

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ КРИСТАЛЛАХ ИСКАЖЕННОЙ ФОРМЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Д.Н. Тимофеев, А.В. Коношонкин, Н.В. Кустова, В.А. Шишко

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
tdn@iao.ru

LIGHT BACKSCATTERING PROPERTIES FOR HEXAGONAL ATMOSPHERIC CRYSTALS WITH A DISTORTED SHAPE WITHIN THE PHYSICAL OPTICS APPROXIMATION

D.N. Timofeev, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, V.A. Shishko

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
tdn@iao.ru

Аннотация. В данной работе представляются характеристики обратного рассеяния света на гексагональных атмосферных кристаллах с разными искажениями формы: скос, выпуклость и вогнутость. Расчет проводился для случая хаотической пространственной ориентации в рамках приближения физической оптики для однократного рассеяния. В качестве базовой геометрической формы частиц была взята гексагональная призма высотой 31.62 мкм и внешним диаметром 22.14 мкм, характерная для частиц типа столбик, наблюдаемых в перистой облачности. Угол искажения для каждого случая варьировался в пределах 0° – 50° . Длина волны падающего излучения при расчете равнялась 1.064 мкм. По результатам сравнения сечения обратного рассеяния можно увидеть, что для всех рассмотренных типов частиц значение данного параметра резко уменьшается с ростом угла искажения.

Ключевые слова: обратное рассеяние света, перистые облака, ледяные частицы, искажение формы, физическая оптика.

Abstract. This paper presents the properties of atmospheric hexagonal ice particles distorted with different methods of distortion of base facets: tilt, pyke, and cavity. We calculated the light backscattering matrices within the physical optics approximation for the case of arbitrary spatial orientation and single scattering. As a basic geometrical shape for distortion, we chose the hexagonal prism with height of 31.62 μm and external diameter of 22.14 μm typical for “column” shape particles occurring in cirrus clouds. The angle of distortion varied from 0 to 50 degrees for each type of particles. The wavelength of incident radiation was equal to 1.064 μm . Comparison of the backscattering cross section reveals that this value decreased sharply with increasing distortion angle for all types of particles under consideration.

Keywords: light backscattering, cirrus clouds, ice particles, shape distortion, physical optics.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные ледяные частицы гексагональной формы являются характерными для перистых облаков, которые вносят существенный вклад в радиационный баланс Земли и должны учитываться в глобальных климатических моделях [Liu, 1986]. Эти облака находятся на высотах 7–11 км, а частицы, из которых они состоят, имеют, как правило, призматическую гексагональную форму и размеры порядка 10–1000 мкм. Однако изучение физических свойств этих частиц (размеры, формы) крайне сложно по ряду причин. Контактные методы изучения малоэффективны из-за того, что в момент наблюдения частицы повреждаются и меняют свою пространственную ориентацию. Более эффективными являются дистанционные методы, такие как лазерное зондирование с поверхности Земли и из космоса. Методом лазерного зондирования исследователи получают от облаков обратный сигнал в виде матрицы рассеяния света (МРС), который необходимо интерпретировать. Для корректной интерпретации необходимо иметь базу данных, в которой матрицы обратного рассеяния света (МОРС) сопоставляются с микрофизическими свойствами частиц облаков [Shishko et al., 2019]. Аналитическим методом рассчитать МРС для частиц перистых облаков не представляется возможным в силу их сложной геометрии, поэтому применяются алгоритмы, основанные на численных методах решения задачи рассеяния света. Эти методы делятся на точные и приближенные. Точ-

