КОНФЕРЕНЦИЯ С

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В НАПРАВЛЕНИИ РАССЕЯНИЯ НАЗАД ДЛЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО СТОЛБИКА НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ

В.А. Шишко[1,2], А.В. Коношонкин[1,2], Н.В. Кустова[1], А.Г. Боровой[1]

[1]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,*

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

[2] *Национальный исследовательский Томский государственный университет,*

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

sva@iao.ru, sasha_tvo@iao.ru, kustova@iao.ru, borovoi@iao.ru

Ключевые слова: физическая оптика, рассеяние света, гексагональные кристаллы.

В работе проведена оценка вклада основных типов траекторий оптических пучков в направлении рассеяния назад для хаотически ориентированного гексагонального ледяного столбика, прямой двухгранный угол которого искажался в диапазоне от 0°(идеальная частица) до 10°. Расчеты выполнены в приближении физической оптики. Длина волны падающего света принималась равной 0,532 мкм, показатель преломления 1,3116. Показано, что основные типы траекторий вносят вклад порядка 85% в направлении рассеяния назад при малом искажении столбика, а при большом искажении, вклад отобранных траекторий уменьшается до 55%. Полученные выводы позволяют значительно уменьшить время расчета, в случае, когда нет необходимости в высокой точности расчета.

Введение

Решение задачи рассеяния света на кристаллических частицах перистых облаков имеет важное прикладное значение. Численное решение прямой задачи рассеяния используется для улучшения качества прогноза погоды, объяснения оптических явлений наблюдаемых в атмосфере, для исследования загрязнений атмосферы [1-4], а также для интерпретации данных лидарных измерений. Задача усложняется тем, что в атмосфере существует великое разнообразие размеров, форм и типов ледяных частиц, имеющих различную пространственную ориентацию. При этом для задачи интерпретации лидарного сигнала, вообще говоря, необходимо учитывать многократное рассеяние, а также тот факт, что поверхность ледяных кристаллов часто бывает не идеальной [5-8]. Однако при лидарном зондировании перистых облаков вкладом многократного рассеяния можно пренебречь в связи малостью их оптической толщины.

Основным методом для решения задачи рассеяния света на крупных атмосферных ледяных кристаллах в настоящее время является основанный на алгоритме трассировки пучков метод физической оптики [9], который хорошо зарекомендовал себя при решении задачи на идеальных гексагональных кристаллах. Однако искажение формы кристалла приводит к нарушению симметрии частицы, и трудоемкость метода возрастает для гексагональных частиц

в 6 раз. Поэтому остро встает задача оптимизации вычислений, которую можно осуществить, уменьшив количество рассчитываемых оптических пучков в алгоритме трассировки пучков.

В работе проведена оценка вклада основных типов траекторий оптических пучков в направлении рассеяния назад на примере гексагонального ледяного столбика, в зависимости от искажения формы. Используемая модель искажения столбика подробно описана в работе [10]. Расчеты выполнены для хаотически ориентированных гексагональных столбиков высотой 100 и 1000 мкм, диаметром 69,6 и 220,09 мкм соответственно. Длина волны падающего света принималась равной 0,532 мкм, показатель преломления – 1,3116. Искажение формы столбика определялось искажением прямого двухгранного угла на угол ξ в пределах от 0°(идеальная частица) до 10°[10].

Результаты расчетов

На рисунках 1 и 2 показан вклад основных типов траекторий (косые и прямые уголковые траектории, траектории Guasta [11-12] с 3 и 4 внутренними отражениями и зеркальные траектории) в дифференциальное сечение рассеяния в направлении назад. Также показан их суммарный вклад. Все расчеты выполнены в рамках приближения физической оптики.

