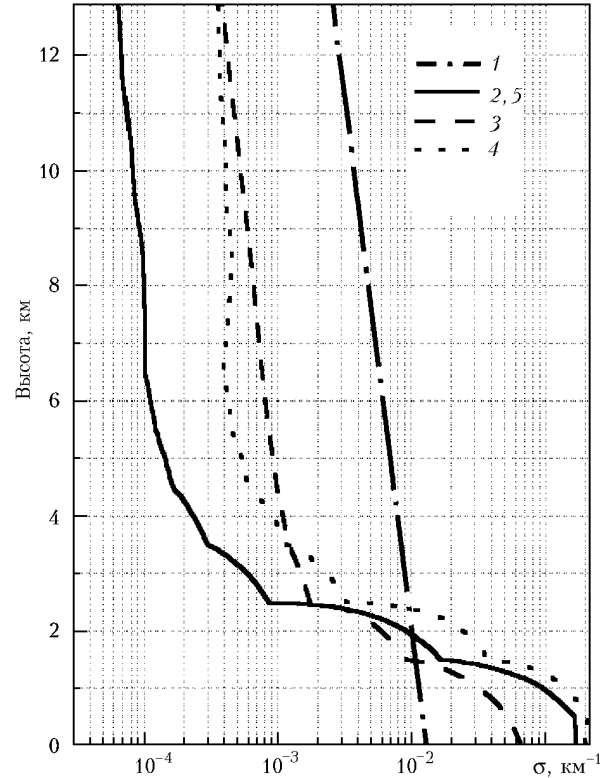


Рис. 1. Результаты численного моделирования: 1 – модельный профиль молекулярного коэффициента рассеяния атмосферы, 2 – аэрозольного коэффициента рассеяния ( $\sigma_{aer}(z)$ ); 3 – восстановленный профиль  $\sigma_{aer}(z)$  методом Клетта; 4 – восстановленный профиль  $\sigma_{aer}(z)$  методом Ферналда; 5 – восстановленный профиль  $\sigma_{aer}(z)$  итерационным методом

становления определялась только погрешностью задания вертикального хода лидарного отношения. Результаты моделирования показали неоднозначность интерпретации лидарных данных различными методами (рис. 1). Метод Ферналда дает завышенные значения восстанавливаемого параметра  $\sigma_{aer}$  при использовании  $S_a = \text{const}$  ( $S_a = \bar{S}_a(z_{\min}, z_{\max})$ ) на всем высотном диапазоне. Наибольшее расхождение с модельным значением фиксируется в интервале высот выше 3 км, в связи с тем, что в этом высотном диапазоне вертикальный ход  $\bar{S}_a/S_a(z)$  достигает максимальных значений.

Использование метода Клетта также дает существенную погрешность на всем высотном диапазоне, при этом в диапазоне высот менее 3 км наблюдаются существенно заниженные значения  $\sigma_{aer}$  из-за неучета вклада молекулярной компоненты. Напротив, применение итерационного алгоритма приводит к точному восстановлению модельных параметров.

Для апробации используемых методов в натуральных условиях реализовано сопоставление указанных выше методов с результатами обращения СКР-лидарных сигналов. Данная методика апробации рекомендована при разработке методов интерпретации лидарных сигналов [9], поскольку данные СКР-лидара позволяют отдельно получать молекулярную и аэрозольную составляющие рассеяния в атмосфере, а также лидарное отношение [2, 20, 21].

Решение для коэффициента обратного рассеяния в этом случае будет [2, 7] иметь вид

$$\beta_{aer}(\lambda_0, z) = -\beta_{mol}(\lambda_0, z) + \beta_R(\lambda_R, z) \frac{C_R P_{\lambda_0}(z)}{C_0 P_{\lambda_R}(z)} \times \frac{\exp\left\{-\int_0^z [\sigma_{aer}(\lambda_R, z') + \sigma_{mol}(\lambda_R, z')] dz'\right\}}{\exp\left\{-\int_0^z [\sigma_{aer}(\lambda_0, z') + \sigma_{mol}(\lambda_0, z')] dz'\right\}}, \quad (5)$$

где  $\beta_{mol}(\lambda_0, z)$ ,  $\beta_{aer}(\lambda_0, z)$  – коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния на длине волны зондирования  $\lambda_0$ ;  $\beta_R(\lambda_R, z)$  рассчитывается из молекулярной плотности азота  $N_R(z)$ ,  $\sigma_{mol}(\lambda_0, z)$ ,  $\sigma_{aer}(\lambda_0, z)$ ,  $\sigma_{mol}(\lambda_R, z)$ ,  $\sigma_{aer}(\lambda_R, z)$  – коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления для длин волн  $\lambda_0$  и  $\lambda_R$ .