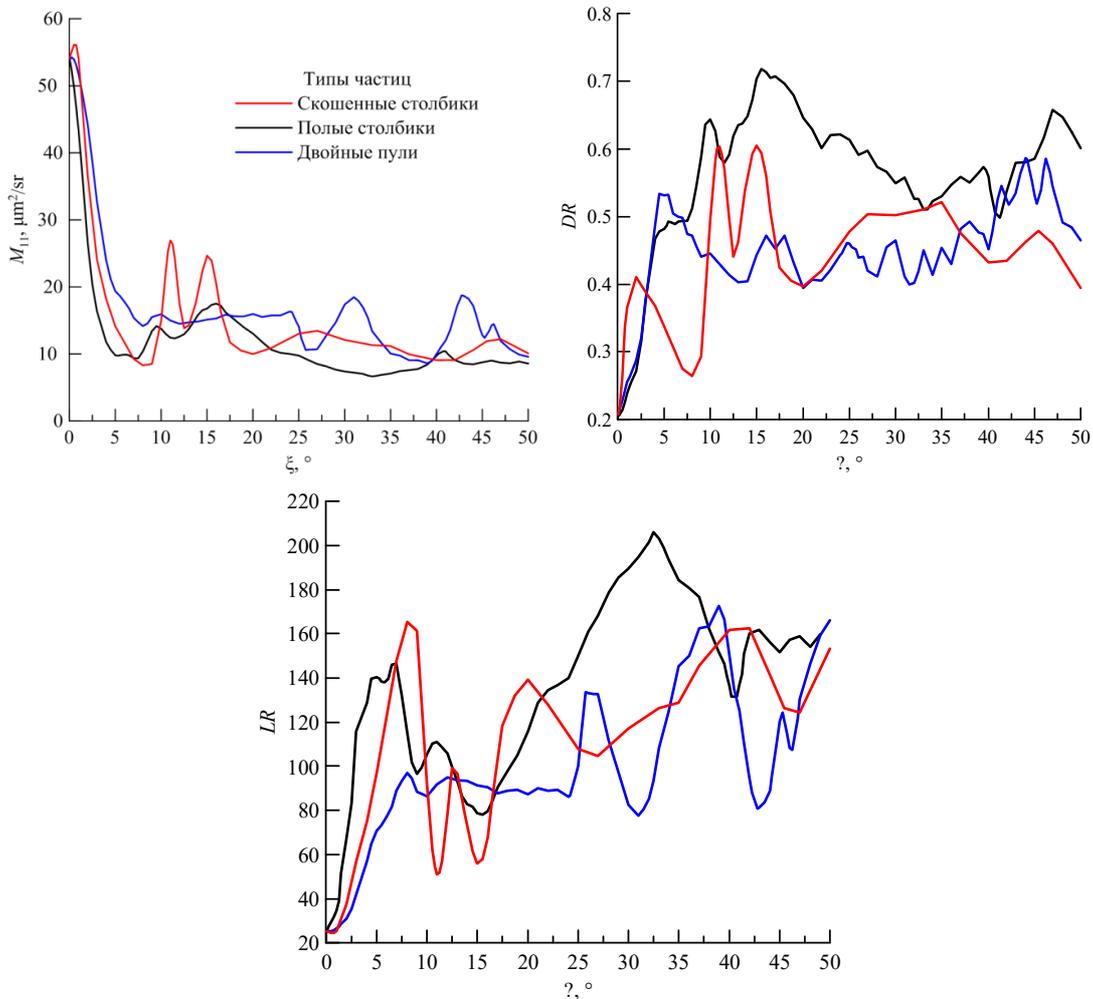
ные численные методы [Kunz, Luebbers, 1993; Purcell, Pennypacker, 1973] хорошо применимы к частицам, размеры которых незначительно превышают длину волны λ падающего излучения, однако их вычислительная сложность растет с увеличением размера частиц. Кроме того, форма кристаллов перистых облаков является несферической, поэтому они требуют расчета МРС с множеством пространственных ориентаций частицы. Приближенные численные методы, например приближение геометрической оптики [Macke et al., 1996], позволяют решать задачу рассеяния света с удовлетворительным временем расчета, жертвуя при этом точностью. Для расчета МРС и МОРС атмосферных частиц, характерных для перистых облаков, успешно применяется метод физической оптики [Borovoi, Grishin, 2003]. Результаты расчетов в рамках данного метода, в отличие от аналогов, хорошо согласуются с экспериментальными данными для случая рассеяния назад [Borovoi et al., 2013].

