

УДК 551.576

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБЛАКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Шефер Ольга Владимировна<sup>1</sup>,  
shefer@tpu.ru

Сенников Виктор Александрович<sup>2</sup>,  
wsen@iao.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

*Предложена численная модель кристаллического облака для расчета коэффициентов ослабления, рассеяния, поглощения и альbedo однократного рассеяния. Полидисперсная среда представлена системой сферических частиц и ансамблем преимущественно ориентированных пластинок. Характеристики однократного рассеяния рассчитывались в рамках теории Ми и метода физической оптики. Продемонстрированы особенности спектрального хода оптических характеристик при изменении микрофизических и оптических параметров среды.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, ослабление, рассеяние, поглощение, альbedo однократного рассеяния, оптическое излучение, кристаллы, ориентация.

Изучение влияния физико-химических свойств частиц на прохождение излучения имеет первостепенное значение для понимания воздействия ледяных облаков на трансформацию радиационных потоков [1]. Исследование характеристик однократного рассеяния связано с решением многих задач оптики атмосферы. К таким задачам относятся: исследование атмосферы оптическими методами, определение радиационного баланса земля–атмосфера, распространение излучения в полидисперсной среде и др.

В настоящее время решение задачи рассеяния малыми и крупными хаотически ориентированными в пространстве частицами широко представлено в научной литературе [2–5]. По результатам натурных и численных экспериментов созданы базы данных оптических характеристик кристаллических облаков. Большой объем материала составляют характеристики однократного рассеяния как для отдельных кристаллов, так и для их совокупности. В случае широкого (от видимого до микроволнового) спектра длин волн наиболее полная информация представлена для мелких частиц (мелких по отношению к длине волны) и крупных хаотически ориентированных кристаллов [3, 4, 6]. Исследователи отмечают, что характеристики рассеяния хаотически ориентированных частиц существенно отличаются от соответствующих свойств в случае их преимущественной ориентации. Характеристики однократного рассеяния для крупных преимущественно ориентированных кристаллов пока слабо представлены в научной литературе и соответствующих базах данных (например, отсутствие спектральной зависимости базовых характеристик однократного рассеяния для произвольной длины волны из оптического диапазона длин волн с высоким разрешением, с учетом функции распределения частиц по размерам и аспекта отношения размеров частиц (фактор формы)). Наличие отдельных характеристик рассеяния (например, ослабление) для частных случаев (например, для отдельных длин волн) не

может обеспечить знания о закономерностях трансформации лучистой энергии преимущественно ориентированными кристаллами с различными физико-химическими параметрами.

Экстинкция, рассеяние и поглощение являются основными характеристиками однократного рассеяния. Из общего анализа рассеивающих и поглощающих свойств атмосферных частиц особый интерес представляет альbedo однократного рассеяния (АОР). Эта величина дает представление о том, как перераспределяются рассеянная и поглощенная части излучения в полидисперсных средах с различными физико-химическими свойствами. Альbedo однократного рассеяния является независимым параметром, характеризующим условия переноса излучения в среде. АОР является наиболее значимым параметром, характеризующим эффективность лидара в аэрозольной атмосфере [7, 8]. Корректный выбор оптических констант и определение характеристик однократного рассеяния обеспечивают восстановление вертикальной структуры оптической плотности дисперсионной среды по данным дистанционного зондирования. Альbedo однократного рассеяния является уникальным инструментом для идентификации типа аэрозоля и может быть определяющим фактором при оценке влияния аэрозоля на излучение [9–11]. Результаты исследования характеристик однократного рассеяния создают благоприятные условия для разработки методических основ формирования оптимальной модели среды для решения задач переноса излучения, лазерного зондирования и интерпретации оптических характеристик.

Среди рассматриваемых в этой работе характеристик однократного рассеяния ослабление является наиболее изменчивой при вариациях параметров излучения и физико-химических параметров частиц. Спектральная зависимость ослабления наиболее ярко проявляется для мелких (соизмеримых с длиной волны падающего излучения) и для крупных преимущественно ориентированных кристаллов.

В данной работе представляется численная модель кристаллического облака в виде системы частиц сферической формы и ансамбля преимущественно ориентированных пластинчатых кристаллов. Совокупность сфер рассматривается как аппроксимационная модель для хаотически ориентированных кристаллов объемной формы. По результатам натурных экспериментов установлено, что пластинчатые кристаллы с высокой повторяемостью (достигают до несколько десятков процентов) входят в состав многих кристаллических облаков. В частности, свое действенное присутствие, выделяющее их среди других компонент полидисперсной среды, пластинки проявляли даже при сотой доле их содержания в облаке. Это является подтверждением, что система крупных горизонтально ориентированных пластинок является близкой к реальности моделью для ряда кристаллических облаков [12].

