

С.В. Самойлова, Ю.С. Балин, М.М. Крекова

УЧЕТ ЭФФЕКТОВ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАКОВ ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

Получены оценки вклада многократного рассеяния (МР) в лидарные сигналы от облаков из космоса, позволяющие описать процесс формирования сигнала на первых кратностях рассеяния. Предложен метод внесения поправок на МР в решение уравнения локации, полученное в приближение однократного рассеяния. Описан алгоритм восстановления профиля коэффициента рассеяния и оптической толщины τ облака в условиях априорной неопределенности, применимый при $\tau_{\max} < 3,5$. Приведены результаты определения оптических параметров верхней кромки слоистообразных облаков по сигналам, рассчитанным методом Монте-Карло.

Интерпретация данных лазерного зондирования облачных полей из космоса имеет ряд особенностей, связанных, с одной стороны, с техническими возможностями лидаров (ранее эта задача была рассмотрена в [1]), с другой – с большими дистанциями зондирования, а следовательно, энергопотерями и высоким фоном многократного рассеяния (МР).

В общем случае для определения оптических и микрофизических параметров облаков необходимо решать нестационарное уравнение переноса [2]. В ряде случаев, однако, удастся исключить вклад МР в мощность сигнала обратного рассеяния и проводить его дальнейшую обработку методами, разработанными в приближении однократного рассеяния (см., например, [3]). Этот подход использован в [4] при интерпретации сигналов от перистых облаков.

Данная задача весьма сложна, во-первых, из-за того, что величина вклада МР зависит от оптических характеристик и параметров спектра размеров, которые априори неизвестны и, вообще говоря, должны быть найдены по самим сигналам (проведение дополнительных калибровочных измерений с борта космического аппарата затруднено). Во-вторых, до сих пор не разработаны аналитические оценки вклада кратностей рассеяния выше второй на этапе формирования лидарного сигнала. В то же время, как было показано в [3], неточность коррекции фона МР при обращении данных приводит к неустойчивости решения, что обусловлено интегральным характером зависимости интенсивности рассеянного света от коэффициента рассеяния $\beta(z)$; для регуляризации решения возникает необходимость введения дополнительной априорной информации о помехе МР и самом решении.

В первой части путем введения качественных гипотез о свойствах первых кратностей рассеяния получены аналитические оценки вклада МР в сигналы от облаков из космоса. Во второй части рассмотрен метод обращения этих сигналов относительно $\beta(z)$ и предложен алгоритм оценки оптической толщины

облака, необходимой для регуляризации решения, по самим сигналам.

Соотношения для оценки вклада МР в лидарные сигналы

Проведенный в [5] численный эксперимент позволил выделить ряд особенностей формирования эхосигналов при зондировании из космоса. Было отмечено, что, независимо от профиля коэффициента рассеяния, передний фронт сигнала до $\tau = 0,8 \div 1$ определяется кратностями рассеяния 1, 2-го порядков, в интервале $\tau \in [1; 1,5]$ нарастает интенсивность кратностей до 5-го порядка, задний фронт импульса ($\tau > 2$) формируется за счет излучения высоких кратностей рассеяния ($n > 5$). При этом сигнал, обусловленный i -й кратностью рассеяния (обозначим $P^{(i)}(z)$), обладает выраженным максимумом, меньшим по амплитуде и смещенным в сторону больших τ по сравнению с $P^{(i-1)}(z)$. Значения $P^{(i)}(z) < P^{(i-1)}(z)$ при малых τ ; с возрастанием τ существует τ_* такое, что $P^{(i)}(z) > P^{(i-1)}(z)$ для $\tau > \tau_*$. Эту априорную информацию качественного характера можно учесть.

Согласно теории двукратного рассеяния [5] при зондировании облаков из космоса

$$P^{(2)}(z) = \delta(z) P^{(1)}(z), \quad (1)$$

где

$$P^{(1)}(z) = A \gamma_{\pi} \beta(z) \exp \{-2 \tau(z_0, z)\} / z^2 \quad (2)$$

