

УДК 551.576

DOI: 10.18799/29495407/2024/2/55

Шифр специальности ВАК: 1.2.2; 1.6.18

Численная модель аэродисперсной среды, содержащей ледяные и саженные частицы, для исследования ослабления лучистой энергии

О.В. Шефер^{1,2✉}, В.А. Сенников³

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

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

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

✉shefer@tpu.ru

Аннотация. Представлена физико-математическая модель кристаллического облака, содержащего ледяные кристаллы и сажевые частицы. Численная модель предназначена для расчета фактора ослабления видимого и ИК-излучения. В качестве рассеивателей рассмотрены ансамбли сфер и пластинок, а также смеси восьми типов кристаллов симметричных и несимметричных форм. Продемонстрированы особенности спектрального хода ослабления при изменении микрофизических параметров среды, состоящей из совокупностей частиц чистого льда, аморфного углерода и триоксида диалюминия.

Ключевые слова: численное моделирование, ослабление, оптическое излучение, ледяные кристаллы, сажевые частицы

Для цитирования: Шефер О.В., Сенников В.А. Численная модель аэродисперсной среды, содержащей ледяные и саженные частицы, для исследования ослабления лучистой энергии // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 2. – С. 29–38. DOI: 10.18799/29495407/2024/2/55

UDC 551.576

DOI: 10.18799/29495407/2024/2/55

Numerical model of aerodispersed medium containing ice and soot particles for investigation radiant energy extinction

O.V. Shefer^{1,2✉}, V.A. Sennikov³

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

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

✉shefer@tpu.ru

Abstract. A physical-mathematical model of crystal cloud containing ice crystals and soot particles is presented. The numerical model is designed to calculate the extinction factor of visible and IR radiation. Ensembles of spheres, plates, and mixtures of eight types of crystals of symmetrical and asymmetrical shapes are considered as scatterers. The features of spectral behavior of extinction with changes in the microphysical parameters of the medium composed of ensembles of particles of pure ice, amorphous carbon and trioxide dialuminum are demonstrated.

Keywords: numerical simulation, extinction, optical radiation, ice crystals, soot particles

For citation: Shefer O.V., Sennikov V.A. Numerical model of aerodispersed medium containing ice and soot particles for investigation radiant energy extinction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 2, pp. 29–38. DOI: 10.18799/29495407/2024/2/55

Введение

Различного рода природные (извержение вулканов, штормовые ветры, пылевые бури и др.) и технологические (выхлопы двигателей, пожары, источники загрязнения промышленных производств и др.) процессы активно влияют на атмосферу и среду обитания [1–5]. Отслеживание распространения объектов возмущения атмосферы имеет важное значение для изучения их влияния на погодообразующие процессы и для решения экологических проблем. Аэрозольные среды природного и антропогенного происхождения могут распространяться над большой территорией и на больших высотах. Их микрофизические свойства меняются в зависимости от дальности источника. Оптические методы являются наиболее эффективными для исследования таких образований [6–9]. В их основе лежит определение характеристик излучения, трансформированного средой, в частности, к которым относится оценка ослабления лучистой энергии. Результаты исследования оптических характеристик аэродисперсных сред природного и антропогенного происхождения широко представлены в научной литературе [1–9]. При этом в большинстве случаев рассматриваются рассеиватели в виде отдельных частиц различной формы или их совокупности, но хаотически ориентированные в пространстве, а также преимущественно ориентированные кристаллы, но для случаев отдельных длин волн. Наименее изученным объектом остаются полидисперсные среды, в состав которых входят ансамбли кристаллов с различными физико-химическими свойствами и учетом их устойчивой ориентации в пространстве. Оценки совместного и раздельного вкладов в ослабление лучистой энергии различных по природе частиц практически отсутствуют в научной литературе.

В природных условиях наблюдается большое разнообразие форм и размеров кристаллов [10–12]. По характеру ослабления наибольший интерес представляют частицы, которые обеспечивают спектральную зависимость экстинкции. К таким частицам относятся мелкие (соизмеримые с длиной волны падающего излучения) частицы и крупные (их размер много больше длины волны) преимущественно ориентированные кристаллы, имеющие плоскопараллельные грани. Для таких рассеивателей фактор ослабления может существенно отличаться от своего асимптотического значения, равного 2. Среди всех крупных частиц выделяются пластинки, они имеют наиболее устойчивое положение в пространстве, и их фактор ослабления принимает значение из наибольшего интервала возможных величин, от 0 до 4 [13]. Увеличение пар плоскопараллельных граней или нарушение их параллельности сужает эти границы. В зависимости от физико-химических свойств среды особенности

экстинкции могут существенно отличаться друг от друга, по крайней мере, на некоторых спектральных диапазонах. Проявление различного рода эффектов ослабления обеспечивают именно крупные преимущественно ориентированные кристаллы, а также при высокой концентрации частицы, соизмеримые с длиной волны.

Роль кристаллического облака, содержащего сажевые частицы различной природы, в пропускании излучения относится к малоизученным и сложным проблемам в физике атмосферных образований. Это связано с большим разнообразием продуктов горения в комплексе с различными составляющими среды, невозмущенной термическим процессом. Зависимость характеристик экстинкции от многих параметров вызывает трудности при оценивании данных, так как разные рассеиватели могут приводить к сходным значениям фактора ослабления. Разделение вклада различных аэрозольных компонентов в спектральных характеристиках является неординарной задачей. Обычно рассматривают доминирующий компонент, влиянием других пренебрегают, что не всегда справедливо. Решение задачи становится более эффективным, если рассматривать широкий диапазон длин волн (например, от видимого до среднего ИК-диапазона). При этом имеется возможность выделить интервалы спектральной зависимости ослабления, где проявляется селективность той или иной составляющей среды. Для ряда аэрозольных смесей определение оптических характеристик с высоким разрешением является значимым.

