

**О.В. Шефер**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ АЭРОЗОЛЕМ**

Представлено всестороннее исследование зависимости коэффициента ослабления от длины волны для атмосферного образования, состоящего из крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций кристаллического аэрозоля. Даны численные расчеты коэффициента ослабления ледяных частиц сферической формы. Показано, что для кристаллического облака спектральная зависимость коэффициента ослабления объясняется прежде всего присутствием в облаке ориентированных ледяных пластинок.

### **1. Введение**

Исследование ослабления оптического излучения применительно к интерпретации данных зондирования кристаллических облаков (для несферических частиц имеет место особый механизм светорассеяния, отличный от рассеяния на сферах) пока недостаточно представлено в литературе. В настоящее время интерпретация данных зондирования строится на более известных моделях, в частности на моделях сферических и хаотически ориентированных кристаллов. Так, на основе экспериментальных исследований установлено, что для ослабления излучения, прошедшего через перистые облака, отмечается спектральная зависимость [1,2].

В статье [3] нами показано, что зависимость этой характеристики светорассеяния от длины волны можно объяснить наличием в рассеивающем объеме ориентированных пластинок. Амплитуда осцилляций фактора эффективности предопределяет спектральное изменение коэффициента ослабления [4, 5]. Для любой другой формы кристаллов такое изменение существенно меньше. Оценка ослабления оптического излучения для ледяных кристаллов представлена в [3, 6]. Следует отметить, что в этих статьях нами проведен подробный анализ этой величины только для больших частиц, в рамках метода физической оптики.

Известно, что коэффициент ослабления для мелких частиц, условно к таким отнесем частицы, имеющие размеры менее 30 мкм, также зависит от длины волны. В связи с этим экспериментально установленное изменение ослабления по спектру связывают с наличием в рассеивающем объеме мелких кристаллов. В данной статье дается достаточно полный анализ возможности такого предположения.

### **2. Численное исследование ослабления для мелкодисперсной фракции кристаллического аэрозоля**

Сначала проведем численное исследование ослабления для мелких ледяных кристаллов. Заметим, что в природных условиях атмосферы это будут в своем большинстве кристаллы объемных форм. Известно, что в силу своих аэродинамических свойств такие частицы будут хаотически ориентированы в пространстве [7]. При рассмотрении ансамбля ледяных кристаллов необходимо провести усреднение характеристик светорассеяния отдельной частицы по размерам и совокупности ориентаций. Очевидно, что в этом случае существенно сглаживаются особенности рассеяния, обусловленные структурой того или иного кристалла. Поэтому в качестве обобщенной модели полидисперсной среды, состоящей из хаотически ориентированных кристаллов произвольных форм, рассмотрим совокупность сферических частиц. Для проведения численных расчетов коэффициента ослабления воспользуемся следующим выражением:

$$\alpha = \int_0^{\infty} f(a) \sigma da, \quad (1)$$

где  $f(a)$  – функция плотности распределения частиц по радиусам  $a$ ;  $\sigma$  – сечение ослабления для сферической частицы, которое определяется по известной формуле [8]:

$$\sigma = 4 \pi / k^2 \operatorname{Re} (S(0)), \quad (2)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны. Значения амплитудной функции  $S(0)$  при различных размерах частицы вычисляются через коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  решения Ми [9]. В качестве функции  $f(a)$  выбрано  $\gamma$ -распределение, что представляет собой действительное описание распределения по размерам ледяных частиц в облаках [10],

$$f(a) = N \frac{\mu^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1) a_m} \left(\frac{a}{a_m}\right)^{\mu} e^{-\mu \frac{a}{a_m}}, \quad (3)$$

где  $N$  – концентрация частиц в единице объема;  $a_m$  – радиус сферы, соответствующий максимуму функции  $f(a)$ ;  $\mu$  – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума. При проведении численных расчетов по формуле (1) использовались средние размеры частиц, которые связаны с  $a_m$  следующим соотношением:

$$\bar{a} = a_m (1 + 1 / \mu).$$

Отметим еще один параметр, от которого зависит сечение ослабления  $\sigma$ , это показатель преломления  $\tilde{n}$ . На рис. 1 представлены графики зависимостей показателей преломления  $n$  и поглощения  $\kappa$  льда от длины волны  $\lambda$ , построенные по результатам обзорной статьи [11]. При переходе из видимой части в ИК-диапазон величина  $\kappa$  возрастает на несколько порядков. Практически во всем ИК-диапазоне длин волн  $\kappa$  и  $n-1$  сравнимы между собой. Поэтому следует ожидать, что показатель поглощения  $\kappa$  будет оказывать заметное влияние на спектральную зависимость коэффициента ослабления  $\alpha$ .

