

РАССЕЯНИЕ СВЕТА АТМОСФЕРНЫМИ МНОГОГРАННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

И.В. Ткачев, А.В. Коношонкин, В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, Н.В. Кустова

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

LIGHT SCATTERING BY ATMOSPHERIC POLYHEDRAL CRYSTALS

I.V. Tkachev, A.V. Konoshonkin, V.A. Shishko, D.N. Timofeev, N.V. Kustova

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

Аннотация. Решение проблемы рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах имеет важное значение для анализа результатов лазерного зондирования атмосферы в различных точках мира, включая г. Томск. В настоящем исследовании мы представляем результаты расчётов матриц обратного рассеяния света для атмосферных ледяных кристаллов произвольной формы, имеющих 15, 20 и 40 граней и размеры от 10 до 300 мкм в рамках приближения физической оптики. Были проведены расчёты для частиц с хаотической пространственной ориентацией при однократном рассеянии света на длинах волн 0,532 мкм и 1,064 мкм. Результаты показали незначительные отличия в оптических свойствах исследуемых частиц с разным количеством граней. Выяснили, что оптические характеристики эталонной частицы из базы данных ИОА СО РАН соответствуют рассматриваемому распределению. Таким образом, исследование подтверждает целесообразность использования данной базы данных для анализа широкого спектра частиц от 15 до 40 граней.

Ключевые слова: рассеяние света, поглощение, атмосферные ледяные частицы, перистые облака, лазерное зондирование, лидар.

Abstract. Solving the light scattering problem on atmospheric ice crystals is important for analyzing the results of laser sensing of the atmosphere in various parts of the world, including Tomsk. In this study, we present the results of calculation of backscattering matrices for atmospheric ice crystals of arbitrary shape having 15, 20 and 40 facets and sizes from 10 to 300 microns within the physical optics approximation. Calculations were done for particles with a chaotic spatial orientation with a single scattering of light at wavelengths of 0.532 microns and 1.064 microns. The results show slight differences in the optical properties of the studied particles with different numbers of facets. It has been found out that the optical characteristics of the reference particle from the IOA SB RAS database correspond to the distribution under consideration. Thus, the study confirms the feasibility of using this database to analyze a wide range of particles from 15 to 40 facets.

Keywords: light scattering, absorption, atmospheric ice crystals, cirrus clouds, laser sensing, lidar.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к перистым облакам среди научного сообщества обусловлен, с одной стороны, их большим влиянием на климат нашей планеты [Baker, 1997; Wendling et al., 1979; Liou, 1986], с другой — необходимостью их учета при интерпретации данных дистанционного зондирования Земли из космоса [Zabukovec et al, 2021]. Несмотря на длительные попытки разрешить проблему рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков, решение до сих пор не найдено, в отличие от жидкокапельных облаков, для которых решение можно легко получить в рамках теории Лоренца-Ми [Wiscombe, 1980].

Для решения данной задачи была разработана программа и описан метод на основе принципов физической оптики, созданный в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) [Shishko, 2019]. Этот метод был выбран для создания оптической модели ледяных частиц перистых облаков, поскольку он применим для частиц, размеры которых превышают длину волны падающего излучения.

С использованием метода физической оптики была создана база данных матриц обратного рассеяния света ИОА СО РАН [Ткачев и др., 2021] (далее БД), однако в ней до сих пор отсутствуют определенные типы частиц, встречающиеся на снимках, сделанных в полевых экспедициях. К ним относятся частицы произвольной формы [Shishko, 2019]. Для построения БД было решено использовать частицу со

средними оптическими характеристиками, описанную в работе [Shishko, 2019], в качестве эталона (рис.1). Однако выбор этой частицы был основан на оптических характеристиках, полученных в геометрическом приближении, поэтому необходимо сравнить оптические характеристики эталонной частицы и множества других частиц произвольной формы, но уже рассчитанных в рамках физического приближения. Кроме того, не было проведено исследование о влиянии количества граней у частиц произвольной формы на оптические характеристики обратного рассеяния света. Все это необходимо для проверки имеющихся в БД оптических характеристик частиц неправильной формы.

Таким образом, целью данной работы является расчет оптических характеристик множества частиц произвольной формы в рамках физического приближения и их сравнение с характеристиками эталонной частицы из БД ИОА СО РАН, а также анализ влияния количества граней у частиц на оптические характеристики обратного рассеяния света.

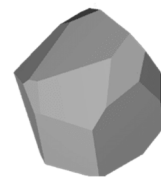


Рис. 1. Геометрическая форма эталонной частицы, используемая в БД в качестве произвольной формы

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования были разработаны трехмерные модели частиц (2000 шт.), характеристики которых были определены случайным образом.

Для создания модели частицы произвольной формы с 15 гранями в 2018 г. был использован определенный алгоритм. Сначала на определенном расстоянии от центра координат было построено несколько плоскостей, выбранных случайным образом. Затем частица была определена как набор точек пространства между начальной точкой и построенными плоскостями. Расстояние до каждой плоскости было выбрано случайным образом из заранее заданного диапазона. Этот метод позволил создать набор частиц с 15 гранями.

Для генерации частиц с 20 и 40 гранями был использован усовершенствованный алгоритм. Была выбрана центральная точка, вокруг которой строились две сферы с различными радиусами. Затем между этими сферами случайным образом были выбраны точки в пространстве, количество которых соответствовало необходимому числу граней. После этого проводились линии от центральной точки до остальных точек, которые были перпендикулярны к плоскостям, проходящим через эти точки. Таким образом пересечения всех плоскостей образовывались плоскости частицы. В результате случайным образом были выбраны частицы с 20 и 40 гранями, в количестве 140 штук для каждого типа частиц.

