

Дистанционный контроль размера облачных капель лидаром с изменяющимися полями зрения

А.И. Абрамочкин, А.А. Тихомиров*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 2.10.2008 г.

Выполнен анализ распределений интенсивности лидарных сигналов в пятне изображения рассеивающего объема. Оценены вклад в лидарные сигналы компонент однократного и многократного рассеяния и эффективный размер капель в облаке. Показано, что при наличии многократного рассеяния распределения интенсивности лидарных сигналов могут быть представлены суммой гауссовых распределений компонент однократного и многократного рассеяния.

Ключевые слова: лидарный сигнал, многократное рассеяние, алгоритм, размер облачных капель, пространственные характеристики.

Введение

Эффективным средством зондирования аэрозольных сред в условиях многократного рассеяния являются MFOV-лидары (multiple-field-of-view lidars) [1]. На основе данных, получаемых с помощью MFOV-лидара, возможен анализ распределений плотности мощности в пятне изображения рассеивающего объема, которые содержат информацию о размерах рассеивающих частиц на трассе зондирования [2]. В приближении однократного рассеяния и изотропности индикатрисы рассеяния в обратном направлении это распределение не информативно, оно подобно угловому распределению плотности мощности потока зондирующего излучения. Для компоненты двукратного рассеяния, как показано в [2, 3], это распределение является сверткой функции распределения плотности мощности зондирующего пучка с пиком индикатрисы рассеяния в прямом направлении, так как каждому акту обратного рассеяния, также изотропного, предшествует акт рассеяния в прямом направлении.

В простейшем приближении лидарный сигнал удобно представлять энергетической и пространственной характеристиками: плотностью мощности, Вт/м², в центре пятна изображения рассеивающего объема и эффективным радиусом этого пятна [4]. В условиях многократного рассеяния энергетическими и пространственными характеристиками более целесообразно представлять компоненты лидарного сигнала различных кратностей рассеяния, рассматривая пятна изображений, создаваемых принимаемыми потоками соответствующих кратностей рассеяния.

Цель настоящей работы — анализ и интерпретация экспериментальных данных зондирования капельного облака с использованием энергетических и пространственных характеристик для случаев суммарного лидарного сигнала и его компонент (однократного и двукратного рассеяния). В первом случае распределение плотности мощности представлялось гауссовой функцией, во втором случае — суммой двух гауссовых функций для компонент однократного и двукратного рассеяния. Компоненты последующих кратностей рассеяния не рассматривались.

1. Энергетическая и пространственная характеристики лидарного сигнала

Распределение плотности мощности лидарного сигнала в плоскости изображения рассеивающего объема в простейшем случае может быть приближенно представлено гауссовым распределением

$$p(z, r) = b(z) \exp\{-[r/a(z)]^2\}, \quad (1)$$

где z — текущее значение дальности; r — радиальная координата в плоскости изображения, а лидарный сигнал $P(z)$ — энергетической $b(z)$ и пространственной $a(z)$ характеристиками [4]:

$$P(z) = 2\pi \int_0^{\infty} p(z, r) r dr = \pi a^2(z) b(z). \quad (2)$$

Подобным образом может быть записана любая из компонент кратности рассеяния n

$$P^{(n)}(z) = \pi a_n^2(z) b_n(z), \quad (3)$$

* Александр Иванович Абрамочкин (asa@imces.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

где $a_n(z)$ и $b_n(z)$ – ее пространственная и энергетическая характеристики при n -кратном рассеянии. Каждая из этих компонент может быть выражена через компоненту однократного рассеяния, определяемую классическим лидарным уравнением. Например, компонента двукратного рассеяния

$$P^{(2)}(z) = P^{(1)}(z)\delta(z), \quad (4)$$

где $\delta(z)$ – отношение мощностей компонент двукратного и однократного рассеяния. Выражение для $\delta(z)$, полученное в [2] и используемое в [3], в нашем случае упрощается и представляется как

$$\delta(z) = \frac{P^{(2)}(z)}{P^{(1)}(z)} \approx \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{R^2}{a_1^2}\right] \right\}^{-1} \times \int_0^z \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{R^2 z^2}{a_1^2 z^2 + f^2 \Theta_s^2(z_1)(z - z_1)^2}\right] \right\} \sigma(z_1) dz_1. \quad (5)$$

