

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦАХ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

^{1,2}А.В. Коношонкин, ²Н.В. Кустова, ^{1,2}А.Г. Боровой, ^{1,2}С.В. Насонов, ^{1,2}В.А. Осипов

COMPARING DIFFERENT METHODS OF PHYSICAL OPTICS FOR SOLVING THE PROBLEM OF LIGHT SCATTERING ON CRYSTAL PARTICLES OF CIRRUS CLOUDS

^{1,2}A.V. Konoshonkin, ²N.V. Kustova, ^{1,2}A.G. Borovoi, ^{1,2}S.V. Nasonov, ^{1,2}V.A. Osipov

В докладе представляются новые результаты сравнения разработанного в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН под руководством А.Г. Борового метода физической оптики с разработанным в Kyushu University (Япония) под руководством доктора К. Masuda методом физической оптики GOM2. Проведено сопоставление теоретической основы методов. Предоставлены результаты численного счета на примере тестовой задачи. Для сравнения метода физической оптики с методом GOM2 решалась задача рассеяния света на гексагональной ледяной пластинке диаметром 10 микрон, высота которой варьировалась от 4 до 7 микрон. Показатель преломления $n=1.3117$, длина волны падающего света 0.532 мкм. Частица неподвижна, свет падает со стороны шестиугольной грани. Полученная разными методами зависимость интенсивности рассеянного в направлении строго назад света показала хорошее согласие. Хорошее совпадение подтверждает возможность использования метода физической оптики для решения задачи рассеяния света на частицах с характерным размером больше 30 мкм.

The report presents new results of the comparison of physical optics method developed at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS by Dr. A.G. Borovoi with GOM2 method developed at Kyushu University (Japan) by Dr. K. Masuda. A comparison of the theoretical foundations of methods presents. The results of numerical calculations of the test problem are provided. For comparison the physical optics method to the GOM2 method the problem of light scattering by hexagonal ice plate with a diameter of 10 microns, the height of which ranged from 4 to 7 microns had been solved. The refractive index $n=1.3117$, wavelength of the incident light is 0.532 microns. Particle is fixed, the light falls on the hexagonal face. The intensity in the exact backscattered direction obtained by different methods showed good agreement. The results of the comparison confirm the possibility of using the physical optics method to solve the problem of light scattering by particles with a characteristic size greater than 30 microns.

Три дифракционные формулы

Методы физической оптики отличаются друг от друга дифракционными формулами. В настоящее время не существует единой, общепризнанной теории дифракции, поэтому активно используются три теории: Е – теория дифракции (1), М – теория дифракции (2), (Е, М) – теория дифракции (3).

$$\mathbf{E}_I^{sct}(\mathbf{r}) = ik \frac{e^{ikr}}{2\pi r} \mathbf{s} \times \oint_{S_p^+} (\mathbf{n} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')) e^{-ik\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}'} ds', \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_{II}^{sct}(\mathbf{r}) = -ik \frac{e^{ikr}}{2\pi r} \mathbf{s} \times \left[\mathbf{s} \times \oint_{S_p^+} (\mathbf{n} \times (\mathbf{r}_b \times \mathbf{E}(\mathbf{r}'))) e^{-ik\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}'} ds' \right], \quad (2)$$

$$\mathbf{E}^{sct}(\mathbf{r}) = ik \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \times \left[-\mathbf{s} \times \left[\mathbf{s} \times \oint_{S_p^+} (\mathbf{n} \times (\mathbf{r}_b \times \mathbf{E}(\mathbf{r}'))) e^{-ik\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}'} ds' \right] + \right. \\ \left. + \mathbf{s} \times \oint_{S_p^+} (\mathbf{n} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')) e^{-ik\mathbf{s} \cdot \mathbf{r}'} ds' \right] \quad (3)$$

Первые два выражения имеют математически корректную постановку, тогда как последние, строго говоря, соответствует задаче с разрывом. Реше-

ние в виде (1) активно использовалось в работах [Jackson, 1998; Borovoi, 2013; Nieto-Vesperinas, 2006], решение в виде (3) использовалось в работах [Yang, 1996; Bi, 2011, Masuda, 2012].

Сравнение численного решения полученного различными дифракционными формулами

Метод физической оптики реализован авторами статьи на основе алгоритма трассировки пучков, позволяющего получить поле внутри кристалла в приближении геометрической оптики. Далее это поле переносится в дальнюю зону либо по формуле (1), либо по формуле (2). Описание алгоритма трассировки пучков подробно изложено в статьях [Коношонкин, 2015а, Коношонкин, 2015б]. Разработанный в Kyushu University (Япония) под руководством доктора К. Masuda метод физической оптики GOM2 [Masuda, 2012], использует формулу (3).

В качестве тестовой задачи, рассмотрим плоскопараллельную волну, выходящую из гексагональной грани ледяного кристалла. Математическая постановка в данном случае эквивалентна дифракции на плоском экране с гексагональным отверстием.

