БАНК ДАННЫХ МАТРИЦ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ЛЕДЯНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЧАСТИЦ РАЗМЕРАМИ 10—100 МКМ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

И.В. Ткачев^{1,2}, Д.Н. Тимофеев¹, Н.В. Кустова¹, А.В. Коношонкин^{1,2}

¹ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия ² НИ Томский государственный университет, Томск, Россия E-mail: sva@iao.ru; tdn@iao.ru; kustova@iao.ru; sasha_tvo@iao.ru; borovoi@iao.ru

Аннотация. Показано решение задачи рассеяния света на гексагональных атмосферных пластинках и столбиках, а также частицах неправильной формы. Решение представлено в виде банка данных матриц обратного рассеяния света и предназначено для интерпретации данных наземных и космических лидаров. Решение получено для наиболее часто используемых в задачах лазерного зондирования длин волн: 0,355; 0,532; 1,064 мкм; а также для длин волн ближнего ИК-диапазона: 1,55; 2 и 2,15 мкм — в рамках метода физической оптики. На основе рассчитанных матриц обратного рассеяния света получены значения спектрального и линейного деполяризационного отношений.

Ключевые слова: рассеяние света, поглощение, ледяные частицы, перистые облака.

DATABANK OF LIGHT BACKSCATTERING MATRICES FOR ICE ATMOSPHERIC PARTICLES WITH SIZES OF 10—100 MICRONS FOR F LASER SOUNDING OF THE ATMOSPHERE

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

Abstract. The paper presents a solution to the problem of light scattering by hexagonal atmospheric plates and columns, as well as irregularly shaped particles. The solution is presented as the databank of Mueller matrices and is intended for interpretation of data from ground-based and space-borne lidars. The solution is obtained for typical wavelengths used in laser sensing problems: 0.355; 0.532; 1.064; as well as for the wavelengths of the near infrared range: 1.55; 2 and 2.15 μ m. The solution was obtained using the physical optics method. Based on the calculated Mueller matrices, the color and linear depolarization ratios were obtained.

Keywords: light scattering, absorption, ice particles, cirrus clouds.

Введение

Научный интерес к перистым облакам обусловлен, с одной стороны, их значительным влиянием на климат нашей планеты [1], с другой — необходимостью их учета при интерпретации данных дистанционного зондирования

[©] Ткачев И.В., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В., 2021

Земли из космоса. Несмотря на многолетнюю историю исследований, задача рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков (в отличие от жидкокапельных облаков) до сих пор не решена.

В решении названной задачи можно выделить два предельных случая: идеальные гексагональные частицы и частицы случайной формы. Но эти две модели не могут полностью описать данные экспериментальных наблюдений. Более достоверные результаты могут быть получены, если предположить, что облако состоит из смеси частиц, которые имеют различную форму.

Поскольку ледяные кристаллы перистых облаков имеют форму гексагональной призмы, для решения задачи рассеяния света вполне реалистичным будет предположение о наличии хаотической ориентации этих частиц в облаке. Задача рассеяния света на таких объектах, вообще говоря, может решаться в приближении как физической [2], так и геометрической оптики, а также точными численными методами [3]. В данной работе мы уделим внимание и частицам неправильной формы. Решение будем строить в рамках метода физической оптики.

Основная трудность решения данной задачи заключается в том, что даже с применением эффективного метода физической оптики она все еще требует колоссальных вычислительных ресурсов.

В работе представлены результаты решения задачи рассеяния света для трех типов частиц: гексагональные пластинки, столбики и частицы неправильной формы. Размеры частиц варьировались в диапазоне от 10 до 100 мкм. Важно отметить, что поскольку решение строилось в рамках метода физической оптики, который реализован на основе алгоритма трассировки пучков, то необходимо было уделить должное внимание исследованию влияния количества учитываемых в рамках метода оптических пучков на решение.