– уравнение локации в приближении однократного рассеяния; A – аппаратная постоянная; z_0 – верхняя граница облака; γ_{π} – лидарное отношение;

$$\delta(z) = \frac{2\pi z^2}{\gamma_p} \left\{ \frac{1}{\beta(z)} \int_0^{\alpha_1} \Gamma(\varphi) \int_{z_0}^z \frac{\beta(x) \beta(x')}{R(z, x, \varphi)} dx d\varphi + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\beta(z)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \Gamma(\varphi) \int_{x_1}^z \frac{\beta(x) \beta(x')}{R(z, x, \varphi)} dx d\varphi + \\
& + \int_{\alpha_2}^{\pi} \Gamma(\varphi) \int_{z_0}^z \frac{\beta(x)}{x^2} dx d\varphi + \\
& + \left. \int_0^{\alpha_2} \Gamma(\varphi) \int_0^{\rho_1} \frac{\beta(z + \rho \cos(\varphi))}{(z - \rho)^2} d\rho d\varphi \right\}, \quad (3)
\end{aligned}$$

где

$$\Gamma(\varphi) = \gamma(\varphi) \gamma(\pi - \varphi) \sin \varphi;$$

$$R(z, x, \varphi) = z^2 - (2z - x) x \sin^2 \varphi/2;$$

$$x' = x + \rho \cos(\varphi) = x + \frac{z(z - x)}{z - x \sin^2 \varphi/2};$$

$$\alpha_1 = \arctg \left[\frac{z \operatorname{tg}(\varphi_0)}{z - z_0} \right]; \quad \alpha_2 = \pi - \arctg \frac{z - z_0}{(z - z_0) + 2 \Delta z};$$

$$x_1 = z \left(1 - \frac{(z - z_0)}{z_0} \operatorname{ctg}(\varphi/2) \right); \quad \rho_1 = \frac{\Delta z}{\cos^2(\varphi/2)};$$

$\gamma(\varphi)$ – нормированная индикатриса рассеяния; φ_0 – угол поля зрения приемопередатчика. Соотношение (3) справедливо для $z \in [z_0, R_0]$, где $R_0 = z_0/(1 - \operatorname{tg}(\varphi_0/2))$; обобщение для $z > R_0$ приведено в [6].

Рис. 1, б, в иллюстрирует результаты вычислений $\delta(z)$ для облаков с различными коэффициентами рассеяния, профили которых приведены на рис. 1, а. Расчеты проводились для схемы моностатического лоатора на $\lambda = 0,53$ мкм, удаленного от Земли на расстояние 400 км; предполагалось, что источник излучает изотропно в конусе направлений $2\pi(1 - \cos\psi_0)$, где $\psi_0 = 0,2$ мрад. Эхосигнал регистрируется приемником в конусе $2\pi(1 - \cos\varphi_0)$, где $\varphi_0 = 0,44$ мрад. Параметры лоатора совпадали с характеристиками космического лидара «БАЛКАН»; облачный слой, находящийся от 1,5 до 2 км над Землей, имел рассеивающие свойства, соответствующие типу С1 (рис. 1, б) и С2 (рис. 1, в) по классификации [7] (нумерация кривых совпадает).

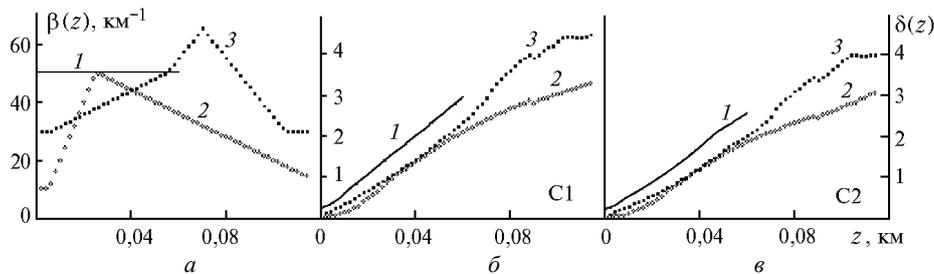


Рис. 1. Отношение сигнала второй кратности рассеяния к первой $\delta(z)$ для водных облаков: а – модельные профили коэффициента рассеяния; б – соответствующие им функции $\delta(z)$ для облака С1; в – для С2

Предположим, что оценки $\tilde{P}^{(i)}(z)$ для $i > 2$ являются функциями, зависящими от $\delta(z)$, и представимы в виде

$$\tilde{P}^{(i)}(z) = \delta_i(z) \tilde{P}^{(i-1)}(z), \quad \delta_i(z) = \frac{[\delta(z)]^{(i-1)}}{(i-1)!}, \quad (4)$$

