

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДЯНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЧАСТИЦ В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

**Н.В. Кан, <sup>1</sup>И.В. Ткачев, <sup>1</sup>Д.Н. Тимофеев, <sup>1</sup>В.А. Шишко, <sup>1,2</sup>А.В. Коношонкин**

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
n.kan.08@mail.com

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

## INVESTIGATION OF ATMOSPHERIC ICE PARTICLES WITHIN THE FRAMEWORK OF GEOMETRIC AND PHYSICAL OPTICS APPROXIMATIONS

**N.V. Kan, <sup>1</sup>I.V. Tkachev, <sup>1</sup>D.N. Timofeev, <sup>1</sup>V.A. Shishko, <sup>1,2</sup>A.V. Konoshonkin**

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia  
n.kan.08@mail.com

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

**Аннотация.** В работе представлены результаты сравнения численных решений задачи рассеяния света на атмосферных ледяных частицах методами геометрической и физической оптики. Решение строилось для частиц гексагональной формы (гексагональный ледяной столбик) и дроксталлов. Результаты сравнения матрицы рассеяния света по всей сфере направления показали, что в направлении рассеяния строго назад использование приближения геометрической оптики может приводить к существенным ошибкам, особенно для гексагональных частиц, для которых характерно наличие уголкового отражения.

**Ключевые слова:** рассеяние света, физическая оптика, частицы льда, перистые облака, геометрическая оптика, оптические свойства.

**Abstract.** This paper presents the results of comparison of numerical solutions to the problem of light scattering on atmospheric ice particles by methods of geometric and physical optics. The solution was constructed for hexagonal shaped particles (hexagonal ice column) and droxtals. The results of comparison of the light scattering matrix over the entire sphere of direction showed that the use of geometric optics approximation in the backward scattering direction can lead to significant errors, especially for hexagonal particles which are characterized by the presence of angular reflection.

**Keywords:** light scattering, physical optics, ice particles, cirrus clouds, geometric optics, optical properties.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача рассеяния света на крупных несферических частицах является сложной задачей атмосферной оптики, традиционно решаемой точными численными методами, такими как DDA, FDTD, PSTD и др. [Yurkin, Hoekstra, 2011; Archambeault, 2017; Liu et al., 2012]. Однако область применимости точных численных методов ограничена размером частиц 5–10 мкм, поскольку для более крупных частиц решение является слишком ресурсозатратным. Поскольку размеры частиц перистых облаков и крупного полевого аэрозоля достигают 1000 мкм, общепринятым методом в таком случае является приближение геометрической оптики [Yang, Liou, 1995]. Однако, вообще говоря, оно неприменимо для решения задачи рассеяния света на частицах правильной гексагональной формы, так как в направлении рассеяния назад ( $\theta=180^\circ$ ) возникает пик сингулярности [Коношонкин и др., 2014]. Эту проблему можно обойти, используя метод физической оптики [Shishko et al., 2019]. Однако он обладает высокой вычислительной трудоемкостью при решении задачи рассеяния света по всем направлениям рассеяния. Например, расчет только точки направления рассеяния назад ( $\theta=180^\circ$ ) на вычислительном кластере ИОА СО РАН занимает несколько месяцев [Ткачев и др., 2021], а для поставленной задачи необходимо рассчитать решение по всей сфере направлений рассеяния.

Следовательно, для решения задачи рассеяния света по всей сфере направления следует объеди-

нить преимущества методов геометрической и физической оптики, т. е. применить подход сшивания решений: решение по всем углам рассеяния (кроме точки рассеяния назад) строить в приближении геометрической оптики, а в направлении рассеяния назад, где приближение геометрической оптики приводит к значительным ошибкам, использовать решение, полученное в рамках физической оптики. Работа посвящена исследованию возможности объединения решений физической и геометрической оптики.