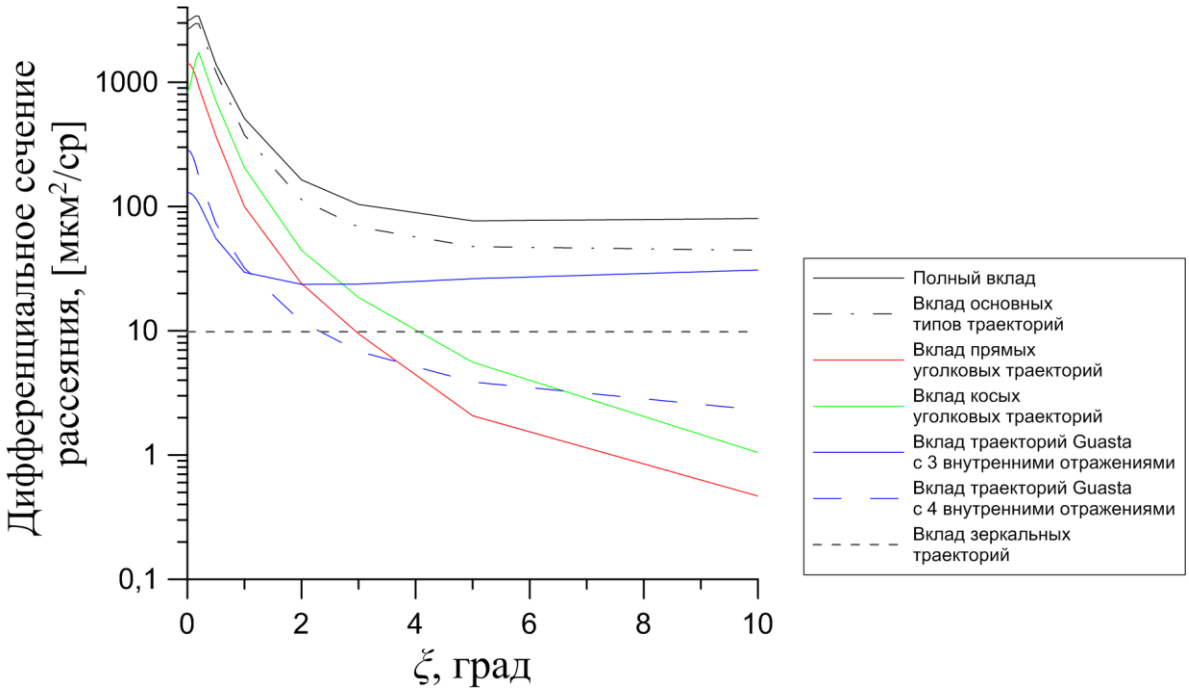

Рисунок 1 – Вклад основных типов траекторий в зависимости от угла искажения столбика ξ. Длина столбика 100 мкм.

