

УДК 551.576

DOI: 10.18799/29495407/2025/3/98

Шифр специальности ВАК: 1.2.2, 1.6.18, 2.3.1

Численная модель для оценки вклада различных компонент кристаллического облака в ослабление оптического излучения. Часть 2. Оценка микрофизических параметров среды

О.В. Шефер^{1,2✉}, В.А. Сенников³, А.А. Алейник¹

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск*

³ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Томск*

✉ shefer@tpu.ru

Аннотация. Продemonстрированы особенности ослабления оптического излучения ансамблем ледяных кристаллов различной формы. Представлены выраженные устойчивые закономерности спектрального хода ослабления для преимущественно ориентированных пластинчатых кристаллов при различных микрофизических параметрах. Установлены с высокой точностью регрессионные кривые, 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, регрессионная модель

Для цитирования: Шефер О.В., Сенников В.А., Алейник А.А. Численная модель для оценки вклада различных компонент кристаллического облака в ослабление оптического излучения. Часть 2. Оценка микрофизических параметров среды // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 3. – С. 37–43. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/98

UDC 551.576

DOI: 10.18799/29495407/2025/3/98

Numerical model for estimating contribution of different components of crystalline cloud to extinction of optical radiation. Part 2. Estimation of microphysical parameters of medium

O.V. Shefer^{1,2✉}, V.A. Sennikov³, A.A. Aleinik¹

¹ *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

² *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

³ *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation*

✉ shefer@tpu.ru

Abstract. The paper demonstrates the features of optical radiation extinction by an ensemble of ice crystals of various shapes. For predominantly oriented plate crystals at different microphysical parameters, the paper presents the expressed stable patterns of spectral behavior of extinction. The authors have established with high accuracy regression curves representing the spectral behavior of extinction factor for the transparency window of the mid-IR range. The obtained dependences in the form of parabolas allow real-time to estimate the average sizes of scatterers.

Keywords: ice cloud, extinction, optical radiation, regression model

For citation: Shefer O.V., Sennikov V.A., Aleinik A.A. Numerical model for estimating contribution of different components of crystalline cloud to extinction of optical radiation. Part 2. Estimation of microphysical parameters of medium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 3, pp. 37–43. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/98

Введение

Знание процесса ослабления лучистой энергии кристаллическими облаками имеет важное значение в понимании распространения излучения в атмосфере, определении радиационного баланса, а также для 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 по форме, размерам, а также природе вещества. К настоящему времени большой объем результатов научного исследования по ослаблению лучистой энергии хаотически ориентированными частицами широко представлен в научной 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 крупных 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 (относительно любых других форм рассеивателей) характеризуются самой устойчивой ориентацией в пространстве. Кроме того, они входят в состав почти всех смешанных и ледяных облаков. Нередко их процентный состав преобладает над другими формами частиц [4, 8]. Устойчивые и ярко выраженные особенности экстинкции, обеспечиваемые крупными преимущественно ориентированными пластинками, зачастую доминируют над соответствующими оптическими характеристиками других форм кри-

сталлов. В этой связи в данной работе основное внимание уделено особенностям ослабления оптического излучения (от видимого до среднего ИК-диапазона) для ансамбля горизонтально ориентированных ледяных пластинок с различными микрофизическими свойствами.

Для численного исследования характеристик ослабления требуется существенное количество вычислительных ресурсов. В данной работе на основе результатов расчета базовой характеристики ослабления и фактора ослабления получены соответствующие регрессионные зависимости, позволяющие много (на порядки) упростить исследование и оценку микрофизических характеристик кристаллического облака.

Формализация

Среди различных характеристик ослабления излучения фактор экстинкции является базовой оптической величиной. 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 или сферы – это радиус). Для атмосферных кристаллов существует функциональная взаимосвязь $d=d(a)$ между толщиной (d) и радиусом (a) рассеивателя [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 и ее оптических свойств (комплексного показателя преломления $\eta = n + i\chi$, где $n = \text{Re}(\eta)$ и $\chi = \text{Im}(\eta)$), а также характеристик излучения (длины волны, состояния поляризации, направления распространения), взаимодействующего с рассеивателем.

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.