В данной работе рассматриваются численные модели условно мелких и крупных кристаллов, обеспечивающих спектральную зависимость ослабления в видимом и ИК-диапазонах длин волн с высоким разрешением. В качестве рассеивателей выделены сажевые и ледяные частицы. Представленные результаты численного исследования позволят выявить информативные направления для установления физико-химических параметров аэродисперсной среды, содержащей отдельные виды частиц и их смесь.

Формализм расчета

Для исследования ослабления лучистой энергии полидисперсной средой представим численную модель, позволяющую адекватно установить зависимость характеристик экстинкции от параметров падающего излучения и рассеивателя. Для этого рассмотрим фактор ослабления (Q).

$$Q = \alpha_{\text{ext}} / \bar{S}_{\text{sq}},$$

где

$$\bar{S}_{\text{sq}} = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} S_{\text{sq}} \cdot N(a) da,$$

$$\alpha_{\text{ext}} = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} S_{\text{ext}} \cdot N(a) da.$$

Здесь $\bar{S}_{\text{sq}}$ – усредненная площадь тени для ансамбля частиц; S_{sq} – площадь тени частицы; S_{ext} – сечение ослабления; α_{ext} – коэффициент ослабления; a – определяющий размер частицы (в частности, для сферы или пластинки – это радиус); $a_{\min}$ – минимальный и $a_{\max}$ – максимальный размеры частиц, рассматриваемого объема.

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

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

вполне удовлетворительно описывает распределение размеров совокупности облачных кристаллов [10]. Соотношение для $N(a)$ включает в себя следующие параметры: C – концентрация частиц; a_m – размер частицы, соответствующий максимуму функции $N(a)$; μ – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума (характеристика разброса частиц по размерам). Для модифицированного гамма-распределения средний размер $\bar{a}$ частиц рассчитывается как $\bar{a} = a_m(1 + 1/\mu)$. Следует отметить, что формула для определения общего ослабления многокомпонентной средой сводится к сумме, слагаемыми которой являются коэффициенты экстинкции для каждого вида частиц [10].

Для построения физико-математической модели частицы необходимо учесть оптические свойства вещества рассеивателя. Эта характеристика представляется комплексным показателем преломления: $\eta = n + i\chi$. Вещественная часть n , называемая показателем преломления, определяет запаздывание (или опережение) фазы волны, прошедшей через вещество, мнимая часть χ , именуемая показателем поглощения, определяет уменьшение интенсивности.

Известно, что значения η зависят от длины волны излучения (λ), проходящего через вещество. По данным работы [14] для ледяных частиц в условиях чистой атмосферы зависимости $n=n(\lambda)$ и $\chi=\chi(\lambda)$ представлены на рис. 1, а, б, соответственно.

Чистая атмосфера может быть загрязнена различного рода примесями, имеющими природное и антропогенное происхождение. В данной работе рассматриваются сажевые частицы, являющиеся продуктами горения. На рис. 2 демонстрируются значения комплексного показателя преломления для частиц аморфного углерода [15]. На рис. 3 иллюстрируются оптические свойства Al_2O_3 . Частицы триоксида диалюминия являются основным дисперсным компонентом продуктов горения в двигателях [16, 17].

Методы расчета сечения ослабления, как базовой характеристики экстинкции, зависят от рассматриваемой среды. Решение Ми [18] задачи рассеяния излучения на сфере является универсальным. И его применение вполне приемлемо, если влияние несферичности незначительное. Для учета несферичности и преимущественной ориентации частиц используют другие методы. К настоящему времени для расчета светорассеивающих свойств кристаллов с произвольной формой и всевозможной ориентацией в пространстве эффективно применяется метод дипольных моментов и Т-матричная процедура [19, 20]. Однако использование этих методов является затруднительным в случае частиц, размеры которых много больше длины волны падающего излучения, тем более с последующим рассмотрением системы частиц. Гибридный метод, представляющий собой комбинацию приближений геометрической и физической оптики (в таком контексте его часто называют «методом физической оптики»), является оптимальным для расчета характеристик излучения, трансформированного крупными кристаллами [21]. Выше отмеченные методы использовались нами для реализации расчета фактора ослабления.

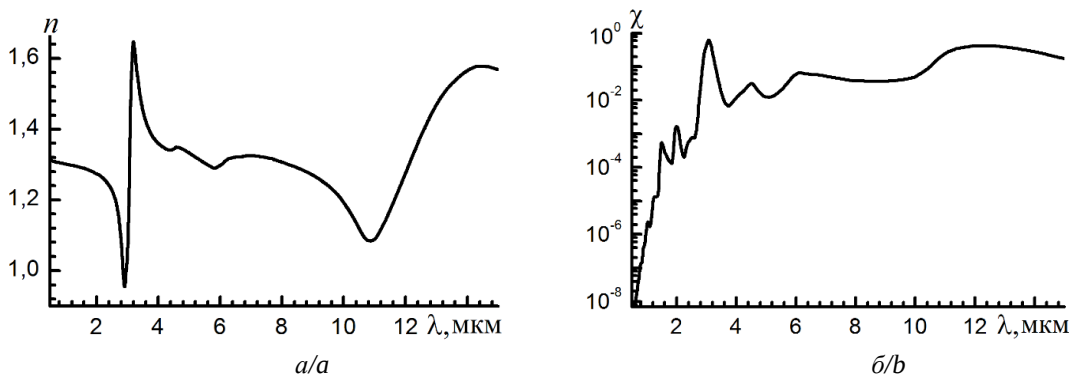


Рис. 1. Зависимости реальной $n=n(\lambda)$ (а) и мнимой $\chi=\chi(\lambda)$ (б) частей комплексного показателя преломления от длины волны для чистого льда [14]

Fig. 1. Dependences of real $n=n(\lambda)$ (a) and imaginary $\chi=\chi(\lambda)$ (b) parts of complex refractive index versus wavelength for pure ice [14]