#### Формализм расчета

Для расчета базовых характеристик однократного рассеяния полидисперсной средой рассматриваются интегральные характеристики, такие как: коэффициенты ослабления ( $\alpha_{ext}$ ), поглощения ( $\alpha_{abs}$ ) и рассеяния ( $\alpha_{sca}$ ). Каждый коэффициент является интегралом, подынтегральная функция которого содержит в качестве множителя соответствующего сечения (сечение ослабления ( $S_{ext}$ ), поглощения ( $S_{abs}$ ), рассеяния ( $S_{sca}$ )) для частицы той или иной формы. В свою очередь, эти характеристики являются результатом решения задачи рассеяния волны на отдельной частице. При учете распределения частиц по размерам ( $N(a)$ ) используются интегральные соотношения:

$$\alpha_{ext} = \int S_{ext}(a)N(a)da, \quad \alpha_{sca} = \int S_{sca}(a)N(a)da, \\ \alpha_{abs} = \int S_{abs}(a)N(a)da.$$

Соответствующие факторы рассчитываются как:

$$Q_{ext} = \alpha_{ext}/S_{mean}, \quad Q_{sca} = \alpha_{sca}/S_{mean}, \quad Q_{abs} = \alpha_{abs}/S_{mean}, \quad S_{mean} = \int S_{sq}N(a)da,$$

где  $S_{sq}$  – площадь тени частицы.

Для расчета альбеда однократного рассеяния ( $\Lambda$ ) достаточно знать две характеристики из трех, связанные известным законом сохранения энергии «ослабление = поглощение + рассеяние» (например,  $\alpha_{ext} = \alpha_{abs} + \alpha_{sca}$ ) [2, 5, 13]. Вероятность выживания кванта для ансамбля частиц можно определить как:

$$\Lambda = (\alpha_{ext} - \alpha_{abs}) / \alpha_{ext}.$$

Известно, что модифицированное гамма-распределение адекватно описывает спектр размеров частиц для многих атмосферных образований [14].

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

Здесь  $a_m$  – определяющий размер кристалла, соответствующий максимуму функции  $N(a)$ ;  $\mu$  – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума;  $G(\mu+1)$  – гамма-функция. Для анализа экспериментальных данных используют средний размер частиц  $\bar{a}$ . В случае (4)  $\bar{a} = a_m(1 + 1/\mu)$ .

Радиус сферы и пластинки (круглой или гексагональной) обозначим как  $a$ . По многочисленным результатам

исследований в натуральных условиях установлено, что для пластинок существует функциональная взаимосвязь между их радиусом ( $a$ ) и толщиной ( $d$ ). При этом можно выделить условно толстые ( $d = 2,020(2 \cdot a)^{0,449}$ ) и тонкие ( $a/d = 20$ ) пластинки.

При рассмотрении среды, в состав которой входят частицы различных форм и фракций, общий коэффициент ослабления определяется как [14]

$$\alpha_{ext} = \sum_{i=1}^m \alpha_{ext}^i.$$

Здесь  $m$  – количество видов частиц;  $\alpha_{ext}^i$  – коэффициент ослабления совокупностью частиц  $i$ -й формы. Подобные выражения справедливы и для коэффициента поглощения и рассеяния.

Выражение для сечения ослабления в случае скалярных полей имеет вид [13]

$$S_{ext} = \frac{4 \cdot \pi}{k^2} \operatorname{Re}(S(0)),$$

где  $k$  – волновое число ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения). Амплитудная матрица  $S_{ij}$  размерностью  $2 \times 2$  при угле рассеяния  $\vartheta = 0^\circ$  преобразуется в скалярную величину, т. е.  $S_{ij} = S(0)$ . Сечение ослабления для поляризованных полей (что актуально для пластинок) определяется по формуле [13]

$$S_{ext} = \frac{4 \cdot \pi}{k^2} \cdot \frac{\operatorname{Re}\{\mathbf{E} \cdot \mathbf{A} | \vartheta = 0\}}{\mathbf{E}^* \cdot \mathbf{E}},$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{A}$  – комплексные векторные амплитуды соответственно падающего и рассеянного полей.

При нормальном падении плоской волны на основание пластинки формулы для сечений ослабления и поглощения, полученные в рамках метода физической оптики, имеют вид [15, 16]:

$$S_{ext} = 2\pi a^2(1 - \operatorname{Re}(T)), \quad S_{abs} = \pi a^2(1 - |T|^2 - |R|^2),$$

где  $T$  и  $R$  – коэффициенты Френеля передачи и отражения для плоской волны, нормально падающей на полупрозрачный слой.

Сечение рассеяния  $S_{sca}$  определяется по формуле [13]:

$$S_{sca} = \frac{2\pi}{k^2} \int_0^\pi |S(\vartheta)|^2 \sin \vartheta d\vartheta,$$

где  $S(\vartheta)$  – амплитуда поля.

При расчете характеристик светорассеяния частицами применяются различные методы. Процесс рассеяния крупными преимущественно ориентированными кристаллами существенно отличается от рассеяния частицами объемных форм. Среди всех крупных преимущественно ориентированных кристаллов по характеру ослабления выделяются преимущественно ориентированные пластинки. Для этой формы кристаллов фактор ослабления может принимать значения из наибольшего интервала от 0 до 4. Для расчета сечений ослабления, поглощения и рассеяния применялся метод физической оптики [15].