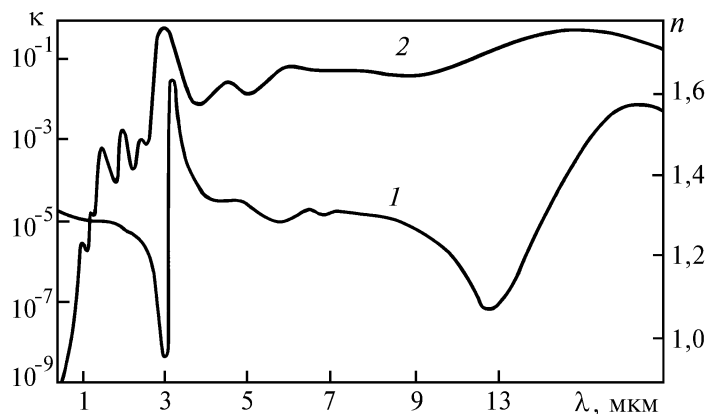


Рис. 1. Зависимости реальной и мнимой частей комплексного показателя преломления льда от длины волны: кривая 1 –  $n(\lambda)$ ; 2 –  $\kappa = \kappa(\lambda)$

Проведем анализ численных расчетов коэффициента ослабления, полученных на основе выражения (1). На рис. 2–4 представлены спектральные зависимости  $\alpha(\lambda)$  в диапазоне  $0,5 \div 15$  мкм длин волн для различных средних размеров частиц, но при одной и той же концентрации  $N = 100 \text{ л}^{-1}$ . Отметим, что для кристаллов с большими размерами существует лишь слабая зависимость  $\alpha$  от длины волны (рис. 2). В области  $0,5 \div 3,0$  мкм на кривой  $\alpha(\lambda)$  наблюдается «рябь», а в области  $10,0 \div 11,0$  – «пичок». Такие особенности  $\alpha(\lambda)$  связаны с характер-

ными «изломами» в зависимости от показателя  $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda)$  (рис. 1). Для более мелких кристаллов при прочих равных условиях наблюдается значительная спектральная зависимость ослабления (рис. 3, 4). Однако изменения этой характеристики светорассеяния являются относительно большими лишь на фоне того порядка, в рамках которого осциллирует  $\alpha$ . Как видно из рис. 2–4, абсолютные значения коэффициента ослабления тем меньше, чем меньше размеры частиц. Отметим, что спектральная зависимость  $\alpha$  для ледяных сфер, соизмеримая для случая ориентированных пластинок, будет наблюдаться только при высокой концентрации мелких частиц, превышающей концентрацию пластинок на несколько порядков.

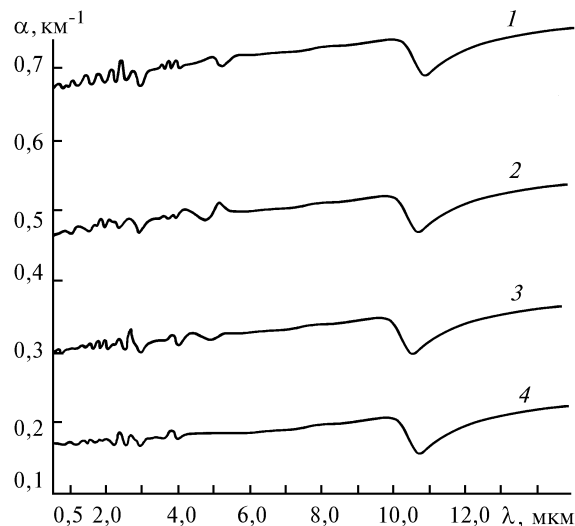


Рис. 2. Коэффициенты ослабления для ледяных частиц сферической формы в зависимости от длины волны  $\lambda$ :  $N = 100 \text{ л}^{-1}$ ,  $\mu = 5$ ; для кривых 1, 2, 3, 4  $\bar{a} = 30; 25; 20; 15 \text{ мкм}$  соответственно