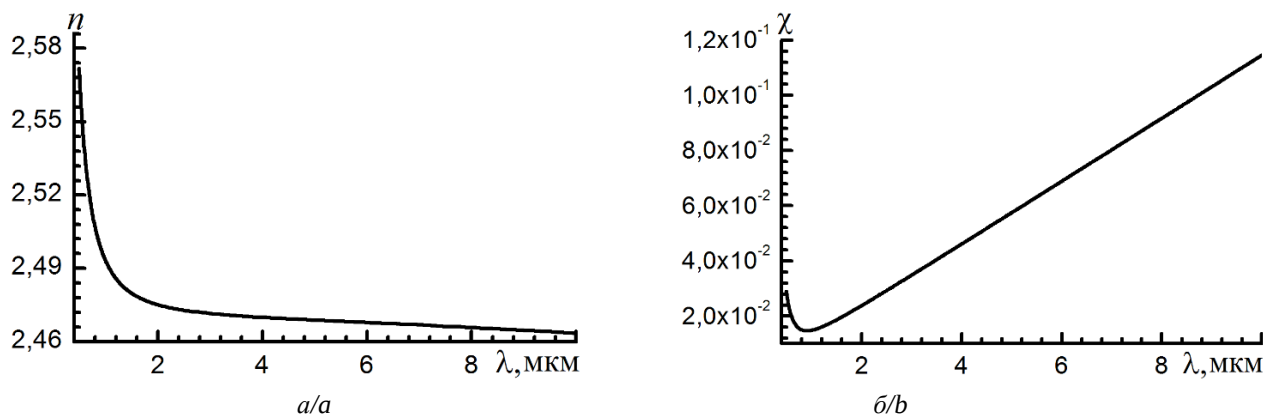


Рис. 2. Зависимости реальной $n=n(\lambda)$ (а) и мнимой $\chi=\chi(\lambda)$ (б) частей комплексного показателя преломления от длины волны для аморфного углерода [15]

Fig. 2. Dependences of real $n=n(\lambda)$ (a) and imaginary $\chi=\chi(\lambda)$ (b) parts of complex refractive index versus wavelength for amorphous carbon [15]

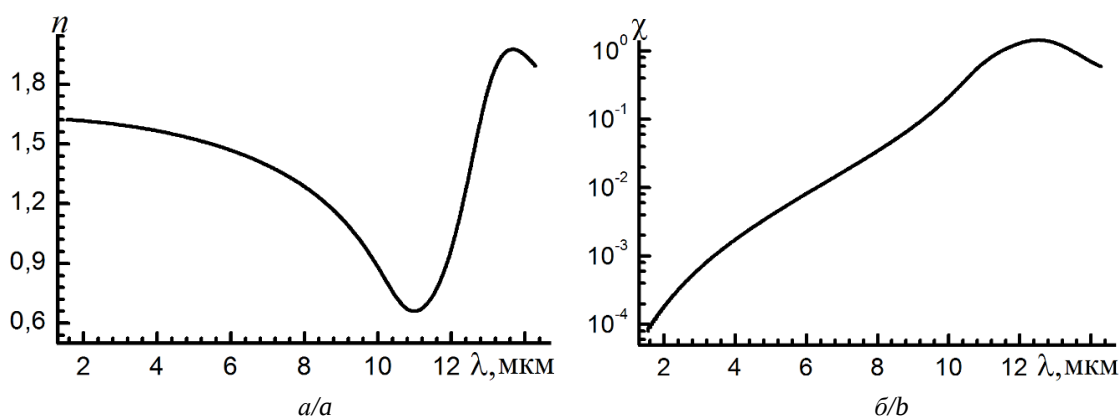


Рис. 3. Зависимости реальной $n=n(\lambda)$ (а) и мнимой $\chi=\chi(\lambda)$ (б) частей комплексного показателя преломления от длины волны для триоксида диалюминия [16, 17]

Fig. 3. Dependences of real $n=n(\lambda)$ (a) and imaginary $\chi=\chi(\lambda)$ (b) parts of complex refractive index versus wavelength for trioxide dialuminum [16, 17]

Для сравнительного анализа особенностей ослабления излучения различными рассеивателями удобнее использовать нормированную характеристику ($Q(\lambda)$). От нее легко перейти к соответствующей энергетической величине, коэффициенту ослабления (α_{ext}). При этом достаточно учесть эффективную площадь тени частиц и их концентрацию в единице объема.

Результаты расчета

Рассмотрим особенности спектральной зависимости ослабления оптического излучения кристаллическим облаком. Результаты численных экспериментов получены с использованием моделей полидисперсной среды, приведенных выше. Оптические характеристики рассчитаны для кристаллов сферической формы, представляющих условно мелкие частицы, и ансамблей крупных преимущественно ориентированных пластинок. При этом использовались решение Ми и метод физической

оптики. Оптические свойства частиц ($\eta(\lambda)$), определяемые природой вещества рассеивателей, обеспечивают вполне характерный спектральный ход $Q_{\text{ext}}(\lambda)$. Особенности поведения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ связаны с набегом фаз излучения, прошедшего через рассеиватель. В свою очередь набег фаз зависит от показателя преломления, длины волны и геометрических размеров частиц. Для кристаллов, особенно преимущественно ориентированных в пространстве, значимым является и направление распространения излучения [13].

Пусть аэродисперсная среда состоит из ледяных частиц. На рис. 4, 5 иллюстрируются значения фактора ослабления в зависимости от длины волны падающего излучения ($\lambda=0.5\div 15$ мкм). Высокая вариативность n , по сравнению со скоростью изменения λ (рис. 1, а), обеспечивает нерегулярный высокочастотный осциллирующий вид $Q_{\text{ext}}(\lambda)$. Это особенно ярко наблюдается в области проявления эффекта Христиансена ($\lambda \approx 2,85$ мкм и $\lambda \approx 10,8$ мкм).