Решение для коэффициента рассеяния аэрозолем записывается в следующем виде [2]:

$$\sigma_{aer}(\lambda_0, z) = \frac{\frac{d}{dz} \left[ \ln \frac{N_R(z)}{P_{\lambda_R}(z) z^2} \right] - \sigma_{mol}(\lambda_0, z) - \sigma_{mol}(\lambda_R, z)}{1 + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_R} \right)^k}, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент в отношении  $\sigma_{aer}(\lambda_0, z) / \sigma_{aer}(\lambda_R, z) = (\lambda_0 / \lambda_R)^k$ , изменяющийся в пределах от 0 до 2 в зависимости от типа исследуемого аэрозоля.

Выбор точки калибровки  $z_0$  производится на высотах, где отношение рассеяния  $R(z) = 1 + \beta_{aer}(z) / \beta_{mol}(z)$  достигает минимума, т.е.  $R(z) \approx 1$ . Отношение рассеяния находится из соотношения

$$R(z) = R(z_m) \frac{P(z) z^2 \beta_{mol}(z_m) T^2(z_m)}{P(z_m) z_m^2 \beta_{mol}(z) T^2(z)},$$

где  $z_m$  – высота с известным значением  $R(z)$ ;  $T^2(z)$  – квадрат пропускания от  $z_{min}$  до  $z$ , задается по оптической модели атмосферы.

Результаты восстановления  $\beta(z)$  и  $\sigma(z)$  на основе сопоставления результатов обработки данных лидарных сигналов на частоте зондирования и их соотношения к сигналам на частоте колебательно-вращательного рамановского рассеяния молекулярным азотом (5), (6) представлены на рис. 2, а, б. В качестве исходного материала использовались данные, полученные на СКР-лидаре группой Ансманна из Института тропосферных исследований Германии в 1999 г [22].