Для частиц объемных форм, близких к сферической, используется решение Ми задачи рассеяния плоской волны на сфере. Теория Ми адекватно описывает множество эффектов, связанных с трансформацией излучения

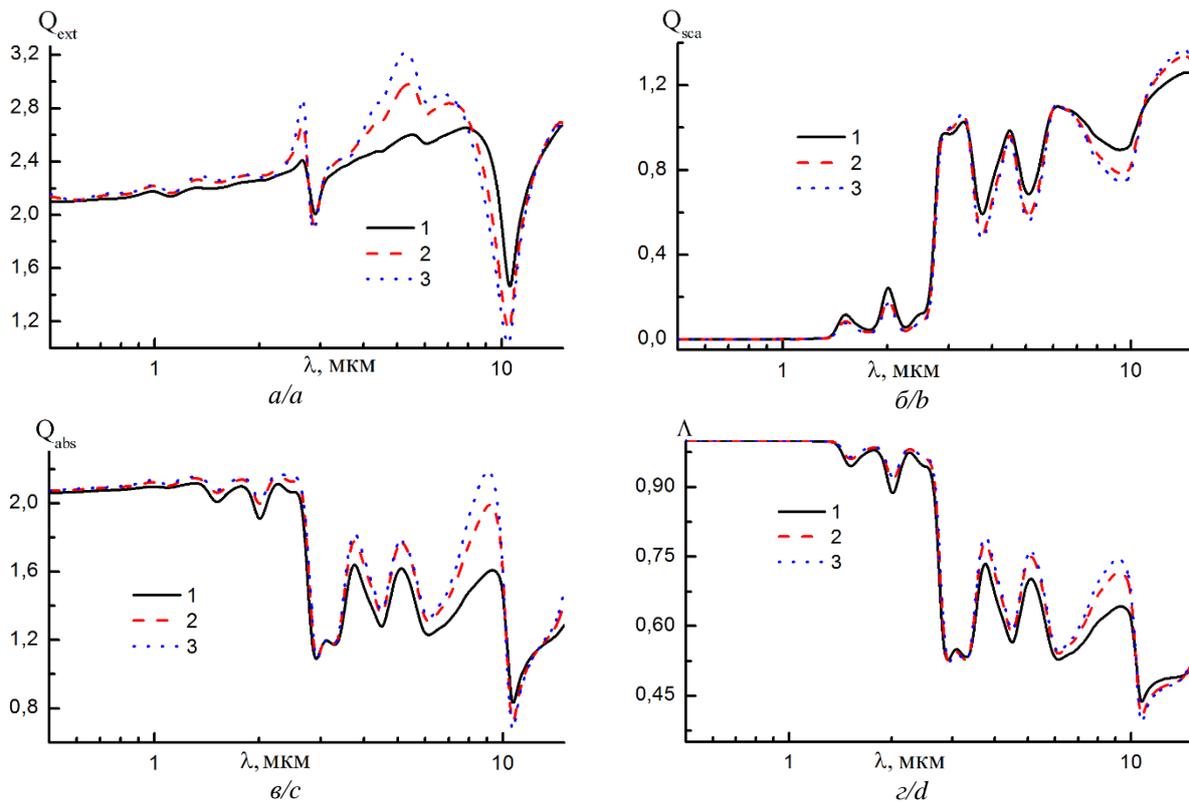
при взаимодействии со средой. Этот формализм может быть использован при моделировании сред, состоящих как из мелких, так и из крупных частиц, причем их форма может быть не только близкой к сферической, но и иметь сложные объемные очертания. Широко известные формулы для расчета характеристик однократного рассеяния для сферы можно найти в [13]. Для крупных частиц ослабление лучистой энергии определяется главным образом дифракционным полем и не зависит от внутренней структуры рассеивателя. Фактор ослабления ( $Q_{ext}$ ) для таких частиц принимает свое асимптотическое значение, равное 2, а для частиц, соизмеримых с длиной волны, существенно отличается от 2. Мелкие частицы, как правило, имеют хаотическую ориентацию в пространстве. При рассмотрении полидисперсной среды многие их особенности светорассеяния усредняются.

### Результаты расчета

На основе предложенной численной модели полидисперсной среды в виде совокупности сфер и крупных пластинок проведено численное исследование базовых характеристик однократного рассеяния (таких как: ослабление, рассеяние, поглощение и альbedo однократного рассеяния). Для расчета спектральных зависимостей оптических характеристик использовались числовые вели-