где $\delta(z)$ удовлетворяет соотношению (3). Такое представление соответствует всем требованиям качественного характера о связи между $\tilde{P}^{(i)}(z)$ и $\tilde{P}^{(i-1)}(z)$, отмеченным в [5], при этом введенная функция $\delta_i(z)$ учитывает информацию о микроструктуре и оптических характеристиках облаков, что дает возможность ее использования в методах восстановления параметров облака по фону МР [8]. Оценка мощности сигнала обратного рассеяния (с учетом МР до некоторой n -й кратности) имеет вид

$$\tilde{P}^{(2)}(z) = \sum_{i=1}^n \tilde{P}^{(i)}(z) = \tilde{P}^{(1)}(z) \exp \{ \delta(z) \} = \tilde{P}^{(1)}(z) \Delta \tilde{P}(z). \quad (5)$$

Количественная достоверность и границы применимости введенных предположений были исследованы в численном эксперименте. На рис. 2, а представлены результаты расчетов $P(z)$, $P^{(i)}(z)$ ($i = 1 \div 5$) методом Монте-Карло для облаков С1, профили $\beta(z)$ которых представлены на рис. 1, а; условия эксперимента аналогичны приведенным выше (более подробно методика расчетов описана в [9]). Рис. 2, б иллюстрирует результаты

вычислений $\tilde{P}^{(2)}(z)$, $\tilde{P}^{(i)}(z)$ ($i = 1 \div 5$) согласно (3)–(5), полученные для тех же предположений. На рис. 2, в изображены относительные (в процентах) погрешности оценивания $\tilde{P}^{(2)}(z)$ по предложенным формулам; за точное значение $P^{(2)}(z)$ принимались результаты расчета методом Монте-Карло (кривые θ рис. 2, а). Анализ результатов показывает, что оценки (3)–(5) позволяют удовлетворительно описывать вклад МР до $\tau \leq 2$ (погрешности оценивания $\leq 30\%$). В то же время их удобно использовать для коррекции помехи МР при восстановлении оптических параметров по сигналам из космоса. В дальнейшем мы покажем, что границы применимости этих оценок при решении обратной задачи могут быть расширены до $\tau < 3,5$.

