

В.С. Шаманав

## К ОЦЕНКЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ОБЛАКА

Предложены критерии для характеристики коэффициента рассеяния в граничной части облака. Вычисляется средний вдоль луча лазера коэффициент рассеяния. Усреднение производится до одной из нескольких характерных точек на эхосигнале от облака. Наиболее приемлемым оказалось усреднение от точки изменения знака производной сигнала при попадании луча в облако до точки с максимальным значением сигнала.

При лазерном зондировании облаков постоянно возникает необходимость определения коэффициента рассеяния излучения. Это характерно для подспутникового зондирования, метеообеспечения авиации, климатологии и т. п. Глубина зондирования облаков достигает на практике десятков и сотен метров. Возникает естественный вопрос о том, какая именно глубина характеризует облако по коэффициенту рассеяния с адекватностью, наиболее полно соответствующей поставленным задачам и техническим возможностям лидара.

Конечно, заманчиво было бы использовать весь глубинный профиль коэффициента рассеяния  $\sigma(r)$ , доводя до потребителя максимум лидарной информации. Но, во-первых, при проведении длинных серий измерений такая информация может оказаться избыточной. Во-вторых, лидарные системы с ограниченным потенциалом (например, самолетные) могут просто не иметь достаточного объема памяти. В-третьих, в силу известных особенностей уравнения лазерного зондирования (УЛЗ) его решение при достижении некоторых глубин начинает расходиться [1], точность восстановления  $\sigma(r)$  резко ухудшается и общая информативность процесса зондирования опять-таки снижается.

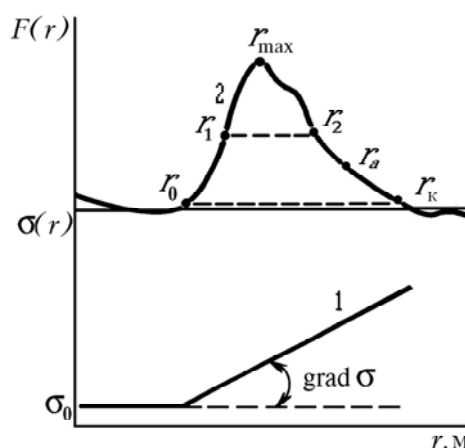


Рис. 1. Лидарное определение границы облачности: кривая 1 — модельный профиль коэффициента рассеяния. Кривая 2 — общий вид лидарного сигнала;  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_m$ ,  $r_a$  — точки, характеризующие различные критерии границы облачности,  $r_k$  — конечная глубина зондирования облака

Во многих случаях при зондировании облаков как наземными, так и самолетными лидарами интерес представляет именно граничная, наружная сторона облаков, а не их центральные области. В свою очередь, понятие границы облака может быть задано несколькими критериями.

Рис. 1 поясняет эти критерии, основанные на анализе лидарного сигнала (ранее предложены в [2]). Профиль коэффициента рассеяния  $\sigma(r)$  (кривая 1) в дооблачной атмосфере постоянен и равен  $\sigma_0$ . Начиная с расстояния  $r_0$  (это микрофизическая граница облака),  $\sigma(r)$  в первом приближении линейно возрастает и  $\text{grad}\sigma(r) = \mu$ . Мощность эхосигнала (кривая 2) изменяется в зависимости от вариации параметров облачности ( $\mu$ ). На дистанции  $r_0$  первый раз изменяется знак производной сигнала. Свое максимальное значение  $F_{\text{max}}$  она принимает на удалении  $r_m$ . Здесь производная второй раз меняет знак. Дистанции  $r_1$  и  $r_2$  соответствуют пороговому значению  $0,5 F_{\text{max}}$  (в общем виде эти пороги могут быть выбраны и другими). Расстояние  $r_a$  формируется из асимптотического режима обработки лидарного сигнала и равно половине максимально достигнутой в данном акте зондирования глубине проникновения луча в облако. Величины  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_m$  и  $r_2$  не зависят от параметров лидара. Значение  $r_a$  прямо зависит от энергетического потенциала лидара.

Для выбора характеристического значения коэффициента рассеяния можно выбрать два пути. Один из них — измерять значения  $\sigma(r)$  в точках  $r_1, r_m, r_2, r_a$ . Здесь нет очевидных трудностей, т. к. берутся заданные точки из уже вычисленного профиля  $\sigma(r)$ . Второй путь — производить некоторое усреднение по трассе зондирования. Логично для этого взять интервалы  $r_0-r_1; r_0-r_m; r_0-r_2; r_0-r_a$ . Численной проверке этих критериев характеристики облачной границы и посвящена данная статья. Конкретная ее направленность — методическое обеспечение подспутникового облачного лидара [4]. Здесь необходимо учесть особенности бортовой автоматизированной системы регистрации и обработки сигналов: а именно, дискретность реального сигнала по времени и амплитуде, и неприменимость слишком сложных алгоритмов обработки данных из-за ограниченных энергоресурсов самолета.

