

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБЛАКА

Алейник А.А.¹ Шефер О.В.^{2,3}

¹Томский политехнический университет, ИШИТР, студент гр. 8В23, e-mail: aaa205@tpu.ru

²Томский политехнический университет, ИШИТР, доцент, e-mail: shefer@tpu.ru

³Томский государственный университет, ИПМКН, профессор, e-mail: shefer-ol@mail.ru

Аннотация

Продемонстрированы особенности ослабления оптического излучения, обеспечиваемые средними размерами и дисперсией размеров ансамбля пластинчатых кристаллов. Установлены регрессионные кривые, с высокой точностью представляющие спектральный ход фактора ослабления в области окна прозрачности среднего ИК диапазона. Полученные зависимости в виде парабол позволяют в реальном масштабе времени оценивать средние размеры рассеивателей.

Ключевые слова: ледяное облако, ослабление, оптическое излучение, регрессия

Введение

Знание процесса ослабления оптического (в широком смысле слова) излучения кристаллическими облаками играет важное значение в понимании распространения излучения в атмосфере, определении радиационного баланса, а также прогнозирования погоды. Однако роль в этом ледяных облаков является одной из самых мало изученных [1–3]. Исследование влияния физико-химических свойств частиц на прохождение излучения имеет первостепенное значение для понимания воздействия ледяных облаков на трансформацию радиационных потоков.

Облачные кристаллы имеют огромное разнообразие форм и размеров, а также природу вещества. К настоящему времени большой объем результатов научного исследования по ослаблению лучистой энергии хаотически ориентированными частицами широко представлен в литературе и базах данных [4–6]. Особенности экстинкции для преимущественно ориентированных кристаллов, представляются главным образом отдельными частицами. Вопрос влияния ансамбля частиц на ослабление оптического излучения слабо изучен. На разных спектральных интервалах в зависимости от физико-химических свойств среды особенности экстинкции могут сильно различаться. С точки зрения спектральной зависимости ослабления лучистой энергии представляют интерес частицы, соизмеримые с длиной волны падающего излучения, а также крупные преимущественно ориентированные кристаллы, имеющие плоскопараллельные грани. Для таких рассеивателей фактор ослабления может принимать значения, отличающиеся от их асимптотической величины, равной 2 [7]. Среди облачных кристаллов выделяются пластинки, для них фактор ослабления принимает значения из наибольшего промежутка, от 0 до 4. Увеличение количества пар плоскопараллельных граней сужают этот интервал. В силу своих аэродинамических свойств, эти кристаллы характеризуются самой устойчивой ориентацией (относительно любых других форм кристаллов) в пространстве. Кроме того, они входят в состав почти всех смешанных и ледяных облаков. Не редко их процентный состав преобладает над другими формами частиц [8]. Устойчивые и наиболее ярко выраженные особенности экстинкции, обеспечиваемые крупными преимущественно ориентированными пластинками, зачастую доминируют над частицами других форм.

В данной работе представлены особенности ослабления оптического излучения (от видимого до среднего ИК диапазона) для ансамбля горизонтально ориентированных кристаллов с различными микрофизическими свойствами. Для численного исследования характеристик ослабления требуется существенное количество вычислительных ресурсов. На основе результатов расчета базовой характеристики ослабления, фактора ослабления,

получены соответствующие регрессионные зависимости, позволяющие много (на порядки) упростить исследование и оценку микрофизических характеристик кристаллического облака.

Формализация

Для представления различных характеристик ослабления излучения фактор экстинкции является базовой характеристикой. Его интегральное представление следующее:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{\int S_{\text{ext}} \cdot N(a) da}{\int S_{\text{sq}} \cdot N(a) da} \quad (1)$$

где S_{ext} – сечение ослабления, S_{sq} – площадь тени частицы, a – определяющий размер частицы (для пластинки – это радиус). Для атмосферных кристаллов существует функциональная взаимосвязь $d = d(a)$ между ее толщиной (d) и радиусом (a) [4]. В частности, для пластинок установлено такое соотношение:

$$d = 2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}. \quad (2)$$

Согласно многочисленным натурным исследованиям микроструктуры ледяных облаков выявлено, что модифицированное гамма-распределение:

$$N(a) = C \frac{\mu^{\mu+1}}{G(\mu+1)} \cdot \frac{1}{a_m} \cdot \left(\frac{a}{a_m} \right)^{\mu} \exp\left(\frac{-\mu a}{a_m} \right) \quad (3)$$

