

**КОНФЕРЕНЦИЯ С  
ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА  
ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

## ПРОБЛЕМА РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛАХ

А.В. Коношонкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Кустова<sup>1</sup>, А.Г. Боровой<sup>1</sup>, Д.Н. Тимофеев<sup>1</sup>, В.А. Шишко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: [sasha\\_tvo@iao.ru](mailto:sasha_tvo@iao.ru), [kustova@iao.ru](mailto:kustova@iao.ru), [borovoi@iao.ru](mailto:borovoi@iao.ru), [tdn@iao.ru](mailto:tdn@iao.ru), [sva@iao.ru](mailto:sva@iao.ru)

Ключевые слова: физическая оптика, рассеяние света, перистые облака

Представлено современное состояние проблемы решения света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков в контексте задачи интерпретации лидарного сигнала. Представлен обзор существующих методов и подходов к решению задачи рассеяния света на несферических частицах. Показано, что результаты, полученные в рамках приближения физической оптики, хорошо согласуются с результатами экспериментальных наблюдений и могут быть использованы для интерпретации лидарных данных. Решение задачи доступно в виде банка данных матриц обратного рассеяния.

Перистые облака играют важную роль в формировании климата планеты. Однако их оптические свойства в настоящее время недостаточно изучены, поскольку не решена задача рассеяния света на образующих эти облака ледяных кристаллических частицах. Это с одной стороны затрудняет интерпретацию данных, получаемых лидарами, которые являются основным инструментом наблюдения перистых облаков, с другой стороны является основным препятствием для построения оптической модели облака.

Решение задачи рассеяния света на несферических частицах традиционно получают численными методами, основанными на прямом решении уравнений Максвелла. К таким методам можно отнести метод конечных разностей во временной области (FDTD[1]), метод дискретных диполей (DDA[2]), разрывный метод Галеркина (DGTD[3]) и др. Однако такие методы эффективны для частиц меньших или сопоставимых с длиной волны падающего излучения[4], в то время как для частиц размером в несколько десятков длин волн решение занимает несколько часов[5]. В виду того, что решение необходимо получить для некоторого ансамбля хаотически ориентированных частиц, что требует решение задачи на миллиардах различных частиц[6], применение точных численных методов не представляется возможным.

С другой стороны, хорошо известное приближение геометрической оптики, используемое для решения задач рассеяния света на крупных частицах[7], не применимо для характерных для

перистых облаков гексагональных ледяных частиц, поскольку такое решение содержит сингулярность в направлении рассеяния назад[8]. А именно направление рассеяния назад представляет основной интерес для лидарных исследований.

Авторами данного доклада разработан метод физической оптики для решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков с размерами от 10 до 1000 мкм при их зондировании лидарами на длинах волн от 0,355 до 1,6 мкм. Данный метод хорошо согласуется результатами, полученными точными численными методами[9], однако значительно превосходит последние по скорости, позволяя получить решение на необходимом ансамбле частиц в разумные сроки.

Решение задачи рассеяния света на хаотически ориентированных гексагональных ледяных пластинках и столбиках в направлении рассеяния назад представлено в виде матриц Мюллера в банке данных. В качестве примера на рис. 1 представлены рассчитанные на его основе лидарное и деполяризационное отношения для гексагональных пластинок.