Известно, что природа вещества частиц (в оптической модели представлена комплексным показателем преломления (η)) представляется в зависимости от длины волны (λ), проходящей через рассеиватель. В качестве среды рассмотрим систему ледяных кристаллов. При этом учтем зависимость $\eta(\lambda)$ для чистого льда [9] в оптическом диапазоне длин волн. В этой работе понятие «оптический диапазон» рассматривается в широком смысле этого слова, и для определенности выбран интервал длин волн от 0,5 до 15 мкм.

На рис. 1 иллюстрируются результаты расчета фактора ослабления для относительно мелких (их размеры меньше и соизмеримы с длиной волны) сферических частиц. Расчеты $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ ((1), (3)) выполнены в рамках теории Ми (рассеяние плоской волны на сфере) [10].

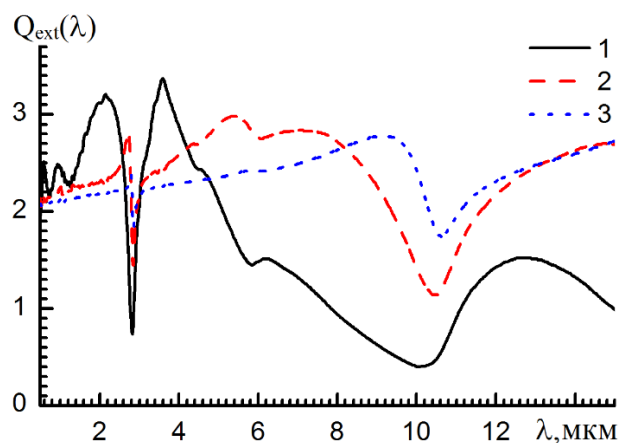


Рис. 1. Фактор ослабления $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для совокупности сферических частиц при $\eta(\lambda)$ для чистого льда, $\mu=5$: 1 – $\bar{a}=2$ мкм; 2 – $\bar{a}=5$ мкм; 3 – $\bar{a}=10$ мкм

Fig. 1. Extinction factor $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ for a set of spherical particles at $\eta(\lambda)$ for pure ice, $\mu=5$: 1 – $\bar{a}=2$ μm ; 2 – $\bar{a}=5$ μm ; 3 – $\bar{a}=10$ μm

На рис. 1 видим существенное различие спектрального хода для частиц с разными средними размерами. Чем больше размеры частиц, тем уже становятся границы изменения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$. Наиболее яркие особенности $Q_{\text{ext}}(\lambda)$, обусловленные размером и природой вещества частиц, наблюдаются для кристаллов, соизмеримых с длиной волны падающего излучения. Для условно больших сферических частиц (размеры которыхкратно превышают длину волны) фактор ослабления принимает значение близкое к своей асимптотической величине.

На рис. 2 иллюстрируются результаты расчета фактора ослабления для среды, состоящей из смеси нескольких видов кристаллов объемной формы с разными эффективными диаметрами d_{eff} .

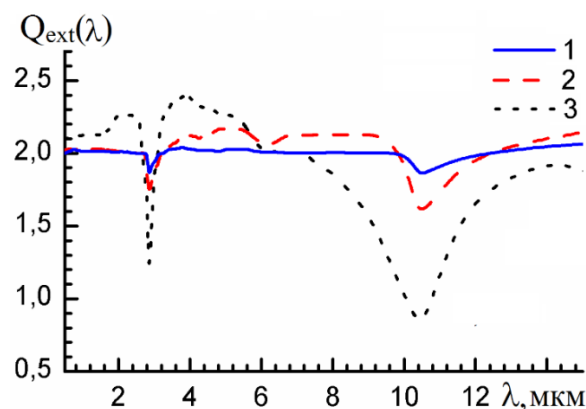


Рис. 2. Фактор ослабления $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для совокупности хаотически ориентированных кристаллов разной формы при $\eta(\lambda)$ для чистого льда с разными эффективными диаметрами (d_{eff}): 1 – $d_{\text{eff}}=80$ мкм; 2 – $d_{\text{eff}}=40$ мкм; 3 – $d_{\text{eff}}=10$ мкм