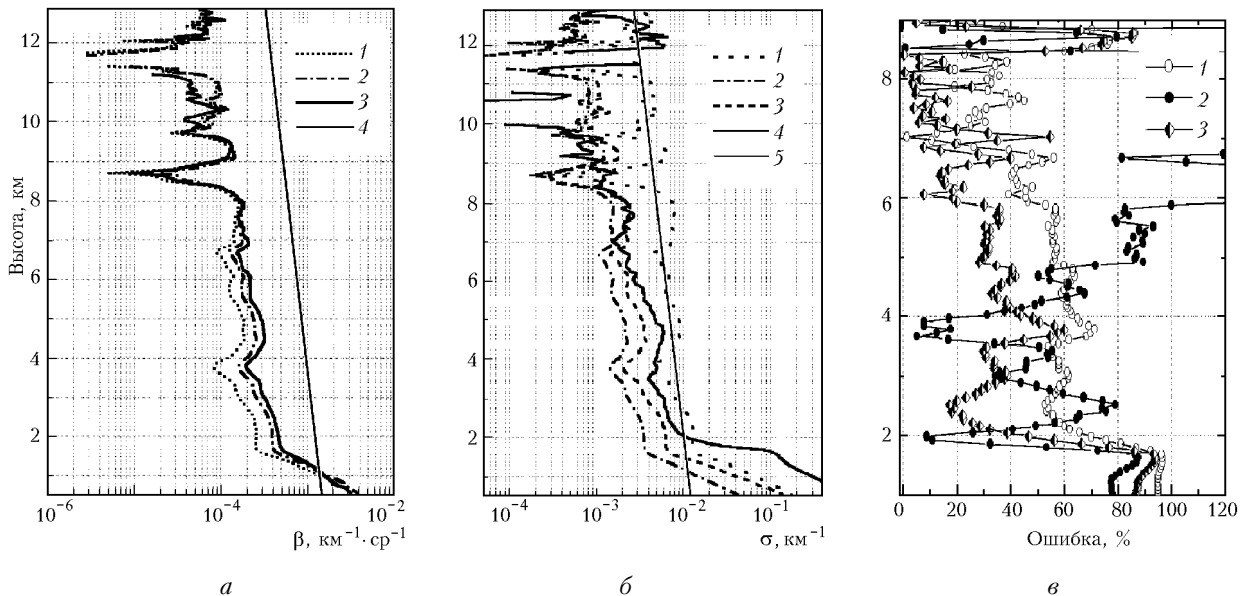


Рис. 2. Результаты восстановления профилей оптических параметров атмосферы: а – 1 – восстановленный профиль коэффициента обратного рассеяния аэрозолем ( $\beta(z)$ ) с использованием метода Ферналда; 2 – профиль  $\beta_{mol}(z)$ , восстановленный итерационным методом; 3 – данные СКР-лидара; 4 – модель  $\beta_{mol}(z)$  для молекулярной атмосферы; б – 1 – восстановленный профиль  $\sigma(z)$  методом Ферналда; 2 – профиль  $\sigma(z)$ , восстановленный методом Клетта; 3 – профиль  $\sigma(z)$ , восстановленный итерационным методом; 4 – данные СКР-лидара; 5 – модель  $\sigma_{mol}(z)$  для молекулярной атмосферы; в – погрешности восстановления высотного хода  $\sigma_{aer}(z)$  1 – методом Клетта; 2 – методом Ферналда; 3 – итерационным методом

Профиль коэффициента рассеяния аэрозолем рассчитывался с применением итерационного метода с адаптивной оценкой области допустимых значений  $\sigma_{aer}(z)$  [16].

Наибольшее приближение к  $\beta_{aer}(z)$ , восстановленному из данных СКР-лидара, дает использование итерационного метода, при этом, в отличие от решения для  $\sigma_{aer}(z)$ , средняя погрешность восстановления в нижнем 8-км слое атмосферы достигает не более 35% для метода Ферналда и 15% для итерационного метода, так как решение для  $\beta_{aer}(z)$  слабо чувствительно к погрешностям задания высотного хода  $S_a$ . Средние ошибки восстановления  $\sigma_{aer}(z)$  значительны для всех методов, наименьшие показатели у итерационного метода (35%), для метода Клетта средняя ошибка составляет 60%, и максимальная погрешность у метода Ферналда (100%). При этом наибольшие значения погрешности восстановления  $\sigma_{aer}(z)$  (рис. 2,б) наблюдаются в нижнем 2-км слое атмосферы, что вызвано главным образом ошибками в задании геометрической функции лидара. Выше высоты 2 км, где, как мы полагаем, геометрический фактор равен 1, распределение ошибки восстановления более соответствует погрешностям метода. Здесь у итерационного метода средняя ошибка составляет 25%, для метода Клетта 50% и для метода Ферналда 110%.

Для корректного использования итерационного метода необходимо задание функциональной связи между лидарным отношением и коэффициентом рассеяния аэрозолем. Приводимые в литературе экспериментальные зависимости, описываемые соотношениями (7) и представленные в графическом виде на рис. 3, получены в основном для сильно- и среднезамутненной атмосферы [4, 17, 18].

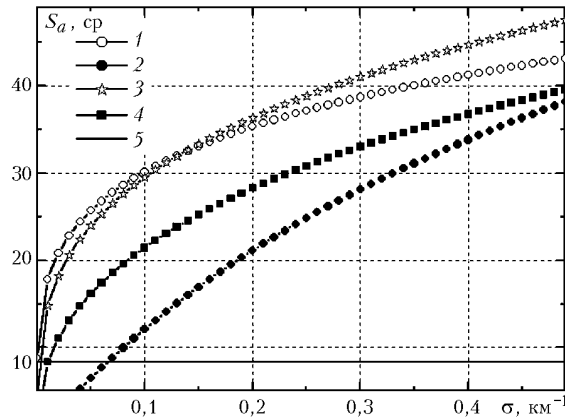


Рис. 3. Эмпирические зависимости  $S_a(\sigma)$  по литературным данным: 1 – формула (7а); 2 – (7б); 3 – (7в); 4 – (7г); 5 –  $S_m = 8\pi/3$

Соотношение (7а) аппроксимировано на основе экспериментальной зависимости между  $\beta(z)$  и  $\sigma(z)$  [11] и экстраполировано в область малых значений  $\sigma(z)$ . Область его применения рассчитана на широкий диапазон изменений  $\sigma(z)$ : от менее  $0,01 \text{ км}^{-1}$  до более  $20 \text{ км}^{-1}$ . Функциональная зависимость (7б) рассчитана на применение в условиях тумана и низкой облачности [17]. Соотношение (7в) впервые встречается в работе Клетта [4] и в дальнейшем получило широкое

