

Л.В. Кравец

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ВИДИМОГО СВЕТА В ОБЛАКАХ ВЕРХНЕГО ЯРУСА

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию вертикальных профилей коэффициента ослабления видимого света в облаках типа Ci с помощью наземного лидара. Обнаружено, что форма профилей коэффициента ослабления различна для облаков с разной высотой нижней границы. Получены эмпирические соотношения, описывающие зависимость коэффициента ослабления видимого света в облаках типа Ci от высоты.

Данная статья базируется на результатах комплексного эксперимента по исследованию облаков верхнего яруса, проводимого в 1986, 1987 и 1989 гг. в весенне-летний период на Звенигородской научной станции ИФА АН СССР. Измерения проводились для всех типов облаков в диапазоне высот 5,5–12 км. Средняя высота нижней границы облаков верхнего яруса, наблюдаемых за это время, была равна 7 700 м. Средняя мощность равнялась 1350 м. Максимальная вертикальная толщина была равна 4400 м 2.06.89 в 12 ч 51 мин.

Вертикальные профили коэффициента ослабления видимого света $\beta(H)$ в облаках типа Ci были получены с помощью лидара, разработанного в ЦАО. При дневных измерениях использовались данные об оптической толщине перистых облаков, полученных спектрофотометром (ИФА АН СССР) [1]. Ночью лидар работал автономно. Методика восстановления $\beta(H)$ предложена автором в [2].

Основные параметры лидарной установки следующие. Энергия передатчика в импульсе на длине волны λ 1060 нм равна 8 Дж, на длине волны 530 нм — 2 Дж. Длительность импульса 30 нс. Расходимость луча передатчика 3 мрад, угол приема 1 мрад. Диаметр зеркала приемной антенны 0,3 м. Определение нижней и верхней границ облаков проводилось по методу, описанному в [3].

Пространственное распределение оптических характеристик, таких как коэффициент ослабления видимого излучения в облаках типа Ci , представляет сложную, изменчивую картину. За время экспериментов было накоплено около 1200 лидарных зондов облаков верхнего яруса. По полученному массиву данных были определены средние профили восстановленного коэффициента ослабления $\beta(H)$ для различных высот обнаружения нижней границы (соответственно температур) при разной вертикальной толщине облаков. На рис. 1 приведены средние относительные профили $\beta(H)$ от нижней границы облаков до верхней. По оси ординат отложена $\beta_{\text{отн.ед.}}(H) = \beta(H) / \langle \beta \rangle (H_v - H_n)$ [отн. ед.], где $\langle \beta \rangle$ — среднее значение коэффициента ослабления, $(H_v - H_n)$ — толщина облачного слоя. Оче-

видно, что $\int_{H_n}^{H_v} \beta \cdot dH = \langle \beta \rangle \cdot (H_v - H_n) = \tau$, где τ — оптическая толщина. Начало оси абсцисс соответствует

высоте нижней границы, конец — высоте верхней границы. Профили на рис. 1 получены для облаков, мощности которых варьировались в пределах 1200–1800 м. Этот диапазон толщин чаще других встречался в экспериментах. В данном диапазоне лежит среднее значение толщины по всему циклу измерений. В этом смысле можно говорить о данных распределениях $\beta(H)$ как о типичных. Заметим, что приведенные на рис. 1 кривые представляют средние профили $\beta(H)$ по большому числу случаев. Отдельные реализации профилей $\beta(H)$ имеют разнообразный вид [3]. Относительное среднеквадратическое отклонение $\sigma(\beta(H)) / \beta(H)$, согласно расчетам, достигает 0,3÷0,5 для разных H . Поэтому профили, приведенные на рис. 1, имеют смысл при усреднении по достаточно большим пространствам.

Кривые, приведенные на рис. 1, отличаются друг от друга. Кривая 1 для облаков, нижняя граница которых колеблется в диапазоне 6–7 км, представляет распределение с максимумом вблизи средней высоты облака $(H_v - H_n) / 2$, где H_v и H_n — высоты верхней и нижней границ облака. С ростом высоты нижней границы кривые становятся асимметричными — максимум распределения коэффициента ослабления видимого света смещается в сторону верхней границы облака (кривые 2 и 3). Для облаков, нижняя граница которых лежит в высотном интервале 9–10 км (кривая 4, эти облака находились непосредственно под тропопаузой, или частично выше нее) максимум $\beta(H)$ смещается к центру распределения, при этом его абсолютное значение становится наибольшим. Это, по-видимому, объясняется тем, что рассеивающая масса таких облаков скапливается непосредственно под тропопаузой в узком высотном слое.

