

Характеристики обратного рассеяния света для типичных моделей атмосферных агрегатов в рамках приближения физической и геометрической оптик

Шишко В.А.^{1,2}, Бабинович А.Е.^{1,2}, Ткачев И.В.¹, Тимофеев Д.Н.¹, Коношонкин А.В.^{1,2}, Кустова Н.В.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

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

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллические облака, которые располагаются преимущественно в умеренных широтах и в полюсах Земли, на высотах 6-12 км, являются существенным фактором неопределенности в исследовании климата планеты. Размеры ледяных частиц, из которых состоят кристаллические облака, варьируются от 10 до 1000 мкм, а геометрическая форма в своей основе имеет вид гексагональной призмы. В отличие от сферических частиц жидко-капельных облаков, изучать процесс рассеяния света на таких частицах достаточно сложно в силу разнообразия форм и фактора пространственной ориентации [1,2].

Существуют прямые и дистанционные методы изучения кристаллических облаков. Прямые методы включают в себя экспериментальные измерения с использованием воздушных судов. Дистанционные исследования представляют собой мониторинг атмосферы лидарными сетями и фотометрами. Прямые методы служат для первичного измерения физических характеристик частиц в атмосфере, таких как форма, размер, концентрация и т.д. Для непосредственного исследования процесса рассеяния используются дистанционные методы. Для интерпретации данных, полученных с помощью дистанционного зондирования необходим широкий набор данных для сопоставления характеристик рассеяния и физических характеристик частиц в облаке. Для расчёта таких данных используются численные методы решения задачи рассеяния света. Они делятся на точные и приближенные. Точные методы дают меньшую погрешность, чем приближенные, однако на решение объёмных задач они тратят значительное время. Для решения задачи рассеяния света на ледяных частицах кристаллических облаков успешно применяется метод физической оптики, разрабатываемый в ИОА СО РАН. Данным методом были проведены исследования одиночных частиц, характерных для перистых облаков [3].

По данным полевых исследований агрегаты атмосферных ледяных частиц составляют значительную долю частиц в кристаллических облаках, однако подробная информация об их рассеивающих свойствах в существующих базах данных отсутствует. Это связано с тем, что решение задачи рассеяния света на агрегате частиц значительно сложнее, чем на одиночной частице.

Исходя из того, что кристаллы в облаке, часто, ориентированы случайным образом, можно ожидать, что агрегаты кристаллов рассеивают свет аналогично, одиночным хаотически ориентированным кристаллам, из которых они состоят, поскольку частицы в агрегате «затеняют» друг друга не существенно. Подтверждение этой гипотезы позволит значительно продвинуться в области исследования оптических свойств агрегатов. Поэтому работа посвящена исследованию оптических характеристик агрегатов атмосферных ледяных частиц и их отличий от характеристик одиночных частиц.

Типичной формой агрегатов, встречающихся в кристаллических облаках, являются «bullet-rosette» (рис. 1).

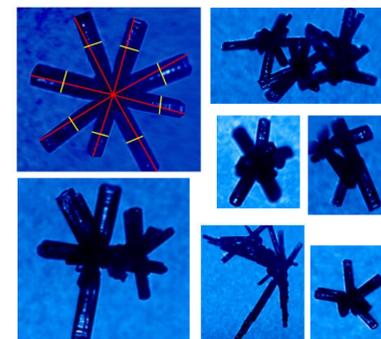


Рисунок 1 – Снимки агрегатов типа «bullet-rosette» [5].



Грант № 23-77-01084

Российский научный фонд



МЕТОД

Метод физической оптики ограниченно применим к таким типам частиц, в силу того, что вычислительная сложность метода сильно возрастает с количеством граней и размером частиц. Поэтому, в первом приближении, агрегаты частиц необходимо рассчитать в рамках приближения геометрической оптики. Ранее были представлены матрицы рассеяния для агрегатов гексагональных столбиков и пластинок [4].

Метод основан на алгоритме трассировки пучков, который похож на алгоритм трассировки лучей, но работает с плоскопараллельными оптическими пучками. В этом алгоритме частица, рассеивающая свет, состоит из граней, состоящих из вершин с трехмерными координатами. Алгоритм разбивает свет, падающий на

грани, на пучки. Эти пучки распространяются в частице и могут быть многократно разделены на преломленные и отраженные пучки, прежде чем они покинут частицу и рассеются. Метод физической оптики рассчитывает рассеянное поле в ближней зоне в рамках приближения геометрической оптики, а в дальней зоне — в рамках приближения физической оптики. Однако расчет дифракции для каждого рассеянного луча — очень затратная операция, особенно для случая произвольно ориентированных частиц в облаке. Больше всего время расчета в методе физической оптики возрастает с увеличением количества граней в частице. Поэтому в первую очередь мы рассчитывали матрицу рассеяния света агрегатов в приближении геометрической оптики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Под агрегатом понимается частица, состоящая из нескольких частиц, касающихся друг друга в одной или множестве точек. Частицы считаются неподвижными относительно друг друга, и, когда агрегат вращается, все частицы вращаются одновременно.