Fig. 2. Extinction factor $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ for a set of randomly oriented crystals of different shapes at $\eta(\lambda)$ for pure ice with different effective diameters (d_{eff}): 1 – $d_{\text{eff}}=80$ μm ; 2 – $d_{\text{eff}}=40$ μm ; 3 – $d_{\text{eff}}=10$ μm

Смесь частиц представляет собой совокупность хаотически ориентированных кристаллов, таких как пластинки, дроксталли, полые и плотные столбики, пустотелые и плотные пулевые розетки, агрегаты плотных столбиков и агрегаты пластинок. Демонстрируемые на рис. 2 спектральные зависимости $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ рассчитаны с использованием методов дипольных моментов, Т-матрицы и модифицированного метода геометрической оптики, а также при использовании библиотечных данных, касающихся свойств однократного рассеяния облачных кристаллов [6]. Из рисунка видно, что спектральная зависимость $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ наиболее выражена при размерах частиц, сравнимых с длиной волны. В видимой и ближней ИК-областях наблюдаем типичную картину, свойственную крупным частицам произволь-

ной формы и ориентации (нейтральное ход $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx \text{const}$). Отметим, что наиболее выраженные особенности, такие как глубокие минимумы $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ в области $\lambda \approx 10$ мкм, схожи для смеси кристаллов (рис. 2) и сфер с большим разбросом частиц по размерам (в частности, при $\mu=1$). Сравнивая характеристики ослабления для сфер и смеси случайно ориентированных кристаллов, наблюдаем качественно похожие особенности.

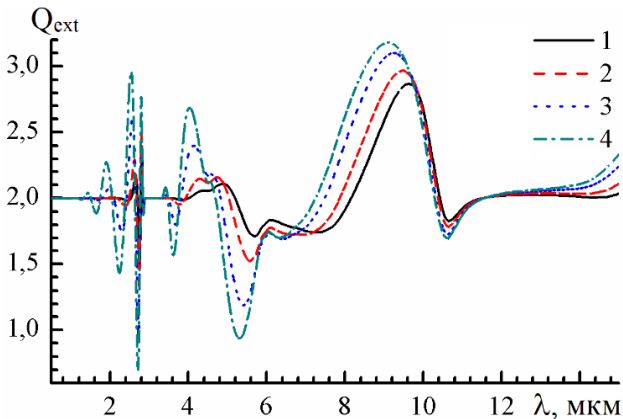


Рис. 3. Фактор ослабления $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для ансамбля ледяных пластинок при $\bar{a} = 50$ мкм: 1 – $\mu=1$; 2 – $\mu=2$; 3 – $\mu=5$; 4 – $\mu=10$

Fig. 3. Extinction factor $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ for an ensemble of ice plates at $\bar{a} = 50 \mu\text{m}$: 1 – $\mu=1$; 2 – $\mu=2$; 3 – $\mu=5$; 4 – $\mu=10$

Для расчета фактора ослабления оптического излучения крупным пластинчатым кристаллом применялся метод физической оптики [11]. На рис. 3 демонстрируется зависимость фактора ослабления для ансамбля крупных горизонтально ориентированных пластинок при различном разбросе 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, характеризующиеся величинами $\mu \geq 2$. Из рис. 3 видно, что на разных интервалах длин волн спектральный ход $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ ((1)–(3)) 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 ($\lambda \approx 2,85$ мкм) [12], а также в диапазонах λ примерно от 3,5 до 6 и от 8 до 9,6 мкм. Следует заметить, что в интервале λ от 9,6 до 12 мкм различий $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ практически не наблюдается при вариации значе-

ний μ . При $\lambda \approx 10,6$ мкм наибольшее различие $Q_{\text{ext}}(\lambda)$, т. е. $\text{abs}(Q_{\text{ext}}(\mu=1) - Q_{\text{ext}}(\mu=10))$, составляет 0,14. Для сравнения, такая разность, но при $\mu=5$ и $\mu=10$, равна 0,02.