Авторами проводилось большое количество расчетов для различных размеров и форм отверстия, а также для различных случаев положения вектора поляризации падающей волны относительно отверстия. Далее будут представлены пограничные случаи, позволяющие сформулировать основные закономерности.

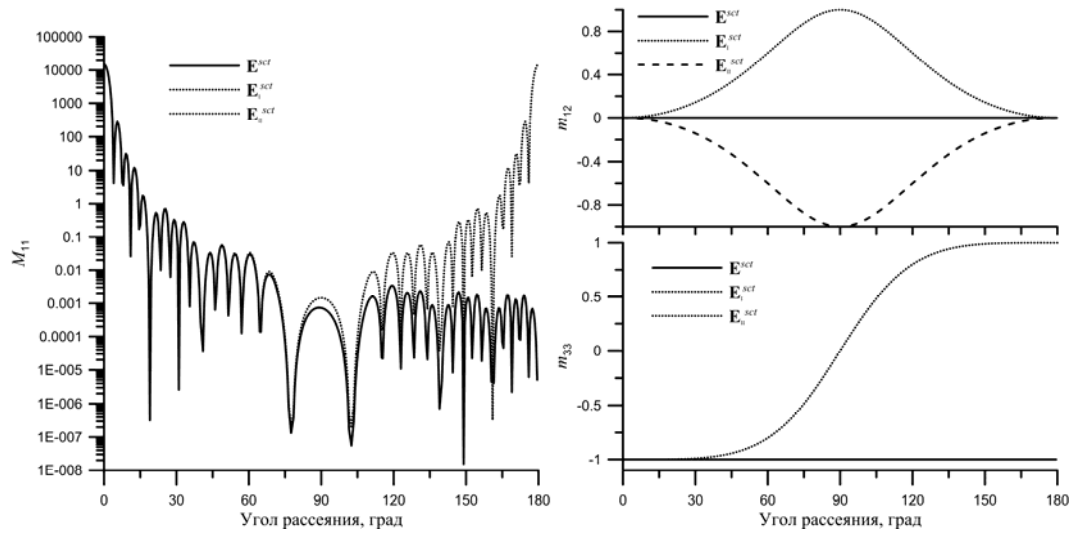


Рис. 1. Ненулевые элементы матрицы Мюллера в зависимости от угла рассеяния в плоскости xOz .