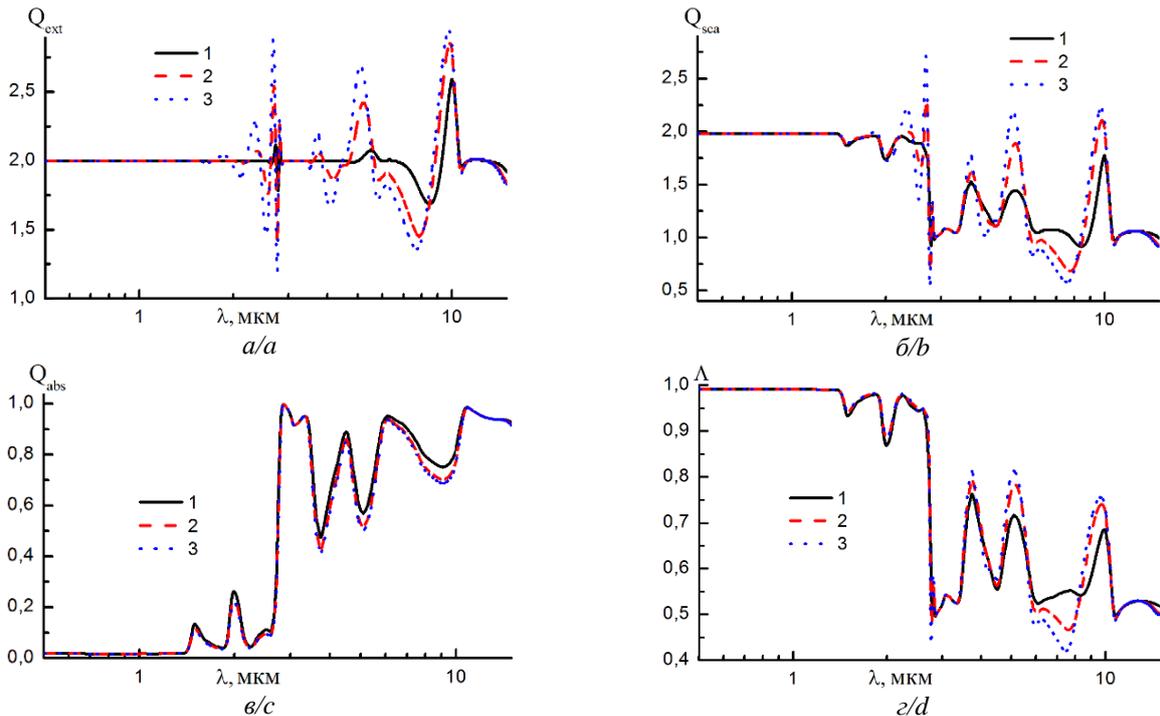
чины  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$ , представленные по данным [17] для чистого льда.

На рис. 1–3 иллюстрируются характеристики однократного рассеяния для системы сферических частиц (рис. 1) и ансамбля крупных горизонтально ориентированных пластинок (рис. 2, 3). Тонкая структура спектрального хода оптических характеристик, проявляемая в случае отдельной частицы [18], для интегральных характеристик сглаживается. Особенности спектральной зависимости факторов ослабления, поглощения, рассеяния и альbedo однократного рассеяния зависят от взаимосвязи  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$ . Для интегральных характеристик в ИК диапазоне длин волн спектральный ход зависимостей  $Q_{ext}(\lambda)$ ,  $Q_{sca}(\lambda)$ ,  $Q_{abs}(\lambda)$  и  $\Lambda(\lambda)$  является более выраженным, и его особенности, обеспечиваемые параметрами распределения частиц по размерам ( $\bar{a}$  и  $\mu$ ), более устойчивые. Для пластинок фактор формы ( $a/d$ ) существенным образом влияет на закономерности интегральных характеристик. Чем тоньше пластинки, тем спектральный ход оптических характеристик более чувствительный к изменению параметров распределения частиц по размерам (сравним соответствующие кривые рис. 2, 3). Иллюстрируемые результаты расчета характеристик однократного рассеяния демонстрируют необходимость учета в моделях среды не только формы и средних размеров частиц, но также дисперсии размеров и фактора формы частиц.



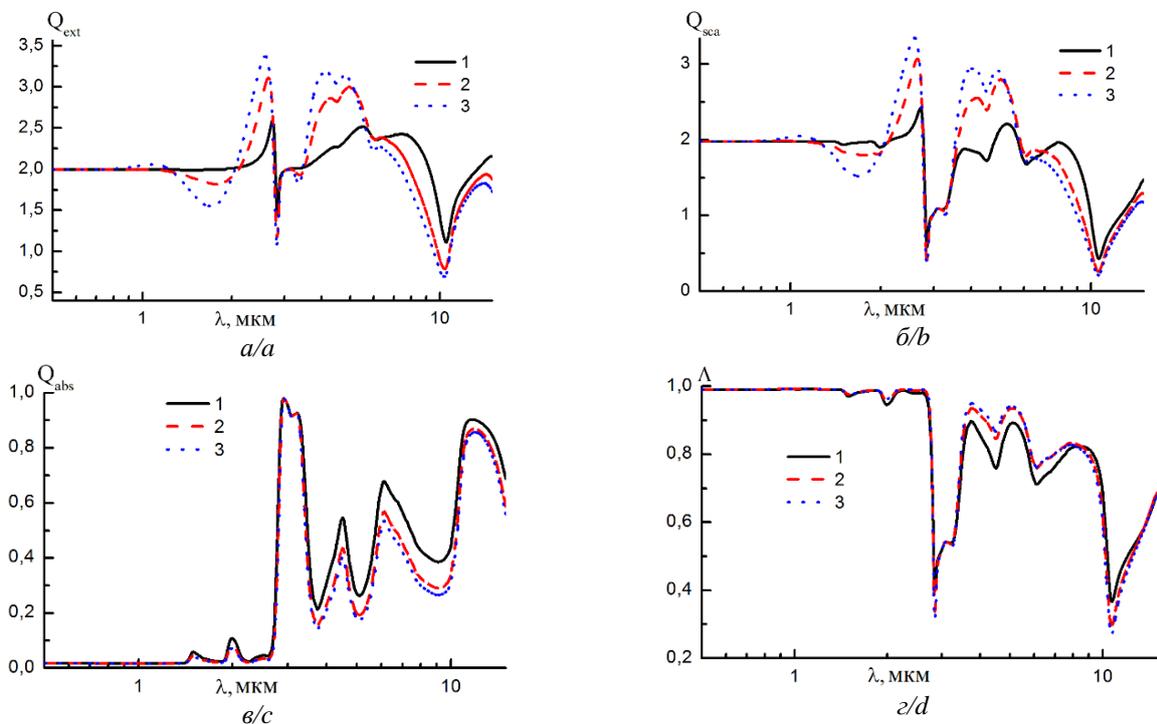
**Рис. 1.** а–г) характеристики однократного рассеяния в зависимости от длины волны для ансамбля сфер при  $\bar{a} = 10$  мкм,  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед): а) фактор ослабления  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) фактор рассеяния  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) фактор поглощения  $Q_{abs}(\lambda)$ ; г) альbedo однократного рассеяния  $\Lambda(\lambda)$ :  $\mu=1$  (кривая 1);  $\mu=5$  (кривая 2);  $\mu=10$  (кривая 3)