На рис. 4, а, б демонстрируются значения относительной ошибки фактора ослабления Δ ($\Delta = \text{abs}(S_{\text{точн}} - S_{\text{прибл}}) / S_{\text{точн}}$) при различных параметрах. Зависимости $\Delta(\lambda)$, иллюстрируемые на рис. 4, а, рассчитаны для случая, когда значения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ ((1)–(3)), полученные при $\mu=10$, являются точными ($S_{\text{точн}}$), а приближенными рассматриваются варианты: для $\mu=1$ (кривая 1), для $\mu=2$ (кривая 2) и для $\mu=5$ (кривая 3). На рис. 4, 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. 4, а, 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. 4, а, б, одинаковый, но величины их максимумов разнятся. Также следует отметить, что на рис. 3 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 неучет 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. 5 иллюстрируются результаты расчета фактора ослабления ((1)–(3)) 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 характеристике (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. 5), который с увеличением $\bar{a}$ снижается и смещается по направлению увеличения длины волн.

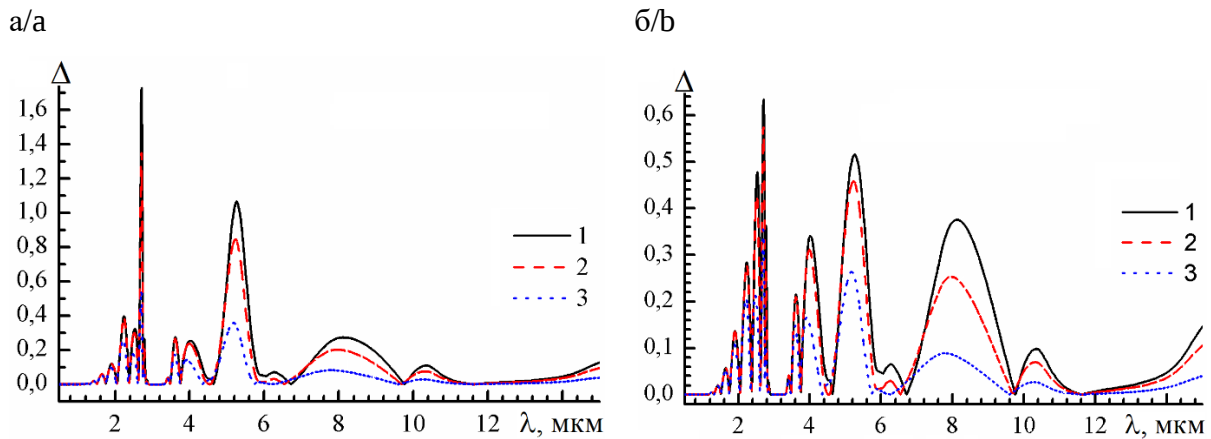


Рис. 4. Относительная ошибка $\Delta = \text{abs}(S_{\text{точн}} - S_{\text{прибл}}) / S_{\text{точн}}$ для разных μ : а) $S_{\text{точн}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu=10$: 1 – $S_{\text{прибл}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu=1$; 2 – $S_{\text{прибл}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ при $\mu=2$; 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 $\mu=5$

Fig. 4. Relative error $\Delta = \text{abs}(S_{\text{precise}} - S_{\text{approx}}) / S_{\text{precise}}$ for different μ : а) $S_{\text{precise}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=10$: 1 – $S_{\text{approx}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=1$; 2 – $S_{\text{approx}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=2$; 3 – $S_{\text{approx}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=5$; б) $S_{\text{approx}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=10$: 1 – $S_{\text{precise}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=1$; 2 – $S_{\text{precise}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=2$; 3 – $S_{\text{precise}} = Q_{\text{ext}}(\lambda)$ at $\mu=5$