вполне удовлетворительно описывает распределение размеров совокупности облачных кристаллов [4]. Здесь C – концентрация частиц, a_m – размер частицы (например, радиус пластинки), соответствующий максимуму функции $N(a)$, μ – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума (характеристика дисперсии размеров частиц). Для модифицированного гамма-распределения (3) средний размер $\bar{a}$ частиц рассчитывается как $\bar{a} = a_m(1 + 1/\mu)$.

Основой для определения фактора ослабления Q_{ext} является расчет сечения ослабления S_{ext} для отдельной частицы. Величина S_{ext} зависит от размеров частицы, оптических свойств частицы (показатель преломления $\eta = n + i \cdot \chi$), где $n = \text{Re}(\eta)$ и $\chi = \text{Im}(\eta)$) и характеристик излучения (длина волны, состояние поляризации, направление распространения), взаимодействующего с частицей. Для расчета фактора ослабления оптического излучения крупным пластинчатым кристаллом применялся метод физической оптики [9].

Анализ результатов расчета

Проанализируем общие закономерности спектрального хода фактора ослабления излучения кристаллическим облаком при учете различных микрофизических свойств рассеивателей. Это позволит качественно выявить информативность оптической характеристики среды с определенными микрофизическими параметрами.

Пусть лучистая энергия проходит через полидисперсную среду, в которой доминантой в ослаблении оптического излучения являются горизонтально ориентированные ледяные пластинчатые кристаллы. В этой работе понятие «оптический диапазон» рассматривается в широком смысле этого слова и для определенности выбран интервал длин волн от 0.5 мкм до 15 мкм. Оптические свойства ледяных кристаллов представляются зависимостью комплексного показателя преломления $\eta(\lambda)$ для чистого льда [10].

На рис. 1 демонстрируется зависимость фактора ослабления для ансамбля горизонтально ориентированных крупных пластинок при различных значениях характеристики разброса частиц по размерам (μ). Микрофизическая характеристика полидисперсной среды, представляемая $\mu = 1$, обеспечивает плотность вероятности $N(a)$ (3) близкой к равномерному распределению, что в природе кристаллических облаков является редким явлением. Наиболее вероятно встречаются случаи с выраженным максимумом, характеризуемые величинами

$\mu \geq 2$. Из рис. 1 видно, что на разных интервалах длин волн, спектральный ход $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ имеет свои особенности при изменении параметра μ . Наиболее существенные различия фактора ослабления с изменением значений дисперсии размеров кристаллов наблюдаются в первой зоне проявления эффекта Христиансена [11] ($\lambda \approx 2.85$ мкм), а также в диапазонах λ примерно от 3.5 до 6 мкм и от 8 до 9.6 мкм. Следует заметить, что в интервале λ от 9.6 мкм до 12 мкм различий $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при вариаций значений μ практически не наблюдается. В этом диапазоне наибольшее различие $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ (а это $\text{abs}(Q_{\text{ext}}(\mu = 1) - Q_{\text{ext}}(\mu = 10))$ при $\lambda \approx 10.6$ мкм составляет 0.14. Для сравнения, такая разность, но при $\mu = 5$ и $\mu = 10$, равна 0.02.