Это отношение зависит от радиуса R окна пространственного фильтра, ограничивающего поле зрения приемной системы с фокусным расстоянием f , и связано с коэффициентом рассеяния $\sigma(z)$ и с угловой шириной $\Theta_s(z)$ переднего пика индикатрисы рассеяния. Для облаков с относительно большим размером капель ширина переднего пика связана с длиной волны λ и эффективным радиусом $\rho(z)$ капель дифракционным соотношением [2]:

$$\Theta_s(z) \approx \lambda/\pi\rho(z), \quad (6)$$

где λ – длина волны; $\rho(z)$ – эффективный радиус капель.

Пространственная характеристика $a_1(z)$ компоненты однократного рассеяния связана с эффективным радиусом $A_1(z)$ поперечного сечения потока зондирующего излучения в зондируемой среде соотношением

$$a_1(z) = A_1(z)f/z,$$

где

$$A_1(z) = \sqrt{\frac{d^2}{4} + \theta_0^2 z^2};$$

d – эффективный диаметр поперечного сечения; θ_0 – половина угла расходимости потока излучения на выходе лазерного передатчика. Пространственная характеристика $a_2(z)$ компоненты двукратного рассеяния таким же образом связана с эффективным радиусом $A_2(z)$ поперечного сечения потока, рассеиваемого в переднюю полусферу:

$$A_2(z) = \sqrt{A_1^2(z) + A^2(z)}, \quad (7)$$

где $A(z)$ – функция, учитывающая расширение этого потока, обусловленное дифракцией излучения на капельках облака: $A(z) = 0$ при $0 < z < z_0$; $A(z) = \Theta_s(z)(z - z_0)$ при $z \geq z_0$, где z_0 – дистанция до границы облака или отдельного облачного слоя. Пространственные характеристики компонент однократного и двукратного рассеяния могут быть представлены следующим образом:

$$a_1(z) = \frac{f}{z} \sqrt{\frac{d^2}{4} + \theta_0^2 z^2}; \quad a_2(z) = a_1(z)$$

– до облака;

$$a_2(z) = \frac{f}{z} \sqrt{\frac{d^2}{4} + \theta_0^2 z^2 + \Theta_s^2(z)(z - z_0)^2}$$

– в облаке.

Для исследования возможностей анализа лидарных сигналов от облаков нами использовался MFOV-лидар ($\lambda = 532$ нм), подробное описание которого приведено в [4]. Пространственная фильтрация сигналов производилась циклической сменой круглых окон в плоскости изображения рассеивающего объема. Радиусы окон $R_k = 0,5; 0,7; 1,0; 1,4; 2,0; 2,8; 4,0; 5,6$ мм обеспечивали изменение угла поля зрения приемной системы от 1,3 до 15 мрад. На основе лидарных измерений рассчитывались семейства из восьми (по числу окон) лидарных сигналов [4].

2. Описание алгоритмов обработки сигналов

Обработка получаемых данных (семейств лидарных сигналов) сводилась к определению параметров распределений плотности мощности в плоскости изображения рассеивающего объема для всей совокупности дальностей z , для чего использовались два алгоритма. С помощью первого, упрощенного, алгоритма [4] производились оценки пространственной $a(z)$ и энергетической $b(z)$ характеристик суммарного сигнала в предположении, что функция распределения плотности мощности в плоскости изображения имеет вид (1). Характеристики $a(z)$ и $b(z)$ определялись [4] из системы уравнений:

$$P_k(z) = \pi a^2(z)b(z) \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{R_k}{a(z)}\right)^2\right] \right\}, \quad (8)$$

где $P_k(z)$ – зарегистрированное семейство лидарных сигналов; R_k – радиусы окон, $k = 1, 2, \dots, 8$.