Для расчета лидарных эхосигналов  $F(r)$  использовалось уравнение лазерного зондирования в приближении однократного рассеяния. На данном этапе этого вполне достаточно. Коэффициент рассеяния — кусочно-ломаный, постоянный до микрофизической границы облака  $r_0$ , и затем линейно нарастающий с фиксированными значениями  $\mu$ . Ранее проведенные нами эксперименты и сведения других авторов [3] показали, что такое предположение не слишком сильно отличается от реальности. Параметр  $\mu$  выбирался так, чтобы на глубине 50 м в облаке коэффициент рассеяния достигал величин  $12,5 \dots 50 \text{ км}^{-1}$  (что близко к реальным значениям).

Восстановление профиля  $\sigma(r)$  производилось асимптотическим методом Ковалева (его основы заложены в [5]) в наиболее простой форме:

$$\sigma(r) = \frac{F(r)}{2 \int_r^{r_k} F(x) x^2 dx} . \quad (1)$$

В этом алгоритме концентрация частиц может быть переменной по трассе, но индикатриса рассеяния предполагается неизменной.

Конечное расстояние  $r_k$ , т. е. асимптотическая дистанция, до которой интегрируется сигнал, вычислялась по условию достижения уровня  $F(r_k) \leq 0,01 F_{\max}$ ,  $F_{\max}$  — максимальное значение сигнала,  $r_k > r_m$ . Такой уровень приблизительно адекватен условиям функционирования 7-разрядного аналого-цифрового преобразователя. Физическая граница облака  $r_0$  вычислялась соответственно при  $F(r_0) \leq 0,01 F_{\max}$ ,  $r_0 < r_m$ .

Известно, что алгоритм Ковалева (1) требует выполнения асимптотического условия «на бесконечность». Для этого необходимо на дистанции  $r_0-r_k$  набрать оптическую толщину в облаке, равную хотя бы двум (по натуральному основанию). Чем она больше, тем до большей глубины в облаке можно доверять восстановленному профилю  $\sigma(r)$ . В реальном же эксперименте никогда заранее точно не известна прозондированная толщина.

Для проверки влияния недобора оптической толщины на усредненный коэффициент рассеяния была использована следующая процедура.

В каждом модельном профиле  $\sigma(r) = \sigma_{mi}(r)$  для его собственного значения  $r_{ki}$  определялась «прозондированная» оптическая толщина  $\tau_i = \int_{r_0}^{r_{ki}} \sigma_{mi}(x) dx$ . Вычислялись значения «недобранной» оптической

толщи  $\tau_n = 0,8\tau_i$ ;  $0,5\tau_i$  и  $0,25\tau_i$ . Определялись дистанции в облаке  $r_{ni}$ , соответствующие этим уменьшенным оптическим толщинам. Далее при восстановлении профилей  $\sigma(r)$  асимптотический интеграл в знаменателе формулы (1) вычислялся не до предельного значения  $r_{ki}$ , а до уменьшенного  $r_{ni}$ . Но сигналы  $F(r)$  для обработки на «укороченной» трассе использовались те же самые. Такая процедура позволяла имитировать зондирование облака с недостаточной для полноценного применения асимптотики (1) прозондированной оптической толщиной и оценивать степень отклонения восстановленных значений  $\sigma(r)$  от модельных  $\sigma_m$  для тех или иных условий.

Следующим шагом было получение среднего вдоль луча лазера значения коэффициента рассеяния. Усреднение производилось до точек  $r_1, r_m, r_2$  и  $r_a = 0,5 r_k$ , т.е. вычислялись

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &= \frac{1}{r_1 - r_0} \int_{r_0}^{r_1} \sigma(x) dx; \quad \bar{\sigma}_m = \frac{1}{r_m - r_0} \int_{r_0}^{r_m} \sigma(x) dx; \\ \bar{\sigma}_2 &= \frac{1}{r_2 - r_0} \int_{r_0}^{r_2} \sigma(x) dx; \quad \bar{\sigma}_a = \frac{1}{r_a - r_0} \int_{r_0}^{r_a} \sigma(x) dx. \end{aligned} \quad (2)$$

Для получения меры отклонения от «истинных» вычислялись такие же средние значения из модельных профилей  $\bar{\sigma}_m(r)$ . Усреднение для моделей производилось соответственно до этих же точек  $r_1, r_m, r_2$  и  $r_a$ .