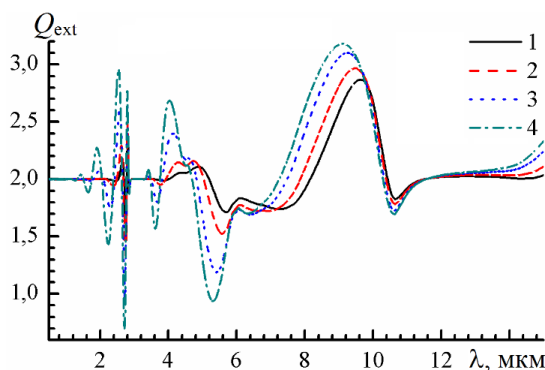


Рис. 1. Фактор ослабления $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для ансамбля ледяных пластинок при $\bar{a} = 50$ мкм: 1 – $\mu = 1$, 2 – $\mu = 2$, 3 – $\mu = 5$, 4 – $\mu = 10$

На рис. 2, а и б демонстрируются значения относительной ошибки фактора ослабления Δ ($\Delta = \text{abs}(S_{\text{точн}} - S_{\text{прибл}}) / S_{\text{точн}}$) при различных условиях. Результаты расчета, иллюстрируемые на рис. 2 а, рассчитаны для случая, когда значения для $Q_{\text{ext}}(\lambda)$, полученные при $\mu = 10$, являются точными ($S_{\text{точн}}$), а

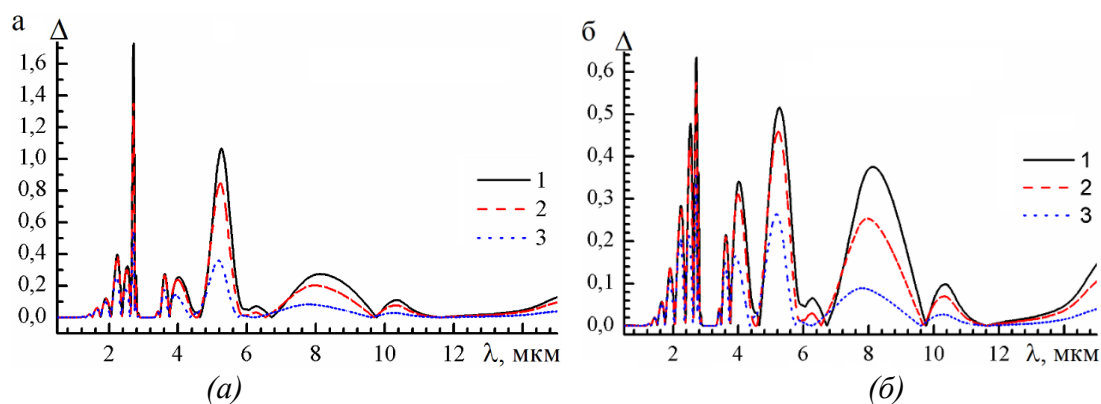


Рис. 2. Относительная ошибка $\Delta = \text{abs}(S_{\text{точн}} - S_{\text{прибл}}) / S_{\text{точн}}$, для разных μ . (а) $S_{\text{точн}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 10$: 1 – $S_{\text{прибл}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 1$, 2 – $S_{\text{прибл}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 2$, 3 – $S_{\text{прибл}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 5$. (б) $S_{\text{прибл}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 10$: 1 – $S_{\text{точн}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 1$, 2 – $S_{\text{точн}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 2$, 3 – $S_{\text{точн}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 5$

приближенными рассматриваются такие варианты: для $\mu = 1$ (кривая 1), для $\mu = 2$ (кривая 2) и для $\mu = 5$ (кривая 3). На рис. 2, б показана обратная расстановка: $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 10$ – приближенная зависимость, а варианты точных расчетов – $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 1$ (кривая 1), $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 2$ (кривая 2), $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu = 5$ (кривая 3). На рис. 2, а и б выделяются интервалы длин волн, где проявляются существенные ошибки, если не учитывать дисперсию размеров частиц. Обратим внимание на то, что характер спектрального хода $\Delta(\lambda)$, иллюстрируемый на рис. 2, а и б, одинаковый, но их величины максимумов разнятся. Так же следует отметить, что на рис. 2 наблюдаются спектральные диапазоны, где влияние параметра μ на значения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$

пренебрежимо мало. В частности, один из таких интервалов является область вблизи $\lambda \approx 9.8$ мкм. Очевидно, что не учет разброса частиц по размерам может привести к большим ошибкам и неправильной оценке характеристик ослабления.