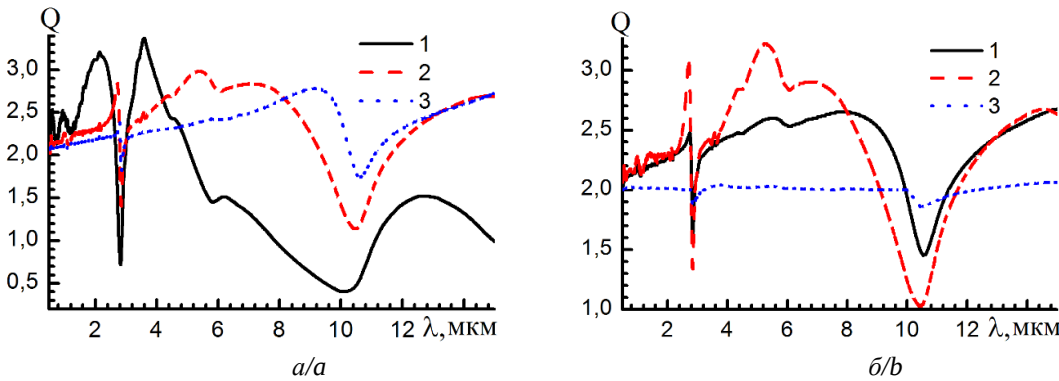


Рис. 4. Фактор ослабления $Q(\lambda)$ для совокупности ледяных частиц: а) для сфер при $\mu=5$: $\bar{a}=2$ мкм (кривая 1), $\bar{a}=5$ мкм (кривая 2), $\bar{a}=10$ мкм (кривая 3); б) для сфер при $\bar{a}=5$ мкм, $\mu=1$ (кривая 1), для сфер при $\bar{a}=5$ мкм, $\mu=10$ (кривая 2), для смеси 8 типов кристаллов при $a_{\text{iff}}=5$ мкм (кривая 3)

Fig. 4. Extinction factor $Q(\lambda)$ for set of ice particles: а) for spheres at $\mu=5$: $\bar{a}=2$ μm (curve 1), $\bar{a}=5$ μm (curve 2), $\bar{a}=10$ μm (curve 3); б) for spheres at $\bar{a}=5$ μm , $\mu=1$ (curve 1), for spheres at $\bar{a}=5$ μm , $\mu=10$ (curve 2), for mixture of 8 types of crystals at $a_{\text{iff}}=5$ μm (curve 3)

Кривые 1–3 рис. 4, а и кривые 1, 2 рис. 4, б иллюстрируют спектральный ход фактора ослабления для сферических частиц, средние размеры ($\bar{a}$) которых соизмеримы с длиной волны падающего излучения. Чем меньше величина $\bar{a}$, тем шире интервал изменения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ (сравним кривые 1–3 рис. 4, а). Наиболее выразительная зависимость $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ проявляется в резонансной области ($\bar{a} \approx \lambda$). Для больших частиц, размеры которых в разы превышают длину волны, $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx 2$. При увеличении разброса частиц по размерам интервал изменения фактора ослабления сужается (сравним кривые 1 и 2 рис. 4, б). Кривая 3 рис. 4, б демонстрирует значения фактора ослабления для хаотически ориентированных ледяных кристаллов, представляющих собой смесь пластинок, дроксталлей, полых и плотных столбиков, пустотелых и плотных пулевых розеток, агрегатов плотных столбиков и агрегатов пластинок. Их эффективный радиус (a_{eff}) составляет 5 мкм. Значения $Q(\lambda)$, демонстрируемые кривой 3 рис. 4, б, получены с использованием методов дипольных моментов, Т-матрицы и модифицированного метода геометрической оптики [22]. За счет усреднения по размерам, формам и ориентации в пространстве для этой смеси кристаллов наблюдается практически нейтральный ход $Q(\lambda)$ (т. е. $Q(\lambda) \approx \text{const}$), за исключением областей проявления эффекта Христиансена (где в узком спектральном диапазоне длин волн фиксируется резкий перепад значений ($n(\lambda)$)).

На рис. 5, а, б иллюстрируются особенности экстинкции для ансамбля горизонтально ориентированных пластинок. Напомним, что для таких кристаллов характерен наибольший интервал возможного изменения величины фактора Q (0–4). Исследование ослабления лучистой энергии системой преимущественно ориентированных пластинок яв-

ляется многопараметровой задачей. В данной работе показана спектральная зависимость экстинкции только от микрофизических параметров системы частиц. Большой объем материала, демонстрирующий поведение этой характеристики при различных пространственных расположениях плоскости преимущественной ориентации кристаллов, а также с учетом состояния поляризации падающего излучения, требует отдельного рассмотрения.

Кривые 1–4 рис. 5 иллюстрируют отличительные черты влияния толщины условно мелких ($\bar{a}=40$ мкм, рис. 5, а) и условно крупных ($\bar{a}=140$ мкм, рис. 5, б) пластинок на спектральную зависимость фактора ослабления. Следует отметить, что согласно определенным законам кристаллографического роста для атмосферной ледяной пластинки существует функциональная взаимосвязь $d=d(a)$ между ее толщиной (d) и радиусом (a). На основе имеющихся данных в научной литературе [10] воспользуемся следующими соотношениями: (1) $d=2.020 \cdot (2a)^{0.449}$ и (2) $d=a/r$. Фактор формы (a/d) представляет пластинки разной толщины (от толстых до тонких). Пластины, толщина которых связана с радиусом как (1), назовем условно толстые, а пластинки, у которых фактор формы r примерно превышает 20, рассмотрим, как условно тонкие. Очевидно, для тонких пластинок наблюдаются более выраженные особенности поведения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ (сравним кривые 1 и 3 или 2 и 4 рис. 5, а). Причем чем меньше разброс частиц по размерам (в частности, при $\mu=10$ по сравнению со случаем $\mu=1$), тем в больших пределах изменяется фактор ослабления. Для тонких пластинок с малой дисперсией их размеров фиксируется выраженная зависимость экстинкции даже в видимом диапазоне длин волн, что не характерно для относительно толстых пластинок. Кривая 5 рис. 5, а показывает $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ для смеси 8 типов (указан-