Рассмотрим полученные данные на примере анализа результатов численного исследования зондирования облаков на удалении  $r_0 = 1000$  м (рис. 2). Результаты зондирования облаков на расстояниях 250, 500 и 2000 м будут приводиться текстуально.

Из кривых 1–3 видно, что положение максимума сигнала  $r_m$  перемещается в глубь облака по мере уменьшения  $\mu = \text{grad}\sigma$ . На этом эффекте может быть построен алгоритм оценки градиента коэффициента рассеяния в облаке [2], когда

$$\mu = \frac{1}{2(r_m - r_0)} \frac{2r_0 - r_m}{r_m}. \quad (3)$$

Для рассмотренных в расчетах ситуаций  $r_1 = (10 \pm 3)$  м;  $r_m = (32 \pm 13)$  м;  $r_a = (55 \pm 15)$  м и  $r_2 = (62 \pm 22)$  м. Они же являются и глубинами пространственного усреднения профилей коэффициента рассеяния.

Семейство кривых на рис. 2, б — это восстановленные по (1) в его дискретной форме профили коэффициента рассеяния. Так, кривая 11 восстановлена в «оптимальных» условиях, когда взятая в расчет толщина равна максимально прозондированной до глубины  $r_{к1} = 140$  м, т.е.  $\tau = 2,48$ . Кривая 2 восстановлена в худших условиях, т.е. когда сигнал  $F(r)$  тот же, но была взята в расчет только толщина  $\tau = 1,98$ , составляющая 0,8 от максимальной. Таким же образом кривые 13 и 14 получены для толщ  $\tau = 1,24$  и 0,62.

Из вида кривых и меры их отклонения от модельных профилей (прямые линии) видно подтверждение того, что восстановление коэффициента рассеяния методом Ковалева происходит с неплохим качеством, когда прозондированная толщина превышает единицу. В этом случае усреднять  $\sigma(r)$  вдоль луча лазера можно было бы до достаточно больших глубин в облаке. Однако общей оптимистической картине препятствуют попадания в оптически слабые участки, иллюстрируемые кривыми 14, 24, 34 (рис. 2) и аналогичными им результатами для других расстояний до облачности.

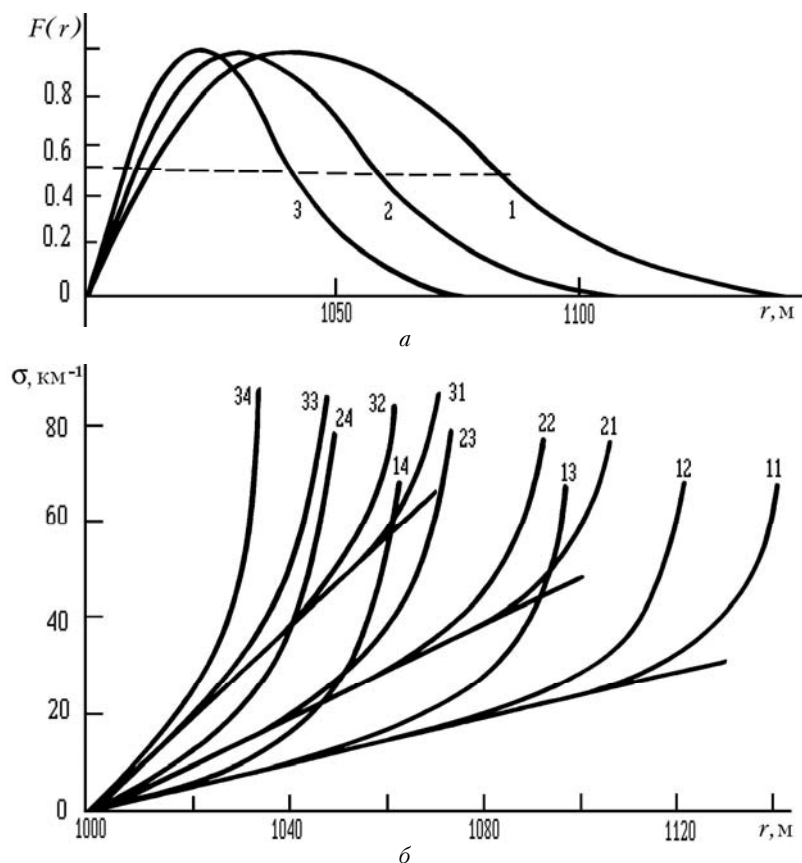


Рис. 2. Восстановление профиля коэффициента рассеяния: кривые 1, 2 и 3 — нормированные на единицу сигналы лидара при градиенте коэффициента рассеяния  $\mu = 2,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $5,0 \cdot 10^{-4}$  и  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$ ; кривые 11, 12, 13 и 14 — значение  $\mu = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2}$ , использованная для восстановления  $\sigma$  оптическая толщина равна 1,0; 0,8; 0,5 и 0,25 от максимально прозондированной; кривые 21, 22, 23 и 24 — то же, но  $\mu = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2}$ ; кривые 31, 32, 33 и 34 — то же, но  $\mu = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$

