

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Д.Н. Тимофеев, В.А. Шишко, Н.В. Кустова

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия,
tdn@iao.ru

INVESTIGATING THE ATMOSPHERIC ICE PARTICLES OF COMPLEX SHAPE WITHIN THE PHYSICAL OPTICS APPROXIMATION

D.N. Timofeev, V.A. Shishko, N.V. Kustova

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

Аннотация. В данной работе представлены матрицы рассеяния света для атмосферных гексагональных ледяных агрегатах, характерных для перистых облаков. Для данного исследования была выбрана форма «bullet», в качестве базовой частицы для агрегатов. Исследуемые агрегаты состоят из одинаковых частиц, расположенных ортогонально друг к другу. Для расчета был создан набор, состоящий из 3D моделей агрегатов с разным количеством частиц (от 1 до 6). Матрицы рассеяния света рассчитаны для случая произвольной пространственной ориентации частиц в рамках приближения геометрической и физической оптики. Установлено, что элементы матрицы рассеяния света для агрегатов могут быть получены из величин тех же элементов, что и у одиночных частиц, из которых они состоят.

Ключевые слова: рассеяние света, перистые облака, ледяные частицы, агрегаты, физическая оптика.

Abstract. This work presents the light-scattering matrices of atmospheric-aggregated hexagonal ice particles that appear in cirrus clouds. For this study the «bullet» shape of the base particle for aggregates was chosen. The aggregates consist of the same particles oriented orthogonal to each other. The set of 3D aggregate models with a different number of particles (from 1 to 6) was created for calculation. The light scattering matrices were calculated for the case of arbitrary spatial orientation of particles within the geometrical and optics physical approximation. It was found that the light-scattering matrix elements for aggregates can be obtained from the same elements of singular particles they consist of.

Keywords: light scattering, cirrus clouds, ice particles, aggregates, physical optics

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные ледяные частицы, которые обычно появляются в перистых облаках, являются важным компонентом атмосферных исследований, таких как дистанционное зондирование и перенос излучения. В общем случае, они находятся на высотах 7–11 км, имеют гексагональную форму и размеры в диапазоне 10–1000 мкм. Плотность частиц в перистых облаках мала по сравнению с облаками других типов, но они обладают трудно прогнозируемыми рассеивающими свойствами из-за специфической геометрии частиц. В то же время многие особенности задачи рассеяния света на ледяных частицах еще мало изучены [Berry, Mace, 2014].

Существуют прямые и дистанционные методы изучения перистых облаков. Поскольку прямые методы ограничены во времени и финансовых ресурсах, на практике более полезными являются дистанционные методы, такие как зондирование атмосферы с помощью лидаров. Для интерпретации лидарных данных необходимо решить прямую задачу рассеяния света монохроматического лазерного излучения. Для этого необходима база данных матриц рассеяния света (M) и соответствующих микрофизических свойств облаков. Для решения этой задачи обычно используют численные методы [Yurkin, Moskalensky, 2021; Sun et al., 2017].

Частицы перистых облаков по микрофизической структуре можно разделить на два типа: одиночные частицы (гексагональные столбики, пластинки, пули и т.д.) и агрегаты, состоящие из нескольких частиц. По данным полевых измерений, агрегаты

составляют значительную часть частиц перистых облаков [Um et al., 2015]. Однако соответствующая информация об их рассеивающих свойствах отсутствует в существующих базах данных. Кроме того, ожидается, что рассеяние света агрегатами, состоящими из одинаковых кристаллов, и рассеяние света одиночным кристаллом в облаке происходит схожим образом. В этом случае можно рассчитать M агрегатов, используя зависимость элементов M от количества частиц в агрегатах. Однако распределение света от отдельной частицы может отличаться от распределения света в совокупности.

Цель исследования — определить зависимость элементов матрицы рассеяния от числа и расположения частиц в агрегате.

Одной из характерных для перистых облаков агрегатных частиц является «bullet-rosette». Данный агрегат может состоять из различного количества одиночных частиц типа «bullet» («пуля») (см. рис. 1). Для агрегатов типа «bullet-rosette» с количеством частиц (N) от 1 до 6 (при $N = 1$ агрегат является одиночной «пулей») были рассчитаны матрицы рассеяния света.