применение при интерпретации данных лазерного зондирования атмосферы. Последняя формула (7г) получена Ковалевым [18] на основе анализа опубликованных литературных данных и собственных экспериментальных наблюдений.

$$1. S_a = 50 [\sigma + 0,000415]^{0,23-0,03\sqrt{\sigma}}, \quad (7а)$$

$$2. S_a = [0,0074 + 0,055 \exp \{-(\log(\sigma) - 3) / 3,1\}^2]^{-1}, \quad (7б)$$

$$3. S_a = 58,8\sigma^{0,3}, \quad (7в)$$

$$4. S_a = 50\sigma^{(0,4-0,1\sqrt{\sigma})}. \quad (7г)$$

В качестве критерия для выбора вида функциональной зависимости для  $S_a$  воспользуемся профилем лидарного отношения, полученного экспериментально из данных СКР-лидара. На рис. 4 представлены отклонения величины  $S_a(z)$ , рассчитанной согласно формулам (7а) – (7г), от реально наблюдаемого профиля для данной атмосферной ситуации. Минимальная величина средней ошибки по профилю лидарного отношения (34%) наблюдается при использовании зависимости вида (7а).

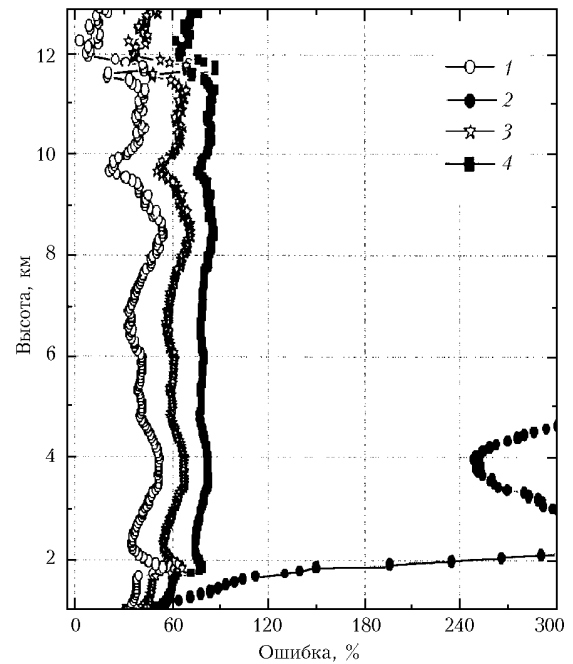


Рис. 4. Отклонения профиля  $S_a(z)$  от восстановленного по данным СКР-лидара при использовании соотношений: 1 – (7а); 2 – (7б); 3 – (7в); 4 – (7г)

Следует отметить, что применение итерационного метода при восстановлении  $\beta(z)$  не дает ощутимого выигрыша по сравнению с методами, использующими допущение о постоянстве лидарного отношения вдоль трассы зондирования. Здесь достаточно введения физически обоснованного значения  $S_a = \text{const}$ .

Величина лидарного отношения зависит от типа исследуемого аэрозоля и изменяется в пределах 5–30 ср для морского аэрозоля, 45–80 ср для континентального и 55–95 ср для техногенного аэрозоля.

На рис. 5 приведены диапазоны изменения лидарного отношения для различного типа аэрозоля, полученного авторами [8, 10, 12,] за последние годы путем численных расчетов и экспериментальных исследований. В работе [8] рекомендовано для нижней тропосферы использовать следующие начальные значения  $S_a$ : 20 ср при преобладании грубодисперсной фракции в логнормальном распределении аэрозольных частиц по размерам; 60 ср для субмикронной фракции; 40 ср при двухмодовом распределении.

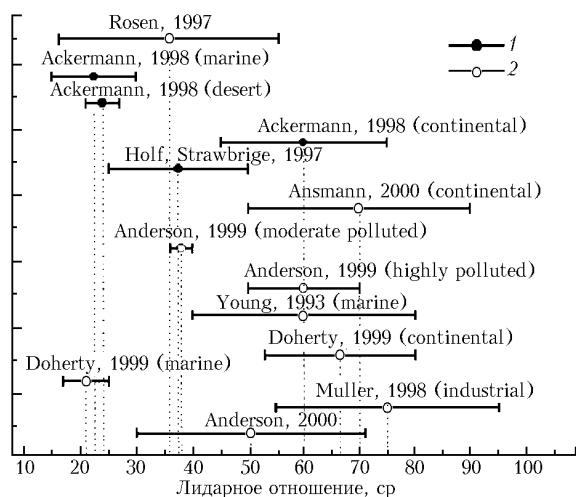


Рис. 5. Диапазоны изменения лидарного отношения для различного типа аэрозоля (по данным 1993–2000 гг.): 1 – данные теоретических расчетов; 2 – данные эксперимента