Второй, более сложный, алгоритм основан на предположении, что функция распределения плотности мощности $p(z, r)$ является суммой распределений плотности мощности компонент однократного и двукратного рассеяния:

$$p(z, r) = b_1(z) \exp\left\{-[r/a_1]^2\right\} + b_2(z) \exp\left\{-[r/a_2(z)]^2\right\}, \quad (9)$$

где a_1 , $a_2(z)$ и $b_1(z)$, $b_2(z)$ – пространственные и энергетические характеристики компонент однократного и двукратного рассеяния соответственно. Характеристики $a_2(z)$ и $b_1(z)$, $b_2(z)$ определялись из системы уравнений

$$P_k(z) = \pi a_1^2 b_1(z) \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{R_k}{a_1}\right)^2\right] \right\} + \pi a_2^2(z) b_2(z) \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{R_k}{a_2(z)}\right)^2\right] \right\} \quad (10)$$

при заданном значении характеристики $a_1 = f\theta_0$. Решения систем уравнений (8) и (10) находились путем последовательных приближений, с минимизацией ошибок методом наименьших квадратов.

3. Результаты анализа экспериментальных данных зондирования капельного облака

На рис. 1, *a* показан пример семейства лидарных сигналов, полученного при зондировании капельного облака на дистанции 300 м, наклон трассы 70° от горизонта. Нижней кривой соответствует окно минимального размера, верхней кривой — окно

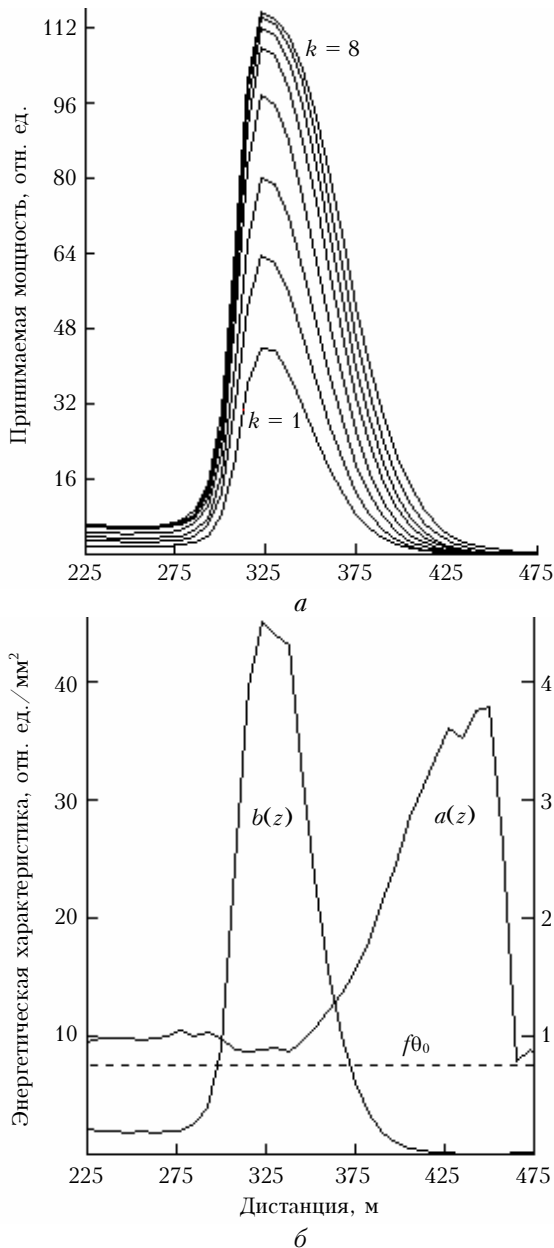


Рис. 1. Семейство лидарных сигналов $P_k(z)$ от капельного облака (*a*); энергетическая $b(z)$ и пространственная $a(z)$ характеристики (*б*), рассчитанные по первому алгоритму