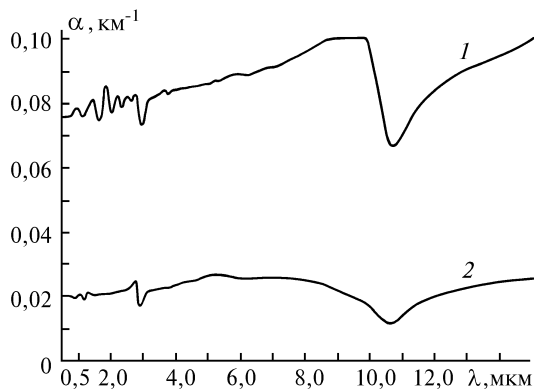


Рис. 3. Коэффициенты ослабления для ледяных сфер в зависимости от длины волны  $\lambda$ :  $N = 100 \text{ л}^{-1}$ ,  $\mu = 5$ ; кривая 1 –  $\bar{a} = 10 \text{ мкм}$ ; 2 –  $\bar{a} = 5 \text{ мкм}$

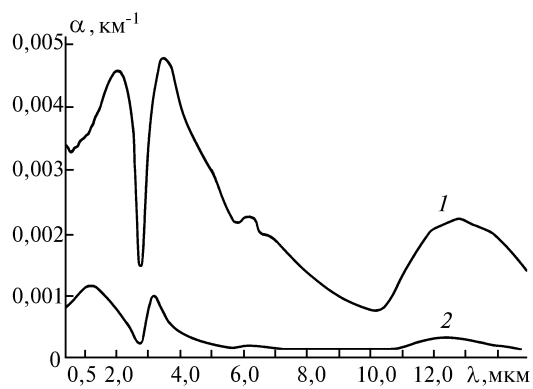


Рис. 4. Коэффициенты ослабления для ледяных сфер в зависимости от длины волны  $\lambda$ :  $N = 100 \text{ л}^{-1}$ ,  $\mu = 5$ ; кривая 1 –  $\bar{a} = 2 \text{ мкм}$ ; 2 –  $\bar{a} = 1 \text{ мкм}$

### 3. Микрофизические свойства атмосферных кристаллических образований

В данном разделе представлен обзор литературы, цель которого: а) выделить наиболее характерные параметры микроструктуры природных кристаллических облаков, б) использовать затем их как априорную информацию при сравнительном анализе численных расчетов коэффициента ослабления (1) для мелких кристаллов и больших пластинок.

Как правило, в состав атмосферного кристаллического образования входят частицы различных размеров. Причем количество больших кристаллов, размеры которых в среднем составляют сотни микрометров, значительно превышает концентрацию мелких частиц. Это объясняется тем, что происходит частичное «выпаривание» и «вымораживание» мелкодис-

персной фракции. По данным обзорной статьи [12], концентрация больших кристаллов, в частности для облаков нижнего и среднего яруса, примерно на три порядка, а в ряде случаев и на 5 порядков выше, чем мелких частиц. При этом объектами исследования являлись облака различных форм, например таких как высокослоистые (As), слоисто-дождевые (Ns), кучевые (Cu), простирающиеся над различного типа местностями, океаном. Соотношение мелких и крупных частиц остается таким же и для облаков верхнего яруса, главным образом для перистых. Что же касается облаков, находящихся на очень большой высоте от Земли, например таких как серебристые и перламутровые, то они состоят главным образом из мелкодисперсной фракции кристаллического аэрозоля. Очевидно, что каждый тип облаков характеризуется определенными микрофизическими свойствами. Так, для кристаллических облаков, центры которых находились на высоте от 4 до 20 км, концентрация частиц принимала значения из широкого диапазона  $10^{-4} \text{ л}^{-1} \div 10^4 \text{ л}^{-1}$ , и наблюдались ледяные частицы с размерами от 1 до 8000 мкм. Однако наиболее типичные значения концентрации и размеров составляли  $30 \text{ л}^{-1}$  и 250 мкм [13].

В атмосфере с малым содержанием воды в силу определенных условий кристаллографического роста кристаллы имеют правильные гексагональные структуры. Согласно своим формам и размерам частицы принимают некоторую преимущественную ориентацию. При этом пластинчатые кристаллы имеют в пространстве наиболее устойчивое положение. Известно [13], что в состав кристаллических облаков в той или иной мере входят ледяные пластинки, и относительно мелкой фазы частиц их концентрация выше.