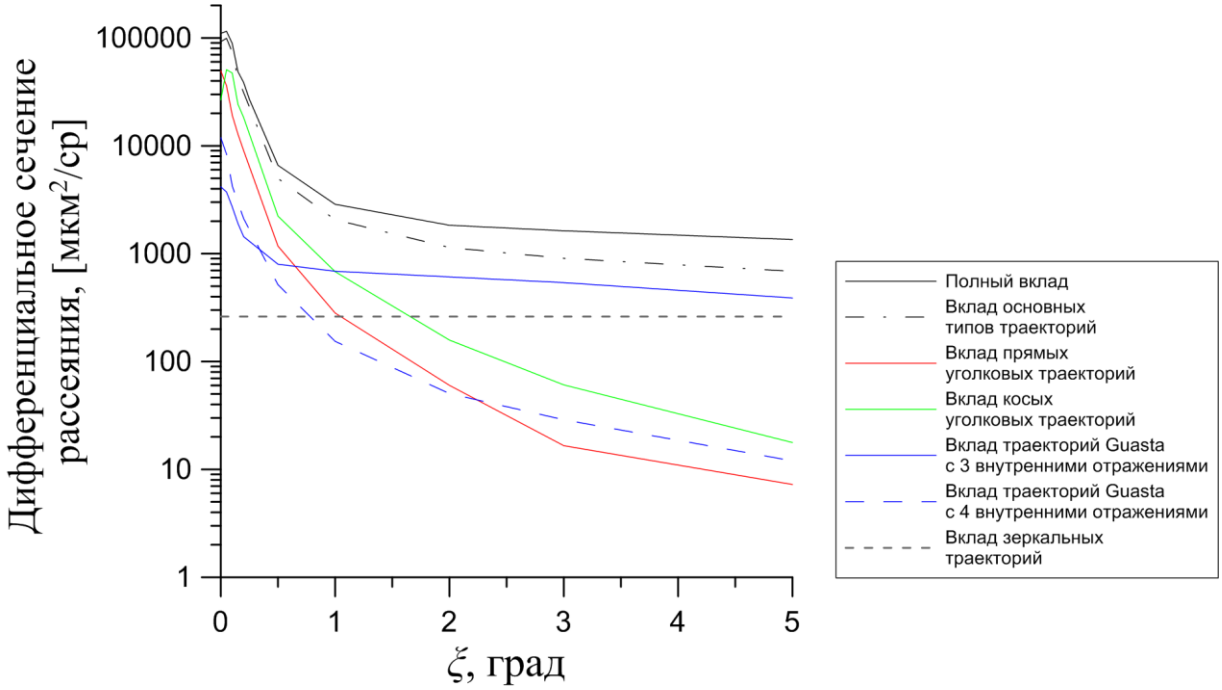

Рисунок 2 – Вклад основных типов траекторий в зависимости от угла искажения столбика ξ. Длина столбика 1000 мкм.

Из рисунка 1 видно, что общий вклад перечисленных пяти типов траекторий достигает порядка 85% при малых углах искажения гексагонального столбика. При углах искажения столбика $\xi > 1°$ общий вклад перечисленных пяти типов траекторий уменьшается и достигает порядка 55% при угле искажения $\xi = 10°$. Недостающий вклад формируют траектории высокого порядка (число внутренних отражений в частице > 4) и квазизеркальные траектории. Рисунок 2 подтверждает выводы, сделанные на основании анализа рисунка 1.

Заключение

Вклад пяти основных типов траекторий (косые и прямые уголковые, Guasta с 3 и 4 внутренними отражениями, а также зеркальные траектории) в дифференциальное сечение рассеяния в направлении назад, при малых углах искажения столбика достигает порядка 85%, а при углах искажения столбика ξ больше 1° общий вклад перечисленных траекторий уменьшается и достигает порядка 55% при угле искажения столбика $\xi = 10°$. Недостающий вклад формируют траектории высокого порядка (число внутренних отражений в частице > 4) и квазизеркальные траектории.

При малых углах искажения гексагонального столбика ($\xi < 2°$) значительное влияние оказывают уголковые траектории, зеркальные траектории и траектории Guasta, а при больших углах искажения ($\xi > 5°$) значительное влияние оказывают траектории Guasta, зеркальные траектории и траектории высокого порядка (число внутренних отражений в частице > 4).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-05-06100а, 16-35-60089_мол_а_дк), Президента РФ (МК-2495.2017.5, НШ-8199.2016.5) и Минобрнауки РФ в рамках «Программы повышения конкурентоспособности ТГУ».

Литература

1. Hong G., Yang P., Gao B.-C., etc. High cloud properties from three years of MODIS Terra and Aqua data over the Tropics // J. Appl. Meteor. Climatol. – 2007. – V. 46. – P. 1840–1856.

2. Junshik Um, Greg M. McFarquhar. Formation of atmospheric halos and applicability of geometric optics for calculating single-scattering properties of hexagonal ice crystals: Impacts of aspect ratio and ice crystal size // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2015. – V. 165. – P. 134–152.

3. Stephens G. L., Tsay S. C., Stackhouse P. W., etc. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback // J. Atmos. Sci. – 1990. – V. 47(14). – P. 1742–1754.

4. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В. и др. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 05. С. 403-411.

5. Chen W.-N., Chiang C.-W., Nee J.-B. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds // Appl. Opt. – 2002. – V. 41(30). – P. 6470–6476.

6. Hu Y., Vaughan M., Liu Z., etc. The depolarization-attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory // Opt. Express. – 2007. – V. 15(9). – P. 5327–5332.

7. Cho H. M., Yang P., Kattawar G. W., etc. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements // Opt. Express. – 2008. – V. 16(6). – P. 3931–3948.

8. Reichardt J., Reichardt S., Lin R.-F., etc. Optical-microphysical cirrus model // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113(D22), D22201.

9. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. V. 146. P. 181-189.

10. Borovoi A., Kustova N., Konoshonkin A. Interference phenomena at backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. – 2015. – V. 23, N 19. – P. 24557 – 24571.

11. Borovoi A.G., Kustova N.V., Oppel U.G. Light backscattering by hexagonal ice crystal particles in the geometrical optics approximation // Opt. Eng. – 2005. – V.44(7), 071208.

12. Del Guasta, M. Simulation of LIDAR returns from pristine and deformed hexagonal ice prisms in cold cirrus by means of "face tracing"// Journal of Geophysical Research Atmospheres. – 2001. –V. 106– P. 12589-12602