

МЕТОД ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА НЕСФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦАХ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

^{1,2}А.В. Коношонкин, ¹В.А. Шишко, ¹Д.Н. Тимофеев, ¹Н.В. Кустова, ²К.С. Сальников

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
a.kon@iao.ru

²Ни Томский государственный университет, Томск, Россия

THE PHYSICAL OPTICS METHOD FOR SOLVING THE LIGHT SCATTERING PROBLEM BY ATMOSPHERIC AEROSOL NONSPHERICAL PARTICLES

^{1,2}A.V. Konoshonkin, ¹V.A. Shishko, ¹D.N. Timofeev, ¹N.V. Kustova, ²K.S. Salnikov

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
a.kon@iao.ru

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

Аннотация. Представлены результаты решения задачи рассеяния света на несферических частицах атмосферного аэрозоля. Показано, что метод физической оптики хорошо согласуется как с точными численными методами, так и с приближением геометрической оптики. С учетом волновых свойств света метод применим для разрешения как когерентного пика обратного рассеяния, так и сингулярного пика, образованного эффектом углового отражения света на гранях идеальных кристаллических частиц. Это делает метод применимым при построении оптических моделей, необходимых для решения задач лазерного зондирования атмосферы.

Ключевые слова: обратное рассеяние света, перистые облака, ледяные частицы, искажение формы, физическая оптика.

Abstract. The report presents the results of solving the light scattering problem on non-spherical particles of atmospheric aerosol. It is shown that the physical optics method is in good agreement with the exact numerical methods and geometric optics approximation. Taking into account wave properties of light, the method is applicable to resolving both the coherent backscattering peak and the singular peak formed by the effect of corner reflection. This makes the method applicable to constructing the optical models necessary to solve problems of atmospheric laser sounding.

Keywords: light backscattering, cirrus clouds, ice particles, shape distortion, physical optics.

ВВЕДЕНИЕ

Рассеяние света на несферических частицах атмосферного аэрозоля — сложная актуальная задача атмосферной оптики [Liou, 1986]. Атмосферный аэрозоль, к которому можно отнести и ледяные кристаллы облаков, оказывает значительное влияние на процессы переноса излучения в атмосфере [Baker, 1997]. При этом большинство современных оптических моделей атмосферного аэрозоля построены в предположении, что частицы в пространстве имеют хаотическую ориентацию. Однако независимые экспериментальные наблюдения показывают, что крупные несферические частицы (размером более 50 мкм), как правило, ориентированы в пространстве таким образом, что их больший размер оказывается в горизонтальной плоскости.

Построение оптической модели крупных частиц атмосферного аэрозоля в случае его преимущественной ориентации необходимо для уточнения радиационных блоков климатических моделей. Однако на сегодняшний день в мире не существует общеизвестных методов решения задачи рассеяния света на таких частицах. Традиционно задача рассеяния света решается точными численными методами, такими как DDA [Yurkin, Hoekstra, 2011], FDTD [Kunz, 1993], T-Matrix, П-ТМ [Yang, 2006] и пр. Однако все они неприменимы для решения задачи рассеяния света на частицах размерами более 50 мкм из-за своей вычислительной ресурсоемкости, которая экспоненциально растет с ростом размера частиц.

Другим активно развиваемым подходом является приближение геометрической оптики [Wendling, 1979]. Однако граница применимости такого прибли-

жения соответствует размерам 200–1000 мкм в зависимости от формы частицы и интересующего диапазона углов рассеяния. Для частиц меньших размеров применять приближение геометрической оптики следует с большой осторожностью, тщательно анализируя погрешность полученных результатов. В частности, большая ошибка возникает в случае обратного рассеяния для ледяных кристаллических частиц перистых облаков. Для таких частиц в направлении рассеяния назад в решении, полученном в рамках приближения геометрической оптики, содержится сингулярность. Более того, даже в случае отсутствия сингулярности в направлении рассеяния назад существует когерентный пик обратного рассеяния [Shishko, 2019]. Этот пик не может быть учтен в рамках приближения геометрической оптики, которое не учитывает волновые свойства.

Большие перспективы для решения поставленной задачи имеет метод физической оптики [Vorovoi, 2013]. Данный метод является развитием приближения геометрической оптики и позволяет учитывать волновые свойства света в рамках эффектов дифракции и интерференции. Учет волновых свойств света сдвигает нижнюю границу применимости метода до частиц размерами 10–30 мкм, что фактически перекрывается с верхней границей применимости точных численных методов.

В частности, на рис. 1 показано сравнение решений, полученных в рамках различных методов на примере ледяной гексагональной частицы. Размер частицы определяется относительным размером $x = 2\pi r/\lambda$. Решение строилось в виде матрицы рассеяния света (матрицы Мюллера) размерностью 4×4 .