**Fig. 1.** а–д) characteristics of single scattering depending on the wavelength for an ensemble of spheres at  $\bar{a} = 10$   $\mu\text{m}$ ,  $n=n(\lambda)$  and  $\chi=\chi(\lambda)$  (pure ice): а) attenuation factor  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) scattering factor  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) absorption factor  $Q_{abs}(\lambda)$ ; д) single scattering albedo  $\Lambda(\lambda)$ :  $\mu=1$  (curve 1);  $\mu=5$  (curve 2);  $\mu=10$  (curve 3)



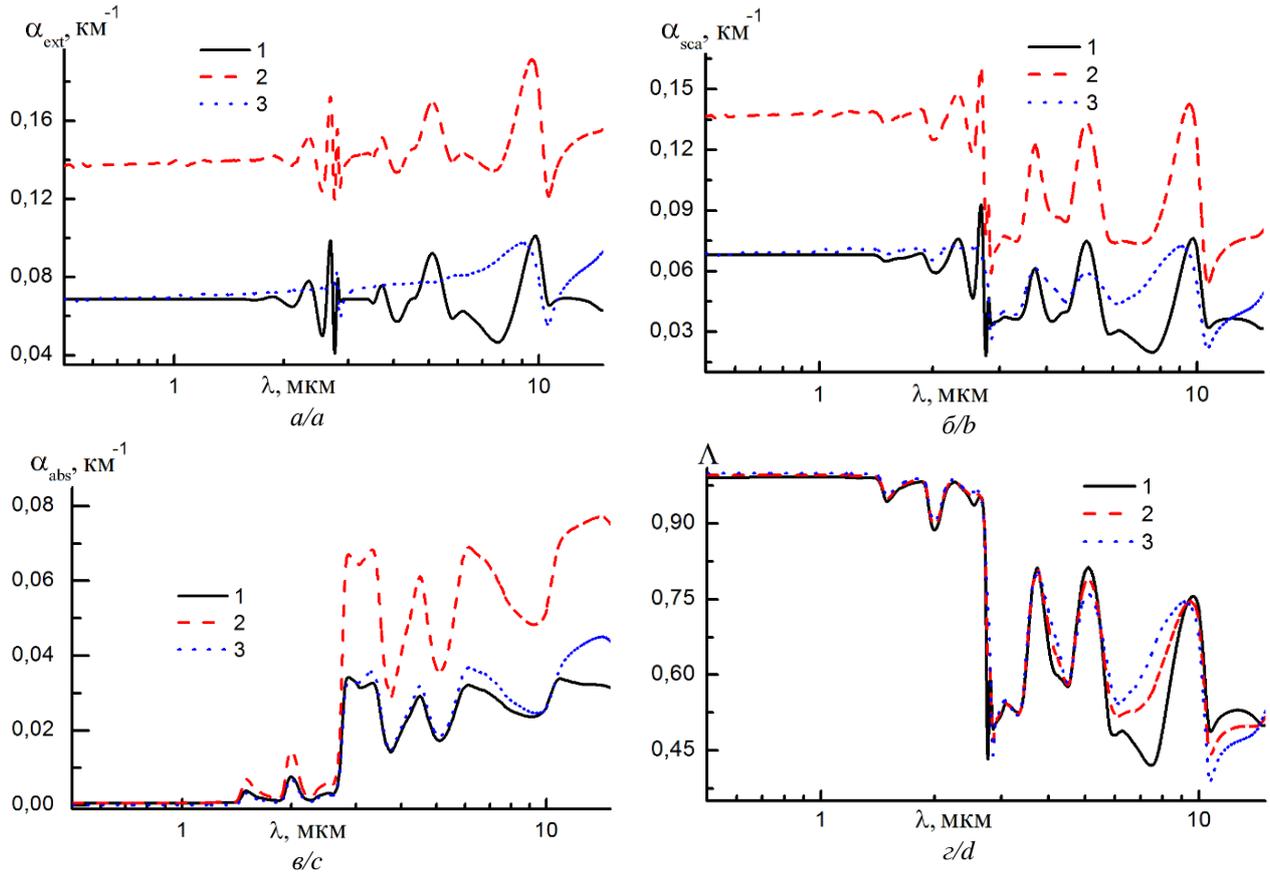
**Рис. 2.** а–г) характеристики однократного рассеяния в зависимости от длины волны для ансамбля пластинок при  $\bar{a} = 100$  мкм,  $d=2,020$  ( $2a$ )<sup>0,449</sup>,  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед): а) фактор ослабления  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) фактор рассеяния  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) фактор поглощения  $Q_{abs}(\lambda)$ ; г) альbedo однократного рассеяния  $A(\lambda)$ :  $\mu=1$  (кривая 1);  $\mu=5$  (кривая 2);  $\mu=10$  (кривая 3)