В качестве тестовой задачи проводилось решение на типичных частицах перистых облаков гексагональный столбик и дроксталл. Так как для таких частиц может присутствовать уголкового отражение и пик сингулярности назад. Решение получено в рамках геометрической и физической оптики.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Из результата расчета (рис. 1) можно увидеть, что для гексагональных столбиков интенсивность в приближении геометрической оптики стремится к высоким значениям. С увеличением диапазона углов рассеяния увеличение интенсивности происходит при углах рассеяния  $179^\circ$ – $180^\circ$ . При этом точка рассеяния назад, рассчитанная в рамках физической оптики, значительно отличается.

Немного иначе решение выглядит для дроксталлов (рис. 2). Поскольку для дроксталлов вклад уголкового компонента рассеянного света не имеет доминирующего характера, пик сингулярности в окрест-

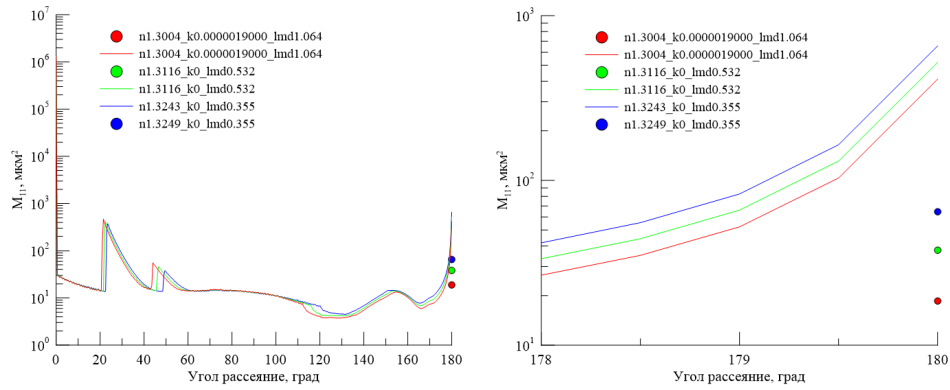


Рис. 1. Сравнение элемента  $M_{11}$  матрицы рассеяния света для гексагонального столбика, полученные методом физической оптики (точки) и геометрической оптики (сплошные линии), построенные в зависимости от угла

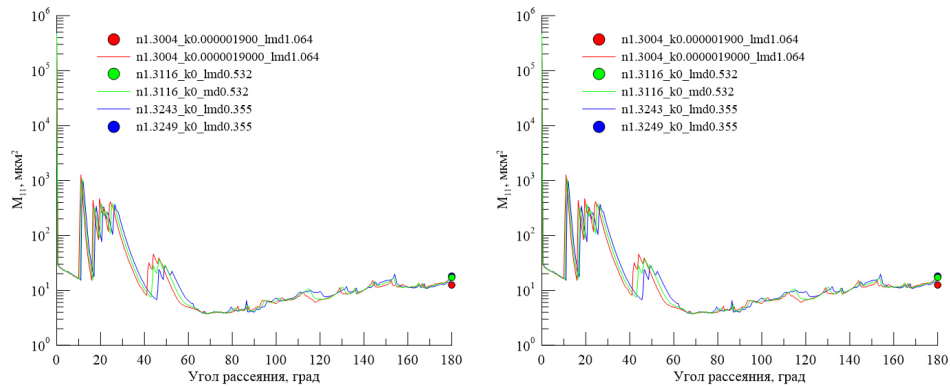


Рис. 2. Сравнение элемента  $M_{11}$  матрицы рассеяния света для дроксталла, полученные методом физической оптики (точки) и геометрической оптики (сплошные линии), построенные в зависимости от угла рассеяния

