

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

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

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

RETRIEVAL OF MICROPHYSICAL PARAMETERS OF CIRRUS CLOUDS FROM REMOTE SENSING DATA

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

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

Аннотация. Представлено решение задачи рассеяния света на хаотически ориентированных ледяных атмосферных кристаллах (гексагональные пластинки и столбики, частицы неправильной формы) размерами от 10 до 1000 мкм. Решение получено в виде банка данных матриц обратного рассеяния света и предназначено для интерпретации данных наземных и космических лидаров, в частности лидара EarthCare. Расчеты выполнены в рамках метода физической оптики для наиболее часто используемых в задачах лазерного зондирования длин волн: 0.355, 0.532 и 1.064 мкм, а также для длин волн ближнего ИК-диапазона (1.55, 2 и 2.15 мкм). На основе рассчитанных матриц обратного рассеяния света построены интенсивность и деполаризационное отношение для представленных типов ледяных частиц.

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

Abstract. We present the solution to the problem of light scattering by randomly oriented atmospheric ice crystals (hexagonal plates and columns, irregularly shaped particles) with sizes from 10 to 1000 μm . The solution was obtained as a data bank of backscattering matrices and is aimed for interpreting data of ground-based and space-borne lidars, in particular, the ATLID of the EarthCare. The calculations were performed within the framework of the physical optics approximation for the wavelengths most frequently used in problems of laser sounding (0.355, 0.532, 1.064 μm) and for the wavelengths of the near-IR range (1.55, 2, 2.15 μm). Based on the calculated light backscattering matrices, the intensity and depolarization ratio for the presented types of ice particles are constructed.

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

ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес к перистым облакам обусловлен, с одной стороны, их значительным влиянием на климат нашей планеты [Wendling et al., 1979; Liou, 1986; Baker, 1997], с другой — необходимостью их учета при интерпретации данных дистанционного зондирования Земли из космоса [Zabukovec et al., 2021]. Несмотря на многолетние попытки решить задачу рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков, решение до сих пор не получено, в отличие от решения для жидкокапельных облаков, которое легко построить в рамках теории Лоренца—Ми [Wiscombe, 1980].

Для решения данной проблемы была составлена программа, а также использован метод, основанный на принципах физической оптики, разработанный в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) [Shishko, 2019]. Поскольку данный метод применим для частиц, размеры которых превышают длину волны падающего излучения, именно он был выбран для составления оптической модели ледяных частиц перистых облаков.

В задачах лазерного зондирования перистых облаков чаще всего используются длины волн Nd:YAG-лазера: $\lambda=0.355$, 0.532 и 1.064 мкм. Однако в последнее время появились результаты дистанционного зондирования перистых облаков в ИК-области, поэтому было необходимо провести расчеты для $\lambda=1.55$, 2 и 2.15 мкм.

Кроме того, большую практическую значимость в настоящее время приобретает лазерное зондиро-

вание пылевых образований, в частности переноса песков пустыни Сахары в южную Америку. Поэтому в расчеты были добавлены показатели преломлений для пылевого аэрозоля.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты решения задачи рассеяния света для трех типов хаотически ориентированных ледяных частиц (гексагональные пластинки и столбики, а также частицы произвольной формы) представлены на рис. 1–3.

Благодаря использованию вычислительных ресурсов кластера ИОА СО РАН удалось получить расчет с мелким интервалом разбиения по размеру частиц, в частности, для столбиков размером от 5 до 100 мкм было рассчитано 948 размеров, а на интервале размеров от 100 до 1000 мкм были рассчитаны окрестности пяти узловых точек (160, 250, 400, 630 и 1000 мкм). Видно, что в действительности в решении для наиболее часто используемых в задачах лазерного зондирования длин волн $\lambda=0.355$, 0.532 и 1.064 мкм содержатся очень небольшие осцилляции, заметные лишь для $\lambda=1.064$ мкм. При этом для $\lambda=1.55$ и 2 мкм величина этих осцилляции заметно больше. На рис. 1 видно также существенное влияние поглощения для крупных частиц пыли, что приводит к резкому отклонению зависимости от степенного закона (отклонению от прямой на графике).