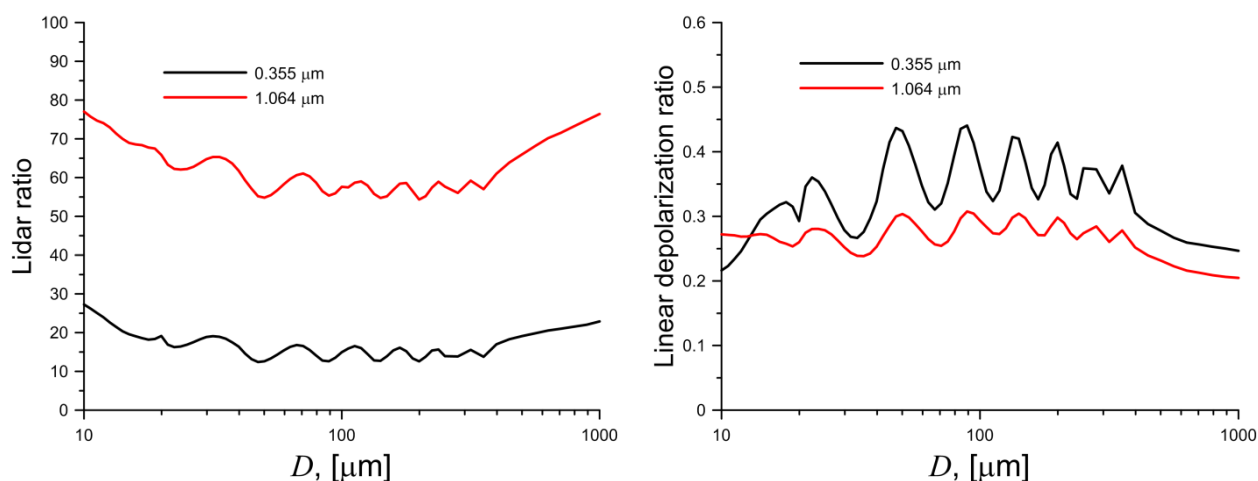


Рис. 1. Лидарное (Lidar ratio) и деполяризационное (Linear depolarization ratio) отношения для гексагональных ледяных пластинок в зависимости от диаметра ( $D$ ) гексагонального основания для двух длин волн 0,355 и 1,064 мкм.

Большой интерес представляет изучение зависимости оптических характеристик ансамбля ледяных частиц в зависимости от эффективного угла наклона частиц относительно горизонтальной плоскости, поскольку в облаках частицы часто имеют преимущественную ориентацию[10]. Полученные нами при помощи метода физической оптики оптические характеристики преимущественно ориентированных кристаллических частиц также представлены в виде банка данных матриц Мюллера. В качестве иллюстрации на рис. 2-4. представлены лидарное и деполяризационное отношения для гексагональных столбиков и пластинок, а также дроксталлов на длине волны 0,355 мкм в зависимости от эффективного угла наклона частицы  $\beta_{eff}$ .

