

## 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  $0^\circ$ – $50^\circ$ . 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  $\mu\text{m}$  and external diameter of 22.14  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$ . 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-

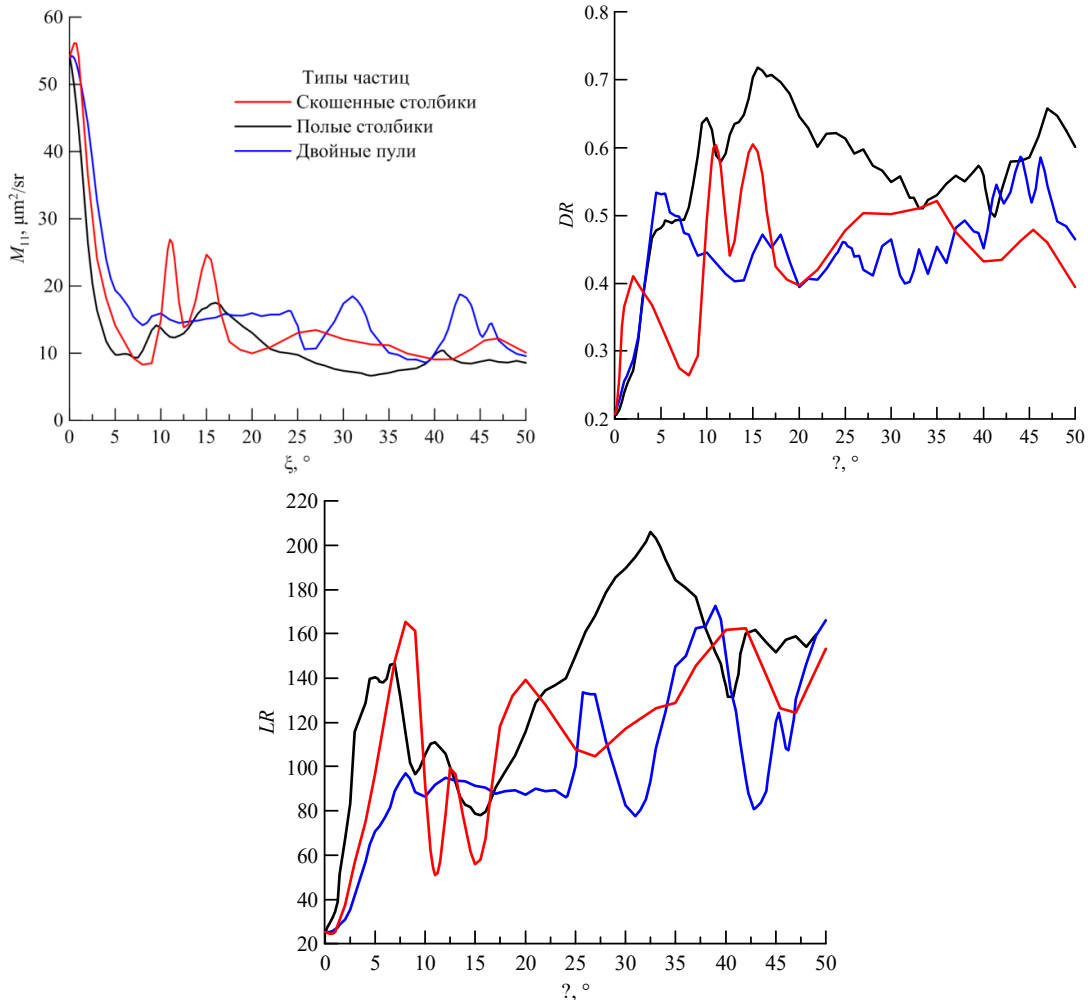
ные численные методы [Kunz, Luebbers, 1993; Purcell, Pennypacker, 1973] хорошо применимы к частицам, размеры которых незначительно превышают длину волны  $\lambda$  падающего излучения, однако их вычислительная сложность растет с увеличением размера частиц. Кроме того, форма кристаллов перистых облаков 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  $0^\circ$ – $50^\circ$  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» ( $\xi$ ). 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	$\lambda$ , мкм	1.064
4	Показатель преломления частицы	1.3004
5	Интервалы вращения частицы по углу наклона ( $\beta$ ), градусы	0–90
6	Интервалы вращения частицы по углу вращения ( $\gamma$ ), градусы	0–60



Зависимости характеристик обратного рассеяния от угла искажения формы  $\xi$ : 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  $\xi$  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  $\xi$  по сравнению с другими типами частиц. Кроме того, как у полых столбиков, так и у двойных пуль исчезает пик интенсивности в интервале  $\xi 0^\circ\text{--}2^\circ$ , свойственный скошенным столбикам, который происходит из-за интерференции косых уголкового траекторий. Для скошенных столбиков наблюдаются скачки интенсивности в интервале  $\xi 5^\circ\text{--}20^\circ$ , 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.