В качестве примера на рис. 2 представлена геометрическая форма некоторых частиц с разным количеством граней $N = 15$, $N = 20$, $N = 40$.

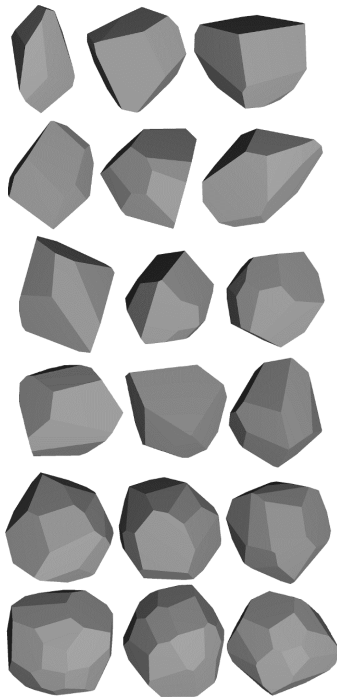


Рис. 2. Геометрические формы произвольных частиц, используемых в расчётах, с разным количеством граней (N), слева направо: $N = 15$, $N = 20$, $N = 40$

На практике значимыми являются измеряемые лидаром оптические параметры, а именно:

спектральные (χ), деполаризационные (δ) и лидарные (η) отношения. На рис. 3 представлены:

а) Зависимость спектрального отношения (длины волн 1,064/0,532) от размера частицы D_{\max} ,

б) Диаграмма рассеяния для спектрального (длины волн 1,064/0,532) и деполаризационного отношений (0,532 мкм) для различных форм ледяных частиц,

в) Диаграмма рассеяния для лидарного и деполаризационного отношений (длина волны 0,532 мкм) для различных форм ледяных частиц.

Из рис. 3 видно, что такой подход позволяет различить гексагональные частицы от частиц произвольной формы и дроксталлов, а также показывает, что частицы произвольной формы с разным числом граней располагаются в той же области, что и эталонная частица, что подтверждает возможность её использования в качестве эталона для банка данных.

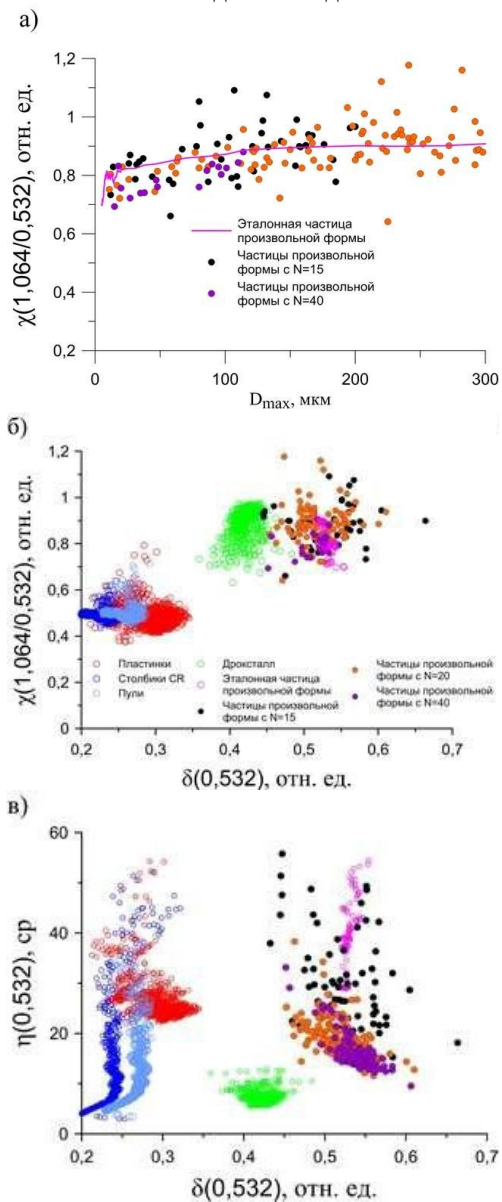


Рис. 3. Зависимости спектрального отношения (χ) от размера частицы D_{\max} ; χ от линейного деполаризационного отношения (δ) и лидарного отношения (η) от δ . Обозначения 1,064 и 0,532 соответствуют длинам волн падающего излучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования было проведено сравнение набора частиц из 15, 20 и 40 граней с эталонной частицей. Анализ показал, что частицы из различных наборов плотно приближаются к графику эталонной частицы, что подтверждает правильность выбора эталона для банка данных. График линейного деполяризационного отношения демонстрирует равномерное распределение частиц вокруг эталонной частицы независимо от количества граней. Такие результаты подтверждают возможность интерпретации данных лазерного зондирования атмосферы с использованием банка данных для эталонной частицы. Диаграммы спектрального отношения и лидарного отношения от линейного деполяризационного отношения позволяют определить тип частицы независимо от ее размеров без необходимости знания ее формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 03. С. 199–206.

Baker B.M. Cloud microphysics and climate // Science. 1997. V. 276. P. 1072–1078.

Zbukovec A., Ancellet G., Penner I.E., Arshinov M., Kozlov V., Pelon J., Paris J.-D., Kokhanenko G., Balin Y.S., Chernov D., Belan B.D. Characterization of aerosol sources and optical properties in siberia using airborne and spaceborne observations // Atmosphere. 2021. V. 12 (2), art. no. 244.

Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // Mon. Wea. Rev. 1986. V. 114, N 6. P. 1167–1199.

Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Borovoi A.G. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27, N 23. P. 32984–32993.

Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals // Appl. Opt. 1979. V. 18. P. 2663–2671.

Wiscombe W.J. Improved Mie scattering algorithms // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 1505–1509.