

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АНОМАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБЛАКАМИ

*О.В. Шефер, д.-ф.м.н., доц.
М.А. Хайров, студент гр. 8ВМ03,
Томский политехнический университет
E-mail: mah9@tpu.ru*

Введение

Многие оптические эффекты, наблюдаемые в атмосфере вызваны взаимодействием лучистой энергии с крупными преимущественно ориентированными частицами [1]. Аномальное рассеяние является отражением излучения от плоской поверхности кристаллов. Высокоинтенсивное излучение, регистрируемое приемным устройством при лазерном зондировании кристаллических облаков, или потоки ослепляющего света, возникающие в условиях прозрачной атмосферы, как правило, формируются при взаимодействии света с крупными пластинчатыми кристаллами. К настоящему времени результаты исследования оптических свойств мелких и крупных хаотически ориентированных кристаллов широко представлено в научной литературе [1]. Проблема остается не решенной для крупных преимущественно ориентированных в пространстве кристаллов [2]. Сложности связаны с численной реализацией процесса взаимодействия лучистой энергии с ансамблем кристаллов, представляющих полидисперсную среду.

Основы работы

Целью данной работы является создание алгоритма и программного комплекса для реализации численной модели кристаллического облака, представленного ансамблем крупных преимущественно ориентированных пластинок для проведения численных экспериментов и исследования характеристик аномального обратного рассеяния. Выбор такой модели обусловлен следующими факторами: в состав практически всех кристаллических облаков входят пластинчатые кристаллы, в природе они имеют наиболее устойчивое положение в пространстве, пластинчатые кристаллы обеспечивают формирование ряда ярко выраженных оптических эффектов, регистрируемых как визуально, так приемными оптическими устройствами. Данная работа состоит из трех основных этапов: (1) разработка численной модели в виде алгоритма для расчета характеристик аномального обратного рассеяния, (2) реализация комплекса программ с подтверждением надежности результатов расчета, (3) представление результатов численного эксперимента.

- Разработка модели состояла в формализованном представлении коэффициента аномального обратного рассеяния $\beta_{sca} = \int S_{sca}(a) N(a) da$ в алгоритмической форме. Здесь S_{sca} – сечение обратного рассеяния для отдельной частицы, $N(a)$ – плотность распределения частиц по размерам a . Радиус частицы и ее толщина d связаны функциональной зависимостью $d=f(a)$. Сечение обратного рассеяния зависит от размеров частиц, значений комплексного показателя преломления $\eta = n + i\chi$ (n – коэффициент преломления, χ – коэффициент поглощения), длины волны λ , состояния поляризации падающего излучения, положения плоскости преимущественной ориентации ансамбля пластинок относительно направления падения излучения с учетом флаттера частиц. Сечение обратного рассеяния определяется в рамках метода физической оптики.

- Создание комплекса программ заключалось в следующем. Реализована последовательность операций для расчета коэффициента обратного рассеяния. Сформированы базы данных: (а) взаимосвязь $n = n(\lambda)$ и $\chi = \chi(\lambda)$ для частиц, имеющих различную природу вещества, функции распределения частиц по размерам (и их параметры) с учетом функциональной зависимости между основными размерами частиц. Установлены степени свободы по заданию значений фактора формы, угла ориентации частиц и их флаттера, значений длины волны, состояния поляризации излучения, а также показателей поглощения и преломления частиц. Учтены возможности рассмотрения как абсолютных, так и относительных характеристик в зависимости от физико-химических параметров частиц, позволяющие согласовать данные численного и натурального экспериментов при применении различных видов и схем зондирования.