**Fig. 2.** а–д) single scattering characteristics versus wavelength for an ensemble of plates at  $\bar{a} = 100$   $\mu\text{m}$ ,  $d=2,020$  ( $2a$ )<sup>0,449</sup>,  $n=n(\lambda)$  and  $\chi=\chi(\lambda)$  (pure ice): а) attenuation factor  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) scattering factor  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) absorption factor  $Q_{abs}(\lambda)$ ; д) single scattering albedo  $A(\lambda)$ :  $\mu=1$  (curve 1);  $\mu=5$  (curve 2);  $\mu=10$  (curve 3)



**Рис. 3.** а–г) характеристики однократного рассеяния в зависимости от длины волны для ансамбля пластинок при  $\bar{a} = 100$  мкм,  $a/d=20$ ,  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед): а) фактор ослабления  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) фактор рассеяния  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) фактор поглощения  $Q_{abs}(\lambda)$ ; г) альbedo однократного рассеяния  $A(\lambda)$ :  $\mu=1$  (кривая 1);  $\mu=5$  (кривая 2);  $\mu=10$  (кривая 3)

**Fig. 3.** а–д) single scattering characteristics versus wavelength for an ensemble of plates at  $\bar{a} = 100$   $\mu\text{m}$ ,  $a/d=20$ ,  $n=n(\lambda)$  and  $\chi=\chi(\lambda)$  (pure ice): а) attenuation factor  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) scattering factor  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) absorption factor  $Q_{abs}(\lambda)$ ; д) single scattering albedo  $A(\lambda)$ :  $\mu=1$  (curve 1);  $\mu=5$  (curve 2);  $\mu=10$  (curve 3)



**Рис. 4.** а–г) характеристики однократного рассеяния в зависимости от длины волны для ансамбля пластинок и сфер при  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед),  $\mu=10$ , для пластинок  $\bar{a}=50$  мкм,  $d=2,020$  ( $2a$ )<sup>0,449</sup> и  $C=1$  л<sup>-1</sup>, для сфер при  $\bar{a}=10$  мкм и  $C\approx 100$  л<sup>-1</sup>: а) фактор ослабления  $Q_{ext}(\lambda)$ ; б) фактор рассеяния  $Q_{sca}(\lambda)$ ; в) фактор поглощения  $Q_{abs}(\lambda)$ ; г) альbedo однократного рассеяния  $\Lambda(\lambda)$ . Для ансамбля пластинок (кривая 1), для смеси пластинок и сфер (кривая 2), для сфер (кривая 3)

**Fig. 4.** a–d) characteristics of single scattering depending on the wavelength for an ensemble of plates and spheres at  $n=n(\lambda)$  and  $\chi=\chi(\lambda)$  (pure ice),  $\mu=10$ , for plates  $\bar{a}=50$   $\mu\text{m}$ ,  $d=2,020$  ( $2a$ )<sup>0,449</sup> and  $C=1$   $\text{l}^{-1}$ , for spheres at  $\bar{a}=10$   $\mu\text{m}$  and  $C\approx 100$   $\text{l}^{-1}$ : a) attenuation factor  $Q_{ext}(\lambda)$ ; b) scattering factor  $Q_{sca}(\lambda)$ ; c) absorption factor  $Q_{abs}(\lambda)$ ; d) single scattering albedo  $\Lambda(\lambda)$ . For an ensemble of plates (curve 1), for a mixture of plates and spheres (curve 2), for spheres (curve 3)

На практике приходится иметь дело с очень сложными аэродисперсными средами, в состав которых входят частицы разных форм и размеров. Оптические свойства вещества частиц также могут существенно отличаться от свойств чистого льда. Данная модель позволяет рассматривать многокомпонентные среды. Рассмотрим случай, когда обе составляющие являются значимыми при оценке характеристик однократного рассеяния.