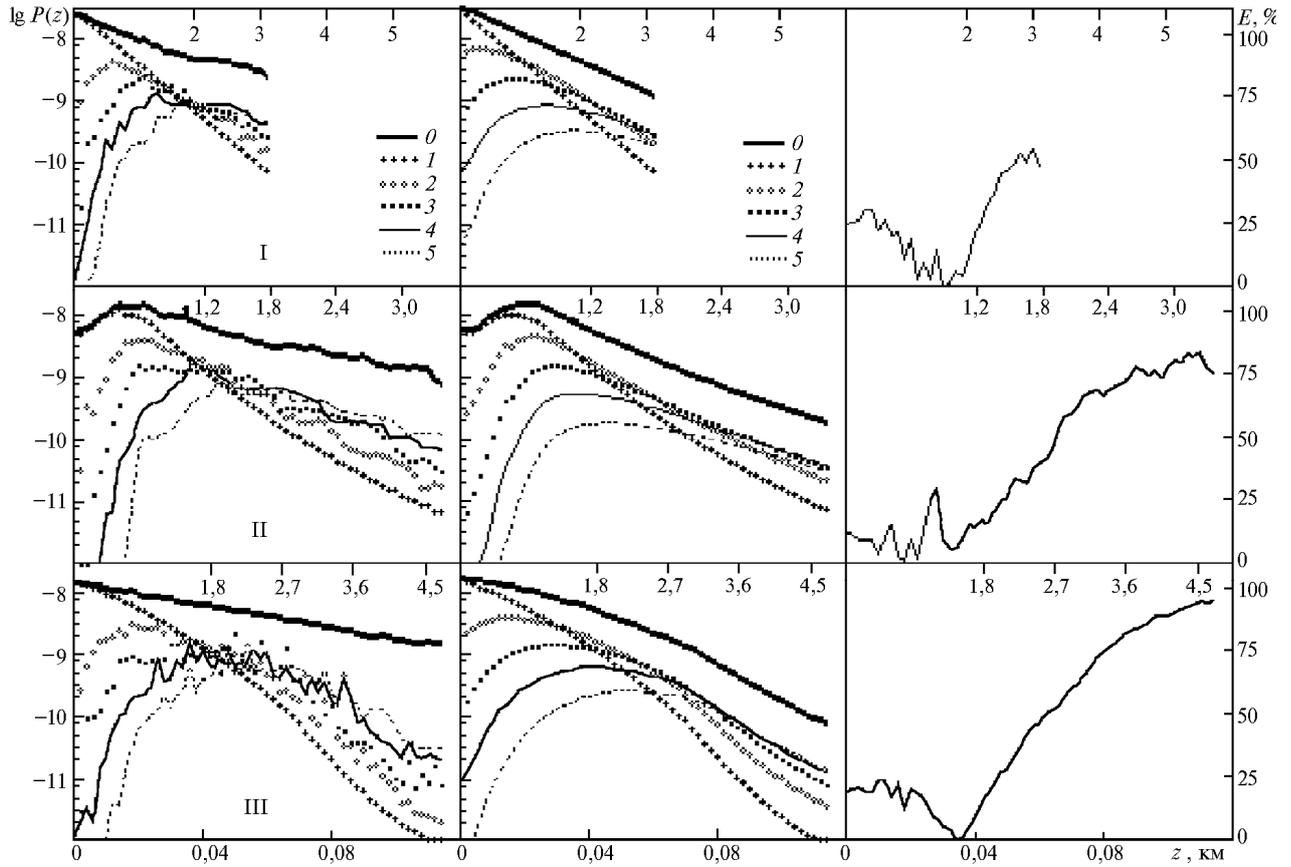


Рис. 2. Сравнение методов расчета сигналов из космоса по первым кратностям рассеяния: *a* – с использованием метода Монте-Карло; *b* – с оценкой вклада МР: *0* – суммарный сигнал, *1*–*5* – сигналы (1–5)-й кратности рассеяния; *ε* – относительная погрешность расчета суммарного сигнала (модельные профили $\beta(z)$ для вариантов I–III соответствуют кривым 1–3 рис. 1, *a*)

Алгоритм восстановления профиля коэффициента рассеяния облака

Реализация алгоритма восстановления оптических параметров облаков требует наличия некоторой априорной информации об объекте для регуляризации решения и оценке вклада МР. В практической ситуации эта информация в полном объеме встречается довольно редко, поэтому необходима разработка методов в условиях большей или меньшей априорной неопределенности. Без ограничения общности в дальнейшем мы будем рассматривать случай полного отсутствия дополнительной информации об облаке; если же таковая будет существовать, то ее использование в предлагаемом алгоритме очевидно.

Итак, решение уравнения (2) с учетом вклада МР относительно $\beta(z)$ имеет вид [3]

$$\beta(z) = \frac{\tilde{P}^{(1)}(z) z^2}{2\varepsilon\Psi(z_0, z_*) + 2\Psi(z, z_*)}; \quad (6)$$

$$\tilde{P}^{(1)}(z) = \tilde{P}^{(1)}(\beta(z), \gamma(\varphi), z) = P(z)/\Delta\tilde{P}(z); \quad (7)$$

$$\Psi(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \tilde{P}^{(1)}(z) z^2 dz; \quad \varepsilon = \varepsilon(\tau, z_*) = 1/\{e^{[2\tau(z_0-z_*)]} - 1\} \quad (8)$$

– безразмерный параметр, выражающийся через априорное значение оптической толщины участка $[z_0, z_*]$; z_* – произвольная точка из интервала $[z_0, z_{\max}]$. Для реализации (6)–(8) необходимы:

1) профиль коэффициента рассеяния (использование $\beta(z)$ в (7)); поскольку $\beta(z)$ является также искомой величиной, применим итерационную процедуру (j – номер итерации):

$$\bar{\beta}^{(j)} = \beta^{(j-1)}; \quad P^{(1),(j)} = \tilde{P}^{(1)}(\bar{\beta}^{(j)}, \gamma); \quad \beta^{(j)} = \beta(\varepsilon(\tau), P^{(1),(j)}), \quad (9)$$

начиная с нулевого приближения $\beta^{(0)} = \bar{\beta}$ (модельного или рассчитанного);

2) оптическая толщина участка $[z_0, z_*]$ (регуляризация решения путем введения параметра $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ в (8)); для оценки ε традиционно [10] проводят минимизацию целевой функции, выбираемой исходя

из требований к искомому $\beta(z)$. Определим калибровочную точку в конце трассы зондирования ($z_* = z_{\max}$) и зададим

$$\Phi(\tau) = [\beta_{\max}(\tau^{(j,l)}) - \beta_{\max}(\tau^{(j,l-1)})]^2 \quad (10)$$

(l – номер итерации при оценивании оптической толщины).