Результаты численного счета

Количество пучков ограничивалось выбором максимального количества столкновений пучка с гранями частицы. Чем больше эта величина, тем точнее решение, но тем выше и требование к вычислительным ресурсам. Поскольку сходимость решения как функция от максимального учитываемого количества столкновений зависит и от формы частиц, необходимо провести отдельное исследование каждой из трех их форм. Но при этом сходимость решения слабо зависит от длины волны и показателя преломления, поэтому исследование проводилось только на одной длине волны (0,532 мкм). Анализ полученных результатов показал, что удовлетворительная сходимость расчетов достигается при следующих значениях максимального количества внутренних столкновений пучков: гексагональные пластинки до 50 мкм — 8, столбики и гексагональные пластинки более 50 мкм — 11, частицы случайной формы — 6. Важно отметить, что зависимость от размера для столбиков и пла-

стинок появляется из-за изменения отношения длины частицы к ее ширине. Чем крупнее гексагональная частица, тем больше внутренних столкновений необходимо учитывать. Это объясняется появлением эффекта волновода при удлинении частицы, что особенно характерно для тонких пластинок. При этом у частиц произвольной формы отношение длины частицы к ее ширине не меняется с размером, следовательно, оценка справедлива для любого размера.

Можно отметить, что практический интерес представляют усредненные значения пространственной ориентации частицы и ее физические параметры, которые соответствуют характеристикам конкретного облака. В перистых облаках усреднение происходит по пространственной ориентации частиц и их распределению по размерам. В большинстве задач можно предположить, что частицы в облаке имеют хаотическую пространственную ориентацию. В результате исследования было установлено, что оптимально разбивать диапазоны ориентаций частиц в соотношении 2:1. Однако у частиц произвольной формы симметрия отсутствует, и расчет необходимо проводить на всем диапазоне углов β и γ (180 и 360°).

Было выявлено, что оптимальным значением количества учитываемых пространственных ориентаций для частицы 100 мкм является 331705 (815 ориентаций по углу β , умноженных на 407 по углу γ). Чем крупнее частица, тем меньше угловой размер дифракционных колец, образованных выходящими из него геометрооптическими пучками, следовательно, тем больше количество ориентаций необходимо для корректного вычисления. Полученная оценка 815×407 ориентаций по углам β и γ справедлива и для всех частиц, размер которых меньше 100 мкм. При этом чем больше длина волны падающего излучения, тем больше размер дифракционных колец. Таким образом, для корректного усреднения по ориентациям в работе выбиралась наибольшая верхняя оценка: 815 ориентаций по углу β и 407 по углу γ .

В задачах лазерного зондирования перистых облаков чаще всего используются длины волн лазера $\lambda = 0,355$; 0,532; 1,064 мкм. Для таких целей был построен первый банк данных матриц обратного рассеяния света ИОА СО РАН [4]. Однако в последнее время появились результаты дистанционного зондирования перистых облаков ИК-области, поэтому возникла необходимость дополнить банк данных расчетами для $\lambda = 1,55$; 2 и 2,15 мкм.

Анализ результатов и выводы

В настоящий момент создан банк матриц рассеяния света для интервала 10—100 мкм. Данное исследование проводилось по нескольким причинам: во-первых, необходимость дополнить уже существующий банк данных, а во-вторых, выяснить степень влияния интерференции оптических пучков на решение.

Результаты расчетов для гексагональных столбиков показали, что для $\lambda = 0,355, 0,532$ и 1,064, наиболее часто используемых в задачах лазерного

зондирования, влиянием интерференции на M_{11} можно пренебречь: осцилляции практически незаметны (составляют менее 1% амплитуды) для λ =0,355 мкм во всем диапазоне размеров частиц, для λ =0,532 мкм — при размерах больше 30 мкм и для λ =1,064 мкм — при размерах больше 50 мкм. Также видно, что учет поглощения при λ =1,064 мкм не оказывает заметного влияния во всем диапазоне размеров. Спектральное отношение этих трех длин волн составляет 0,6 и 0,5. Что касается решений в ближней ИК-области (λ =1,55; 2 и 2,15 мкм), здесь осцилляции становятся уже более значительными — до 5% амплитуды для λ =2 мкм. Более того, заметно проявляется влияние поглощения, особенно на λ =2 мкм.

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 наблюдается для λ=0,532 и 1,064 мкм при изменении вещественной части показателя преломления *n* 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 элемента M_{11} от размера во всем диапазоне расчетов. Деполяризационное отношение показывает, что оно оказывается более чувствительным к вещественной части показателя преломления, чем к длине волны падающего излучения. В частности, для $\lambda = 0.532$ и 1.064 мкм с близкими показателями преломления ≈ 1.3 значение деполяризационного отношения примерно равно 0,23 во всем диапазоне размеров. При этом увеличение вещественной части показателя преломления с 1,3 до 1,48 и до 1,6 приводит к значительному росту деполяризационного отношения до 0,27 и 0,31 соответственно. Однако увеличение мнимой части показателя преломления дает незначительный рост деполяризационного отношения для столбиков малых размеров и значительное уменьшение деполяризационного отношения для крупных частиц. Это объясняется уменьшением уголковой компоненты рассеянного света и доминированием зеркальной.