ных выше при обсуждении кривой 3 рис. 4, б) хаотически ориентированных кристаллов с эффективным радиусом (a_{eff}), равным 40 мкм. Для таких кристаллов почти на всем иллюстрируемом интервале длин волн $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx 2$ (за исключением слабых всплесков в области проявления эффекта Христиансена). Ослабление для таких кристаллов определяется главным образом их концентрацией в единице объема и средней площадью тени в направлении распространения волны. Для совокупности крупных (в разы превышающих длину волны) преимущественно ориентированных ледяных пластинок по ее микрофизическим особенностям (тонкие или толстые, мелкие или крупные пластинки, малый ($\mu=10$) или большой ($\mu=1$) разброс по размерам) на различных спектральных интервалах выделяются особые характерные черты, которые могут быть использованы для интерпретации данных. Как уже отмечалось выше, для ориентированных кристаллов, имеющих неплоскую форму, возможный интервал изменения значений фактора ослабления в разы уже, чем для пластинок.

Природные и технологические высокотемпературные процессы возмущают атмосферу. При этом формируется аэрозоль с различными физико-химическими свойствами, и, как правило, порождаются сажевые частицы. Их форма, концентрация, оптические свойства зависят от многих факторов (от природы возгораемого вещества, температурного режима, близости источника и др.). Рассмотрим, как сажевые частицы аморфного углерода, включая тонкие пленки, а также частицы триоксида диалю-

миния влияют на ослабление лучистой энергии. На рис. 6, 7 иллюстрируется спектральная зависимость фактора ослабления оптического излучения для разных микрофизических параметров среды. Несмотря на то, что в рассматриваемом диапазоне длин волн значение показателя преломления (η) слабо изменяется (в частности, из рис. 2 видно, что в интервале λ от 2 до 10 мкм $n(\lambda) \approx \text{const}$, а значения показателя поглощения $\chi(\lambda)$ возрастают не более чем на порядок), только для мелких сфер наблюдаются нерегулярные существенные изменения $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ (кривая 1 рис. 6, а). Для более крупных частиц сферической формы (кривые 2–4 рис. 6, а) границы изменения фактора ослабления сужаются в разы, а дисперсия размеров частиц (изменение μ) обеспечивает различия не более чем на десятую долю величины фактора Q_{ext} . Для ансамбля горизонтально ориентированных пластинок наблюдается ярко выраженный спектральный ход $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ только для относительно небольших ($\bar{a}=40$ мкм) и тонких кристаллов. Увеличение параметра μ обеспечивает расширение границ изменения фактора ослабления (сравним кривые 3 и 4 рис. 6, б). Для толстых (кривые 1 и 2 рис. 6, б) пластинок характерен нейтральный ход (за исключением области λ от 7 до 10 мкм, и то в случае малой дисперсии размеров, где проявляется слабо выраженное отклонение $Q_{\text{ext}}(\lambda)$ от 2). Для более крупных пластинок (при $\bar{a}$ примерно больше 100 мкм) тонких или толстых при любых параметрах μ фактор ослабления равен своему асимптотическому значению (т. е. $Q_{\text{ext}}(\lambda) \approx 2$).

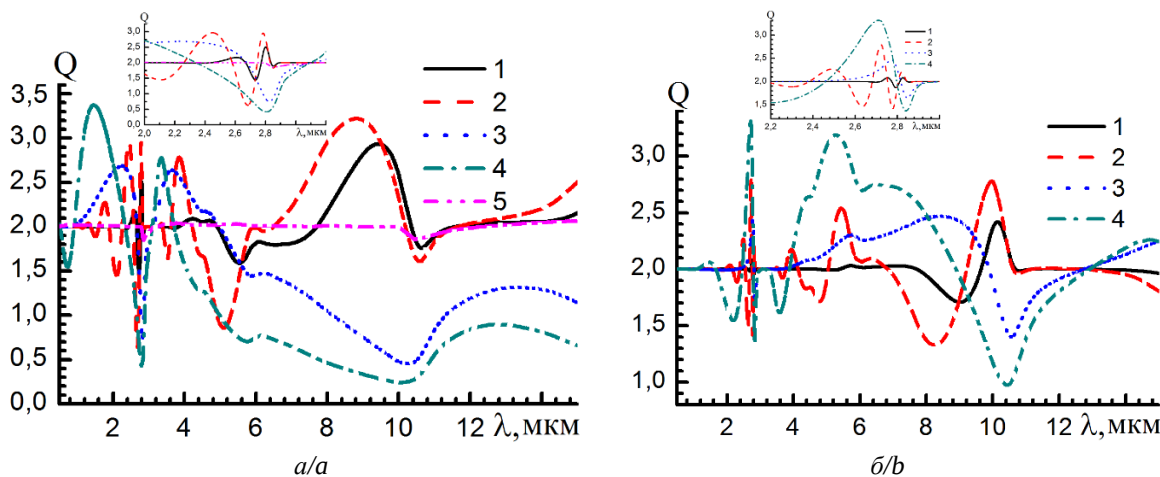


Рис. 5. Фактор ослабления $Q(\lambda)$ для совокупности ледяных частиц: а) для пластинок $\mu=1$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0,449}$ (кривая 1), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0,449}$ (кривая 2), $\mu=1$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=a/20$ (кривая 3), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=a/20$ (кривая 4), для смеси 8 типов кристаллов при $a_{\text{eff}}=40$ мкм (кривая 5); б) для пластинок $\mu=1$, $\bar{a}=140$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0,449}$ (кривая 1), $\mu=10$, $\bar{a}=140$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0,449}$ (кривая 2), $\mu=1$, $\bar{a}=140$ мкм, $d=a/20$ (кривая 3), $\mu=10$, $\bar{a}=140$ мкм, $d=a/20$ (кривая 4)