Рассмотрим влияние среднего значения размера частиц на особенности фактора ослабления. На рис. 3 иллюстрируются результаты расчета фактора ослабления для ансамбля ледяных пластинок с различными средними размерами и $\mu = 10$. Вариации значений $\bar{a}$ приводят к проявлению ярко выраженных особенностей, отличных от особенностей, вызванных изменением параметра μ . Напомним, что радиус пластинки связан функциональной зависимостью с толщиной кристалла. Поле, прошедшее через кристалл, является чувствительным к этой микрофизической характеристики (меняется набег фаз), а значит меняет свои характеристики и ослабление лучистой энергии. Размеры частиц, по сравнению с дисперсией размеров, в большей мере влияют на вариации спектрального хода излучения. Выделим одну из особенностей поведения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ – это проявление ярко выраженного максимума на интервале λ от 8 до 10.6 мкм (рис. 4), который с увеличением $\bar{a}$ снижается и смещается по направлению увеличения длины волн.

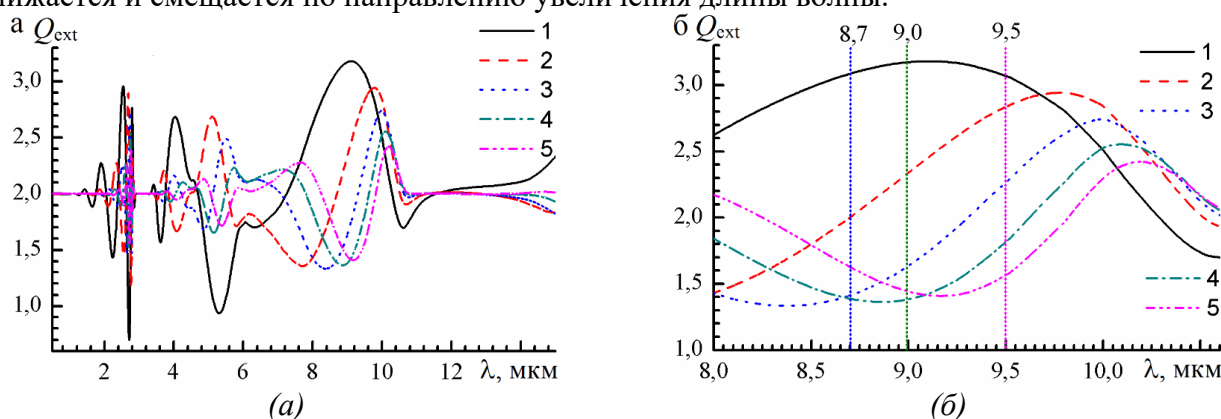


Рис. 3 а, б. Фактор ослабления $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для ансамбля ледяных пластинок, где $\mu = 10$: 1 – $\bar{a} = 50$ мкм, 2 – $\bar{a} = 100$ мкм, 3 – $\bar{a} = 150$ мкм, 4 – $\bar{a} = 200$ мкм, 5 – $\bar{a} = 250$ мкм. (а) $\lambda = [0.5 \text{ мкм}, 15 \text{ мкм}]$. (б) $\lambda = [8 \text{ мкм}, 10.6 \text{ мкм}]$ с выделением (вертикальные линии) соответствующих спектральных областей, где $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx Q_R(\lambda)$.

Для зависимостей $Q_{\text{ext}}(\lambda)$, представленных кривыми 1–5 рис. 4, на интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$ (интервалы отмечены на рисунке вертикальными линиями, а также указаны в таблице ниже) получены соответствующие регрессионные линии $Q_R(\lambda)$ с достоверностью не менее $R^2 \approx 0.99$ (R^2 – коэффициент детерминации). Каждая $Q_R(\lambda)$ представляет собой параболу вида $y = Ax^2 + Bx + F = 0$ (или $y = A(x + B/2A)^2 - (B/2A)^2 + F$, $(x - x_0)^2 = 2p(y - y_0)$), где (x_0, y_0) – координаты вершины параболы), которая проста для анализа.