В то же время при восстановлении высотного профиля  $\sigma(z)$  допущение  $S_a = \text{const}$  приводит к отклонениям полученного профиля  $\sigma(z)$  от реперного на отдельных участках высотного диапазона. Это проиллюстрировано в работе [21] и нашими графиками на рис. 6, где показано сравнение восстановленного профиля  $\sigma(z)$  итерационным методом и методом Ферналда (при  $S_a = 50$  ср) с данными СКР-лидара. Различие восстанавливаемых данных между этими двумя методами обработки лидарных данных начинается уже с высоты 1,5 км, когда происходит уменьшение значений лидарного отношения с высотой. При этом применение итерационного метода дает достаточно хорошее приближение к реальному профилю  $\sigma(z)$ , по крайней мере начиная с высоты 2 км. До этой дистанции наблюдаются значительные отклонения от данных СКР-лидара для обоих параметров, но причина здесь, скорее, кроется в особенностях именно данных комбинационного рассеяния, что обсуждалось выше при рассмотрении рис. 2. Таким образом, при интерпретации лидарных сигналов в условиях априорной неопределенности можно дать следующие рекомендации.

1) Для условий чистой и слабозамутненной атмосферы необходимо использовать методы, учитывающие в решении высотную зависимость коэффициента молекулярного рассеяния атмосферы. Профиль  $\sigma_{mol}(z)$  в этом случае задается моделью молекулярной

атмосферы или, если есть возможность, рассчитывается по аэрологическим данным.

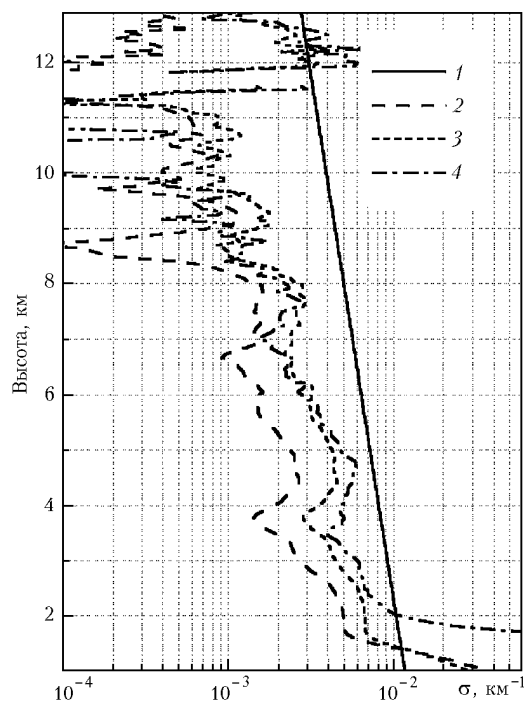


Рис. 6. Профиль коэффициента рассеяния аэрозолем ( $\sigma(z)$ ): 1 – модель  $\sigma(z)$  для молекулярной атмосферы; восстановленные: 2 – методом Ферналда, 3 – итерационным методом; 4 – данные СКР-лидара

2) Наименьшие погрешности при восстановлении по лидарным данным  $\sigma_{aer}(z)$  дает итерационный метод, описанный выше.

3) При использовании итерационного метода наиболее оптимальна функциональная зависимость между лидарным отношением и коэффициентом рассеяния аэрозолем, предложенная Ковалевым [11] [формула (7a)].

Авторы выражают благодарность А. Ансманну (Институт тропосферных исследований, Германия) за возможность использования данных зондирования СКР-лидаром.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 02-05-64486 и INTAS-01-0239.

1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. 173 с.
2. Ansmann A., Wandiger U., Riebesell M., Weitkamp C. and Michaelis W. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar // Appl. Opt. V. 31. N 33. 1992. P. 7113–7131.
3. Fernald F.G., Herman B.M., and Reagan J.A. Determination of aerosol height distributions by lidar // J. Appl. Meteorol. 1972. V. 11. P. 482–489.
4. Klett J.D. Stable analytic inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 2. P. 211–220.
5. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 5. P. 652–653.