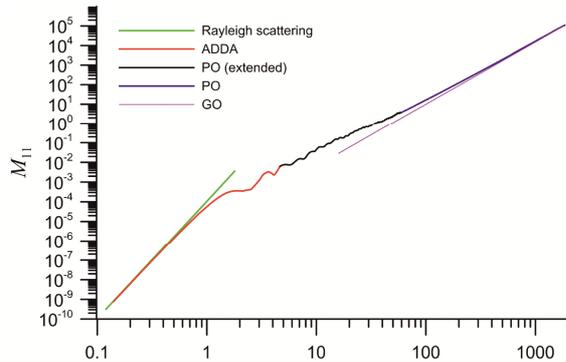


Рис. 1. Сравнение первого элемента матрицы рассеяния света в зависимости от размера ледяного гексагонального столбика, рассчитанной различными методами: метод дискретных диполей ADDA, приближение Релея (Rayleigh scattering), геометрикооптический режим GO, метод физической оптики (PO, PO extended)

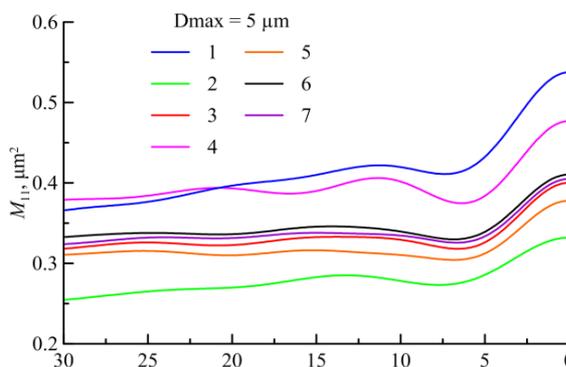


Рис. 2. Когерентный пик обратного рассеяния для различных частиц

Из сопоставления методов (см. рис. 1) видно, что метод физической оптики хорошо согласуется с точным численным методом — методом дискретных диполей, с одной стороны, и выходит на геометрикооптический режим, с другой стороны.

В качестве иллюстрации возможностей метода физической оптики на рис. 2 показан когерентный пик обратного рассеяния для ледяного гексагонального столбика размером 5 мкм. Здесь фазовый угол отсчитывается от направления рассеяния назад, угол 0° соответствует рассеянию строго назад.

Метод физической оптики оказывается эффективным для изучения многих особенностей, возникающих при решении задачи рассеяния света на крупных несферических частицах. На рис. 3 показан эффект отрицательной степени линейной поляризации, возникающей в окрестности когерентного пика обратного рассеяния.

Уникальность метода физической оптики заключается в том, что удается разделить полное рассеянное поле на его компоненты. На рис. 4 показано разложение минимума линейной поляризации на компоненты. Видно, что причиной возникновения негативной поляризации являются только оптические лучи, испытывающие три акта преломления/отражения на частице атмосферного аэрозоля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты решения задачи рассеяния света на несферических частицах атмосферного

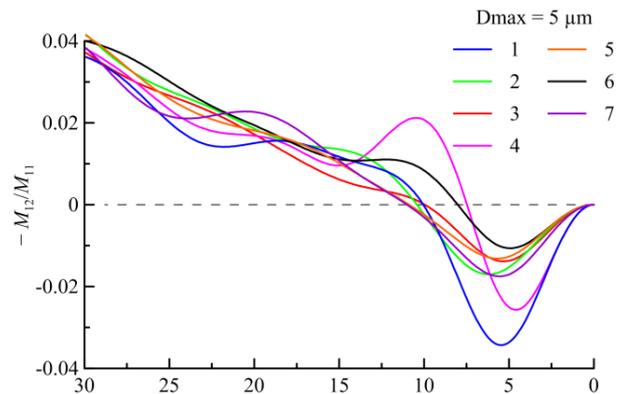


Рис. 3. Эффект отрицательной степени линейной поляризации

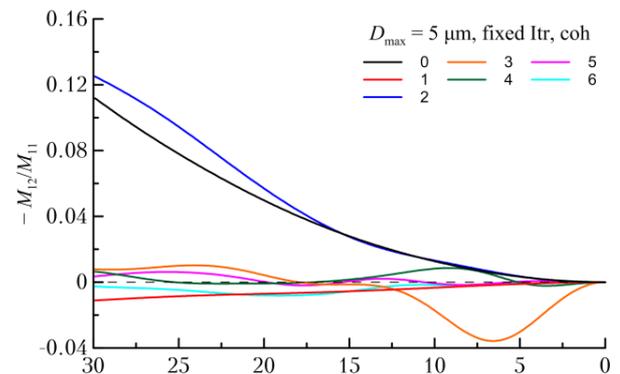


Рис. 4. Появление отрицательной степени линейной поляризации

аэрозоля. Показано, что метод физической оптики хорошо согласуется как с точными численными методами, так и с приближением геометрической оптики.

Метод физической оптики оптимален для решения задачи рассеяния света на несферических частицах размерами 10–1000 мкм. С учетом волновых свойств света метод применим для разрешения как когерентного пика обратного рассеяния, так и сингулярного пика, образованного эффектом уголкового отражения света на гранях идеальных кристаллических частиц. Это делает метод применимым при построении оптических моделей, необходимых для решения задач лазерного зондирования атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baker B.M. Cloud microphysics and climate. *Science*. 1997. Vol. 276. P. 1072–1078.
- Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. Backscattering by hexagonal ice crystals of cirrus clouds. *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, no. 15. P. 2881–1884.
- Kunz K.S., Luebbers R.J. *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. Boca Raton: FL CRC Press, 1993. 448 p.
- Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective. *Monthly Weather Rev.* 1986. Vol. 114, no. 6. P. 1167–1199.
- Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., et al. Timofeev D.N., Borovoi A.G. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape. *Opt. Express*. 2019. Vol. 27, no. 23. P. 32984–32993.
- Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals. *Appl. Opt.* 1979.

Vol. 18. P. 2663–2671.

Yang P., Liou K. N. Light scattering and absorption by non-spherical ice crystals. *Light Scattering Rev.* Vol. 1. Chichester: Springer-Praxis, 2006.

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.