Fig. 5. Extinction factor $Q(\lambda)$ for set of ice particles: а) for plates $\mu=1$, $\bar{a}=40$ μm , $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 1), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ μm , $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 2), $\mu=1$, $\bar{a}=40$ μm , $d=a/20$ (curve 3), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ μm , $d=a/20$ (curve 4), for mixture 8 types of crystals at $a_{\text{eff}}=40$ μm (curve 5); б) for plates $\mu=1$, $\bar{a}=140$ μm , $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 1), $\mu=10$, $\bar{a}=140$ μm , $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 2), $\mu=1$, $\bar{a}=140$ μm , $d=a/20$ (curve 3), $\mu=10$, $\bar{a}=140$ μm , $d=a/20$ (curve 4)

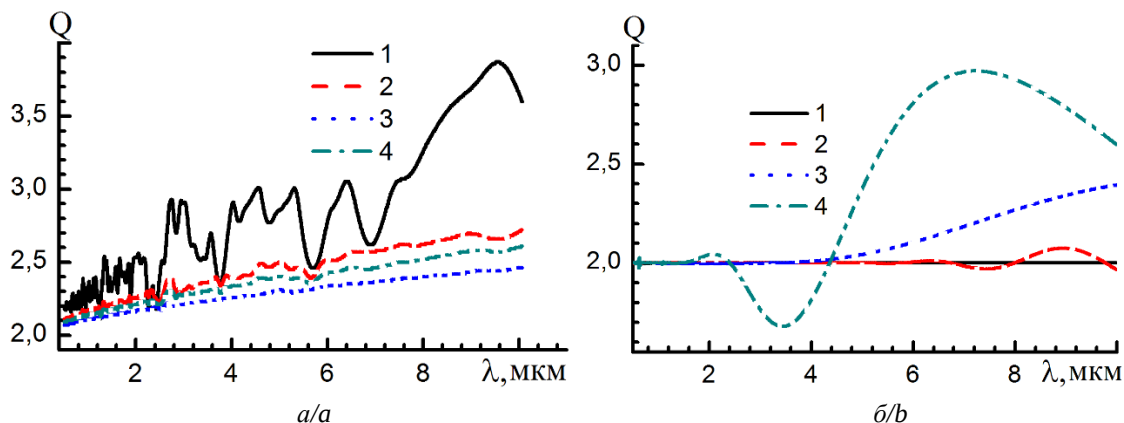


Рис. 6. Фактор ослабления $Q(\lambda)$ для совокупности частиц аморфного углерода: а) для сфер при $\mu=5$, $\bar{a}=2$ мкм (кривая 1), $\mu=5$, $\bar{a}=5$ мкм (кривая 2), $\mu=5$, $\bar{a}=10$ мкм (кривая 3), $\mu=1$, $\bar{a}=5$ мкм (кривая 4); б) для пластинок при $\mu=1$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (кривая 1), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (кривая 2), $\mu=1$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=a/20$ (кривая 3), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=a/20$ (кривая 4)

Fig. 6. Extinction factor $Q(\lambda)$ for a set of amorphous carbon particles: а) for spheres at $\mu=5$, $\bar{a}=2$ μm (curve 1), $\mu=5$, $\bar{a}=5$ μm (curve 2), $\mu=5$, $\bar{a}=10$ μm (curve 3), $\mu=1$, $\bar{a}=5$ μm (curve 4); б) for plates at $\mu=1$, $\bar{a}=40$ μm, $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 1), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ μm, $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 2), $\mu=1$, $\bar{a}=40$ μm, $d=a/20$ (curve 3), $\mu=10$, $\bar{a}=40$ μm, $d=a/20$ (curve 4)

Продукты сгорания в двигателях обеспечивают порождение частиц с содержанием триоксида диалюминия [15, 16]. На рис. 7 иллюстрируются характерные особенности ослабления лучистой энергии, трансформированной частицами Al_2O_3 с разными микрофизическими свойствами. Как было отмечено выше, спектральный ход ослабления зависит от соотношения скоростей изменения показателя преломления и длины волны. Чем больше размеры частиц, тем в большей мере сужаются границы изменения фактора ослабления. Высокие значения показателя поглощения (n и η отличаются не более чем на порядок) и дисперсии сглаживают особенности спектрального хода рассматриваемой оптической

характеристики, тем не менее общая закономерность поведения $Q_{ext}(\lambda)$, обусловленная $n(\lambda)$, сохраняется. Для горизонтально ориентированных пластинок наиболее выраженные и устойчивые особенности экстинкции проявляются для тонких кристаллов.

Выше представленные результаты численного исследования демонстрируют характер зависимости ослабления оптического излучения для ледяных и сажевых частиц с различными микрофизическими свойствами. На разных спектральных интервалах проявляются свои особенности, обусловленные определенными формой, средним размером (с учетом дисперсии), природой вещества частиц, что позволяет установить состав исследуемой среды.