Как показали расчеты, данная функция обладает устойчивым минимумом по τ в области искомого $\beta(z)$ (используемые традиционно «функция рассогласования профилей»

$$\Phi(\tau) = \int_{z_{\max}}^{z_0} [\beta_{\max}(\varepsilon(\tau^{(j,l)}, z)) - \beta_{\max}(\varepsilon(\tau^{(j,l-1)}, z))]^2 dz$$

либо «функция гладкости»

$$\Phi(\tau) = \int_{z_0}^{z_{\max}} \sum_{k=1}^n \left[\frac{d^k \beta(\varepsilon(\tau^{(j,l)}, z))}{dz^k} \right]^2 dz$$

при $\tau > 1$ экстремальных точек не имеют вообще). Минимизация (10) по τ совместно с итерационной процедурой (6)–(9) дает искомое решение $\beta(z)$ в условиях априорной неопределенности.

Значение τ_{\max} также связано, как отмечалось выше, с количеством кратностей рассеяния, участвующих в формировании обратного сигнала, и может использоваться для корректной оценки $P^{(1)}(z)$ из (1) для $\tau_{\max} < 1$ либо из (5) для $\tau_{\max} \geq 1$;

3) задание типа облачности (введение $\gamma(\varphi)$ в (7)); без применения специальных методов наиболее разумным представляются селекция облаков по дальности и для верхнего яруса (высота над Землей > 6 км) использование $\gamma(\varphi)$ для кристаллических облаков, в остальных же случаях – для водных.

Численный эксперимент по восстановлению оптических параметров облака

В целях исследования работоспособности предложенного алгоритма был проведен замкнутый численный эксперимент, условия которого были аналогичны приведенным выше.