максимального размера. С увеличением размера окна наблюдается увеличение мощности сигналов. Увеличение обусловлено присутствием многократно рассеянного излучения в принимаемых сигналах. На рис. 1, *б* показаны энергетическая $b(z)$ и пространственная $a(z)$ характеристики, рассчитанные на основе полученного семейства.

Энергетическая характеристика на входе в облако подобна лидарному сигналу для окна минимального размера. Пространственная характеристика до облака и на входе в облако имеет несколько большее значение в сравнении с уровнем $f\theta_0$. В глубине облака начинается ее быстрый подъем, наибольшего значения она достигает на выходе из облака, где относительный вклад многократного рассеяния достигает максимального значения.

Первый алгоритм основан на предельном упрощении (1) распределения плотности мощности, тем не менее получаемые решения чувствительны к вкладу в лидарный сигнал многократного рассеяния. Об этом вкладе можно судить по разности $a^2(z) - f^2\theta_0^2$, обусловленной дифракцией потока зондирующего излучения на капельках облака. Результаты анализа с использованием первого алгоритма не позволяют количественно оценивать энергетический вклад в лидарный сигнал компонент однократного и многократного рассеяния.

Реальные распределения плотности мощности в условиях многократного рассеяния более адекватно представляются выражением (9). Это приближение, используемое в основе второго алгоритма, позволяет рассчитывать пространственную характеристику $a_2(z)$ и энергетические характеристики $b_1(z)$ и $b_2(z)$ компонент однократного и двукратного рассеяния (рис. 2, *a*).

Пространственная характеристика $a_2(z)$ на всем интервале дальностей имеет тенденцию возрастания. До облака и на входе в облако ее значения более чем вдвое превышают значение $a_1 = f\theta_0$. В глубине облака наблюдается ее резкий подъем, максимального значения она достигает на выходе из облака. Энергетическая характеристика $b_2(z)$ до облака и на входе в облако по уровню ниже значений энергетической характеристики $b_1(z)$ (на рис. 2 значения $b_2(z)$ увеличены в 10 раз в сравнении со значениями $b_1(z)$). По мере проникновения в облако характеристика $b_2(z)$ возрастает и достигает максимального значения на дистанции, превышающей дистанцию максимума характеристики $b_1(z)$.

На рис. 2, *б* показан результат восстановления суммарного лидарного сигнала $P(z)$ и компонент $P^{(1)}(z)$ и $P^{(2)}(z)$ однократного и двукратного рассеяния. Отношение

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

до облака имеет некоторое конечное значение, что свидетельствует о наличии в лидарном сигнале некоторого вклада двукратного рассеяния, в глубине облака наблюдается резкий подъем отношения $\delta(z)$. На выходе из облака преобладающей в лидарном сигнале становится компонента двукратного рассеяния.

