

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ

Л.В. Кравец

УДК 551.576.1

**О ВОССТАНОВЛЕНИИ ПРОФИЛЕЙ НЕКОТОРЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ
МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИИ**

Рассматривается лидарный метод определения профилей коэффициента рассеяния и ослабления в перистых облаках. Для реализации метода требуется измерение профиля обратно рассеянного сигнала и коэффициента направленного пропускания облака. Коэффициент направленного пропускания определяется по отношению сигналов СКР азота из стробов выше и ниже облака.

Приводится алгоритм расчета профилей оптических параметров и результаты восстановления профилей в облаке.

Восстановление пространственных распределений оптических характеристик перистых облаков по данным лазерного зондирования представляет несомненный интерес как для изучения оптических свойств облаков данного типа, так и для определения их микрофизических параметров.

Характерные для перистой облачности значения коэффициента ослабления излучения β_t в большинстве случаев не превышают $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ [5]. Типичные значения коэффициента обратного рассеяния лежат в диапазоне $10^{-5} \div 10^{-4} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. В то же время коэффициент обратного рассеяния, обусловленного аэрозольным и молекулярным компонентами, на высотах 6–12 км изменяется в пределах $10^{-6} - 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Перистые облака относятся к типу полупрозрачных облаков, мощность которых, как правило, не превышает 2 км, а оптическая толщина — 2 [2]. Анализ приведенных числовых значений характеристик рассеяния и ослабления атмосферных и облачных составляющих позволяет сделать вывод о возможности получения профиля эхо-сигнала в перистых облаках на фоне безоблачной атмосферы, а также измерения сигналов от «чистой» атмосферы из пространственных стробов, лежащих выше и ниже перистого облака методами лазерной локации.

Предлагаемая методика определения профиля коэффициента ослабления в перистых облаках состоит из двух частей. Первая заключается в измерении профиля эхосигнала в облачном образовании, вторая — в измерении коэффициента направленного пропускания облака с использованием сигналов спонтанного комбинационного рассеяния (СКР).

Пространственное изменение оптических характеристик облака по трассе зондирования связано с величиной принимаемого лидарного сигнала известным соотношением

$$S(z) = A \cdot z^{-2} \cdot \beta_{\pi}(z) \cdot \exp\left(-2 \int_0^z \beta_t(z') dz'\right), \quad (1)$$

где $S(z)$ — сигнал (энергия), принимаемый из элементарного объема, находящегося на расстоянии z ; A — аппаратная функция; $\beta_{\pi} = \beta_s \cdot \gamma_{\pi}$ — объемный коэффициент обратного рассеяния, $\beta_s(z)$ и $\beta_t(z)$ — объемные коэффициенты рассеяния и ослабления, $\gamma_{\pi}(z)$ — модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла π .

В видимом диапазоне длин волн справедливо допущение $\beta_s(z) = \beta_t(z)$, и тогда выражение (1) упрощается:

$$S(z) = A \cdot z^{-2} \cdot \gamma_{\pi}(z) \cdot \beta_s(z) \cdot \exp\left(-2 \int_0^z \beta_s(z') dz'\right). \quad (2)$$

Ввиду трудности абсолютной калибровки лидача, то есть нахождения параметра A , для решения (2) относительно $\beta_s(z)$ предлагается использовать модифицированный метод последовательных слоев (МПС), для которого требуется знание отношения сигналов для соседних слоев, выбранного по трассе зондирования разбиения. В этом методе предполагается слабая зависимость индикатрисы γ_{π} от слоя к слою:

$$\gamma_{\pi}(\Delta z_i) \simeq \gamma_{\pi}(\Delta z_{i+1}) \text{ и } \beta_s(\Delta z_i) = \beta_t(\Delta z_i), \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, N$ индексы, соответствующие разбиению трассы в облаке на N слоев.

Метод дает рекуррентные соотношения для значений $\beta(\Delta z_i)$ для соседних слоев [4]

$$\beta_s(\Delta z_{i+1}) = \beta_s(\Delta z_i) \cdot T^{-2}(\Delta z_i) \cdot \frac{S(\Delta z_{i+1})}{S(\Delta z_i)}, \quad (4)$$