6. *Sasano Y., Browell E.V. and Ismail S.* Error caused by using a constant extinction/backscatter ratio in the lidar solution // *Appl. Opt.* 1985. V. 24. N 22. P. 3929–3932.
7. *Волков С.Н., Кауль Б.В.* Методика определения коэффициентов обратного рассеяния или ослабления света в аэрозольных слоях тропосферы лидаром, работающим на частотах упругого и комбинационного рассеяния света // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7 № 11–12. С. 1592–1602.
8. *PICASSO-CENA Lidar ATBD White Papers* (<http://www.atmos.washington.edu/~cheeka/PC/whitepapers.html>)
9. *Platt C.M., Young S.A., Carswell A.I., Pal S.R., McCormick M.P., Winker D.M., DelGuasta M., Stefanutti L., Eberhard W.L., Hardesty M., Flamant P.H., Valentin R., Forgan B., Gimmestad G.G., Jager H., Khmelevtsov S.S., Kolev I., Kaprieolev B., Daren Lu, Sassen K., Shama-naev V.S., Uchino O., Mizuno Y., Wandinger U., Weitkamp C., Ansmann A., and Wooldridge C.* The Experimental Cloud Lidar Pilot Study (ECLIPS) for Cloud-Radiation Research // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1994. V. 75. P. 1635–1645.
10. *Rosen J. and Kjome N.* Ballon-borne measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio // *J. Geoph. Res. D.* 1997. V. 102. N 10. P. 11165–11169.
11. *Ковалев В.А.* Функциональные зависимости между полным и обратным рассеянием для восстановления профиля показателя ослабления атмосферы по данным лидарного зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5. № 5. С. 534–538.
12. *Anderson T., Masonis S.J., Covert D.S., Charlson R.J., Rood M.J.* In situ measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio at a polluted continental site // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105. N 22. P. 26907–26915.
13. *Kovalev V.A. and Moosmuller H.* Distortion of particulate extinction profiles measured with lidar in a two-component atmosphere // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. N 27. P. 6499–6507.
14. *Sasano Y. and Nakane H.* Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. N 1. P. 11–13.
15. *Balin Yu.S., Kavkyanov S.I., Krekov G.M. and Rasenkov I.A.* Noise-proof inversion of lidar equation // *Opt. Lett.* 1987. V. 12. N 1. P. 13–15.
16. *Самойлова С.В., Балин Ю.С., Ершов А.Д.* Устойчивый метод восстановления оптических характеристик аэрозольных полей по данным зондирования Раман-лидаром // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2002. (в печати).
17. *Klett J.D.* Lidar inversion with variable backscatter/ extinction ratios // *Appl. Opt.* 1985. V. 24. N 11. P. 1638–1643.
18. *Ковалев В.А., Болденков Г.Н., Козинцев В.И.* О связи между обратным и полным рассеянием света в атмосфере // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1987. Т. 23. № 6. С. 611–616.
19. *Bruscaioni P., Ismaelli A.* MUSCLE 11 Homework // *Book of extended abstracts. Eleventh International Workshop on Multiple Scattering Lidar Experiments.* NASA Langley Research Center, USA. 2000. N 11. P. 3–9.
20. *Liu Zh., Nobuo S. and Toshiyuki M.* Extinction-to-backscatter ratio of Asia dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 15. P. 2760–2767.
21. *Larcheveque G., Balin I., Nessler R., Quaglia Ph., Simeonov V., van den Bergh H., and Calpini B.* Development of a multiwavelength aerosol and water-vapor lidar at the Jungfraujoch Alpine Station (3580 m above sea level) in Switzerland // *Appl. Opt.* V. 41. N 15. P. 2781–2789.
22. *Mattis I., Jaenisch V., Muller D., Franke K., Ansmann A.* Classification of Particle Extinction Profiles Derived Within the Framework of the German Lidar Network by the Use of Cluster Analysis of Backtrajectories // *Advances in Laser Remote Sensing, 20<sup>th</sup> ILRC,* Vichy, France. 2000. P. 211–214.

*A.D. Ershov, Yu.S. Balin, S.V. SamoiloVA.* **Lidar data inversion when studying optical characteristics of the weakly turbid atmosphere.**

The efficiency of methods for solution of the lidar equation is studied under the conditions of background aerosol and *a priori* uncertainty. The effect of the contribution of molecular scattering and the altitude behavior of the lidar ratio on the accuracy of reconstruction of atmospheric parameters is considered in numerical experiment. Optical parameters of the atmosphere reconstructed by different methods are compared with Raman lidar data.