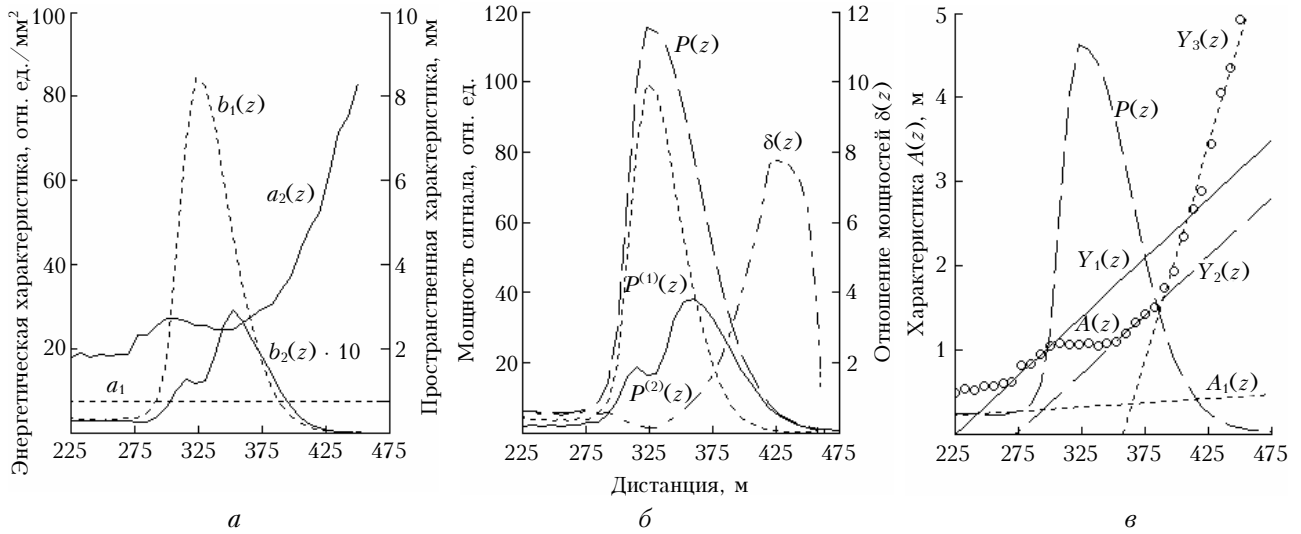


Рис. 2. Энергетические и пространственные характеристики компонент однократного и двукратного рассеяния, рассчитанные по второму алгоритму (а); восстановленные уровни суммарного лидарного сигнала и компонент однократного и двукратного рассеяния, отношение $\delta(z)$ (б); оценка размера капель в облаке (в): $Y_1(z)$ – линейная аппроксимация характеристики $A(z)$ на интервале дальностей 270–300 м; $Y_2(z)$ – на интервале дальностей 352–382 м; $Y_3(z)$ – на интервале дальностей 382–450 м; $P(z)$ – профиль лидарного сигнала; $A_1(z)$ – радиус однократно рассеивающего объема

4. К оценке эффективных размеров облачных капель

Пространственные характеристики a_1 и $a_2(z)$ компонент однократного и двукратного рассеяния сопряжены с характеристиками $A_1(z)$ и $A_2(z)$ в пространстве предметов. Характеристика $A_1(z)$ (рис. 2, в) представляет собой эффективный радиус объема, в котором происходят акты однократного рассеяния. Ее наклон к оси z определяется углом расходимости θ_0 потока излучения передатчика. Характеристика $A_2(z)$ (на рисунке не показана) представляет собой эффективный радиус объема, в котором происходят акты повторного рассеяния фотонов, уже претерпевших рассеяние в переднюю полусферу.

Из уравнения (7) можно определить функцию $A(z)$, учитывающую расширение поперечного сечения потока зондирующего излучения, обусловленное дифракцией на капельках облака. На рис. 2, в значения функции $A(z)$ показаны кружками. Наклоны отдельных отрезков кривой $A(z)$ определяются углами дифракции $\Theta_s(z)$ зондирующего излучения на капельках облака и связаны с радиусом капелек на трассе зондирования дифракционным соотношением (6). Для определения углов дифракции использовалась линейная аппроксимация значений функции $A(z)$ на характерных отрезках, имеющих стабильный наклон. В результате аппроксимации получены прямые $Y_1(z)$, $Y_2(z)$ и $Y_3(z)$ (см. рис. 2, в), углы наклона которых к оси z , равные $\Theta_s(z)$, использовались для оценки эффективного радиуса облачных капель, $\rho(z) = \lambda / \pi \Theta_s(z)$. Оценки радиуса капель на входе и на выходе из облака равны 12,5 мкм, над облаком – 3,5 мкм.