РАСЧЕТ МАТРИЦ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

При варьировании угла скоса оснований столбика в диапазоне 0° – 50° получаются скошенные столбики, при варьировании угла вогнутости — полые столбики, угла пика — двойные пули. Все эти углы для удобства далее будут обозначаться как «угол искажения формы» (ξ). Угол изменялся с переменным шагом таким образом, чтобы на каждое дифрак-

Параметры расчета

№	Параметр	Значение
1	Высота частицы, мкм	31.62
2	Внешний диаметр частицы, мкм	22.14
3	λ , мкм	1.064
4	Показатель преломления частицы	1.3004
5	Интервалы вращения частицы по углу наклона (β), градусы	0–90
6	Интервалы вращения частицы по углу вращения (γ), градусы	0–60



Зависимости характеристик обратного рассеяния от угла искажения формы ξ : сечения обратного рассеяния (M_{11} , сверху слева), линейного деполаризационного (DR , сверху справа) и лидарного (LR , внизу) отношений

ционное кольцо приходилось по пять точек. Для каждой полученной частицы из двух последних наборов были рассчитаны МОРС. В таблице приведены значения параметров расчета МОРС для вышеописанных частиц методом физической оптики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ отдельных событий показал, что магнитосферные электроны с энергиями более 2 МэВ на геостационарной орбите по-разному реагируют на различные типы возмущений в межпланетной среде.

Поскольку пространственная ориентация частиц является хаотической, интервалы вращения были заданы исходя из симметрии частиц. По значениям

элементов матриц были получены сечение обратного рассеяния, которое соответствует первому элементу МОРС (M_{11}), линейное деполаризационное (DR) и лидарное (LR) отношения. Их зависимости от ξ для трех типов частиц приведены на рисунке.

При сравнении M_{11} для разных типов частиц видно, что у полых столбиков происходит более быстрое падение величины данного параметра с увеличением ξ по сравнению с другими типами частиц. Кроме того, как у полых столбиков, так и у двойных пульс исчезает пик интенсивности в интервале ξ 0° – 2° , свойственный скошенным столбикам, который происходит из-за интерференции косых угловых траекторий. Для скошенных столбиков наблюдаются скачки интенсивности в интервале ξ 5° – 20° , схожие с наблюдаемыми для полых столбиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение характеристик обратного рассеяния, полученных из матриц обратного рассеяния света, рассчитанных методом физической оптики, для характерных для перистой облачности частиц гексагональной формы размером около 30 мкм, с $\lambda=1.064$ мкм, полученных тремя методами искажения. По результатам сравнения сечения обратного рассеяния можно увидеть, что для всех рассмотренных типов частиц значение данного параметра резко уменьшается с ростом угла искажения, однако сильнее всего это выражается у полых столбиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. Backscattering by hexagonal ice crystals of cirrus clouds. *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, no. 15. P. 2881–1884.
- Borovoi A.G., Grishin I.A. Scattering matrices for large ice crystal particles. *J. Opt. Soc. Am. A.* 2003. Vol. 20. P. 2071–2080.
- Kunz K.S., Luebbers R.J. *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. Boca Raton: FL CRC Press, 1993. 448 p.
- Liou K.-N. Influence of cirrus clouds on the weather and climate process: a global perspective. *Mon. Weather Rev.* 1986. Vol. 114. P. 1167–1199.
- Macke A., Mueller J., Raschke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystal. *J. Atmos. Sci.* 1996. Vol. 53, no. 19. P. 2813–2825.
- Purcell E.M., Pennypacker C.R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains. *Astrophys. J.* 1973. Vol. 186. P. 705–714.
- Shishko V.A., Bryukhanov I.D., Nie E.V., et al. Algorithm for interpreting light backscattering matrices of cirrus clouds for the retrieval of their microphysical parameters. *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. Vol. 32, no. 4. P. 393–399.