

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 537.876; 535.36; 535.44

**Характеристики обратного рассеяния оптических
и электромагнитных волн при совместном зондировании
перистых облаков поляризационным лидаром (0,355 мкм)
и 94-ГГц радаром**

**В.А. Шишко^{1,2}✉, Д.Н. Тимофеев¹, А.В. Коношонкин¹, Н.В. Кустова¹, Н. Кан¹,
И.В. Ткачев¹, К. Masuda³, Н. Ishimoto³, Н. Okamoto⁴, А.Г. Боровой^{1*}**

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

³*Meteorological Research Institute
Nagamine 1-1, Tsukuba 305-0052, Japan*

⁴*Kyushu University
Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan*

Поступила в редакцию 8.04.2022 г.;
после доработки 13.05.2022 г.;
принята к печати 15.06.2022 г.

В настоящей работе решена задача рассеяния на ледяных кристаллах, характерных для перистых облаков, излучения гигагерцового радара (94 ГГц; длина волны 3189 мкм) и лидара (длина волны 0,355 мкм); показатели преломления льда $1,7864 + 0,0032 \cdot i$ и $1,3249 + 0 \cdot i$ соответственно. Матрицы рассеяния рассчитаны в рамках приближения физической оптики и приближения дискретных диполей для случая хаотически ориентированных частиц размерами от 4 до 1000 мкм. Рассчитано отношение сигналов обратного рассеяния радара и лидара в направлении назад, так называемое радар-лидарное отношение, для широкого диапазона размеров частиц для типичных форм ледяных кристаллов перистого облака. Показано, что такое отношение может быть использовано для оценивания размеров ледяных кристаллов перистых облаков.

Ключевые слова: рассеяние света, лидар, радар, физическая оптика, приближение дискретных диполей, атмосферные ледяные кристаллы, перистые облака; light scattering, lidar, radar, physical optics, discrete dipole approximation, atmospheric ice crystal, cirrus cloud.

Введение

Глобальные климатические изменения, наблюдаемые в последнее время, обуславливают необходимость более пристального и детального изучения климатообразующих факторов [1, 2]. Один из основных источников неопределенности в современных численных моделях прогнозирования изменений климата — это перистые облака, которые являются

важным компонентом атмосферы, существенно влияющим на радиационный баланс Земли [3–8]. Обычно перистые облака располагаются на высотах от 7 до 12 км и состоят из ледяных кристаллических частиц преимущественно гексагональной формы [9, 10].

Микрофизические свойства (размер, форма, ориентация и т.д.) атмосферных кристаллов льда плохо изучены из-за высокой степени их изменчивости во времени и пространстве, а также в силу того, что полевые измерения таких свойств малоэффективны из-за нарушения структуры частиц в момент наблюдения [11, 12]. Эффективными способами исследования атмосферы остаются различные дистанционные методы. Среди них выделяются методы лидарного и радарного зондирования, обеспечивающие активное зондирование облаков [13–19] с использованием приборов наземного, воздушного и космического базирования [13, 19–23]. Преиму-

* Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru); Дмитрий Николаевич Тимофеев (tdn@iao.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Надежда Кан (n.kan.08@gmail.com); Илья Валерьевич Ткачев (tiv@iao.ru); Kazuhiko Masuda (k_masuda@met.kishou.go.jp); Hiroshi Ishimoto (hiroshi@mri-jma.go.jp); Hajime Okamoto (okamoto@riam.kyushu-u.ac.jp); Анатолий Георгиевич Боровой (borovoi@iao.ru).

щество этих методов в том, что они не вносят изменений в пространственную ориентацию кристаллов. Однако при интерпретации сигнала, получаемого этими методами, возникают сложности [24–26].

Ранее [27, 28] нами были найдены измеряемые лидаром характеристики (лидарное, деполяризационное и спектральное отношения), которые чувствительны к форме и ориентации атмосферных ледяных кристаллов. Эти характеристики предложено использовать для классификации типов ледяных частиц при работе лидара высокого спектрального разрешения ATLID (ATMospheric LIDar) [29, 30]. Задача определения размера ледяных кристаллов остается нерешенной, поскольку пока не существует эффективных алгоритмов восстановления размера ледяных частиц перистых облаков, а данные, получаемые при лазерном зондировании атмосферы, слабо зависят от размера частиц [28].

Сведения о размерах атмосферных ледяных кристаллов необходимы для решения таких климатических задач, как задача переноса излучения, предсказания глобальных катастроф и др., а также для включения в современные модели глобального изменения климата и долгосрочного прогноза погоды.