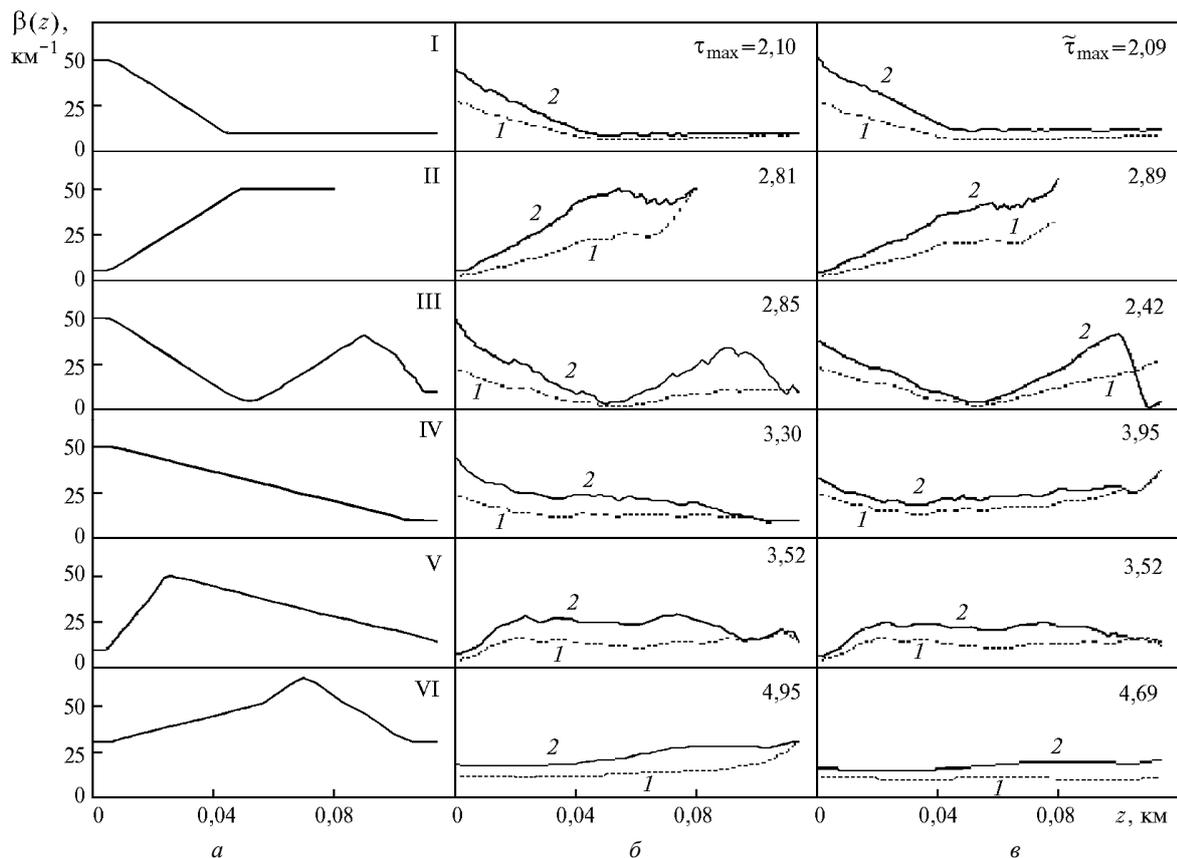


Рис. 3. Сравнение различных методов восстановления коэффициента рассеяния по сигналам, рассчитанным методом Монте-Карло: a – точное значение $\beta(z)$; 1 – результат восстановления без учета вклада МР, 2 – с учетом вклада МР после 10 итераций; b – при известном τ_{\max} , v – в условиях априорной неопределенности по τ (профили $P(z)$ для моделей V–VI соответствуют кривым θ рис. 2, a , варианты II–III)

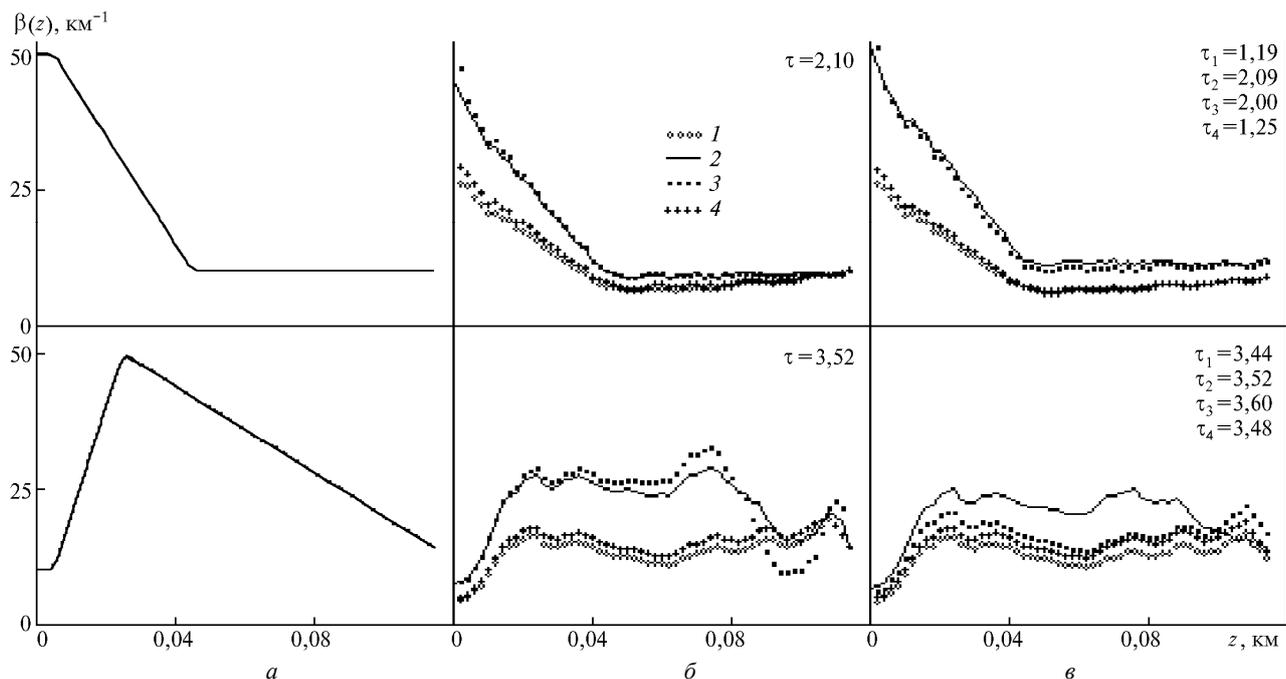


Рис. 4. Восстановление при априорной неопределенности по типу облачности: *a* – точное значение $\beta(z)$ для облака C1; 1 – результат восстановления $\beta(z)$ без учета МР, 2 – при использовании $\gamma(\varphi)$ для C1, 3 – для C2, 4 – для кристаллического облака; $\bar{\tau}$ – τ_{\max} известно, $\hat{\tau}$ – τ_{\max} оценивается