#### **4. Сравнительный анализ спектральной зависимости ослабления, обусловленной мелкими кристаллами и большими пластинками**

Выше были выделены две группы кристаллов, для каждой из которых существует зависимость ослабления от длины волны. К первой группе относятся мелкие кристаллы, ко второй – большие пластинки, имеющие некоторую преимущественную ориентацию. Проведем сравнительный анализ абсолютных значений коэффициентов для таких частиц. Для ледяных пластинок с концентрацией  $N$ , соизмеримой для случаев, представленных на рис. 3–4, коэффициент ослабления будет выше на несколько порядков [3]. Такое отличие будет тем больше, чем больше разница между средними размерами кристаллов этих двух групп. Например, для пластинок, средние радиусы которых составляют 250 мкм, при  $N = 1 \text{ л}^{-1}$   $\alpha$  принимает значения примерно из области  $10^0 \div 10^{-1} \text{ км}^{-1}$  [2], для мелких частиц с радиусом  $a = 5 \text{ мкм}$   $\alpha$  равна значениям порядка  $10^{-4} \text{ км}^{-1}$ . Более того, при существующих концентрациях кристаллов с малыми размерами коэффициент ослабления будет иметь достаточно низкие значения (рис. 2–4). Так, при концентрации  $N = 0,3 \text{ л}^{-1}$   $\alpha$  будет принимать значения в рамках  $10^{-8} \div 10^{-5} \text{ км}^{-1}$ .

Таким образом, при реальных параметрах микроструктуры большинства природных кристаллических облаков абсолютные значения коэффициента ослабления для мелкодисперсной фракции аэрозоля будут значительно меньше, чем величины коэффициента ослабления для больших ориентированных пластинок.

#### **5. Заключение**

Спектральная зависимость коэффициента ослабления, зафиксированная при зондировании природных кристаллических облаков, может быть объяснена присутствием мелких частиц только в том случае, когда величина  $N$  огромна, например  $10^5 \text{ л}^{-1}$ . Но, как правило, такой концентрации для мелких частиц не бывает, и, более того, образуется большее количество крупных кристаллов. При этом присутствующие в исследуемом объеме ориентированные ледяные пластинки будут обеспечивать спектральную зависимость ослабления, на фоне которой не существенны какие-либо ее особенности, обусловленные мелкими частицами. Следовательно, экспериментально установленную зависимость ослабления от длины волны прежде всего следует связать с наличием в кристаллическом облаке ориентированных ледяных пластинок.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 94-02-03190-а).

1. Prabhakara C., Fraser R.S., Dalu G. // J. Appl. Meteor. 1988. V. 2. P. 376–399.

2. Prabhakara C., Jung-Moon Yoo, Dalu G., Fraser R.S. // J. Appl. Meteor. V. 29. P. 1313–1329.

3. Боровой А.Г., Попов А.А., Шефер О.В. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 9. С. 899–906.
4. Боровой А.Г. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 7. С. 17–21.
5. Попов А.А. // ДАН СССР. 1988. Т. 303. N 3. С. 594–597.
6. Попов А.А., Шефер О.В. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 5. С. 456–461.
7. Hallett J. // Opt. Soc. Am. 1987. V. 4. N 3. P. 581–589.
8. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
9. Mie G. // Ann. Phys. 1908. V. 25. P. 377–445.
10. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 200 с.
11. Warren S. G. // J. Appl. Opt. 1984. V. 23. N 8. P. 1206–1225.
12. Hobbs P. V., Rangno A. L. // J. Atm. Scie. 1985. V. 42. N 23. P. 2523–2549.
13. Dowling D. R., Radke L. F. // J. Appl. Opt. 1990. V. 29. P. 970–978.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
Томский государственный университет им. В.В. Куйбышева

Поступила в редакцию  
3 апреля 1995 г.

**O. V. Shefer. Theoretical Investigation of Optical Radiation Extinction by Crystalline Aerosol.**

A comprehensive investigation of extinction coefficient as a function of wavelength is conducted for atmospheric formations including macrocrystalline and microcrystalline aerosol fractions. The computations of the extinction coefficient are presented for ice particles of spherical form. The spectral dependence of extinction coefficient is shown to be due to presence of oriented ice plates inside crystalline cloud.