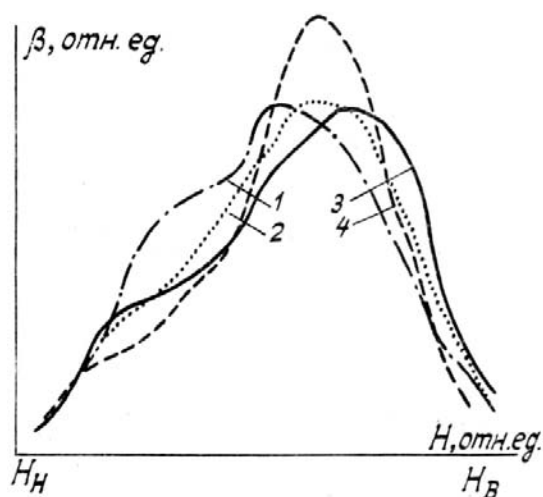


Рис. 1. Профили вертикального распределения коэффициента ослабления видимого света в облаках верхнего яруса, полученные экспериментально

На основе полученных экспериментальных данных предложена следующая эмпирическая формула, описывающая вертикальные профили коэффициента ослабления видимого света в облаках верхнего яруса, для толщин облаков 1200–1800 м.

$$\beta(H) = A(1 - \xi)^{2,56 - 0,125H_n} \cdot (e^{(0,83 + 0,4H_n)\xi} - 1), \quad \xi = \frac{H - H_n}{H_b - H_n}, \quad (1)$$

где высота H измеряется в километрах. Параметр A может быть определен, если известна функция, описывающая зависимость среднего значения оптической толщины τ от высоты, например, нижней границы облаков $\tau(H_n)$. Тогда

$$\tau(H_n) = \int_{H_n}^{H_b} \beta(H) dH. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) легко получить A .

На рис. 2 *а, б, в* приведены кривые, полученные по формуле (1), и экспериментальные точки из рис. 1 для разных уровней H_n . Соответствие достаточно хорошее, если высота верхней границы облака $H_b < H_\tau$, где H_τ – высота тропопаузы. Вертикальными отрезками на рис. 2 показаны максимальные погрешности, определяемые из экспериментально-модельных данных в условиях дневного фона, как описано в [3].

Заметим, что зануление функции $\beta(H)$, особенно на верхней границе, – экстраполяционное. В условиях дневного фона величина H_b , измеренная лидаром, меньше реальной. Однако для тонких облаков с $\tau < 1$, а именно такие, как правило, исследовались в экспериментах, это отличие, по видимому, невелико.

Выражение (1) для β может быть преобразовано в зависимость от температуры t . Для этого был получен средний за время экспериментов профиль температуры верхней тропосферы. Зависимость $H(t)$ имеет следующий вид:

$$H(t) = 0,13|t| + 3,1. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), легко получить параметрическое соотношение $\beta(t)$.

Важной оптической характеристикой перистых облаков является их оптическая толщина τ . В [4] на основе экспериментальных данных предложена функция зависимости коэффициента поглощения ИК-излучения σ_a от температуры середины облака в следующем виде:

$$\sigma_a = B(t + t_0)^2, \quad (4)$$

где $B = 1,6 \cdot 10^{-4}$, $t_0 = 82,5^\circ\text{C}$. По оценкам авторов коэффициент ослабления видимого излучения примерно вдвое больше σ_a . Тогда эмпирическое соотношение (4) может быть преобразовано в следующее:

$$\langle \beta \rangle \approx 3,2 \cdot 10^{-4} (t + t_0)^2. \quad (5)$$

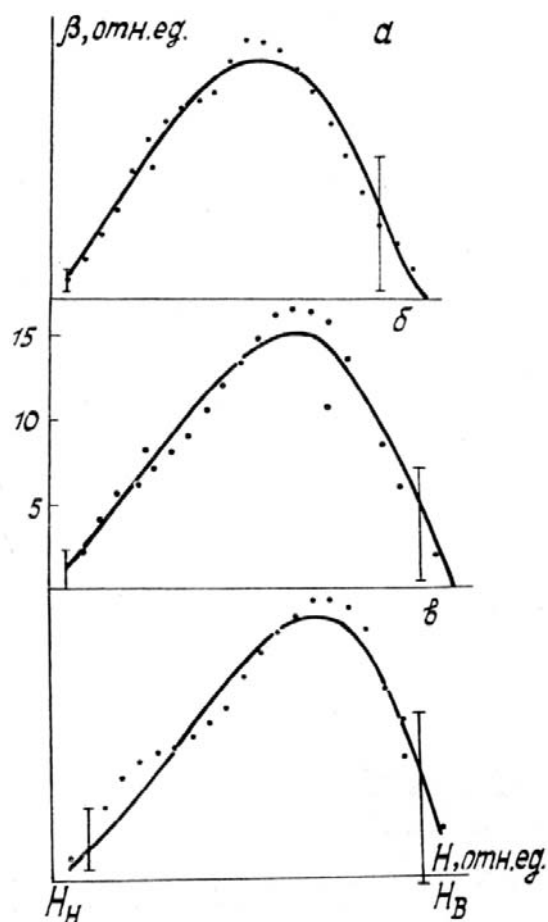


Рис. 2. Профили вертикального распределения коэффициента ослабления видимого света в облаках верхнего яруса, полученные по формуле (1). а — $H_H = 6,5$ км; б — $H_H = 7,5$ км; в — $H_H = 8,5$ км