5. Сравнение используемых алгоритмов обработки сигналов

Для обработки экспериментальных данных нами использовались два алгоритма. Обработка, по сути, сводилась к аппроксимации сечений семейств лидарных сигналов для всей совокупности дистанций z с шагом $\Delta z = 7,5$ м. В первом алгоритме использовались аппроксимирующая функция

$$P(z, r) = \pi a^2(z) b(z) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{r}{a(z)} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

и параметры аппроксимации $a(z)$ и $b(z)$ для лидарного сигнала в целом. Во втором алгоритме – аппроксимирующая функция

$$P(z, r) = \pi a_1^2 b_1(z) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{r}{a_1} \right)^2 \right] \right\} + \pi a_2^2(z) b_2(z) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{r}{a_2(z)} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

и параметры аппроксимации $b_1(z)$, $a_2(z)$ и $b_2(z)$ при фиксированном значении $a_1 = f \theta_0$ (в нашем случае $f \theta_0 = 0,75$ мм). Функции (11) и (12) зависят от радиальной координаты r в плоскости изображения рассеивающего объема в отличие от соответствующих выражений (8) и (10), связанных с фиксированными значениями радиуса R_k окон, ограничивающих принимаемые сигналы.

На рис. 3, а показана аппроксимация сечения на дистанции $z = 375$ м (в облаке). Кружками отмечены уровни мощности сигналов $P_k(r)$, полученные

экспериментально, пунктиром — аппроксимация по формуле (11) с использованием параметров $a(z)$ и $b(z)$, полученных по первому алгоритму. Непрерывная линия — аппроксимация по формуле (12) с использованием параметров $b_1(z)$ и $a_2(z)$, $b_2(z)$, полученных по второму алгоритму. Вполне очевидно, что аппроксимация по второму алгоритму более удовлетворительна. Отсюда следует, что распределение плотности мощности лидарного сигнала в пятне изображения рассеивающего объема более адекватно представляется соотношением (9).

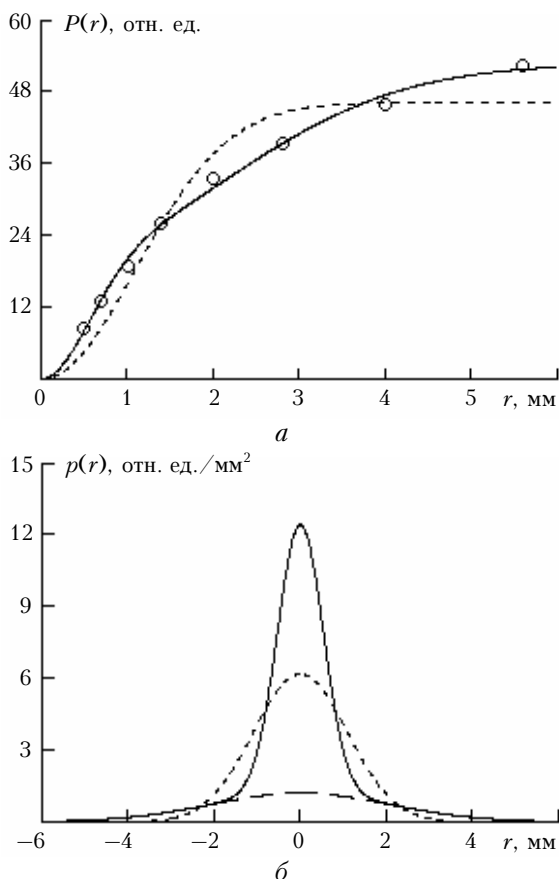


Рис. 3. Аппроксимации сечения семейства лидарных сигналов (в облаке) (а); восстановленные распределения плотности мощности в пятне изображения рассеивающего объема (б)

На рис. 3, б приведены восстановленные распределения плотности мощности в плоскости изображения для той же дистанции. Пунктиром показано распределение (7), непрерывной линией — распределение (9), штриховой линией — распределение плотности мощности компоненты двукратного рассеяния [второе слагаемое в выражении (9)].