Крупные преимущественно ориентированные пластинки и частицы, соизмеримые с длиной волны падающего излучения, оказывают преобладающее влияние на волновую зависимость ослабления более чем на порядок по сравнению с другими составляющими полидисперсной среды. По этой причине выделим эти рассеиватели. При равной концентрации различных дисперсных компонент среды в формирование особенностей ослабления подавляющий вклад обеспечивают крупные преимущественно ориентированные пластинки. На рис. 4 демонстрируются соизмеримые значения ослабления для крупных пластинок и мелких частиц, концентрация которых на два порядка выше, чем для пластинчатых кристаллов. Пластинки в большей мере определяют спектраль-

ный ход  $Q_{ext}(\lambda)$  и  $Q_{sca}(\lambda)$ , обеспечиваемый совместным влиянием сферических и пластинчатых кристаллов. То есть, если в облаке содержатся крупные ориентированные пластинки, по характеру зависимости характеристик ослабления или рассеяния от длины волны ИК диапазона можно установить их присутствие. А в свою очередь вид кривой (например, положения экстремальных точек кривой) можно связать со средним радиусом пластинок и значением фактора формы. Для мелких частиц и крупных пластинок общие закономерности  $Q_{abs}(\lambda)$  и  $\Lambda(\lambda)$  являются менее зависимыми от этих параметров. Хотя можно выделить спектральные диапазоны, где  $Q_{abs}(\lambda)$  и  $\Lambda(\lambda)$  различны для пластинок и мелких частиц (в частности, для  $\Lambda(\lambda)$  при  $\lambda$  от 6 до 9 мкм).

#### Заключение

Предложенная оптическая модель системы полупрозрачных горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов обеспечивает реализацию с единых позиций и в комплексе (т. е. применяется единый формализованный подход, и реализуются несколько оптических характеристик) коэффициентов ослабления, рассеяния, погло-

щения и альbedo однократного рассеяния. Это обеспечивает наибольшую корректность совместной оценки указанных величин.

Численная модель позволяет рассчитывать базовые характеристики однократного рассеяния при различных значениях комплексного показателя преломления, фактора формы, параметров распределения частиц по размерам и длины волны падающего излучения (при учете границ применения соответствующего метода) с высоким разрешением. Для рассматриваемых кристаллов (сфер и пластинок) спектральная зависимость базовых характеристик однократного рассеяния (в большей сте-

пени это касается ослабления) является особо чувствительной к изменениям микрофизических параметров кристаллов и зависимости значений комплексного показателя преломления от длины волны. Модели, сформированные на основе баз данных, в этом плане имеют существенные ограничения.

Предложенная модель позволяет исследовать оптические характеристики среды, состоящей из разных компонент, отличающихся по физико-химическим свойствам. При этом могут быть учтены различные составляющие среды как вместе, так и отдельно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. – Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
2. The microphysical properties of small ice particles measured by the small ice detector-3 probe during the MACPEX field Campaign / C. Schmitt, M. Schnaiter, A. Heymsfield, P. Yang, E. Hirst, A. Bansemer // Journal of The Atmospheric Sciences. – 2016. – № 73. – P. 4775–4791. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0126.1
3. Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100  $\mu\text{m}$  / P. Yang, L. Bi, B. Baum, K.-N. Lion, G. Kattawar, M. Mishchenko, B. Cole // Journal of The Atmospheric Sciences. – 2013. – № 70. – P. 330–347. DOI: 10.1175/JAS-D-12-039.1
4. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100  $\mu\text{m}$  / B. Baum, P. Yang, A. Heymsfield, A. Bansemer, B. Cole, A. Merrelli, S. Schmitt, C. Wang // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2014. – V. 146. – P. 123–139. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.02.029.
5. Bi L., Yang P. Improved ice particle optical property simulations in the ultraviolet to far-infrared regime // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2017. – V. 189. – P. 228–237. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.007
6. Saito M., Yang P. Oriented ice crystals: a single-scattering property database for applications to lidar and optical phenomenon simulations // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2019. – V. 76. – Iss. 9. – P. 2635–2652. DOI: https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0031.1
7. Laser transmission through thin cirrus clouds / K.N. Liou, Y. Takano, S.C. Ou, M.W. Johnson // Applied Optics. – 2000. – V. 39. – P. 4886–4894. DOI: 10.1364/ao.39.004886.
8. Васильев А.В., Мельникова И.Н., Новиков С.С. Влияние оптических параметров атмосферы на характеристики солнечной радиации // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 285–299. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-285-299
9. 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. – V. 204. – P. 250–255. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.029
10. Moosmüller H., Sorensen C.M. Single scattering albedo of homogeneous, spherical particles in the transition regime // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2018. – V. 219. – P. 333–338. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.08.015
11. Eswaran K., Satheesh S.K., Srinivasan J. Multi-satellite retrieval of single scattering albedo using the OMI-MODIS algorithm // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2019. – V. 19. – Iss. 5. – P. 3307–3324. DOI: https://doi.org/10.5194/acp-19-3307-2019
12. Baran A. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: a way forward // Atmospheric Research. – 2012. – V. 112. – P. 45–69. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.04.010
13. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
14. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
15. Попов А.А., Шефер О.В. О границах применимости метода физической оптики в задачах рассеяния света на крупных кристаллах. Ч. 1. Рассеяние на круглой пластинке // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6. – № 8. – С. 899–904.
16. Попов А.А., Шефер О.В. Теоретическое исследование поглощения оптического излучения ориентированными ледяными пластинками в ИК-диапазоне // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7. – № 1. – С. 18–23.
17. Wren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2008. – V. 113. – Iss. D14. DOI: https://doi.org/10.1029/2007JD009744
18. Shefer O. Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2016. – V. 178. – P. 350–360. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.10.028

Поступила: 21.03.2023 г.