Перспективной для решения задачи определения размеров облачных кристаллов представляется идея совместного зондирования лидаром и радаром одного и того же объема перистого облака в предположении, что распределения ледяных кристаллов и их микрофизические характеристики при таких измерениях остаются одинаковыми.

Как уже было показано нами ранее в [31], при совместном зондировании лидаром и радаром одного и того же объема перистого облака отношение сигналов обратного рассеяния радара к лидару (радар-лидарное отношение) не зависит от удельного числа частиц и, как следствие, характеризует только микрофизические характеристики ледяных кристаллов. Это вызвано тем, что радарный сигнал главным образом определяется удельным объемом исследуемых частиц, а лидарный сигнал чувствителен в основном к площади проекции частицы. Как следствие, их отношение чувствительно именно к размеру частиц.

Несмотря на отсутствие теоретического решения, эксперименты по совместному зондированию перистой облачности лидаром и радаром проводятся уже около 30 лет. Первая работа, объединяющая лидарные и радарные измерения перистых облаков, была выполнена в 1993 г. J.M. Intrieri et al. [32]. Авторам удалось восстановить вертикальные профили эффективного размера кристалла из данных совместных измерений лидаром и радаром. Однако в связи с недостаточной развитостью численных методов в 1993 г. рассеяние на частицах перистой облачности моделировалось в рамках теории Лоренца–Ми [33, 34], что не является корректным, так как в основном в перистой облачности наблюдаются несферические частицы [12, 35], форма и ориентация которых существенно влияют на рассеяние света [36]. Несмотря на этот недочет, работа получила широкую известность и ее результаты используются

для интерпретации экспериментальных данных [18, 37–40]. Однако проблема точности восстановления среднего размера ледяных частиц перистых облаков при использовании предложенного выше метода остается нерешенной. Позже были разработаны и исследованы другие алгоритмы совместных одновременных измерений космическими радиометрами, радаром и лидаром (например, [18, 37–40]). Возможность и эффективность восстановления размеров частиц из данных совместного зондирования была подтверждена и нами в теоретическом расчете для 35-ГГц радара (длина волны $\lambda = 8565$ мкм) и лидара (0,532 мкм), установленных в юго-восточном Китае (институт AIOFM г. Хефэй) [31].

Уже в марте 2023 г. будет запущен на орбиту Земли спутник EarthCare (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) [41], на борту которого будут совместно работать лидар ATLID ($\lambda = 0,355$ мкм) и радар CPR (Cloud Profiling Radar) на частоте 94 ГГц ($\lambda = 3189$ мкм). В связи с этим возникает необходимость построения оптической модели перистой облачности для длин волн лидара ATLID и радара CPR, установленных на спутнике, с целью интерпретации данных совместного зондирования лидаром и радаром спутника EarthCare. Настоящая работа посвящена решению именно этой задачи.

Методология

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. В теоретических расчетах вместо экспериментально измеряемых величин используются матрицы обратного рассеяния света \mathbf{M}^{lid} (матрица Мюллера [42]) для лидарных длин волн и матрицы обратного рассеяния микроволнового излучения \mathbf{M}^{rad} для радарных длин волн.

Для лидара ATLID ($\lambda = 0,355$ мкм) расчет матриц обратного рассеяния света для сферических частиц выполнялся в рамках теории рассеяния Лоренца–Ми [34, 43], а для всех остальных типов частиц использовался метод физической оптики [44, 45]; показатель преломления льда принимался равным $1,3249 + 0 \cdot i$. Для 94-ГГц радара CPR ($\lambda = 3189$ мкм) матрицы обратного рассеяния микроволнового излучения рассчитывались в приближении дискретных диполей, разработанном М. Юркиным [46, 47]; в этом случае показатель преломления льда принимался равным $1,7864 + 0,0032 \cdot i$.

Моделировались следующие формы хаотически ориентированных частиц: гексагональные столбики и пластинки, bullet, дроксталлы, агрегаты, bullet-rossette, частицы произвольной формы, сферические частицы (рис. 1). При моделировании методом дискретных диполей частицы представлялись набором от 4000 до 20000 диполей в зависимости от размера частицы.

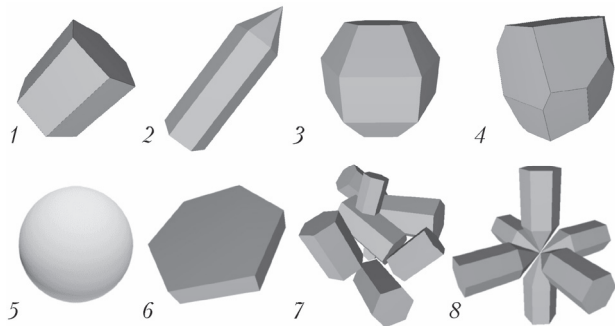


Рис. 1. Формы ледяных кристаллов, использованные в расчетах: 1 – гексагональный столбик; 2 – bullet; 3 – дрок-сталл; 4 – произвольная форма; 5 – сфера; 6 – гексагональная пластинка; 7 – агрегат; 8 – bullet-rosette

Размеры крупных несферических частиц перистых облаков принято определять их максимальным размером (расстояние между наиболее удаленными точками частицы) D_{\max} [48], который в наших расчетах варьировался в диапазоне от 4 до 1000 мкм. Таким образом, типичный размер кристалла существенно превышает длину волны лидара, но меньше длины волны радара.

Результаты

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) [49]. Однако полученные методом дискретных диполей расчеты показали, что для частиц размером более 200 мкм приближение Рэля уже неприменимо для длины волны радара 3189 мкм. На рис. 2, а (цв. вкладка) приведен элемент $\mathbf{M}_{11}^{\text{rad}}$ матрицы рассеяния в зависимости от D_{\max} . Видно, что решение имеет сильный разброс в зависимости от формы частицы. Это противоречие можно объяснить с учетом того факта, что рассеяние на частицах размером меньше длины волны падающего излучения зависит не от размера, а от объема частицы. Поэтому далее мы предлагаем ввести другой параметр, характеризующий размер частиц: эквивалентный радиус R_{eq} , который имеет простой физический смысл – это радиус шара, объем которого совпадает с объемом исследуемой частицы:

$$R_{\text{eq}} = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{part}}}{4\pi}},$$

где V_{part} – объем несферической частицы.

Сравнения рис. 2, а и б показывает, что определение размера частицы через эквивалентный радиус R_{eq} вместо общепринятого максимального размера D_{\max} позволяет получить хорошее согласие с приближением Рэля для всех типов частиц в диапазоне размеров до $R_{\text{eq}} < 200$ мкм для радара с частотой 94 ГГц.

Решение задачи рассеяния света для лидара ATLID с $\lambda = 0,355$ мкм уже было получено нами

ранее [28] и представлено в базе данных [50]. На рис. 3 (цв. вкладка) в качестве иллюстрации представлен элемент $\mathbf{M}_{11}^{\text{hd}}$ матрицы обратного рассеяния света как функция максимального размера D_{\max} и эквивалентного радиуса R_{eq} частицы.

После того, как нам удалось решить задачу рассеяния на ледяных частицах перистых облаков применительно к лидару ATLID и радару CPR, мы смогли рассчитать отношение радарного сигнала к лидарному.

На рис. 4 (цв. вкладка) построено отношение радарного сигнала к лидарному, рассчитанное по формуле

$$\chi = \frac{\beta^r}{\beta^l} = \frac{c\sigma^r}{c\sigma^l} = \frac{\sigma^r}{\sigma^l} = \frac{\mathbf{M}_{11}^{\text{rad}}}{\mathbf{M}_{11}^{\text{hd}}}. \quad (1)$$

Здесь $\beta^{r,l}$ – коэффициент обратного рассеяния излучения радара и лидара; c – концентрация частиц в облаке; $\sigma^{r,l}$ – дифференциальное сечение рассеяния одного кристалла в направлении назад, которое усредняется по статистическому ансамблю кристаллов в облаке; $\mathbf{M}_{11}^{\text{hd}}$ и $\mathbf{M}_{11}^{\text{rad}}$ получены при решении задачи рассеяния методом физической оптики и в приближении дискретных диполей соответственно. Решение получено для ледяных частиц, представленных на рис. 1, как функция максимального размера кристалла (рис. 4, а) и эквивалентного радиуса (рис. 4, б). Здесь мы допускаем, что концентрация частиц одинакова в выделяемой лидаром и радаром области облака.

Из рис. 4 видно, что определение размера частицы через эквивалентный радиус R_{eq} является предпочтительным при использовании отношения χ для восстановления размера, поскольку кривые, очевидно, слабо зависят от форм кристалла, а зависимость от размера кристалла остается сильной. Эти результаты подтверждают, что для восстановления размеров кристаллов эффективно использовать отношение радарного сигнала к лидарному.

Обсуждение результатов

В формуле (1) используются следующие допущения: радаром и лидаром наблюдается один и тот же ансамбль ледяных кристаллов (хотя поле зрения инструментов разное); облако однородно как по ориентации кристаллов, так и по их размеру. В рамках настоящей работы мы не рассматриваем вопрос о том, насколько допустимо такое предположение, поэтому при интерпретации экспериментальных данных следует уделять этому особое внимание. Кроме того, в перистых облаках ледяные кристаллы не монодисперсные, а распределены по размерам. Поскольку вопрос выбора закона распределения по размерам кристалла остается дискуссионным, в качестве предварительной оценки мы выбрали гамма-распределение, предложенное в работах Н. Okamoto [51, 52].

Оценим влияние распределения по размерам на радар-лидарное отношение с помощью гамма-распределения в его простейшей форме ($k = 2$):

$$p(R_{\text{eq}}) = R_{\text{eq}}^{k-1} \frac{\exp(-R_{\text{eq}}/\theta)}{\theta^k \Gamma(k)},$$

где p — плотность вероятности; $\Gamma(k)$ — гамма-функция; θ и k — параметры гамма-распределения.

Радар-лидарные отношения, усредненные с использованием гамма-распределения по ансамблю ледяных кристаллов фиксированной формы, показаны на рис. 5 (цв. вкладка) в зависимости от модального радиуса $R_{\text{mod}} = (k - 1)\theta$, который имеет простой физический смысл — это наиболее часто встречающийся в распределении размер кристалла.

Как видно из рис. 5, усреднение частиц в облаке по ансамблю влияет на абсолютное значение радар-лидарного отношения χ , однако зависимость от размера все еще остается сильной. Видно, что изменение модального размера на один порядок (с 10 до 100 мкм) приводит к изменению χ практически на три порядка. Этот факт доказывает эффективность использования радар-лидарного отношения для определения размера частиц в облаке.

Конечно, предложенный закон гамма-распределения частиц по размерам носит иллюстративный характер, и вопрос выбора адекватного распределения частиц в облаке по размерам должен быть рассмотрен подробно в дальнейшем.

Заключение

Таким образом, в рамках приближения физической оптики и метода дискретных диполей впервые рассчитано отношение радарного сигнала к лидарному для реалистичной модели размеров и форм ледяных кристаллов перистого облака для космического аппарата EarthCARE. Показано, что именно радар-лидарное отношение является наиболее информативным для восстановления размеров кристаллов независимо от их формы. Полученные результаты предполагается использовать при создании алгоритмов интерпретации данных совместного зондирования лидаром и радаром спутника EarthCare.

Благодарности. Анализ радарного сигнала выполнен в рамках государственного задания ИОА СО РАН. А.В. Коношонкин выражает благодарность фонду CAS PIFI (2021VTA0009) за развитие метода физической оптики.

Финансирование. Расчеты и построение банка данных матриц рассеяния света в приближении физической оптики выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-77-00083). Расчеты и построение банка данных матриц рассеяния микроволнового излучения методом дискретных диполей выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-55-53027).

Список литературы

1. Baker B.M. Cloud microphysics and climate // Science. 1997. V. 276. P. 1072–1078.
2. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). New York, USA; Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
3. Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals // Appl. Opt. 1979. V. 18. P. 2663–2671.
 4. Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // Mon. Weath. Rev. 1986. V. 114, N 6. P. 1167–1199.
 5. Takano Y., Liou K.N. Radiative transfer in cirrus clouds. Part III: Light scattering by irregular ice crystals // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52, N 7. P. 818–837.
 6. Sassen K., Benson S. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing: II. Microphysical properties derived from lidar depolarization // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58, N 15. P. 2103–2112.
 7. Sassen K., Zhu J., Benson S. Midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. IV. Optical displays // Appl. Opt. 2003. V. 42. P. 332–341.
 8. Takano Y., Liou K.N. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I. Single scattering and optical properties of hexagonal ice crystals // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46, N 1. P. 3–19.
 9. Hobbs P.V., Chang S., Locatelli J.D. The dimensions and aggregation of ice crystals in natural clouds // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 2199–2206.
 10. 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 // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2015. V. 165. P. 134–152.
 11. Baker B.A., Lawson R.P. In situ observations of the microphysical properties of wave, cirrus, and anvil clouds. Part I: Wave clouds // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. P. 3160–3185.
 12. Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., Lee S.-S., Jung C.H., Lawson R.P., Mo Q. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 3933–3956.
 13. Moshary F., Han Z., Wu Y., Gross B., Wesloh D., Hoff R.M., Delgado R., Su J., Lei L., Lee R.B., McCormick M.P., Diaz J., Cruz C., Parsiani H. New results from the NOAA CREST Lidar Network (CLN) observations in the US eastcoast // EPJ Web of Conf. 2016. V. 119. P. 19005.
 14. Veselovskii I., Goloub P., Podvin T., Tanre D., Ansmann A., Korenskiy M., Borovoi A., Hu Q., Whitman D.N. 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 // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. V. 202. P. 74–80.
 15. Balin Y.S., Samoilova S.V., Krekova M.M., Winker D.M. Retrieval of cloud optical parameters from space-based backscatter lidar data // Appl. Opt. 1999. V. 38, N 30. P. 6365–6373.
 16. Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Nasonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilova S.V. Scanning polarization lidar LOSA-M3: Opportunity for research of crystalline particle orientation in the clouds of upper layers // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13, N 3. P. 1113–1127.
 17. Okamoto H., Macke A., Quante M., Raschke E. Modeling of backscattering by nonspherical ice particles for the interpretation of cloud radar signals at 94 GHz.

- An error analysis // Beitr. Phys. Atmos. 1995. V. 68. P. 319–334.
18. Liu C.-L., Illingworth A.J. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds // J. Appl. Meteorol. 2000. V. 39, N 7. P. 1130–1146.
 19. Zabukovec A., Ancellet G., Penner I.E., Arshinov M., Kozlov V., Pelon J., Paris J.-D., Kokhanenko G., Balin Y.S., Chernov D., Belan B.D. Characterization of aerosol sources and optical properties in Siberia using airborne and spaceborne observations // Atmosphere. 2021. V. 12(2). Art. N 244.
 20. Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P. An overview of LITE: NASA's Lidar-in-space Technology Experiment // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 164–180.
 21. Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2002. V. 4893.
 22. Балин Ю.С., Тухомуров А.А. История создания и работы в составе орбитальной станции «Мир» первого российского космического лидара БАЛКАН // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1078–1087.
 23. Sassen K., Wang Z., Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) measurements // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. (D00A12).
 24. Garrett K.J., Yang P., Nasiri S.L., Yost C.R., Baum B.A. Influence of cloud top height and geometric thickness on MODIS infrared-based cirrus cloud retrieval // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2009. V. 48. P. 818–832.
 25. Шишко В.А., Брюханов И.Д., Ну Е.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В. Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 186–192; Shishko V.A., Bryukhanov I.D., Nie E.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Konoshonkin A.V. Algorithm for interpreting light backscattering matrices of cirrus clouds for the retrieval of their microphysical parameters // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 4. P. 393–399.
 26. Okamoto H., Iwasaki S., Yasui M., Horie H., Kuroiwa H., Kumagai H. An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95-GHz cloud radar and lidar // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N D7. P. 4226.
 27. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. Backscattering Mueller matrix for quasihorizontally oriented ice plates of cirrus clouds: Application to CALIPSO signals // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 28222–28233.
 28. Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Reichardt J. Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2017. V. 25, N 19. P. 22341–22346.
 29. Okamoto H., Sato K., Borovoi A., Ishimoto H., Masuda K., Konoshonkin A., Kustova N. Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar // Opt. Express 2019. V. 27, N 25. P. 36587–36600.
 30. Okamoto H., Sato K., Borovoi A., Ishimoto H., Masuda K., Konoshonkin A., Kustova N. Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for spaceborne polarization lidar applications // Opt. Express 2020. V. 28, N 20. P. 29178–29191.
 31. Wang Z., Shishko V., Kustova N., Konoshonkin A., Timofeev D., Xie C., Liu D., Borovoi A. Radar-lidar ratio for ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express 2021. V. 29, N 3. P. 4464–4474.
 32. Intrieri J.M., Stephens G.L., Eberhard W.L., Utal T. A method for determining cirrus cloud particle sizes using lidar and radar backscatter technique // J. Appl. Meteorol. 1993. V. 32. P. 1074–1082.
 33. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Ann. Phys. 1908. V. 25. P. 377–445.
 34. Wiscombe W.J. Improved Mie scattering algorithms // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 1505–1509.
 35. Heymsfield A.J. Ice crystal terminal velocities // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. P. 1348–1357.
 36. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 25, № 4. С. 293–299.
 37. Borg L.A., Holz R.E., Turner D.D. Investigating cloud radar sensitivity to optically thin cirrus using collocated Raman lidar observations // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. DOI: 10.1029/2010GL046365.
 38. Tinel C., Testud J., Pelon J., Hogan R.J., Protat A., Delanoe J., Bouniol D. The retrieval of ice-cloud properties from cloud radar and lidar synergy // J. Appl. Meteorol. 2005. V. 44. P. 860–875.
 39. Delanoe J., Hogan R.J. Combined CloudSat-CALIPSO-MODIS retrievals of the properties of ice clouds // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. DOI: 10.1029/2009JD012346.
 40. Protat A., Delanoe J., O'Connor E.J., L'Ecuyer T.S. The evaluation of CloudSat and CALIPSO ice microphysical products using ground-based cloud radar and lidar observations // J. Atmos. Ocean. Technol. 2010. V. 27. P. 793–810.
 41. Illingworth A.J., Barker H.W., Beljaars A., Ceccaldi M., Chepfer H., Clerbaux N., Cole J., Delanoë J., Domenech C., Donovan D.P., Fukuda S., Hirakata M., Hogan R.J., Huenerbein A., Kollias P., Kubota T., Nakajima T., Nakajima T.Y., Nishizawa T., Ohno Y., Okamoto H., Oki R., Sato K., Satoh M., Shephard M.W., Velázquez-Blázquez A., Wandinger U., Wehr T., van Zadelhoff G.-J. The EarthCARE satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2015. V. 96, N 8. P. 1311–1332.
 42. Hayman M., Thayer J.P. General description of polarization in lidar using Stokes vectors and polar decomposition of Mueller matrices // J. Opt. Soc. Am. A. 2012. V. 29. P. 400–409.
 43. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N. Light scattering by spherical particles for data interpretation of mobile lidars // Opt. Eng. 2020. V. 59, N 8. P. 083103.
 44. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Borovoi A.G. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27, N 23. P. 32984–32993.
 45. Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Боровой А.Г. Оценка влияния поглощения на рассеяние света на атмосферных ледяных частицах для длин волн, характерных для задач лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 381–385; Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Borovoi A.G. Estimation of the absorption effect on light scattering by atmospheric ice crystals for wavelengths typical for problems of laser sounding of the atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 5. P. 564–568.
 46. Penttilä A., Zubko E., Lumme K., Muinonen K., Yurkin M.A., Draine B., Rahola J., Hoekstra A.G., Shkuratov Yu. Comparison between discrete dipole implementations and exact techniques // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2007. V. 106. P. 417–436.

47. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112. P. 2234–2247.
48. Yang P., Liou K.N. Light scattering and absorption by nonspherical ice crystals // *Light Scattering Reviews*, v. 1 / A.A. Kokhanovsky (ed.). Chichester: Springer-Praxis, 2006.
49. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Рэлеевское рассеяние в газах и жидкостях // *Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред.* М.: Наука, 1982. Т. VIII. С. 582–583.
50. База данных матриц обратного рассеяния, рассчитанных в рамках физической оптики. [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/ (дата обращения: 4.04.2022).
51. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. Backscattering Mueller matrix for quasihorizontally oriented ice plates of cirrus clouds: Application to CALIPSO signals // *Opt. Express.* 2012. V. 20. P. 28222–28233.
52. Okamoto H., Sato K., Hagihara Y. Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. (D22209).

V.A. Shishko, D.N. Timofeev, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, N. Kan, I.V. Tkachev, K. Masuda, H. Ishimoto, H. Okamoto, A.G. Borovoi. **Backscattering properties of optical and electromagnetic waves with remote sensing of cirrus clouds by 0.355 μm polarizing lidar and 94 GHz radar.**

The problem of electromagnetic scattering on ice crystals of cirrus clouds was solved for 94 GHz radar (wavelength 3189 μm) and lidar (wavelength 0.355 μm) with the refractive indices of ice — $1.7864 + 0.0032 \cdot i$ and $1.3249 + 0 \cdot i$ respectively. The scattering matrices 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 . It was possible to correctly calculate the ratio of the radar and lidar signals in the backscattering direction, called the radar-lidar ratio. The ratio was obtained for the wide particle size distribution for typical shapes of cirrus cloud ice crystals. It is shown that this ratio can be used to estimate the size of ice crystals in cirrus clouds.

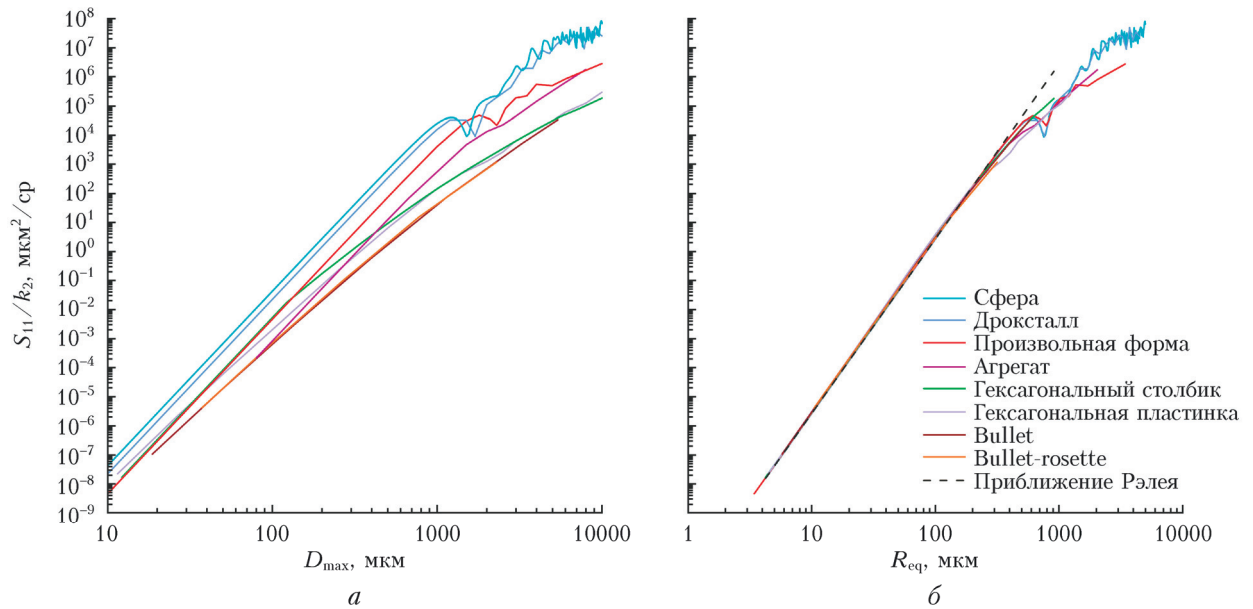


Рис. 2. Элемент матрицы обратного рассеяния микроволнового излучения M_{11}^{rad} для хаотически ориентированных кристаллов различных форм, построенный в зависимости от: a – максимального размера D_{max} частицы; b – эквивалентного радиуса R_{eq} . Длина волны радара CPR – 3189 мкм

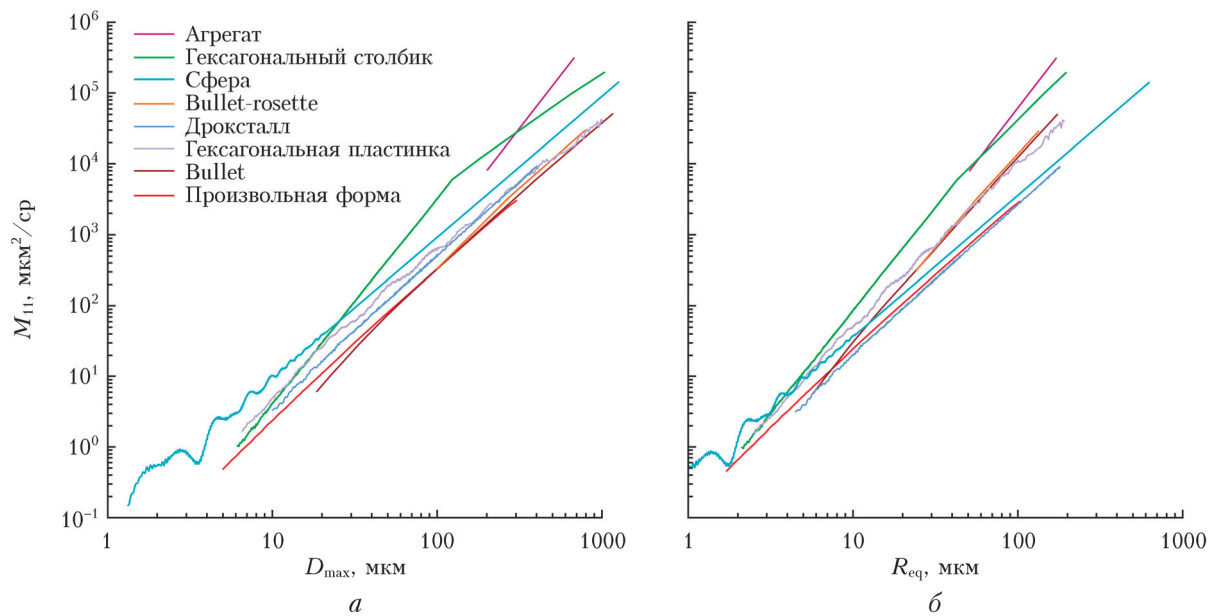


Рис. 3. Элемент матрицы обратного рассеяния света M_{11}^{lid} для хаотически ориентированных кристаллов различных форм, построенный в зависимости: a – от максимального размера D_{max} частицы; b – эквивалентного радиуса R_{eq} . Длина волны лидара ATLID – 0,355 мкм

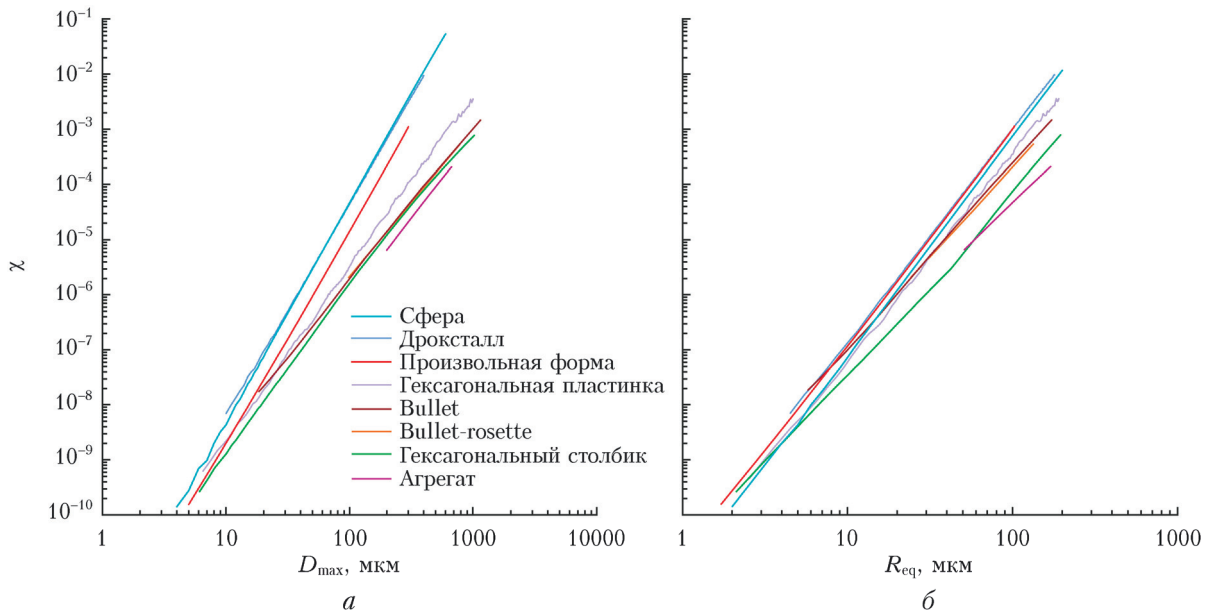


Рис. 4. Отношение радарного сигнала к лидарному для хаотически ориентированных кристаллов различных форм в зависимости от: a – максимального размера частицы; b – эквивалентного радиуса. Длина волны лидара – 0,355 мкм, радара – 3189 мкм (94 ГГц)

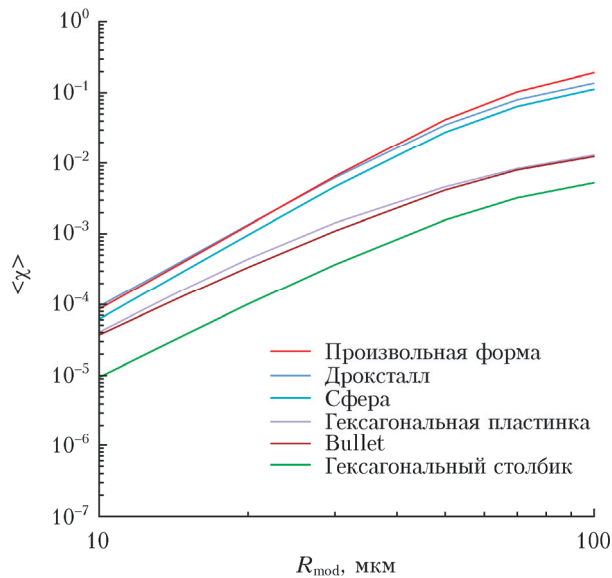


Рис. 5. Отношение радарного сигнала к лидарному для хаотически ориентированных кристаллов различных форм в зависимости от модального радиуса. Длина волны лидара 0,355 мкм, радара – 3189 мкм (94 ГГц)