Исследование сечений на различных дистанциях показало, что в лидарном сигнале практически на всех дистанциях присутствует некоторая доля двукратно рассеянного излучения. На дистанциях до облака и на входе в облако ее уровень относительно небольшой, в лидарном сигнале преобладает компонента однократного рассеяния. По мере углубления в облако мощность компоненты двукрат-

ного рассеяния возрастает. На выходе из облака преобладающей становится компонента двукратного рассеяния. Кривая распределения (7) приближается к кривой, соответствующей второму слагаемому распределения (9).

Простота и устойчивость работы первого алгоритма делают его весьма привлекательным для качественных оценок зондируемых объектов, так как динамика изменений пространственной характеристики, определяемой по первому алгоритму, в достаточной степени отражает особенности микроструктуры зондируемого облака. Второй алгоритм, в отличие от первого, более чувствителен к ошибкам регистрации сигналов. Снижение отношения сигнал-шум на конце трассы или за оптически плотным облаком приводит к сбоям в работе второго алгоритма.

Необходимая в таких случаях оценка корректности результатов анализа производилась нами путем контроля поправки пространственной характеристики компоненты многократного рассеяния в итерационных процедурах ее расчета. На дистанциях с минимальным уровнем сигналов эта поправка не достигала нулевого значения, что заметно искажало получаемые результаты. Это обстоятельство всегда учитывалось при анализе сигналов на конце трассы.

Заключение

Представление лидарных сигналов энергетическими и пространственными характеристиками упрощает их описание и делает наглядной интерпретацию экспериментальных данных, получаемых с использованием MFOV-лидара. Удобство такого представления состоит в том, что энергетические характеристики в большей степени связаны с интегральными оптическими параметрами, а пространственные характеристики — с микрофизическими параметрами зондируемых сред.

Практические приложения энергетических и пространственных характеристик не ограничиваются представленными в настоящей статье оценками размеров облачных капель. Заметим при этом, что характеристики компоненты двукратного рассеяния, рассчитанные по второму алгоритму, фактически представляют собой характеристики суммарного вклада в лидарный сигнал компонент с кратностью рассеяния $n > 1$, подобно тому как характеристики, рассчитанные по первому алгоритму, представляют собой характеристики суммарного лидарного сигнала в целом. Это обстоятельство необходимо учитывать при работе с аэрозольными объектами высокой оптической плотности, особенно на выходе из плотных слоев, когда становится возможным существенный энергетический вклад в лидарные сигналы компонент с кратностью рассеяния $n > 2$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 05-08-13544.

1. Hutt D.L., Bissonnette L.R., Durand L. Multiple field of view lidar returns from atmospheric aerosols // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 12. P. 2338–2348.

2. *Eloranta E.W.* Practical model for the calculation of multiply scattered lidar returns // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. N 12. P. 2464–2471.
3. *Hogan R.J.* Fast approximate calculation of multiple scattered lidar returns // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. N 23. P. 5984–5992.
4. *Брюханова В.В., Самохвалов И.В., Абрамочкин А.И., Абрамочкин С.А., Тихомиров А.А.* Лидарный сигнал многократного рассеяния от капельных облаков // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16. № 9. С. 773–782.

A.I. Abramochkin, A.A. Tikhomirov. **Remote monitoring of cloud droplet size with a multiple-field-of-view lidar.**

A lidar signal intensity distribution in the image spot of a scattering volume is considered. The contribution of single and multiple scattering components to lidar returns and the effective droplet size in a cloud are estimated. For the case of multiple scattering it is shown that the lidar return intensity distribution can be expressed as a sum of Gaussian distributions of single and multiple scattering components.