Анализ результатов расчетов для пластинок показывает, что, с одной стороны, для $\lambda = 0,355$ и 0,532 мкм высокочастотными осцилляциями, вызванными интерференционными эффектами, можно пренебречь (их величина не превышает 1,8% по амплитуде), но осцилляции, вызванные эффектом волновода, составляют около 15% и имеют достаточно большой период, который хорошо прослеживается и в деполяризационном отношении. При этом все расчеты, в которых поглощение не оказывает существенного влияния, имеют общий тренд степенной зависимости. Важно отметить, что новые уточненные расчеты привели к увеличению M_{11} для столбиков примерно на 10%. Значение деполяризационного отношения практически не изменилась.

Анализ результатов, полученных для частиц произвольной формы, показал, что в решении отсутствуют интерференционные осцилляции, поскольку у частицы нет плоскопараллельных граней. Для длин волн, на которых отсутствует поглощение, степенные зависимости гладкие. Спектральные отношения для такой частицы близки к 0,8 для длин волн, на которых отсутствует поглощение. Они также имеют сильный нисходящий тренд для длин волн, у которых мнимая часть показателя преломления больше 0,001. Важно отметить, что спектральное отношение для частиц произвольной формы зависит, главным образом, от отношения вещественных частей показателя преломления, нежели от длины волны. Деполяризационное отношение также является достаточно гладкой функцией ввиду отсутствия интерференционных осцилляций и эффекта волновода у таких частиц. Для длин волн с $n \approx 1,3+0$ і деполяризационное отношение лежит в диапазоне 0,5—0,55 для всех рассчитанных размеров частиц. При этом увеличение вещественной части показателя преломления до 1,48 и 1,6 приводит к уменьшению деполяризационного отношения до 0,4 и 0,35 во всем диапазоне размеров. Учет влияния поглощения приводит к значительному уменьшению деполяризационного отношения, вплоть до нуля, при величине мнимой части показателя преломления более 0,002і в размерах частицы более 100 мкм. Что явно указывает на преобладание внешней зеркальной компоненты в рассеянном излучении. Поэтому можно сделать вывод, что величина деполяризационного отношения может быть использована в качестве критерия для создания алгоритмов восстановления размеров частиц пылевого аэрозоля по данным поляризационного лазерного зондирования.

Заключение

В данной работе представлено решение задачи рассеяния света на хаотически ориентированных гексагональных пластинках и столбиках, а также частицах неправильной формы в диапазоне размеров от 10 до 100 мкм для $\lambda = 0,355$; 0,532; 1,064; 1,55; 2; 2,15 мкм. На $\lambda = 0,532$ и 1,064 мкм, помимо показателя преломления льда, использовался показатель преломления пылевого аэрозоля: 1,48+0,002i и 1,6+0,002i соответственно. Установлено, что для хаотически ориентированных гексагональных столбиков размерами более 50 мкм и частиц неправильной формы для $\lambda = 0,355$; 0,532 и 1,064 мкм в решении можно пренебречь влиянием интерференционных осцилляций, поскольку их величина не превышает 1%. Однако для гексагональных пластинок интерференционные осцилляции могут превышать 5%, особенно для длин волн более 1 мкм. Показано, что для частиц размерами до 100 мкм при мнимой части показателя преломления больше 0,004i наблюдаются существенные отклонения от степенного закона.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-45-703010, 20-35-70041, 21-55-53027). Построение отношения радар-лидар выполнено в рамках Государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Liou K.N.* Light scattering by ice clouds in the visible and infrared: A theoretical study // J. Atmos. Sci. 1972. Vol. 29. P. 524—536.

2. Коношонкин А. В., Кустова Н. В., Осипов В. А. и др. Метод физической оптики для решения задачи рассеяния света на кристаллических ледяных частицах: сравнение дифракционных формул // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. С. 830—843.

3. Yurkin M. A., Hoekstra A. G. The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. Vol. 112. P. 2234—2247.

4. Банк данных матриц обратного рассеяния, рассчитанных в рамках физической оптики. URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/ (дата обращения: 15.04.2021).