где

$$T^2(\Delta z_i) = \exp(-2\beta_s(\Delta z_i) \cdot \Delta z_i).$$

Однако решение (4) для профиля $\beta_s(\Delta z_i)$ возможно при наличии дополнительной информации о $\beta_s(\Delta z_i)$. С этой целью в ночное время возможно проведение параллельных лидарных измерений оптической толщины облака с использованием обратного спонтанного комбинационного рассеяния (СКР). Для основного компонента атмосферного воздуха азота N_2 при длине волны падающего излучения $\lambda_0 = 0,53$ мкм длина волны линии СКР составляет $\lambda_{N_2\text{скр}} = 0,605$ мкм. Ввиду того что высотное распределение азота известно (стандартная атмосфера) и флуктуирует незначительно, отношение сигналов СКР для двух стробов длиной Δz , расположенных на высотах z_1 и z_2 , при условии прозрачной атмосферы является заранее известной функцией $F(\Delta z, z_1, z_2)$. Если при наличии облачности стробы выбраны на высотах z_1 и z_2 ниже и выше облака соответственно, то измеренное отношение сигналов СКР $F_{\text{изм}}(\Delta z, z_1, z_2)$ будет отличаться от $F(\Delta z, z_1, z_2)$ множителем T^2

$$F_{\text{изм}} = T^2 \cdot F \quad (5)$$

где T — коэффициент направленного пропускания облачного слоя между высотами z_1 и z_2 . Несколько более сложное соотношение можно получить для определения T , используя распределение сигналов СКР N_2 по высоте ниже и выше облака.

При наличии высотного профиля сигнала $S(z)$ на основной длине волны и измеренного коэффициента направленного пропускания T для облачного слоя предлагается следующий алгоритм обработки для получения функции $\beta_s(z)$.

1. Задается значение $\beta_s(\Delta z_k)$ для k -го слоя, причем слой выбирается ближе к верхней границе облака, что обеспечивает большую устойчивость метода МПС [3].

2. По формулам (4) рассчитывается профиль $\beta_s(\Delta z_i)$, $i = 1, \dots, N$.

3. Сравнивается рассчитанная оптическая толщина $\tau = \sum_i \beta_s(\Delta z_i) \Delta z_i$ и логарифм измеренной величины T $\tau = \ln T$.

4. В случае, если условие (6) не выполняется, изменяется значение параметра $\beta_s(\Delta z_k)$ и вновь выполняются пп. 1, 2, 3, 4 до выполнения условия (6). В результате получаем профиль коэффициента рассеяния $\beta_s(\Delta z_i)$.

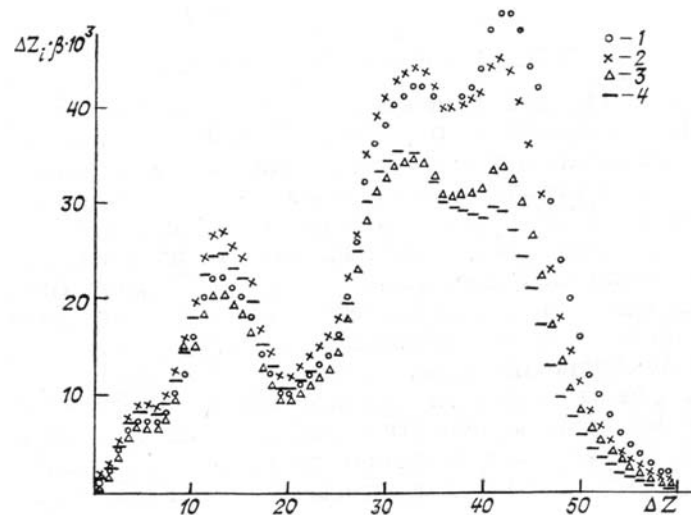


Рис. 1. Влияние изменчивости индикатрисы вдоль «облака» и точности определения оптической толщины на восстановление профиля коэффициента рассеяния $\beta(z) \cdot \Delta z$ (1 — заданное распределение $\tau = 1,3$; 2 — $\tau = 1,3$, $\gamma = 0,03 \pm 0,07$; 3 — $\tau = 1$, $\gamma = \text{const}$; 4 — $\gamma = 0,03 \pm 0,07$. По высоте «облако» разбивалось на 60 интервалов (в произвольных единицах)

На рис. 1 графически приводятся результаты восстановления профиля β_s указанным методом в численном эксперименте. Кривая 1 представляет заданное распределение $\beta_s(z)$, при заданном значении оптической толщины всего «облака» $\tau_0 = 1,3$. Профиль $\beta_s(z)$ задавался в виде ступенчатой функ-