Принята: 30.04.2023 г.

#### Информация об авторах

**Шефер О.В.**, доктор физико-математических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сенников В.А.**, научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 551.576

## NUMERICAL MODEL OF A CRYSTAL CLOUD FOR INVESTIGATING BASIC CHARACTERISTICS OF SINGLE SCATTERING

**Olga V. Shefer**<sup>1</sup>,  
shefer@tpu.ru

**Victor A. Sennikov**,  
wsen@iao.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,  
1, Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russia.

*A numerical model of a crystalline cloud is proposed for calculating the coefficients of attenuation, scattering, absorption, and single-scattering albedo. A polydisperse medium is represented by a system of spherical particles and an ensemble of predominantly oriented plates. The characteristics of single scattering were calculated within the framework of the Mie theory and the method of physical optics. The features of the spectral behavior of the optical characteristics are demonstrated with a change in the microphysical and optical parameters of the medium.*

**Key words:** numerical simulation, attenuation, scattering, absorption, single scattering albedo, optical radiation, crystals, orientation.

### REFERENCES

1. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Schmitt C., Schnaiter M., Heymsfield A., Yang P., Hirst E., Bansemer A. The microphysical properties of small ice particles measured by the small ice detector-3 probe during the MACPEX field Campaign. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 2016, no. 73, pp. 4775–4791. DOI: 10.1175/JAS-D-16-0126.1
3. Yang P., Bi L., Baum B., Lion K.-N., Kattawar G., Mishchenko M., Cole B. Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100  $\mu\text{m}$ . *Journal of The Atmospheric Sciences*, 2013, no. 70, pp. 330–347. DOI: 10.1175/JAS-D-12-039.1
4. 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  $\mu\text{m}$ . *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, vol. 146, pp. 123–139. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.02.029.
5. Bi L., Yang P. Improved ice particle optical property simulations in the ultraviolet to far-infrared regime. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, vol. 189, pp. 228–237. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.007>
6. Saito M., Yang P. Oriented ice crystals: a single-scattering property database for applications to lidar and optical phenomenon simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, vol. 76, Iss. 9, pp. 2635–2652. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0031.1>
7. Liou K.N., Takano Y., Ou S.C., Johnson M.W. Laser transmission through thin cirrus clouds. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, pp. 4886–4894. DOI: 10.1364/ao.39.004886.
8. Vasilyev A.V., Melnikova I.N., Novikov S.S. Influence of atmospheric optical parameters on the characteristics of solar radiation. *Current Problems in Sensing of the Earth from Space*, 2017, vol. 14, no. 5, pp. 285–299. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-285-299 In Rus.
9. 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>
10. Moosmüller H., Sorensen C.M. Single scattering albedo of homogeneous, spherical particles in the transition regime. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, vol. 219, pp. 333–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.08.015>
11. Eswaran K., Satheesh S.K., Srinivasan J. Multi-satellite retrieval of single scattering albedo using the OMI–MODIS algorithm. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, vol. 19, Iss. 5, pp. 3307–3324. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-19-3307-2019>
12. Baran A. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: a way forward. *Atmospheric Research*, 2012, vol. 112, pp. 45–69. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.04.010
13. Bohren C., Huffman D. *Pogloshchenie i rasseyaniye sveta malymi chastitsami* [Absorption and scattering of light by small particles]. Moscow, Mir Publ., 1986. 660 p.
14. Volkovitsky O.A., Pavlova L.N., Petrushin A.G. *Opticheskie svoystva kristallicheskikh oblakov* [Optical properties of crystalline clouds]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 200 p.
15. Popov A.A., Shefer O.V. O granitsakh primenimosti metoda fizicheskoy optiki v zadachakh rasseyaniya sveta na krupnykh kristallakh. Ch. 1. Rasseyaniye na krugloy plastinke [Applicability limits of the method of physical optics in the problems on light scattering by large crystals. P. I. Scattering by a round plate]. *Optika Atmosfery i Okeana*, 1993, vol. 6, no. 8, pp. 899–904.
16. Popov A.A., Shefer O.V. Teoreticheskoe issledovanie pogloshcheniya opticheskogo izlucheniya orientirovannymi ledyanymi plastinkami v IK-diapazone [Theoretical investigation of light absorption by oriented ice plates in the IR region]. *Optika Atmosfery i Okeana*, 1994, vol. 7, no. 1, pp. 18–23.
17. 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>
18. 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>

Received: 21 March 2023.

Reviewed: 30 April 2023.

### Information about the authors

**Olga V. Shefer**, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Victor A. Sennikov**, researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science.