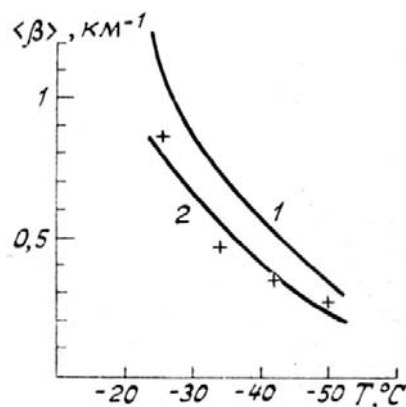


Рис. 3. Зависимость среднего показателя ослабления в облаках верхнего яруса по данным [4] (кривая 1), по данным наших экспериментов (кривая 2)

На рис. 3 приведены кривая, описываемая функцией (5), и точки, соответствующие полученным в наших экспериментах значениям среднего коэффициента ослабления в восьмиградусных интервалах усреднения. Экспериментальные значения, полученные в наших экспериментах, лежат ниже кривой, описываемой (5). Для наших данных достаточно хорошей аппроксимацией можно считать зависимость вида (5) с той разницей, что множитель перед скобкой равен 2, 4:

$$\langle \beta \rangle \approx 2,4 \cdot 10^{-4} (t + t_0)^2. \quad (6)$$

Учитывая формулу (6), нетрудно получить окончательное выражение для профиля $\beta(t)$. Параметр A в формуле (1) с учетом (6) будет равен

$$A = 1,85 \cdot 10^{-3} \frac{\int_{|t_H|}^{|t_B|} (t + t_H)^2 dt}{\int_{|t_H|}^{|t_B|} (1 - \xi_t)^{2,17-0,016|t_H|} e^{(2,07+0,052|t_H|\xi_t - 1)} dt}, \quad (7)$$

$$\xi_t = \frac{|t| - |t_H|}{|t_B| - |t_H|},$$

где t_H , t_B — температуры на нижней и верхней границе облака. Таким образом, выражения (1), (3) и (7) полностью определяют профиль $\beta(t)$, $\beta(H)$.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Форма вертикального профиля коэффициента ослабления видимого света в облаках верхнего яруса различна для облаков разной высоты и соответственно температуры. Обнаружено, что максимум распределения $\beta(H)$ смещается в сторону верхней границы с ростом высоты облаков (понижением температуры). Смещение максимума $\beta(H)$ в сторону верхней границы для более высоких облаков может быть объяснено следующим образом. Центр генерации облачных частиц находится ближе к верхней границе зрелого облака. По мере роста облачных частиц наиболее крупные опускаются вниз. Поскольку в более высоких облаках частицы меньше, то при одинаковых по скорости вертикальных токах в верхних облаках меньшая часть частиц будет спадать вниз. Соответственно максимум $\beta(H)$ будет ближе к уровню начального центра генерации частиц. Для облаков, расположенных непосредственно под тропопаузой, максимум $\beta(H)$ обнаруживается примерно на уровне 0,3–0,5 км ниже тропопаузы.

1. Аникин П. П., Шукуров А. Х. // Радиационные свойства перистых облаков / Под ред. Е. М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. С. 100–108.
2. Кравец Л. В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 2. С. 188.
3. Кравец Л. В., Маринушкин В. Н., Смирнов Н. Д. // Радиационные свойства перистых облаков / Под ред. Е. М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. С. 87–100.
4. Platt C. M., Harshvardhan J. // Geophys. Res. 1988. V. 93. № 9D. P. 11.

Центральная аэрологическая обсерватория,
г. Долгопрудный

Поступила в редакцию
28 февраля 1990 г.

L. V. Kravets. Vertical Distribution of the Extinction Coefficient of Upper Level Clouds in Visual Range.

An experimental study of the vertical profiles of the extinction coefficient of *Ci* clouds in the visual range with a ground lidar is discussed in the present paper. The extinction coefficient profiles shape is found to be different for clouds with different lower boundary heights. Obtained are empirical correlations describing the dependence of extinction coefficient of *Ci* clouds in the visual range on altitude.