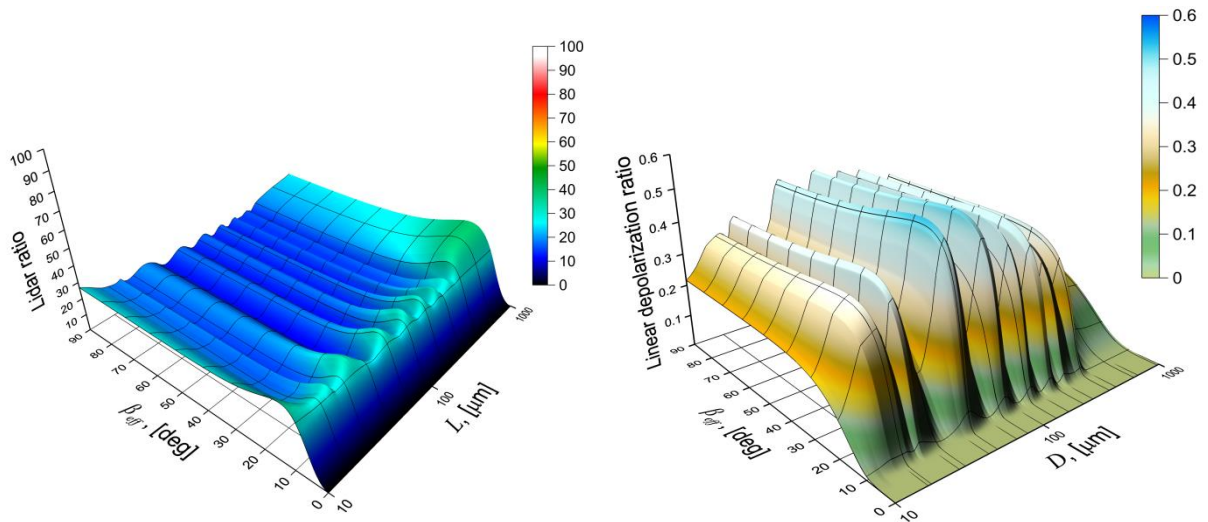


Рис. 2. Лидарное и деполаризационное отношения для гексагональных столбиков.

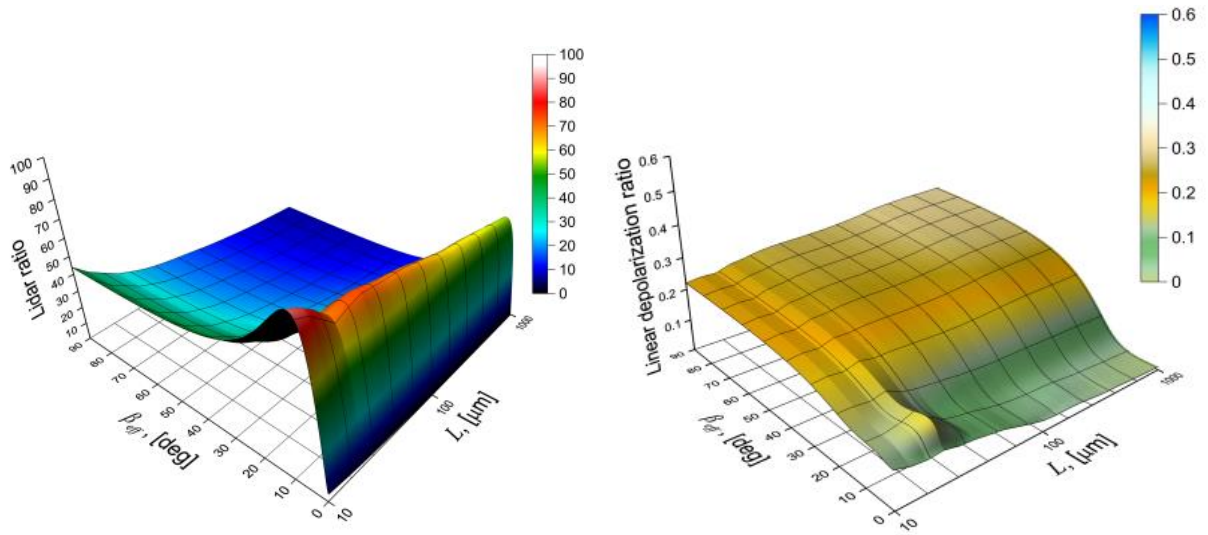


Рис. 3. Лидарное и деполаризационное отношения для гексагональных пластинок.

