УДК 535.36; 535.31; 535.42 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-151

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЛО 46° ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАЗМЕРА АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В РАМКАХ МЕТОДА ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

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

[1] Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия,
n.kan.08@mail.com
[2]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

STUDY OF FORMATION OF A 46° HALO WHEN CHANGING SIZE OF ATMOSPHERIC ICE HEXAGONAL PARTICLES WITHIN THE FRAMEWORK OF PHYSICAL OPTICS METHOD

N.V. Kan[1], V.A. Shishko[1], N.V. Kustova[1], A.V. Konoshonkin[1, 2]

[1]V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia,
n.kan.08@mail.com
[2]National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Аннотация. Работа посвящена исследованию изменчивости гало 46° при росте мелкого хаотически ориентированного ледяного гексагонального столбика. Решение строилось в рамках приближения физической оптики по всей сфере направлений рассеяния для хаотически ориентированного гексагонального столбика в диапазоне размеров от 10 до 30 мкм, при длине волны 0.532 мкм, показателе преломления 1.3116. Результаты демонстрируют, как формируется гало 46° при росте размера гексагонального кристалла.

Ключевые слова: рассеяние света, физическая оптика, частицы льда, перистые облака, физическая оптика, оптические свойства

Abstract. The paper is devoted to the study of the variability of a 46° halo during the growth of a small chaotically oriented hexagonal ice column. The solution was built within the physical optics approximation over the entire sphere of scattering directions for a chaotically oriented hexagonal column in the size range from 10 to 30 microns, with a wavelength of 0.532 microns and a refractive index of 1.3116. The results demonstrate how a 46° halo is formed with an increase in the size of a hexagonal crystal.

Keyword: light scattering, physical optics, ice particles, cirrus clouds, physical optics, optical properties

ВВЕДЕНИЕ

Перистые облака покрывают значительную часть земной поверхности (до 30 %) и состоят из ледяных кристаллических частиц различной формы. Они существенно влияют на процесс переноса солнечной энергии через атмосферу и, соответственно, на формирование климата нашей планеты [Hong, 2007]. В зависимости от формы и ориентации кристаллических частиц, эти облака могут, как задерживать проникновение солнечного излучения вглубь атмосферы к земной поверхности, так и препятствовать выходу теплового излучения Земли в открытый космос, усугубляя парниковый эффект. Поэтому важно получить решение задачи рассеяния света на всем многообразии частицах перистых облаков, для их корректного учета в климатических моделях.

Задача рассеяния света на ледяных несферических частицах является сложной задачей атмосферной оптики, которая традиционно решается точными численными методами, такими как DDA, FDTD, PSTD и др. Однако область применимости точных численных методов ограничена размером частиц 5-10 мкм, поскольку для более крупных частиц решение является слишком ресурсозатратным. Так как размеры частиц перистых облаков и крупного полевого аэрозоля достигают 1000 мкм, то общепринятым методом в таком случае является приближение геометрической оптики [Коношонкин и др., 2014]. Однако полученное решение непригодно для интерпретации данных лазерного зондирования атмосферы, поскольку не может разрешить пик обратного рассеяния, очень важный для задач лазерного зондирования. Эту проблему можно обойти, используя метод физической оптики [Shishko et al., 2019]. Благодаря данному методу могут быть получены решения для кристаллических частиц. Приближение физической оптики основано на алгоритме трассировки пучков [Коношонкин и др., 2015]. Данный метод рассчитывает рассеянное поле в ближней зоне в рамках приближения геометрической оптики, а при переходе к дальней зоне учитываются дифракция и интерференция. Однако расчет дифракции для каждого рассеянного пучка – очень затратная операция, особенно для случая произвольно ориентированных частиц в облаке. Больше всего время расчета в приближении физической оптики возрастает с увеличением количества граней в частице.

Помимо радиационного воздействия, ледяные облака вызывают в атмосфере различные оптические явления, такие как гало, паргелии, околозенитные и касательные дуги, а также солнечные столбы [Moilanen, Gritsevich, 2022].

При некоторых условиях атмосфера бывает насыщена мелкими кристаллами, имеющими шестигранные основания, прямой угол между шестигранным основанием и боковой гранью, ответственен за отклонение луча света на 46°, так образуется красноватое с внутренней стороны гало, но оно может состоять и из всех цветов спектра. Такой вид гало называется гало 46°. Гало 22° часто

наблюдается в природе и является широко известным оптическим явлением, оно образованно двугранным углом 60° между боковыми гранями кристалла. В отличие от гало 22°, гало 46° наблюдается значительно реже.