Немного иначе выглядят результаты для гексагональных ледяных пластинок (рис. 2). Видно, что даже для $\lambda=0.355$, 0.532 и 1.064 мкм в решении наблюда-

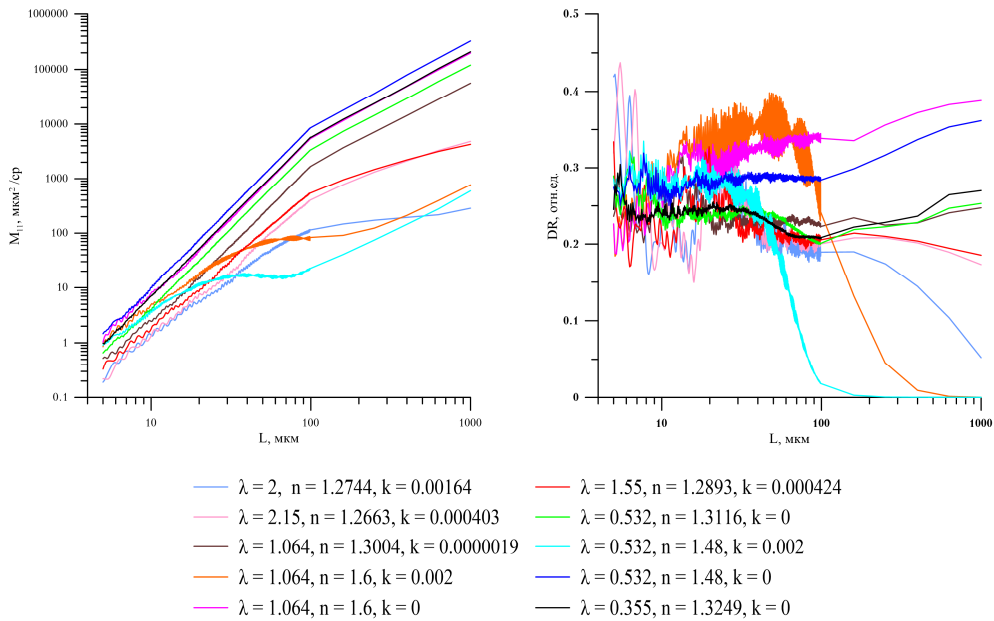


Рис. 1. Элемент M_{11} матрицы Мюллера (слева) и линейное деполаризационное отношение DR (справа), построенные для гексагональных столбиков в зависимости от размера частиц

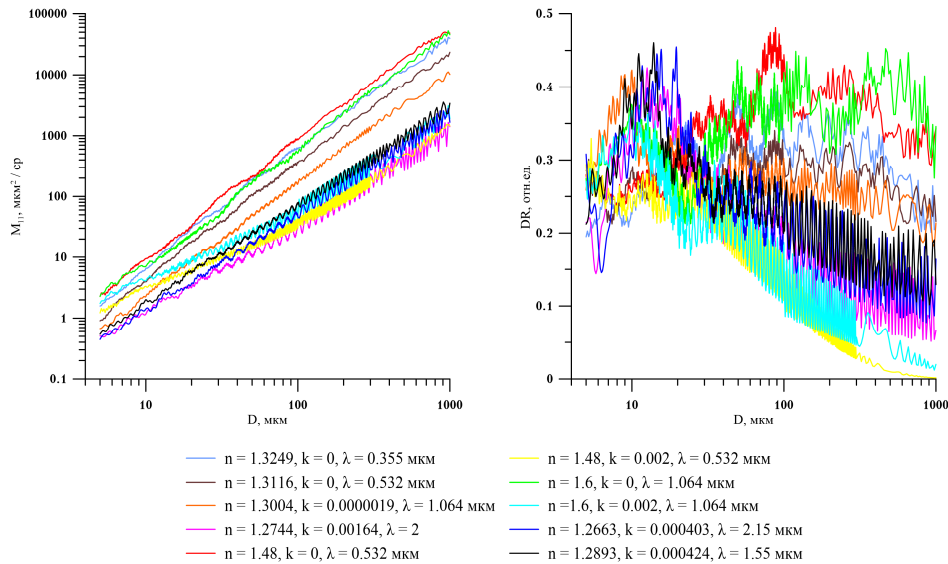


Рис. 2. Элемент M_{11} матрицы Мюллера (слева) и линейное деполаризационное отношение DR (справа), построенные для гексагональных пластинок в зависимости от размера частиц

ются осцилляции. При этом есть как высокочастотные осцилляции, связанные с когерентными эффектами, так и низкочастотные, связанные с эффектом волновода. В диапазоне от 5 до 100 мкм было рассчитано 949 размеров, и 98 расчетов было проведено в диапазоне от 100 до 1000 мкм.

Из результатов, полученных для частиц неправильной формы (рис. 3), видно, что, как и у гексагональных столбиков, поведение элементов матрицы рассеяния света подчиняется степенным законам для случаев, когда поглощение незначительно. Важно заметить, что в расчете практически отсутствуют осцилляции в деполаризационном отношении, в диапазоне от 10 до 100 мкм было рассчитано 88 размеров, а от 100 до 300 мкм — 9 размеров.