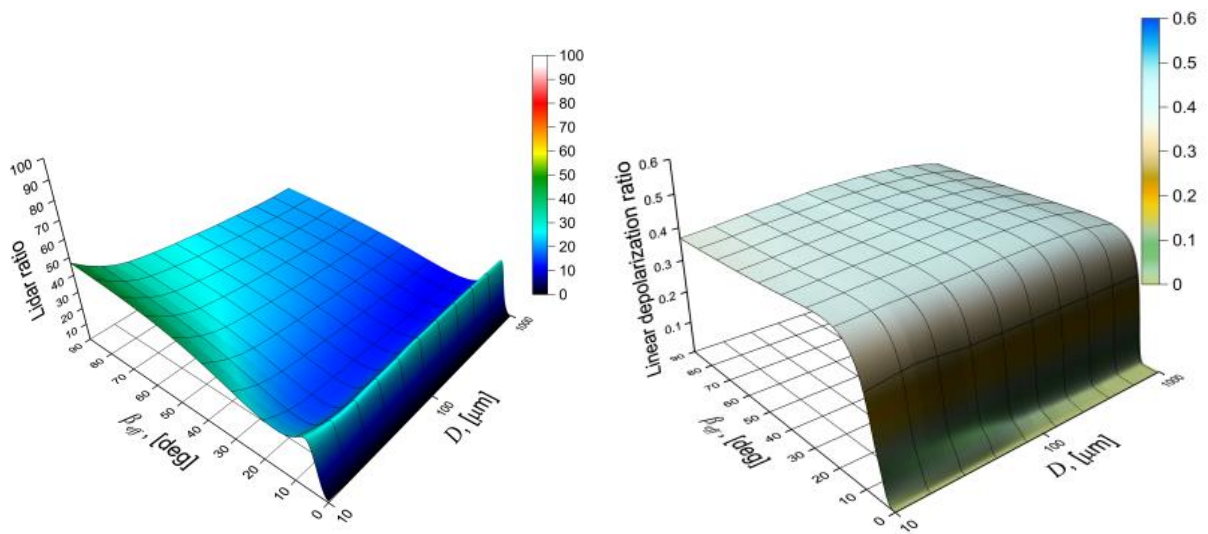


Рис. 4. Лидарное и деполаризационное отношения для дрoксталлов.

Полученное нами методом физической оптики решение задачи рассеяния света на гексагональных ледяных пластинках и столбиках, а также на дроксталлах, «пулях» и неидеальных гексагональных столбиках хорошо согласуется с результатами экспериментальных наблюдений. Расчеты проведены для частиц размерами от 10 до 1000 мкм для трех длин волн: 0,355, 0,532 и 1,064 мкм. Для четырех углов отклонения лидар от вертикали: 0, 0,3, 3 и 5 градусов. Сформированный банк данных матриц рассеяния света может быть использован для интерпретации данных, получаемых как наземными, так и космическими лидарами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-05-06100а, 16-35-60089\_мол\_а\_дк), Президента РФ (МК-2495.2017.5, НШ-8199.2016.5) и Минобрнауки РФ в рамках «Программы повышения конкурентоспособности ТГУ».

1. *Kunz K. S., and Luebbers R. J.* Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. – Boca Raton, FL : CRC Press, 1993
2. *Yurkin, M.A., Maltsev, V.P., Hoekstra, A.G* The discrete dipole approximation for simulation of light scattering by particles much larger than the wavelength // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. V. 106. №1-3 P. 546-557.
3. *Grynko Y, Shkuratov Y, Förstner J.* Light scattering by randomly irregular dielectric particles larger than the wavelength // *Opt. Lett.* 2013. V.38 P.5 153-5156.
4. *Tang C., and Aydin K.* Scattering from ice crystals at 94 and 220 GHz millimeter wave frequencies // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995. V. 33. P. 93–99.
5. *Yurkin, M.A., Hoekstra, A.G* The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. №13 P. 2234-2247.
6. *Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Okamoto H., Ishimoto H., Grynko Y. and Förstner J.* Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: from exact numerical methods to physical-optics approximation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.024>
7. *Cai Q., and Liou K. N.* Polarized light scattering by hexagonal ice crystals: theory // *Appl. Opt.* 1982, V. 21, N 19. P. 3569–3580
8. *Borovoi A.G., Kustova N.V., and Oppel U.G.* Light backscattering by hexagonal ice crystal particles in the geometrical optics approximation // *Opt. Engineering.* 2005. V. 44. P. 071208(10).
9. *Konoshonkin AV, Kustova NV, Borovoi AG, Grynko Y, and Förstner J.* Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: comparison of the physical optics methods // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016, V. 182. P.12–23.
10. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Ориентация частиц кристаллических облаков  $\text{Ci}$ : Часть 1. Ориентация при падении. // *Оптика атмосферы и океана.* 2005. Т. 18, № 11. С. 963-967.