В некоторых исследованиях моделировались гало и другие оптические явления путем расчета траекторий лучей, которые зависят от взаимного расположения Солнца и кристаллов льда (или ориентации кристаллов льда), а также от пути солнечного света через грани кристаллов. Для такого моделирования доступно несколько программ (например, HaloSim и HaloPoint), использующих известные минимальные отклонения солнечного света для заданных форм кристаллов льда и относительных положений между Солнцем и кристаллами льда. Также оценивали геометрию кристаллов льда на основе углов, под которыми наблюдались гало, в частности, для объяснения редко встречающихся описанных гало, таких как 9°, 18°, 20° [Um, McFarquhar, 2022].

Для таких направлений исследования как перенос излучения и калибровка положения спутников на орбите (в случае, когда используется лазерный луч и атомные часы), необходимо иметь решение задачи рассеяния света на атмосферных кристаллических частицах для всей сферы направлений рассеяния. Такое решение можно получить в рамках приближение физической оптики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Решение строилось по всей сфере направлений рассеяния для гексагонального столбика размерами 10, 20 и 30 мкм при длине волны 0.532 мкм, зависимость элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния света от угла рассеяния θ показан на рис. 1.

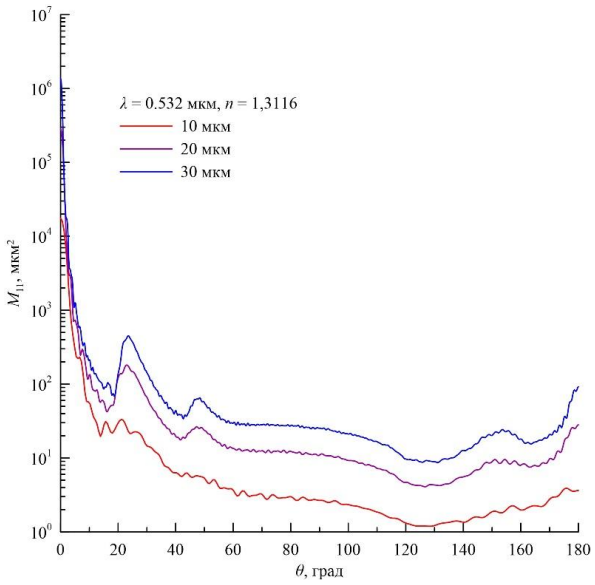

Рис. 1. Зависимость элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния света от угла рассеяния θ в рамках приближения физической оптики для гексагонального столбика размером 10, 20 и 30 мкм

На рис. 1 видно, что гало 46° наблюдается, как для 20 мкм, так и для 30 мкм гексагонального столбика, но не наблюдается у 10 мкм столбика. Поэтому было решено провести дополнительное исследование влияния размера гексагональной кристаллической частицы на формирование гало 46°. Для этого было построено решение для диапазона размеров столбика от 10 до 20 мкм с шагом 1 мкм. В результате удалось показать, как формируется гало 46° в зависимость от размера гексагонального столбика (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что для гексагональных столбиков длиной до 10 мкм гало 46° не наблюдается. Оно начинает формироваться с ростом размера кристалла, а когда гексагональный кристалл становится порядка 15 мкм, гало 46° уже отчетливо распознается.

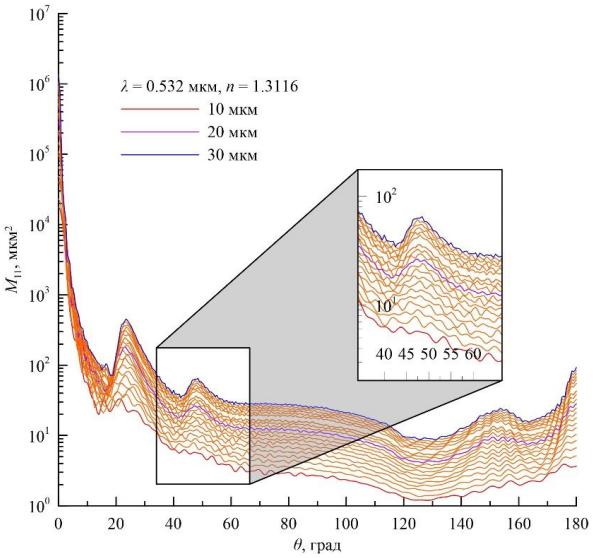

Рис. 2. То же, что и на рис. 1, только размер гексагонального столбика варьировался от 10 до 30 мкм с шагом 1 мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного исследования показали, что у гексагональных столбиков размером менее 10 мкм гало 46° не наблюдается, оно начинает формироваться с ростом размера кристалла, и когда кристалл становится порядка 15 мкм, гало 46° уже отчетливо распознается.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Граница применимости приближения геометрической оптики для решения задачи обратного рассеяния света на квазигоризонтально ориентированных гексагональных ледяных пластинках // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 08. С. 705–712.

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.

Hong G. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D11208.

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.

Moilanen Ja., Gritsevich M. Light scattering by airborne ice crystals – An inventory of atmospheric halos // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V.290, P. 108313.

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. V. 27, N 23. P. 32984–32993.