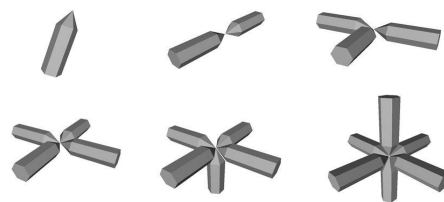


Рис. 1. Геометрические модели агрегата типа «bullet-rosette» с N от 1 до 6

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

Для вышеописанных агрегатов были рассчитаны матрицы M для углов рассеяния $0-180^\circ$ с шагом 1° в приближении геометрической оптики с показателем преломления льда 1,3116 (соответствует длине волны излучения 0,532 мкм) [Warren, Brandt, 2008]. Расчёт был проведён для более 1 млн случая пространственной ориентации для каждого агрегата. Для расчетов использовался модифицированный алгоритм трассировки пучков [Timofeev et al., 2018]. В качестве результатов на рис. 2

представлены зависимости элементов матрицы ($M_{11}, M_{22}, M_{12}, M_{14}$) от угла рассеяния (θ). Значения M_{22}, M_{12}, M_{14} для удобства нормированы на M_{11} (т.е. $m_{22} = M_{22}/M_{11}$ и т.д.).

Наиболее информативным параметром для сравнения является M_{11} , разделенный на среднюю геометрическую площадь тени (G_A). Эту площадь можно рассчитать, используя геометрию агрегата, не решая задачу светорассеяния. Результат показывает, что M_{11}/G_A и элементы матрицы очень незначительно меняется с N для агрегата.

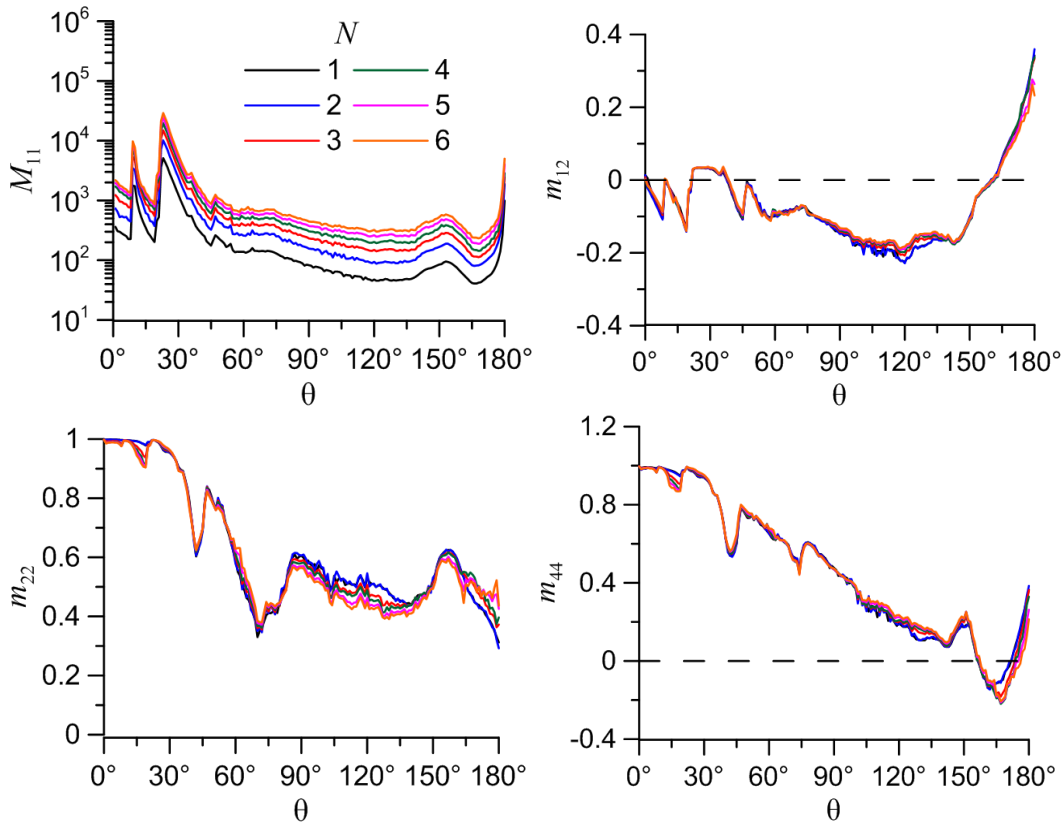


Рис. 2. Зависимость элементов матрицы рассеяния света от угла рассеяния (θ) для исследуемых агрегатов