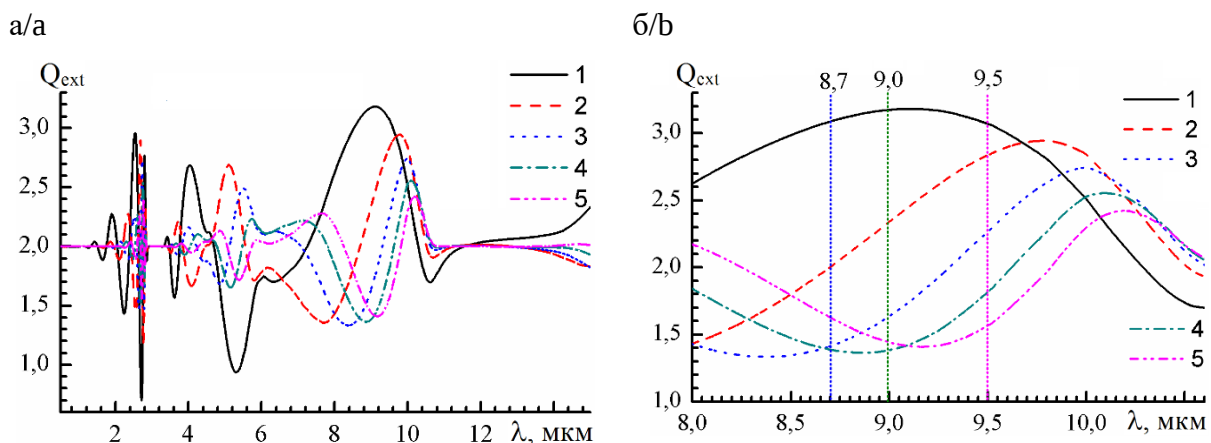


Рис. 5. Фактор ослабления $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для ансамбля ледяных пластинок, где $\mu=10$: 1 – $\bar{a} = 50$ мкм; 2 – $\bar{a} = 100$ мкм; 3 – $\bar{a} = 150$ мкм; 4 – $\bar{a} = 200$ мкм; 5 – $\bar{a} = 250$ мкм; а) $\lambda = [0,5 \text{ мкм}, 15 \text{ мкм}]$; б) $\lambda = [8 \text{ мкм}, 10,6 \text{ мкм}]$ с выделением (вертикальные линии) соответствующих спектральных областей, где $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx Q_R(\lambda)$

Fig. 5. Extinction factor $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ for an ensemble of ice plates, where $\mu=10$: 1 – $\bar{a} = 50 \text{ }\mu\text{m}$; 2 – $\bar{a} = 100 \text{ }\mu\text{m}$; 3 – $\bar{a} = 150 \text{ }\mu\text{m}$; 4 – $\bar{a} = 200 \text{ }\mu\text{m}$; 5 – $\bar{a} = 250 \text{ }\mu\text{m}$; а) $\lambda = [0,5 \text{ }\mu\text{m}, 15 \text{ }\mu\text{m}]$; б) $\lambda = [8 \text{ }\mu\text{m}, 10,6 \text{ }\mu\text{m}]$ with the corresponding spectral regions (highlighted vertical lines), where $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx Q_R(\lambda)$

Для зависимостей $Q_{\text{ext}}(\lambda)$, представленных кривыми 1–5 (рис. 5), на интервале длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$ (интервалы отмечены на рисунке вертикальными линиями, а также указаны в таблице) 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. Характеристики регрессионных зависимостей для фактора ослабления при $\mu=10$

Table. Characteristics of regression dependencies for the extinction factor at $\mu=10$

$\bar{a}$	λ_1	λ_2	$Q_R(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + F$
	мкм/ μm		
50	8	10,6	$-0,5933 \cdot \lambda^2 + 10,781 \cdot \lambda - 45,796$
100	8		$-2,124 \cdot \lambda^2 + 41,433 \cdot \lambda - 199,11$
150	8,7		$-2,2396 \cdot \lambda^2 + 44,645 \cdot \lambda - 219,78$
200	9		$-2,801 \cdot \lambda^2 + 56,648 \cdot \lambda - 283,87$
250	9,5		$-2,93 \cdot \lambda^2 + 59,773 \cdot \lambda - 302,42$

Положение максимума $Q_R(\lambda)$ на интервале $[\lambda_1, \lambda_2]$ не трудно связать с соответствующим значением $\bar{a}$. Это позволяет определить величину среднего размера рассеивателя по данным $Q_{ext}(\lambda)$ 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 до 15 мкм для совокупности ледяных кристаллов. Особый акцент сделан на оптических характеристиках для горизонтально ориентированных пластинок. Именно такой вид частиц (при равных долях содержания основных типов ледяных кристаллов в облаке) обеспечивает наиболее выраженные (на порядки превышающие) особенности ослабления оптического излучения. При этом приняты во внимание различные микрофизические параметры: средние размеры и разброс частиц по размерам. Продemonстрировано, на каких спектральных интервалах учет диспер-