ции, состоящей из 60 значений. По горизонтальной оси отложено расстояние в «облаке» в произвольных единицах. Соответственно по вертикальной оси даны значения $\beta_s \cdot \Delta z_i \cdot 10^3$, где Δz_i — длина интервала разбиения. По заданному распределению рассчитывался профиль «сигнала» для постоянного вдоль трассы модуля индикатрисы обратного рассеяния и для линейно-меняющегося профиля модуля индикатрисы от 0,07 до 0,03. По значениям полученных профилей «сигналов» данным методом восстанавливались профили $\beta_s(z)$. Кривая 2 соответствует восстановленному профилю $\beta_s(z)$ при линейно-меняющейся величине модуля индикатрисы обратного рассеяния и $\tau = 1,3$. Кривые 3 и 4 даны для постоянной индикатрисы и линейно-меняющейся при значении $\tau = 1$ (т.е. предполагается, что ошибка в задании величины τ около 30%). Сравнение рассчитанных профилей $\beta_s(\Delta z_i)$ с заданным показывает, что изменение модуля индикатрисы обратного рассеяния слабо влияет на точность восстановления профиля β_s . Так, линейное изменение индикатрисы вдоль «облака» более чем в 2 раза привело к ошибке в восстановлении β_s более 10% лишь в верхней части «облака». Влияние неточности в задании оптической толщины τ на ошибки в восстановлении профиля более существенно. Тем не менее даже в наихудшем случае, при 30%-ной ошибке в определении оптической толщины τ и меняющейся в граничных пределах индикатрисе рассеяния назад [5, 6] для большей части заданного «облака» достаточно точны количественные совпадения. Заметим, что выбранное значение τ также является весьма большим для перистых облаков. При меньших значениях τ ошибки уменьшаются. Согласно расчетам для $\tau = 0,13$ профиль $\beta_s(z)$ отличается от профиля сигнала на единицы процентов.

Описанный метод использовался для восстановления профилей коэффициента рассеяния $\beta_s(z)$ в натурных измерениях. Основные параметры используемой лидарной установки следующие. Передатчик — лазер на стекле с Nd — имел импульсную энергию на второй гармонике ($\lambda_0 = 530$ нм) 1,5 Дж и расходимость 3 мрад. Приемник — полуметровый телескоп с углом поля зрения 3 мрад. На рис. 2 в качестве примера приведен полученный профиль коэффициента рассеяния во время комплексного эксперимента по перистым облакам в г. Звенигороде.

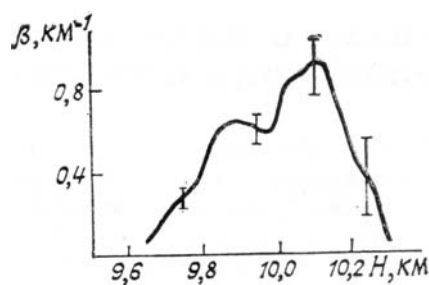


Рис. 2. Зависимость коэффициента рассеяния $\beta(H)$ от высоты для перистого облака. Оптическая толщина облака $\tau = 0,34 \pm 0,07$. Время измерения 1...05—1...15. Дата 29.V.86

Таким образом, предложенный метод позволяет по простому алгоритму с использованием только экспериментальной информации восстанавливать распределение оптических параметров по высоте перистых облаков.

1. Невзоров А. П., Мазин И. П., Шугаев В. Ф. Оптическая плотность облаков. Труды ЦАО. М.: Гидрометеиздат, 1976. 168 с.
2. Журавлёва В. А. Лидарно-радиометрические исследования характеристик перистой облачности. Диссертация. ЦАО. М., 1983.
3. Зуев В. Е., Кавкьянов С. И., Креков Г. М. // Известия АН СССР. ФАО. 1983. Т. 19. № 3. С. 255.
4. Зуев В. Е., Креков Г. М., Крекова М. М., Наац И. Э. // В кн.: Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1976.
5. Mc Cormick M. P., Fuller W. H. Lidar Techniques for Pollution Studies. «AIAA J.», 1973. V. 11. № 2. P. 244.
6. Wendling P., Wendling R., Weickmann H. K. // Appl. Opt. 1979. V. 18. № 15. P. 2663.

Центральная аэрологическая
обсерватория, г. Долгопрудный

Поступила в редакцию
19 сентября 1988 г.

L. V. Kravets. On the Resolution of Profiles of Some Optical Parameters of Cirrus Clouds using Lidar Techniques.

Lidar method of light extinction and scattering coefficient profile determination in cirrus clouds is considered. For method realization required are measurements of back scattered light signal profile and cloud transmission coefficient. Transmission coefficient is defined by ratio of Raman signals from atmospheric nitrogen higher and lower a cloud. Profile determination algorithm and the results of the computations are discussed.