В рамках геометрической оптики были рассчитаны матрицы рассеяния света для агрегатов типа «bullet-rosette», а также агрегатов в которых в качестве базовых частиц были использованы гексагональный столбик и пластинка (рис. 2). Количество частиц варьировалось от 1 до 9.

Использовались следующие размеры базовых частиц: высота 100 мкм, диаметр основания 69,6 мкм (для столбика); высота 15,97 мкм, диаметр основания 100 мкм (для пластинки); высота 100 мкм, диаметр 42 мкм; угол пика — 19,7 градусов (для пули).

Расчёт матриц рассеяния проводился в рамках однократного рассеяния, для случая хаотической пространственной ориентации частиц (около 230 тыс. ориентаций), с показателем преломления 1,3116.



Рисунок 2 – Геометрические модели агрегата состоящего из столбиков и пластинок (расположенных как компактно, так и разрежено), и агрегата типа «bullet-rosette».

Зависимости отношения элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния света к средней геометрической площади тени частицы (G_A) от угла рассеяния θ для разного количества частиц в агрегате N , представлены на рисунке 3.

Практический интерес для интерпретации данных лазерного зондирования атмосферы представляет решение задачи рассеяния света в направлении рассеяния назад в приближении физической оптики, поэтому на рисунке 4 представлены зависимости элемента M_{11} и M_{22} матрицы обратного рассеяния света от максимального размера частицы D_{max} .

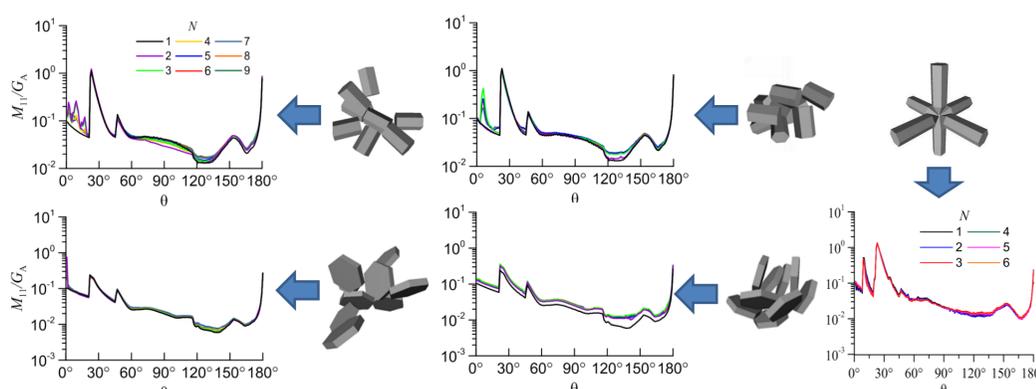


Рисунок 3 – Зависимости отношения M_{11}/G_A от угла рассеяния света (θ) для разных моделей (рис. 2) и разного количества частиц в агрегате (N).

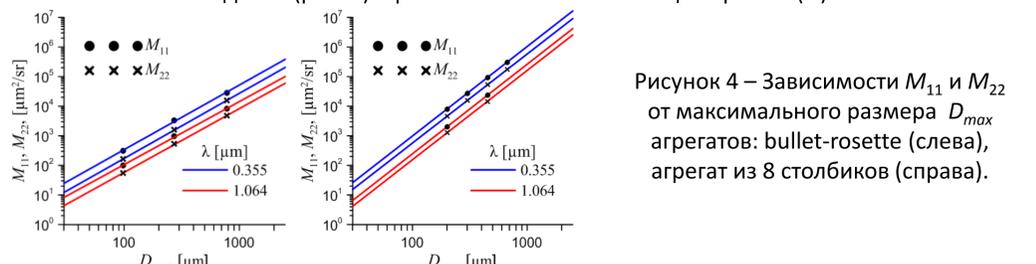


Рисунок 4 – Зависимости M_{11} и M_{22} от максимального размера D_{max} агрегатов: bullet-rosette (слева), агрегат из 8 столбиков (справа).

ВЫВОДЫ

Результаты показывают, что M_{11}/G_A слабо меняется в зависимости от N , за исключением случая компактных агрегатов пластинок.

[1] Mitchell D. L., Garnier A., Pelon J., Erfani E. CALIPSO (IIR-CALIOIP) retrievals of cirrus cloud ice-particle concentrations // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18, N. 23, P. 17325-17354.
[2] Heymsfield A. J., Bansemir A., Field P. R. Observations and parameterization of particle size distributions in deep tropical cirrus and stratiform precipitating clouds: Results from in-situ observations in TRMM field campaigns. // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. P. 3457-3491.
[3] Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. Backscattering Mueller matrix for quasihorizontally oriented ice plates of cirrus clouds: application to CALIPSO signals // Opt. Express. 2012. V. 20(27). P. 28222-28233.
[4] Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Borovoi A.G. Light scattering matrix for atmospheric ice aggregates of cirrus clouds within geometrical optics approximation // Proc. SPIE 11916, 119163Q (2021).
[5] Fridlind A., Atlas R., van Diedenhoven B., Um J., McFarquhar G., Ackerman A., Mayer E., Lawson P. Derivation of physical and optical properties of midlatitude cirrus ice crystals for a size-resolved cloud microphysics model // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 7251-7283.