сии размеров кристаллов значим для фактора ослабления (в частности, в первой зоне проявления эффекта Христиансена относительная ошибка может составлять более 100 %), а где ее 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. Это позволяет установить информативные направления для интерпретации данных по ослаблению на разных спектральных диапазонах. На определенных интервалах длин волн проявляется селективность того или иного компонента среды, это является значимым фактором в распознавании присутствия ключевых составляющих среды, в том числе и газовой компоненты [13]. 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 от 8 до 10,6 мкм. Установленные трендовые зависимости позволяют в реальном масштабе времени проводить анализ и оценку микрофизических характеристик облачных кристаллов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baran A.J. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: a way forward // *Atmospheric Research*. – 2012. – Vol. 112. – P. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.010>
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 // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2019. – Vol. 226. – P. 81–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.01.011>
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 // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2018. – Vol. 204. – P. 250–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.029>
6. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm / B. Baum, P. Yang, A. Heymsfield, A. Bansemer, B. Cole, A. Merrelli, S. Schmitt, C. Wang // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2014. – Vol. 146. – P. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.02.029>
7. Shefer O. Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2016. – Vol. 178. – P. 350–360. DOI: [10.1016/j.jqsrt.2015.10.028](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.10.028)
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 // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 1978. – Vol. 17. – P. 1220–1224. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2)
9. Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2008. – Vol. 113. – Iss. D14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
10. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
11. Popov A.A. New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals // *Proc. SPIE, Mathematical Methods in Geophysical Imaging IV*. – 1996. – Vol. 2822. – P. 186–194. DOI: [10.1117/12.255207](https://doi.org/10.1117/12.255207)
12. Yang P., Liou K.N. Extinction efficiency and single-scattering albedo for laboratory and natural cirrus clouds // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1997. – Vol. 102. – Iss. D18. – P. 21825–21835. DOI: <https://doi.org/10.1029/97JD01768>
13. The HITRAN–2012 molecular spectroscopic database / L.S. Rothman, I.E. Gordon, Y. Babikov et al. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2013. – Vol. 130. – P. 4–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>

Информация об авторах

Ольга Владимировна Шефер, доктор физико-математических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор кафедры программной инженерии Института прикладной математики и компьютерных наук Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. shefer@tpu.ru

Виктор Александрович Сенников, научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. wsen@iao.ru

Андрей Алексеевич Алейник, студент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. aaa205@tpu.ru

Поступила: 17.07.2025

Принята: 10.09.2025

Опубликована: 30.09.2025

REFERENCES

1. Baran A.J. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: a way forward. *Atmospheric Research*, 2012, vol. 112, pp. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.010>
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. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, vol. 226, pp. 81–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.01.011>
4. Volkovitsky O.A., Pavlova L.N., Petrushin A.G. *Optical properties of crystalline clouds*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984. 200 p. (In Russ.)
5. Moosmüller H., Sorensen C.M. Small and large particle limits of single scattering albedo for homogeneous, spherical particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, vol. 204, pp. 250–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.029>
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 . *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, vol. 146, pp. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.02.029>
7. Shefer O. Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, vol. 178, pp. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.10.028>
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. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1978, vol. 17, pp. 1220–1224. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<1220:SMPOAI>2.0.CO;2)
9. Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, vol. 113, Iss. D14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
10. Boren K., Huffman D. *Absorption and scattering of light by small particles*. Moscow, Mir Publ., 1986. 660 p. (In Russ.)
11. Popov A.A. New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals. *Proc. SPIE, Mathematical Methods in Geophysical Imaging IV*, 1996, vol. 2822, pp. 186–194. DOI: [10.1117/12.255207](https://doi.org/10.1117/12.255207)
12. Yang P., Liou K.N. Extinction efficiency and single-scattering albedo for laboratory and natural cirrus clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, vol. 102, Iss. D18, pp. 21825–21835. DOI: <https://doi.org/10.1029/97JD01768>
13. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. The HITRAN-2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 130, pp. 4–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>

Information about the authors

Olga V. Shefer, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shefer@tpu.ru

Victor A. Sennikov, Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation. wsen@iao.ru

Andrey A. Aleinik, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. aaa205@tpu.ru

Received: 17.07.2025

Revised: 10.09.2025

Accepted: 30.09.2025