Апробация программного комплекса

На рисунке 1 а и б представлены результаты расчета спектральной зависимости коэффициента аномального обратного рассеяния $\beta_{sca}(\lambda)$. Рассматривался случай горизонтальной ориентации частиц (нормальное расположения пластинок относительно направления падения излучения). Для расчета иллюстрируемых данных использовались: функциональная зависимость между толщиной d и радиусом a пластины $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$, модифицированное гамма распределение частиц по размерам $N(a)$ с параметрами C, μ, am . Здесь C – концентрация частиц в единице объема, am – размер кристалла, соответствующий максимуму функции $N(a)$, μ – характеристика, связанная с дисперсией, $\bar{a} = am(1+1/\mu)$ – средний размер частиц. На рисунке демонстрируются зависимости $\beta_{sca}(\lambda)$ с учетом природы вещества частиц (рис. 1а – для ледяных пластинок [3], на рис. 1б – для пластинок, содержащих продукты сгорания ракетного двигателя [4]). Особенности спектрального хода аномального обратного рассеяния связаны с оптическими свойствами кристаллов (сравните кривые рис. а и б). Достоверность расчетов подтверждена количественным соответствием данных численного и натурного экспериментов (см. кривую 1 рис. 1а и [4]). Различие в величинах β_{sca} при $\lambda=0.694$ мкм менее 1%.

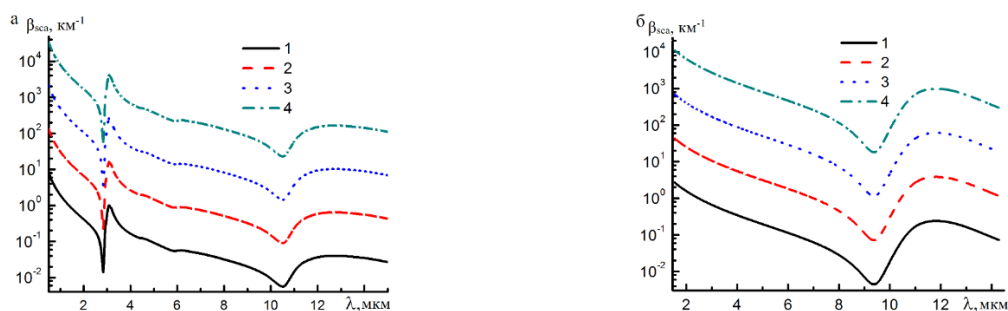


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента аномального обратного рассеяния $\beta_{sca}(\lambda)$ при разных средних размерах \bar{a} и $C=1$ л-1, $\mu=5$, $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$: 1 – $\bar{a}=25$ мкм; 2 – $\bar{a}=50$ мкм, 3 – $\bar{a}=100$ мкм; 4 – $\bar{a}=200$ мкм. а – для ледяных пластинок ($n=n(v)$, $\chi=\chi(v)$ [3]), б – для пластинок, содержащих триоксид диалюминия Al_2O_3 ($n=n(v)$, $\chi=\chi(v)$ [4]).

Заключение

В многокомпонентном кристаллическом облаке даже малое (единицы процентов) содержание крупных преимущественно ориентированных пластинок обеспечивает формирование аномального обратного рассеяния. Предложенный программный комплекс позволяет исследовать особенности этого оптического эффекта при различных физико-химических параметрах пластинок и выявить информативные направления для оценки показателя преломления, размеров и флаттера кристаллов. Установление микрофизических, ориентационных и оптических параметров частиц связано с диагностированием явлений, возмущающих атмосферу.

Список использованных источников

1. Mishchenko M.I. Electromagnetic scattering by particles and particle groups./ Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.– 472 p.
2. Saito M., Yang P.. Oriented ice crystals: a single-scattering property database for applications to lidar and optical phenomenon simulations.// J. Atm. Sci. 2019.– V.76.– P.2635–2652.
3. Wren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation.// Geophys. Res. 2008.– V.113. – P.D14220.
4. Kischkat J., Peters S., Gruska B., and et. al. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride.// Appl. Opt. 2012.– V.51.– P.6789–6798.
5. Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals.// Appl. Meteorol. 1978.– V.17.– P.1220–1224.