Результаты расчетов также позволяют сделать выводы о влиянии вещественной и мнимой частей

показателя преломления на решение задачи. Так, увеличение вещественной части показателя преломления приводит к значительному увеличению значения элемента M_{11} , но не приводит к изменению угла наклона степенной зависимости, что хорошо видно для $\lambda=0.532$ и 1.064 мкм при изменении вещественной части показателя преломления с 1.3116 на 1.48 и с 1.3004 на 1.6 соответственно. Однако увеличение мнимой части показателя преломления до характерных для пылевого аэрозоля значений $0.002i$ приводит к резкому изменению зависимости M_{11} от размера на всем диапазоне расчетов (см. рис. 1).

Деполаризационное отношение также является достаточно гладкой функцией ввиду отсутствия интерференционных осцилляций и эффекта волновода у частиц произвольной формы (рис. 3). Учет влияния поглощения приводит к значительному уменьшению

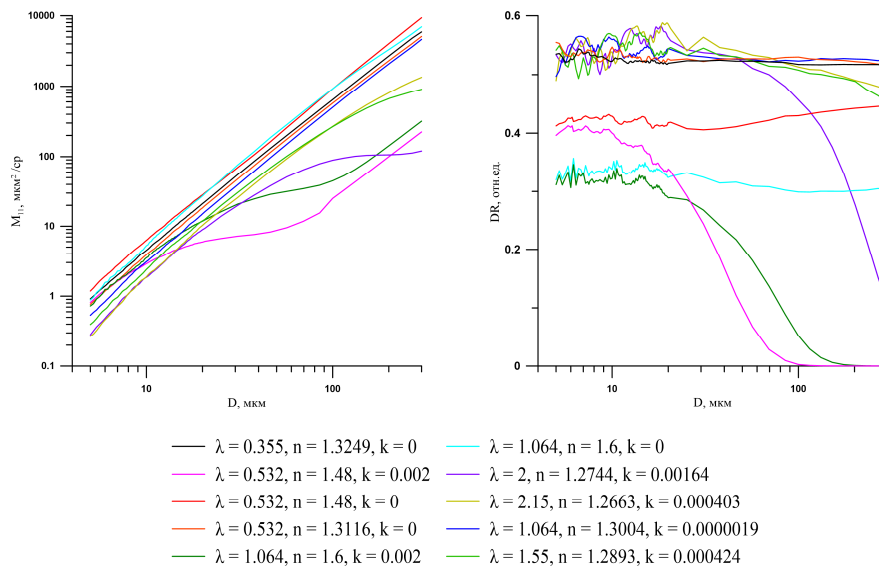


Рис. 3. Элемент M_{11} матрицы Мюллера (слева) и линейное деполаризационное отношение DR (справа), построенные для частиц произвольной формы в зависимости от размера частиц

деполаризационного отношения, вплоть до нуля, при величине мнимой части показателя преломления более $0.002i$ и размерах частицы более 100 мкм, что явно указывает на преобладание внешней зеркальной компоненты в рассеянном излучении.

Поскольку частицы произвольной формы являются приемлемой моделью для пылевого аэрозоля, можно сделать вывод, что величина деполаризационного отношения может быть использована в качестве критерия для создания алгоритмов восстановления размеров частиц пылевого аэрозоля по данным поляризационного лазерного зондирования космическим лидаром EarthCARE, планируемому к запуску.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате был составлен банк данных матриц обратного рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков и получены оптические модели для частицы произвольной формы размерами от 10 до 300 мкм, а также для гексагональных столбиков и пластинок размерами от 10 до 1000 мкм.

Была рассчитана основная используемая в задачах лазерного зондирования характеристика — деполаризационное отношение. Показано, что для частиц произвольной формы деполаризационное отношение находится в диапазоне 0–0.6 отн. ед., для столбиков — в диапазоне 0–0.45 отн. ед., для пластинок — 0–0.5 отн. ед.

Решение задачи рассеяния в оптическом и микроволновом диапазонах излучения для типичных форм ледяных кристаллов перистых облаков и построение

банка данных выполнены при финансовой поддержке РФФ № 21-77-00083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baker B.M. Cloud microphysics and climate. *Science*. 1997. Vol. 276. P. 1072–1078.
- 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. 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.
- Wiscombe W.J. Improved Mie scattering algorithms. *Appl. Opt.* 1980. Vol. 19. P. 1505–1509.
- Zbukovec A., Ancellet G., Penner I.E., et al. Characterization of aerosol sources and optical properties in siberia using airborne and spaceborne observations. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, no. 2. Art. no. 244.