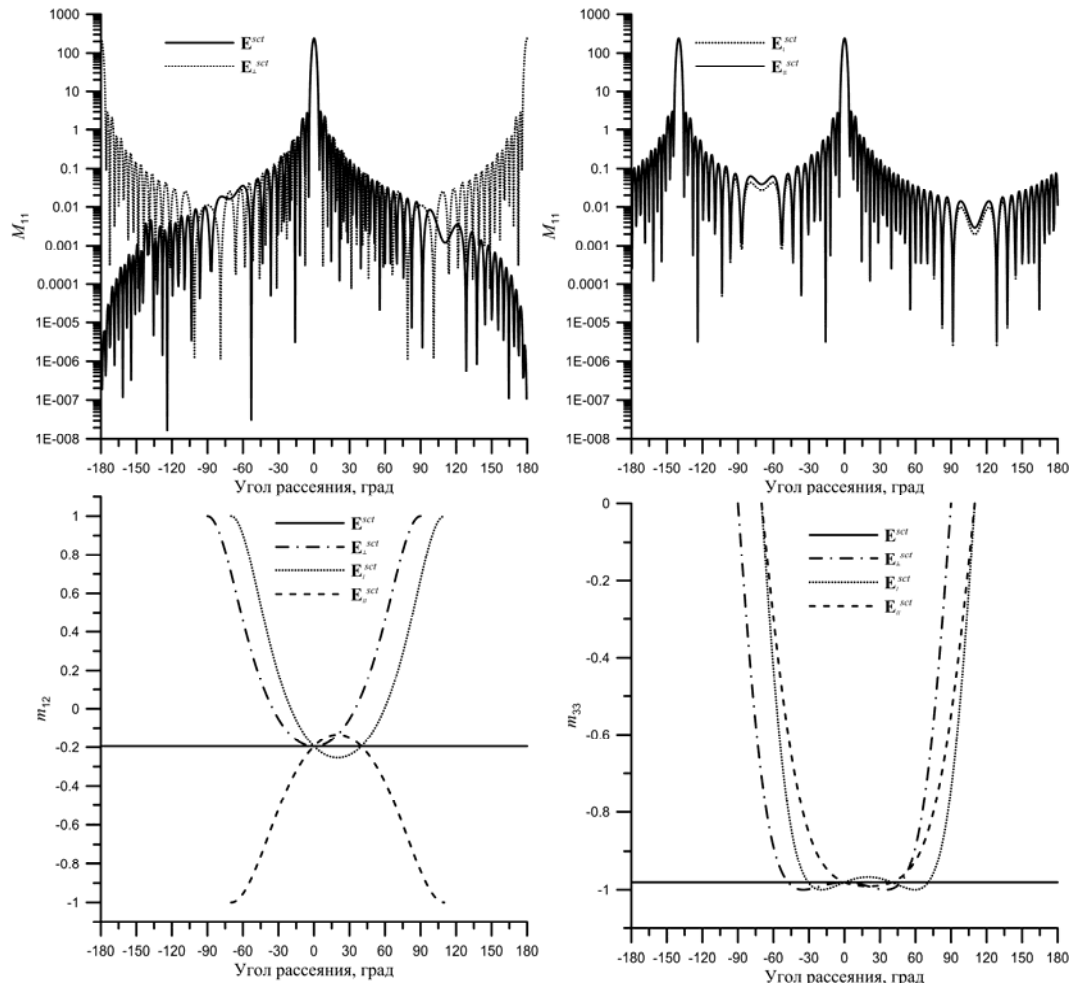


Рис. 2. Элементы матрицы Мюллера в плоскости xOz для дифракции на наклонном экране. Угол наклона -20° .

Пусть плоскопараллельная волна единичной интенсивности E , распространяющаяся в направлении $\mathbf{r}_b$, падает на гексагональное отверстие S , с единичной нормалью $\mathbf{n}$. Будем искать рассеянное поле E^{scat} в направлении $\mathbf{s}$. Предполагаем, что волна падает на отверстие нормально: $\mathbf{n}=\mathbf{r}_b=\mathbf{z}$. Диаметр отверстия 10 мкм, длина волны падающего света 0.532 мкм. Для избавления от симметрии частица повернута на 19°

относительно оси x . Результаты расчетов представлены на рис 1.

Из расчетов следует, что элемент M_{11} матрицы рассеяния, полученный по формулам (1) и (2), хорошо совпадает с элементом M_{11} , посчитанным по формуле (3), в диапазоне углов от 0 до 60° . Также хорошо видно, что решение интегралов (1) и (2) симметричны относительно плоскости экрана (точ-

ки 90°), и как следствие построение решения по формулам (1) и (2) возможно только в полупространстве «за экраном». Стоит отметить, что в рассматриваемом случае все три дифракционные формулы удовлетворяют закону сохранения энергии.

Расчеты также показывают, что элементы матрицы рассеяния m_{12} и m_{33} начинают расходиться гораздо быстрее. Так элемент m_{33} хорошо совпадает в области от 0 до 30° , а элемент m_{12} — только в области от 0 до 15° . Следовательно, для отверстий больших 10 мкм, в пределах первых 5 дифракционных колец все три формулы совпадают с хорошей точностью.

Рассмотрим случай наклонного падения света на экран. В данном случае полезно также рассмотреть решение, полученное на мнимом экране с отверстием S' , перпендикулярном распространению падающей волны. Обозначим такое решение $E_\perp^{sct}$. Результаты представлены на рис. 2.

Анализ решений показал, что элемент M_{11} для всех решений очень хорошо согласуется при малых углах дифракции и существенно отличается при углах дифракции близких к 180° . Видно, что E_I^{sct} и E_{II}^{sct} создают ложный дифракционный максимум как отражение существующего, следовательно, решение должно быть обрезано в точках -70 и 110° . В местах обрезки значение функции скачком обращается в нуль, что может быть несущественно при углах падения света на экран близких к 90° , но существенно для малых углов падения. Решение $E_\perp^{sct}$ производить ложный дифракционный максимум в области 180° , и должно быть обрезано в точках -90 и 90° .

Видно, что поляризационные элементы m_{12} и m_{33} в случае наклонного падения расходятся быстрее, однако в направлении выхода пучка все четыре решения совпадают. При дифракции под углами меньше 10° отличие в элементах m_{12} и m_{33} составило не более 8 % и 2 %, соответственно.

Заключение

Анализ четырех дифракционных интегралов показал, что для случая мало угловой дифракции на плоском экране расхождение между интегралами незначительно. Однако, для случая дифракции на наклонном экране, а также при дифракции под большими углами наблюдается существенное расхождение в решениях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 15-05-06100а, частичной поддержке РНФ (соглашение № 14-27-00022), при поддержке Гранта президента РФ (МК-6680.2015.5) и при поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности университетов 5–100.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 1. Теоретические основы алгоритма // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 04. С. 324–330.

Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 2. Сравнение с алгоритмом трассировки лучей // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 04. С. 331–337.

Bi L., Yang P., Kattawar G.W., Hu Y., Baum B.A. Scattering and absorption of light by ice particles: solution by a new physical-geometric optics hybrid method // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. P. 1492–508.

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.

Jackson J.D. Classical electrodynamics. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons. 1998. 808 p.

Masuda K., Ishimoto H., Mano Y. Efficient method of computing a geometric optics integral for light scattering by nonspherical particles // Papers in Meteorology and Geophysics. 2012. V. 63. P. 15–19.

Nieto-Vesperinas M. Scattering and diffraction in physical optics (2nd ed.) New Jersey: World sci. 2006. 434 p.

Yang P., Liou K.N. Geometric-optics-integral-equation method for light scattering by nonspherical ice crystals. Appl. Opt. 1996. V. 35. P. 6568–6584.

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия