

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛАХ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ В ОПТИЧЕСКОМ И МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНАХ ИЗЛУЧЕНИЯ

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

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

BACKSCATTERING PROPERTIES OF ATMOSPHERIC ICE CRYSTALS OF IRREGULAR SHAPE IN THE OPTICAL AND MICROWAVE RANGES

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

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

Аннотация. В данной работе была решена задача рассеяния излучения на ледяных кристаллах, характерных для перистых облаков, для 94 ГГц радара (длина волны 3189 мкм) и лидара (длина волны 0.355 мкм), с показателями преломления льда $1.7864+0.0032i$ и $1.3249+0i$ соответственно. Решения получены в рамках приближения физической оптики и приближения дискретных диполей для случая хаотически ориентированных частиц. Размеры частиц варьировались от 4 до 1000 мкм. Полученные результаты предполагается использовать при создании алгоритмов интерпретации данных совместного зондирования лидаром и радаром на инструментах спутника EarthCare.

Ключевые слова: рассеяние света, лидар, радар, физическая оптика, приближение дискретных диполей, атмосферные ледяные кристаллы, перистые облака.

Abstract. The problem of electromagnetic scattering on ice crystals of cirrus clouds was solved for the 94-GHz radar (wavelength 3189 μm) and lidar (wavelength 0.355 μm) with the refractive indices of ice – $1.7864+0.0032i$ and $1.3249+0i$, respectively. The solutions were calculated within the physical optics approximation and the discrete dipole approximation for the case of randomly oriented particles. The particle sizes varied from 4 to 1000 μm . The obtained results are supposed to be used in the development of algorithms for interpreting data from joint sensing by lidar and radar on EarthCare satellite instruments.

Keywords: light scattering, lidar, radar, physical optics, discrete dipole approximation, atmospheric ice crystals, cirrus clouds.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные климатические изменения, наблюдаемые в последнее время, диктуют необходимость более пристального и детального изучения климатообразующих факторов [Baker, 1997]. Одним из основных источников неопределенности в современных численных моделях прогнозирования изменений климата являются перистые облака, которые являются важными компонентами атмосферы, существенно влияющими на радиационный баланс Земли [Wendling et al., 1979; Liou, 1986]. Перистые облака обычно располагаются на высотах от 7 до 12 км и состоят, как правило, из ледяных кристаллических частиц преимущественно гексагональной формы [Um, McFarquhar, 2015].

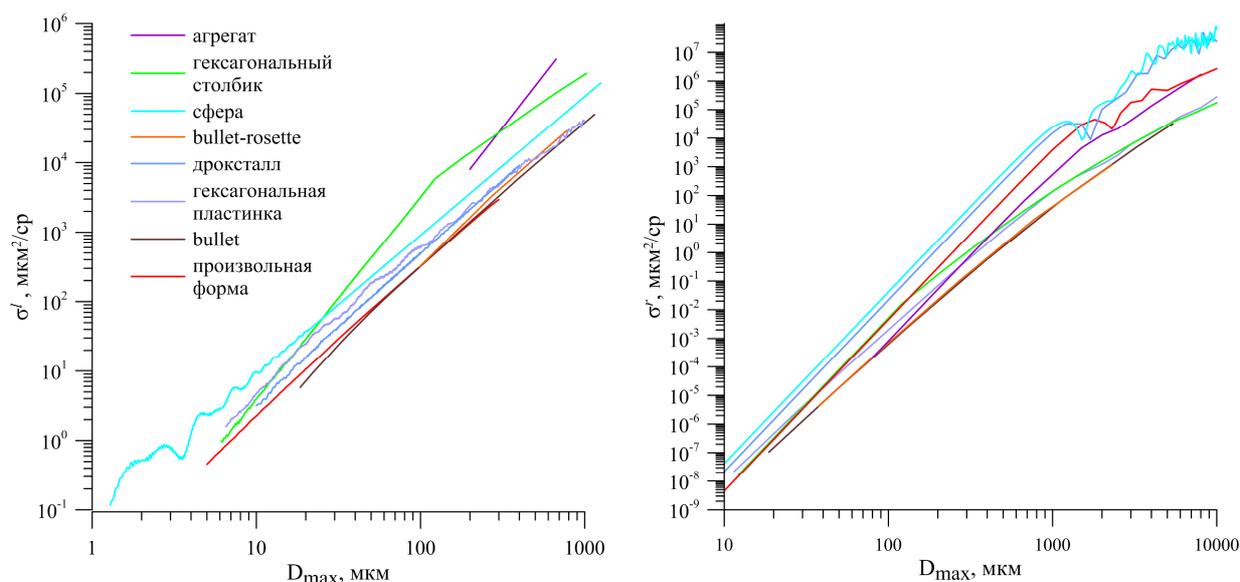
В настоящее время микрофизические свойства (размер, форма, ориентация и т. д.) атмосферных кристаллов льда плохо изучены из-за их высокой степени изменчивости во времени и пространстве, а также в силу того, что полевые измерения микрофизических свойств атмосферных кристаллов являются малоэффективными из-за нарушения структуры частиц в момент наблюдения [Um et al., 2015]. Поэтому единственными эффективными инструментами исследования атмосферы остаются различные дистанционные методы, среди которых выделяются методы лидарного и радарного зондирования атмосферы, обеспечивающие активное зондирование облаков. Преимущество этих инструментов в том, что они не вносят изменения в пространственную ориентацию кристаллов, более того, они широко распространены: имеют наземное, воздушное и кос-

мическое базирование [Moshary et al., 2016; Veselovskii et al., 2017; Zabukovec et al., 2021].

В марте 2023 г. будет запущен на орбиту Земли спутник EarthCare (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) [Illingworth et al., 2015], на борту которого будут совместно работать лидар ATLID (длина волны 0.355 мкм) и радар CPR (Cloud Profiling Radar) работающий на частоте 94 ГГц (длина волны 3189 мкм). В связи с чем возникает необходимость в построении оптической модели перистой облачности для длин волн лидара ATLID и радара CPR, установленных на спутнике, с целью интерпретации данных совместного зондирования лидаром и радаром на инструментах спутника EarthCare. Данная работа посвящена решению именно этой задачи.

МЕТОДЫ

Для построения оптической модели перистой облачности для длин волн лидара ATLID и радара CPR, установленных на спутнике EarthCare, в рамках настоящей работы на вычислительном кластере ИОА СО РАН была рассчитана база данных, необходимая для интерпретации совместных измерений радаром и лидаром. Для лидара ATLID (длина волны 0.355 мкм) расчет матриц обратного рассеяния света для сферических частиц выполнялся в рамках теории рассеяния Лоренца — Ми [Wiscombe, 1980], а для всех остальных типов частиц использовался метод физической оптики [Shishko, 2019], показатель преломления льда принимался равным $1.3249+0i$. Для 94 ГГц радара CPR (длина волны 3189 мкм) расчеты матриц обратного рассеяния



Рассчитанные дифференциальные сечения рассеяния для хаотически ориентированных кристаллов различных форм, построенные в зависимости от максимального размера D_{\max} частицы для длин волн лидара ATLID 0.355 мкм (слева) и радара CPR 3189 мкм (справа)

микроволнового излучения выполнялись в приближении дискретных диполей, разработанном М. Юркиным [Yurkin, Hoekstra, 2011], в этом случае показатель преломления льда принимался равным $1.7864+0.0032i$.

Моделировались следующие формы хаотически ориентированных частиц: гексагональные столбики и пластинки, bullet, дроксталлы, агрегаты, bullet-rossette, частицы произвольной формы, сферические частицы. При моделировании методом дискретных диполей частицы представлялись набором от 4000 до 20000 диполей в зависимости от размера частицы. Размеры крупных несферических частиц перистых облаков в литературе принято определять их максимальным размером (расстояние между наиболее удаленными точками частицы) D_{\max} [Yang, Lio, 2006], который в наших расчетах варьировался в диапазоне от 4 до 1000 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В теоретических расчетах вместо экспериментально измеряемых величин обычно используется дифференциальное сечение рассеяния одного кристалла в направлении назад, которое усредняется по статистическому ансамблю кристаллов в облаке — $\sigma^{r,1}$, где $r, 1$ соответствуют радарным и лидарным измерениям. В качестве примера на рисунке представлено дифференциальное сечение рассеяния, рассчитанное для длин волн лидара ATLID 0.355 мкм (слева) и радара CPR 3189 мкм (справа).

Хорошо известно, что при решении задачи рассеяния света на частицах, размер которых много меньше длины волны падающего излучения, решение может быть представлено аналитически — это так называемое рэлеевское рассеяние (приближение Рэля). Однако полученные методом дискретных диполей расчеты показали, что для частиц размером более 800 мкм приближение Рэля уже неприменимо

для длины волны радара 3189 мкм и возникает необходимость в расчете точными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках приближения физической оптики и метода дискретных диполей была решена задача рассеяния в оптическом и микроволновом диапазонах излучения для реалистичной модели размеров и форм ледяных кристаллов перистого облака. Полученные результаты предполагается использовать при создании алгоритмов интерпретации данных совместного зондирования лидаром и радаром на инструментах спутника EarthCare.

Решение задачи рассеяния в оптическом и микроволновом диапазонах излучения для типичных форм ледяных кристаллов перистых облаков и построение банка данных выполнены при финансовой поддержке РНФ № 21-77-00083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baker B.M. Cloud microphysics and climate. *Science*. 1997. Vol. 276. P. 1072–1078.
- Illingworth A.J., Barker H.W., Beljaars A., et al. The Earth-CARE Satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 96, iss. 8. P. 1311–1332.
- Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective. *Mon. Weather Rev.* 1986. Vol. 114, iss. 6. P. 1167–1199.
- Moshary F., Han Z., Wu Y., et al. New results from the NOAA CREST Lidar Network (CLN) observations in the US East-coast. *EPJ Web of Conf.* 2016. Vol. 119. P 19005.
- 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. Vol. 27, iss. 23. P. 32984–32993.
- Um J., McFarquhar G.M. 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. *JQSRT*. 2015. Vol. 165. P. 134–152.

Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., et al. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals. *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. P. 3933–3956.

Veselovskii I., Goloub P., Podvin T., et al. Spectral dependence of backscattering coefficient of mixed phase clouds over West Africa measured with two-wavelength Raman polarization lidar: features attributed to ice-crystals corner reflection. *JQSRT*. 2017. Vol. 202. P. 74–80.

Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals. *Appl. Opt.* 1979. Vol. 18. P. 2663–2671.

Wiscombe W.J. Improved Mie scattering algorithms. *Appl. Opt.* 1980. Vol. 19. P. 1505–1509.

Yang P., Liou K. N. Light scattering and absorption by non-spherical ice crystals. *Light Scattering Reviews*. Chichester: Springer-Praxis, 2006. P. 31–71.

Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2011. Vol. 112. P. 2234–2247.

Zabukovec A., Ancellet G., Penner I.E., et al. Characterization of aerosol sources and optical properties in siberia using airborne and spaceborne observations. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, 244.