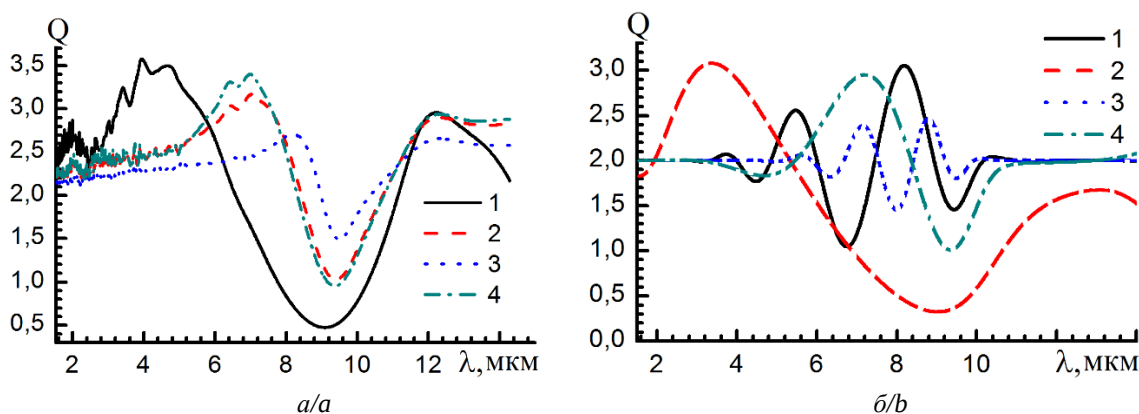


Рис. 7. Фактор ослабления $Q(\lambda)$ для совокупности частиц триоксида диалюминия: а) для сфер при $\mu=5$, $\bar{a}=2$ мкм (кривая 1), $\mu=5$, $\bar{a}=5$ мкм (кривая 2), $\mu=5$, $\bar{a}=10$ мкм (кривая 3), $\mu=10$, $\bar{a}=5$ мкм (кривая 4); б) для пластинок при $\mu=5$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (кривая 1), $\mu=5$, $\bar{a}=40$ мкм, $d=a/20$ (кривая 2), $\mu=5$, $\bar{a}=140$ мкм, $d=2,020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (кривая 3), $\mu=5$, $\bar{a}=140$ мкм, $d=a/20$ (кривая 4)

Fig. 7. Extinction factor $Q(\lambda)$ for a set of trioxide dialuminum particles: а) for spheres at $\mu=5$, $\bar{a}=2$ μm (curve 1), $\mu=5$, $\bar{a}=5$ μm (curve 2), $\mu=5$, $\bar{a}=10$ μm (curve 3), $\mu=10$, $\bar{a}=5$ μm (curve 4); б) for plates at $\mu=5$, $\bar{a}=40$ μm, $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 1), $\mu=5$, $\bar{a}=40$ μm, $d=a/20$ (curve 2), $\mu=5$, $\bar{a}=140$ μm, $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ (curve 3), $\mu=5$, $\bar{a}=140$ μm, $d=a/20$ (curve 4)

Заключение

Для представления кристаллосодержащих аэродисперсных сред, возмущенных продуктами горения, в качестве рассеивателей рассмотрены сажевые и ледяные частицы. В данной работе предложены численные модели условно мелких и крупных кристаллов, обеспечивающие спектральную зависимость ослабления в видимом и ИК-диапазонах длин волн. При этом характеристика экстинкции реализуется с высоким разрешением, что особо важно для изучения ее тонкой структуры или рассмотрения газовой-дисперсной среды. В данной работе в качестве базовых форм рассеивателей выделены сферы и пластинки. В моделях учитываются возможные вариации спектра размеров частиц и взаимосвязь комплексного показателя преломления и длины волны. Продемонстрирован отдельный вклад частиц, различных по физико-химическим свойствам, в формирование спектральной зависимости ослабления. Наиболее выраженные особенности экстинкции проявляются в интервалах длин волн, в рамках которых происхо-

дит существенное изменение показателя преломления. Средние величины частиц, их разброс по размерам, а также их форма обеспечивают свои ярко выраженные устойчивые особенности в характере изменения фактора ослабления от длины волны.

По представленным в статье результатам численного исследования выявляются информативные направления для установления физико-химических параметров аэродисперсной среды, содержащей смесь кристаллов. При раздельном анализе рассматриваемых оптических характеристик несложно перейти к последующей оценке комплексного влияния на экстинкцию основных составляющих смеси. Предложенные физико-математические модели позволяют численно моделировать многокомпонентные полидисперсные среды с различными весовыми коэффициентами. Демонстрация такой модели с последующей иллюстрацией соответствующих результатов расчета требует отдельного рассмотрения за рамками данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption / J. Hansen, A. Lacis, R. Ruedy, M. Sato // *Geophysical Research Letters*. – 1992. – Vol. 19. – № 2. – P. 215–218. DOI: <https://doi.org/10.1029/91GL02788>.
2. Yu F., Turco R.P. Contrail formation impacts on aerosol properties in aircraft plumes: effects of fuel sulfur content // *Geophysical Research Letters*. – 1998. – Vol. 25. – P. 313–316. DOI: <https://doi.org/10.1029/97GL03695>.
3. Wong J., Li Z. Retrieval of optical depth for heavy smoke aerosol plumes: uncertainties and sensitivities to the optical properties // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2002. – Vol. 59. – P. 250–261. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0250:ROODFH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0250:ROODFH>2.0.CO;2).
4. The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany / A. Ansmann, M. Tesche, S. Groß, V. Freudenthaler, P. Seifert, A. Hiebsch, J. Schmidt, U. Wandinger, I. Mattis, D. Müller, M. Wiegner // *Geophysical Research Letters*. – 2010. – Vol. 37. – L13810-5. DOI: [10.1029/2010GL043809](https://doi.org/10.1029/2010GL043809).
5. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation / D.S. Lee, G. Pitari, V. Grewe, K. Gierens, J.E. Penner, A. Petzold, M.J. Prather, U. Schumann, A. Bais, T. Bernsten, D. Iachetti, L.L. Lim, R. Sausen // *Atmospheric Environment*. – 2010. – Vol. 44. – P. 4678–4734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>.
6. Guo G., Li S. Study on the vertical profile of refractive index in the troposphere // *International Journal of Infrared and Millimeters Waves*. – 2000. – Vol. 21. – № 7. – P. 1103–1111.
7. Schlimme I., Macke A., Reichardt J. The impact of ice crystal shapes, size distributions, and spatial structures of cirrus clouds on solar radiative fluxes // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2005. – Vol. 62. – P. 2274–2283. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS3459.1>.
8. Study on influence of different mixing rules on the aerosol components retrieval from ground-based remote sensing measurements / Y. Xie, Z. Li, L. Li et al. // *Atmospheric Research*. – 2014. – Vol. 145–146. – P. 267–278.
9. Sensitivities of spectral optical properties of dust aerosols to their mineralogical and microphysical properties / Y. Zhang, M. Saito, P. Yang, G. Schuster, C. Trepte // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2024. – Vol. 129. – № 1. – e2023JD040181 (P. 1–23). DOI: <https://doi.org/10.1029/2023JD040181>.
10. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
11. Scattering, absorption, and emission of light by small particles / Eds. M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002. – 449 p.
12. Baran A. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward (Review) // *Atmospheric Research*. – 2012. – Vol. 112. – P. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.010>.
13. 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: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.10.028>.
14. Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – Iss. D14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JD009744>.
15. High reflectance ta-C coatings in the extreme ultraviolet / J.I. Larruquert, L.V. Rodríguez-de Marcos, J.A. Méndez, P.J. Martín, A. Bendavid // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – № 23. – P. 27537–27549. DOI: [10.1364/OE.21.027537](https://doi.org/10.1364/OE.21.027537).
16. Dombrovsky L.A. Near-infrared properties of droplets of aluminum oxide melt // *Thermopedia*. – 2011. DOI: [10.1615/thermopedia.000149](https://doi.org/10.1615/thermopedia.000149).

17. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride / J. Kischkat, S. Peters, B. Gruska et. al. // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51. – Iss. 28. – P. 6789–6798. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.51.006789>.
18. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
19. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA: capabilities and known limitations // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2011. – Vol. 112. – P. 2234–2247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.01.031>.
20. Notes comprehensive thematic T-matrix reference database: A 2014–2015 update / M.I. Mishchenko, N.T. Zakharova, N.G. Khlebtsov, G. Videen, T. Wriedt // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2016. – Vol. 178. – P. 276–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.11.005>.
21. Popov A.A. New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals // *Proc SPIE*. – 1996. – Vol. 2822. – P. 186–194. DOI: [10.1117/12.255207](https://doi.org/10.1117/12.255207).
22. 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>.

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

Поступила: 15.04.2024

Принята: 20.06.2024

Опубликована: 30.06.2024

REFERENCES

1. Hansen J., Lacis A., Ruedy R., Sato M. Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption. *Geophysical Research Letters*, 1992, vol. 19, no. 2, pp. 215–218. DOI: <https://doi.org/10.1029/91GL02788>.
2. Yu F., Turco R.P. Contrail formation impacts on aerosol properties in aircraft plumes: effects of fuel sulfur content. *Geophysical Research Letters*, 1998, vol. 25, pp. 313–316. DOI: <https://doi.org/10.1029/97GL03695>.
3. Wong J., Li Z. Retrieval of optical depth for heavy smoke aerosol plumes: uncertainties and sensitivities to the optical properties. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, vol. 59, pp. 250–261. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0250:ROODFH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0250:ROODFH>2.0.CO;2).
4. Ansmann A., Tesche M., Groß S., Freudenthaler V., Seifert P., Hiebsch A., Schmidt J., Wandinger U., Mattis I., Müller D., Wiegner M. The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany. *Geophysical Research Letters*, 2010, vol. 37, L13810-5. DOI: [10.1029/2010GL043809](https://doi.org/10.1029/2010GL043809).
5. Lee D.S., Pitari G., Grewe V., Gierens K., Penner J.E., Petzold A., Prather M.J., Schumann U., Bais A., Bernsten T., Iachetti D., Lim L.L., Sausen R. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, pp. 4678–4734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>.
6. Guo G., Li S. Study on the vertical profile of refractive index in the troposphere. *International Journal of Infrared and Millimeters Waves*. *Mil im. Waves*, 2000, vol. 21, no. 7, pp. 1103–1111.
7. Schlimme I., Macke A., Reichardt J. The impact of ice crystal shapes, size distributions, and spatial structures of cirrus clouds on solar radiative fluxes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, vol. 62, pp. 2274–2283. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS3459.1>.
8. Xie Y., Li Z., Li L. Study on influence of different mixing rules on the aerosol components retrieval from ground-based remote sensing measurements. *Atmospheric Research*, 2014, vol. 145–146, pp. 267–278.
9. Zhang Y., Saito M., Yang P., Schuster G., Trepte C. Sensitivities of spectral optical properties of dust aerosols to their mineralogical and microphysical properties. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, vol. 129, no. 1, e2023JD040181 (P. 1–23). DOI: <https://doi.org/10.1029/2023JD040181>.
10. Volkovitsky O.A., Pavlova L.N., Petrushin A.G. *Optical properties of crystalline clouds*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 200 p. (In Russ.)
11. *Scattering, absorption, and emission of light by small particles*. Eds. M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2002. 449 p.
12. Baran A. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward (Review). *Atmospheric Research*, 2012, vol. 112, pp. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.04.010>.
13. 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>.

14. Waren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, Iss. D14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
15. Larruquert J.I., Rodríguez-de Marcos L.V., Méndez J.A., Martín P.J., Bendavid A. High reflectance ta-C coatings in the extreme ultraviolet. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 23, pp. 27537–27549. DOI:10.1364/OE.21.027537.
16. Dombrovsky L.A. Near-infrared properties of droplets of aluminum oxide melt. *Thermopedia*, 2011. DOI: 10.1615/thermopedia.000149.
17. Kischkat J., Peters S., Gruska B. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, Iss. 28, pp. 6789–6798. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.51.006789>.
18. Boren K., Huffman D. *Absorption and scattering of light by small particles*. Moscow, Mir Publ., 1986. 660 p. (In Russ.)
19. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA: capabilities and known limitations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, vol. 112, pp. 2234–2247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.01.031>.
20. Mishchenko M.I., Zakharova N.T., Khlebtsov N.G., Videen G., Wriedt T. Notes comprehensive thematic T-matrix reference database: A 2014–2015 update. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, vol. 178, pp. 276–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.11.005>.
21. Popov A.A. New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals. *Proc SPIE*, 1996, vol. 2822, pp. 186–194. DOI: 10.1117/12.255207.
22. 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>.

Information about the authors

Olga V. Shefer, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University; Professor, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; 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

Received: 15.04.2024

Revised: 20.06.2024

Accepted: 30.06.2024