Рис. 3 соответствует результатам восстановления профиля коэффициента рассеяния в условиях априорной неопределенности по $\tau(z_0, z_{\max})$ при известном рассеивающем типе облака (C1). Искомые функции $\beta(z)$ представлены на рис. 3, *a*. Профили $P(z)$, рассчитанные методом Монте-Карло для моделей V–VI, представлены на рис. 2, *a* (кривые 0, модели II–III соответственно). Остальные профили $P(z)$ приведены в [9]. Рис. 3, *б* иллюстрирует восстановление $\beta(z)$ согласно (6)–(9) при точно известном τ_{\max} , и результаты являются, в некотором смысле, эталонными по разрешению для данного метода. Кривая 1 показывает решение уравнения локации без учета вклада МР; это решение выдиралось в качестве начального приближения для итерационного алгоритма, результат использования которого после 10 итераций представлен кривой 2 (отметим, что метод показал устойчивость к начальному приближению; при этом для сходимости достаточно выполнения ≈ 10 итераций). На рис. 3, *в* приведены результаты восстановления $\beta(z)$ при известном τ_{\max} , оценка которого находится минимизацией (10) (нумерация кривых аналогична).

Рис. 4 иллюстрирует влияние на точность определения $\beta(z)$ ошибки в задании рассеивающего типа облачности. Искомая функция $\beta(z)$ представлена на рис. 4, *a*; результаты использования итерационного алгоритма (6)–(9) при известном τ_{\max} приведены на рис. 4, *б*; результаты рис. 4, *в* получены тем же методом с оцениванием τ_{\max} . Профилям, восстановленным без учета МР, соответствуют

кривые 1; кривые 2 – результат восстановления при известном типе облачности (C1), кривые 3 получены при обращении с использованием $\gamma(\varphi)$ для облака C2, кривые 4 – $\gamma(\varphi)$ для кристаллического облака согласно [11]; помимо этого на рис. 4, *в* приведены значения τ_{\max} , полученные в каждом из рассмотренных случаев (нумерация совпадает).

Работа выполнена при частичном финансировании МОПО (грант № 96-17-6.3-27) и поддержке РФФИ – грант № 98-05-64066.

1. Балн Ю.С., Кавкьянов С.И., Креков Г.М., Самохвалов И.В., Самойлова С.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 1. С. 93–99.
2. Kargin B., Kersher M., Noormohammadian M., Oppel U.G. Simulation and inversion of multiply scattered LIDAR signals (in preparations) DLR: Köln, 1997.
3. Кавкьянов С.И., Креков Г.М., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
4. Ruppertsberg G.H., Kersher M., Noormohammadian M., Oppel U.G., Genger W. // Beitr. Phys. Atmosph. 70 (1997). 12. С. 93–105.
5. Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В. // Исследование Земли из космоса. 1986. N 6. С. 77–84.
6. Самохвалов И.В. Теория двукратного рассеяния и ее приложения к задачам лазерного зондирования аэрозоля // Дистанционные методы исследования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. С. 90–134.
7. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 375 с.
8. Коршунов В.А. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 2. С. 115–121.
9. Креков Г.М., Крекова М.М. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 1. С. 46–54.
10. Зув В.Е., Задде Г.О., Кавкьянов С.И., Кауль Б.В. Об интерпретации лидарных сигналов из области больших оптических

ских толщ // Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 60–68.

11. *Tokano Yo., Kuo-Nan Lion.* // J. Atmos. Sci. 46 (1989). N 1. P. 3–19.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
20 августа 1997 г.

S.V. Samoilova, Yu.S. Balin, M.M. Krekova. **Accounting for Effects of Multiple Scattering in Reconstruction of Optical Parameters of Clouds from Space Sounding Data.**

The estimates of the magnitude of the multiple scattering (MS) contribution into lidar returns from clouds at space sounding are obtained allowing us to describe the process of the first multiplicities returns formation. A method is proposed to introduce corrections for MS into the algorithm of reconstructing the scattering coefficient profile and optical thickness τ of a cloud under a priori uncertainty condition applicable at $\tau_{\max} < 3.5$. We present the results of determination of the optical parameters of the stratus clouds upper layer from the signals computed by Monte-Carlo method.