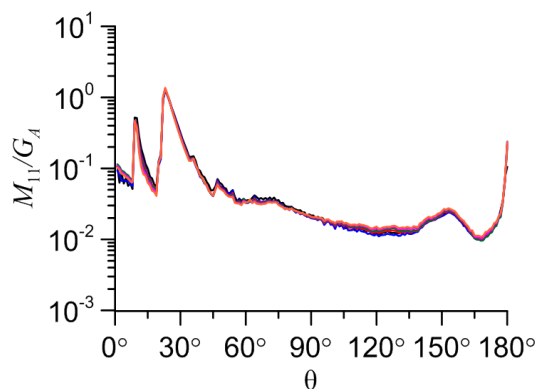


Рис. 3. Зависимость M_{11}/G_A от θ агрегатов типа «bullet-rossette»

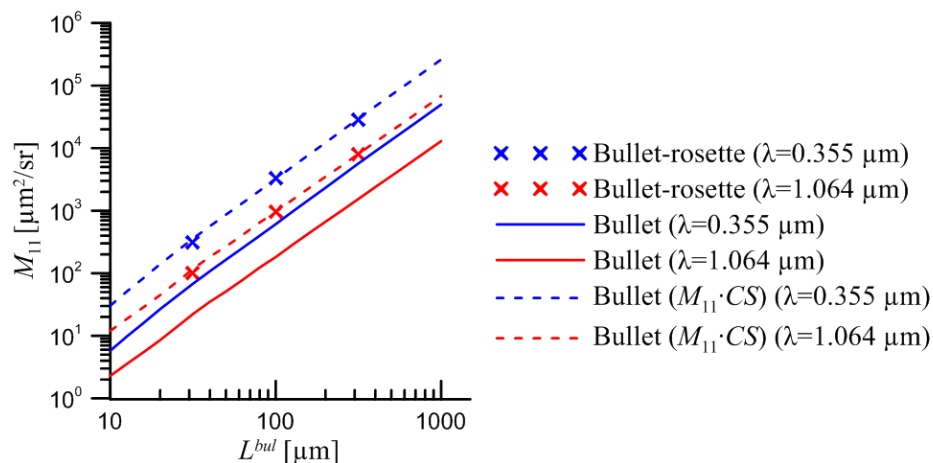


Рис. 4. Зависимость M_{11} от L^{bul} для агрегата типа «bullet-rosette» и одиночной частицы

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

Расчитав в M в направлении рассеяния 180° в приближении физической оптики, мы можем сравнить M_{11} для агрегата типа «bullet-rosette» (6 частиц) и для одиночной пули, используя существующую базу данных. Поскольку размеры агрегата одиночной частицы отличаются, мы используем зависимость M_{11} от длины одиночной частицы (L^{bul}). Затем M_{11} для одиночной частицы умножалось на полное сечение рассеяния агрегата. Результат представлен на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты матрицы рассеяния света в приближении геометрической и физической оптики для агрегатов, состоящих частиц типа «bullet», показывают квазилинейные зависимости первого элемента матрицы светорассеяния (M_{11}) от числа частиц (N). Величину M_{11} для агрегата можно получить умножением M_{11} для одиночной пули на полное сечение рассеяния для агрегата в приближении как геометрической, так и физической оптики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Berry E., Mace G.G. Cloud properties and radiative effects of the Asian summer monsoon derived from A-Train data // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119(15). P. 9492–9508.
- Yurkin M.A., Moskalensky A.E. Open-source implementation of the discrete-dipole approximation for a scatterer in an absorbing host medium // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 12167.
- Sun B., Yang P., Kattawar G.W., Zhang X. Physical-geometric optics method for large size faceted particles // *Opt. Express.* 2017. V. 25(20). P. 24044–24060.
- Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P. et al. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 3933–3956.
- Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation // *J. Geophys. Res.* 2008. V. D14220. P. 113.
- Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V. Modified Beam-Splitting 1 (MBS-1) Algorithm for Solving the Problem of Light Scattering by Nonconvex Atmospheric Ice Particles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31(06). P. 642–649.