Таблица 1. Характеристики регрессионных зависимостей для фактора ослабления при $\mu = 10$

$\bar{a}$, мкм	λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	$Q_R(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + F$
50	8	10.6	$-0.5933 \cdot \lambda^2 + 10.781 \cdot \lambda - 45.796$
100	8	10.6	$-2.124 \cdot \lambda^2 + 41.433 \cdot \lambda - 199.11$
150	8.7	10.6	$-2.2396 \cdot \lambda^2 + 44.645 \cdot \lambda - 219.78$
200	9	10.6	$-2.801 \cdot \lambda^2 + 56.648 \cdot \lambda - 283.87$
250	9.5	10.6	$-2.93 \cdot \lambda^2 + 59.773 \cdot \lambda - 302.42$

Положение максимума $Q_R(\lambda)$ на интервале $[\lambda_1, \lambda_2]$ не трудно связать с соответствующим значением $\bar{a}$. Это, в свою очередь, позволяет определить величину среднего размера рассеивателя по данным $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ в выделенном промежутке длин волн. Полученные уравнения можно привести к каноническому виду, тем самым явно выразить координаты вершины

параболы (которые соотносятся с вполне определенным значением $\bar{a}$). Для случая $\bar{a} = [50 \text{ мкм}, 250 \text{ мкм}]$, установлено, что максимумы $Q_R(\lambda)$ (или $Q(\lambda)$) располагаются вдоль параболы $Q_R(\lambda) = -0.879 \cdot \lambda^2 + 16.284 \cdot \lambda - 72.212$ с достоверностью $R^2 > 0.99$. Полученные регрессионные зависимости позволяют получить простые в численной реализации интерпретационные схемы для оценивания средних значений пластинок.

Заключение

В работе продемонстрированы особенности зависимости фактора ослабления в диапазоне длин волн от 0.5 мкм до 15 мкм для совокупности горизонтально ориентированных ледяных пластинок. При этом приняты во внимание различные микрофизические параметры такие как средние размеры и разброс частиц по размерам. Продемонстрировано, на каких спектральных интервалах фактора ослабления учет дисперсии размеров значим (в частности, в первой зоне проявления эффекта Христиансена относительная ошибка может составлять более 100%), а где его влияние пренебрежимо мало (например, в области окна прозрачности вблизи длины волны равной примерно 9.8 мкм).

Проиллюстрирован спектральный ход фактора ослабления при различных средних размерах пластинок. Выделены интервалы длин волн, где проявляется наиболее яркая зависимость оптической характеристики среды, связанной с вариацией средних размеров рассеивателей. При этом особое внимание уделено области прозрачности из среднего ИК диапазона, где наблюдаются устойчивые и выразительные максимумы фактора ослабления, являющиеся уникальными для установления средних размеров кристаллов. Получены регрессионные кривые (в виде парабол), которые с высокой точностью (более 99%) представляют спектральный ход фактора ослабления в этой области. Установленные трендовые зависимости позволяют в реальном масштабе времени проводить анализ и оценку микрофизических характеристик облачных кристаллов.

Список использованных источников

1. Baran A.J. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward // *Atmos. Res.* – 2012. – V. 112. – С. 45-69.
2. IPCC. The physical science basis: contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. – 1552 p.
3. Sorensen C.M., Maughan J.B., Moosmüller H. Spherical particle absorption over a broad range of imaginary refractive index // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2019. – V. 226. – С. 81-86.
4. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
5. Moosmüller H., Sorensen C.M. Small and large particle limits of single scattering albedo for homogeneous, spherical particles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2018. – V. 204. – P. 250-255.
6. Baum B., Yang P., Heymsfield A., Bansemer A., Cole B., Merrelli A., Schmitt S., Wang C. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2014. – V. 146. – С. 123-139.
7. Shefer O. Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2016. – V. 178. – С. 350-360.
8. Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // *Appl. Meteorol.* – 1978. – V. 17. – С. 1220-1224.
9. Popov A.A. New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals // *Proc. SPIE.* – 1996. – V. 2822. – С. 186-194.
10. Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // *Geophys. Res.* – 2008. – V. 113. – D14220.
11. Yang P., Liou K.N. Extinction efficiency and single-scattering albedo for laboratory and natural cirrus clouds // *J. Geophys. Resear.* – 1997. – V. 102. – D18 21,825–21,835.