Рассмотрим сведенные в таблицу отклонения вычисленных из сигналов значений  $\bar{\sigma}$  от их модельных аналогов. Во втором столбце приведены среднеквадратические отклонения вычисленных зна-

чений среднего  $\sigma$  от модельного, равного, к примеру,  $\bar{\sigma}_m = \sigma_0(r_m - r_0) + 0,5\mu(r_m - r_0)^2$ . (Все погрешности взяты с положительным знаком).

Так, при пользовании критерием  $\bar{\sigma}_m$  для плотного облака его среднеквадратическое отклонение от модельного значения составляет всего 6%. Правда, вариация этого отклонения здесь достигает 84%. При недоборе оптической толщи до единицы отклонение от модели достигает уже 48%, однако вариация этого отклонения уменьшается до 32%. Показательно, что в «хорошем», т.е. плотном, облаке для всех критериев отклонения от модельных значений находятся в диапазоне 4–10%. Но уже для  $1 < \tau < 2$  для наиболее глубоких величин  $\bar{\sigma}_a$  и  $\bar{\sigma}_2$  оно стремится к 20% (нижние строки таблицы).

Отклонения средних вдоль луча лазера значений  $\bar{\sigma}_i$ , вычисленных по асимптотической формуле (2), от вычисленных из модельных профилей  $\sigma(r)$

Критерий усреднения	Среднеквадратическое отклонение среднего по лучу лазера коэффициента рассеяния $\bar{\sigma}_i$ от среднего модельного $\bar{\sigma}_m$ (%)	Разброс данных (%)	Геометрическая глубина усреднения (м)	Прозондированная оптическая толщина
$\bar{\sigma}_1$	7 36	74 42	10±3	$\tau > 1$
$\bar{\sigma}_m$	6 48	84 32	32±13	$\tau < 1$
$\bar{\sigma}_a$	10 82	90 32	55±15	$\tau > 1$
$\bar{\sigma}_2$	6 72	87 26	62±22	$\tau < 1$
$\bar{\sigma}_a$	5	93	—	$2 < \tau < 3$
$\bar{\sigma}_2$	4	72	—	
$\bar{\sigma}_a$	19	38	—	$1 < \tau < 2$
$\bar{\sigma}_2$	10	67	—	

При недоборе толщи до единицы отклонения  $\bar{\sigma}_a$  и  $\bar{\sigma}_2$  от модели достигают 80%. Исходя из этого можно предложить  $\bar{\sigma}_m$  в качестве наиболее удобного критерия для коэффициентов рассеяния. Если учесть принципиальную неопределенность восстановления профиля  $\sigma(r)$ , а также несовпадение его истинного вида линейной модели, то 50% -е отклонения от модели можно считать не слишком большими.

При необходимости от  $\bar{\sigma}_m$  можно перейти и к  $\bar{\sigma}_2$ , и к  $\bar{\sigma}_a$ . Между ними существуют корреляционные отношения, и для всех наборов параметров  $\bar{\sigma}_a / \bar{\sigma}_m = 2,2 \pm 0,5$ . В случае иного критерия  $\bar{\sigma}_2 / \bar{\sigma}_m = 1,7 \pm 0,5$ .

1. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Наац И.Э. // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 3–33.
2. Пеннер И.Э., Самохвалов И.В., Шаманаев В.С., Шнайдер И.А. // IX Всес. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск, 1987.
3. Оптическая плотность облаков / А.Л. Косарев, И.П. Мазин, А.Н. Невзоров, В.Ф. Шугаев // Труды ЦАО. 1976. Вып. 124. 168 с.
4. Абрамочкин А.И., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 3. С. 332–334
5. Ковалёв В.А. // Труды ГГО. 1973. Вып. 321. С. 128–133.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
6 мая 1992 г.

V. S. Shamaev. On Estimation of the Light Scattering Coefficient within the Region of Cloud Boundary.

Some criteria of characterization of the scattering coefficient in the cloud boundary are proposed. Based on the use of these criteria the scattering coefficient averaged over the laser beam is calculated. The averaging is made along the beam to one of several specific points at the lidar return from a cloud. It is shown that averaging over the interval between the point where the derivative of the lidar return with respect to range changes its sign and the point of maximum signal is most suitable.