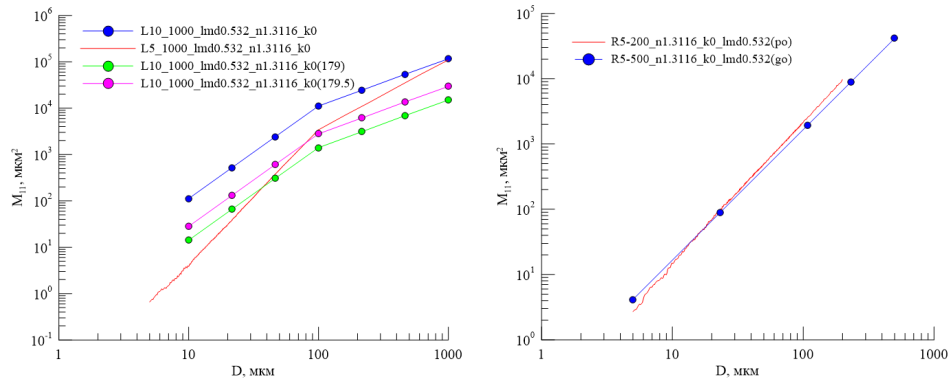


Рис. 3. Сравнение элемента  $M_{11}$  матрицы рассеяния света для столбика (слева) и для дроксталла (справа), полученные методом геометрической оптики (точки) и физической оптики (сплошная красная линия), построенные в зависимости от размера частицы для фиксированного угла рассеяния около направления назад

ности углов рассеяния  $179^\circ$ – $180^\circ$  не наблюдается. В связи с этим решения геометрической и физической оптики примерно совпадают. Однако в направлении рассеяния назад существует еще и когерентный пик обратного рассеяния, который не может быть учтен в рамках приближения геометрической оптики, поэтому истинным следует считать решение в рамках физической оптики.

Динамика различия решений с ростом размера частиц представлена на рис. 3. В частности, на панели слева видно, что геометрический пик сингулярности для точки  $180^\circ$  (синяя линия) сходится с решением, полученным в рамках физической оптики только для части размером 1000 мкм. При этом решения для точек  $179^\circ$  и  $179.5^\circ$  значительно отлича-

ются. Однако решение, полученное для дроксталлов (панель справа), демонстрирует меньшее расхождение, которое вызвано лишь наличием когерентного пика обратного рассеяния.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного исследования показали, что решение задачи рассеяния света, полученное в рамках геометрической и физической оптики, существенно отличаются для частиц, имеющих гексагональную форму, ввиду появления для таких частиц пика сингулярности в направлении рассеяния строго назад. При этом для частиц, для которых вклад уголкового компонента рассеянного излучения не является до-

минирующим, например для дроксталлов, решения отличаются только из-за когерентного пика обратного рассеяния. Таким образом, совместное решение, построенное в рамках геометрической и физической оптики для частиц, не содержащих пика сингулярности обратного рассеяния, может быть получено заменой в геометрооптическом решении лишь точки  $180^\circ$  на решение, полученное в рамках метода физической оптики. Для частиц, у которых присутствует пик сингулярности в обратном рассеянии, необходимо проводить замену решений в значительной окрестности направлений рассеяния назад, например, в диапазоне углов  $175^\circ$ – $180^\circ$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Граница применимости приближения геометрической оптики для решения задачи обратного рассеяния света на квазигоризонтально ориентированных гексагональных ледяных пластинках. *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27, № 8. С. 705–712.

Ткачев И.В., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размерами 10–100 мкм для интерпретации данных лазерного зондирования. *Оптика атмосферы и океана*. 2021. Т. 34, № 3. С. 199–206.

Archambeault B. Introduction to the finite-difference time-domain (FDTD) technique. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal/Power Integrity (EMCSI)*. 2017. P. 1–43.

Liu C., Panetta R.L., Yang P. Application of the pseudo-spectral time domain method to compute particle single-scattering properties for size parameters up to 200. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2012. Vol. 113. P. 1728–1740.

Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., et al. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape. *Optics Express*. 2019. Vol. 27, no. 23. P. 32984–32993.

Yang P., Liou K.N. Light scattering by hexagonal ice crystals: Comparison of finite-difference time domain and geometric optics models. *J. Optical Society of America. A: Optics and Image Science, and Vision*. 1995. Vol. 12, no. 1. P. 162–176.

Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2011. Vol. 112. P. 2234–2247.