

УДК 535.42

Характеристики обратного рассеяния света атмосферных ледяных гексагональных частиц искаженной формы в рамках приближения физической оптики

Д.Н. Тимофеев¹, А.В. Коношонкин^{1,2}, Н.В. Кустова¹, В.А. Шишко^{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

Поступила в редакцию 17.11.2021 г.

Рассчитаны матрицы обратного рассеяния света для ледяных атмосферных гексагональных частиц 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. Расчет был выполнен для частиц, полученных тремя методами искажения формы: скос, выпуклость и вогнутость. Угол искажения для каждого варианта варьировался от 0 до 50°. Длина волны падающего излучения при расчете матриц обратного рассеяния света составляла 1,064 мкм. По результатам сравнения сечений обратного рассеяния можно увидеть, что для всех рассмотренных типов частиц его значение резко уменьшается с ростом угла искажения.

Ключевые слова: обратное рассеяние света, перистые облака, ледяные частицы, искажение формы, физическая оптика; light backscattering, cirrus clouds, ice particles, shape distortion, physical optics.

Введение

Перистые облака вносят существенный вклад в радиационный баланс Земли и должны учитываться в глобальных климатических моделях [1–3]. Эти облака находятся на высотах 7–11 км, а частицы, из которых они состоят, отличаются, как правило, призматической гексагональной формой и размерами порядка 10–1000 мкм. Однако изучать физические свойства этих частиц (размеры, геометрия) сложно в силу ряда причин. Контактные методы изучения малоэффективны из-за того, что в момент наблюдения частицы повреждаются и меняют свою пространственную ориентацию. Более эффективны 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) [4], который нужно интерпретировать. Для корректной интерпретации необходимо иметь базу данных, в которой матрицы обратного рассеяния света (МОРС) сопоставляются с микрофизическими свойствами частиц облаков [5, 6].

Аналитическим методом рассчитать МРС для частиц перистых облаков не представляется возможным

в силу их сложной геометрии, поэтому для этой задачи применяются алгоритмы, основанные на численных методах решения задачи рассеяния света. Эти методы делятся на точные и приближенные. Точные численные методы [7–10] хорошо применимы к частицам, размеры которых не сильно превышают длину волны падающего излучения, однако их вычислительная сложность растет с увеличением размера частиц. Например, расчеты для частиц характерным размером порядка 30 мкм на длинах волн, используемых в лазерном зондировании (0,355; 0,532; 1,064 мкм), занимают от нескольких недель до нескольких месяцев на современных вычислительных кластерах [11]. 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 [12, 13], 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 [14–18]. За счет того, что в методе вместо лучей используются плоскопараллельные пучки света, в нем легко учитываются явления дифракции и интерференции. Результаты расчетов в рамках этого метода, в отличие от аналогов [19, 20], хорошо согласуются с экспериментальными данными в направлении рассеяния света назад [21].

* Дмитрий Николаевич Тимофеев (tdn@iao.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru).

Перед тем как решать прямую задачу рассеяния, которая заключается в расчете значений отраженного от частиц сигнала, необходимо выбрать геометрическую форму и размеры частицы. Основа для выбора этих параметров — данные натурных измерений, которые показывают большое количество частиц гексагональной формы [22]. В частности, для интерпретации данных спутниковой системы MODIS используются такие формы частиц, как «столбики», «пластинки», «дроксталлы», «полые столбики» и их агрегаты (рис. 1). На их основе, как правило, создаются геометрические модели упрощенной формы для численных расчетов, т.е. модели с минимальным количеством составных объектов (характерных точек, диполей и т.д.) и без искажений углов между гранями частицы.

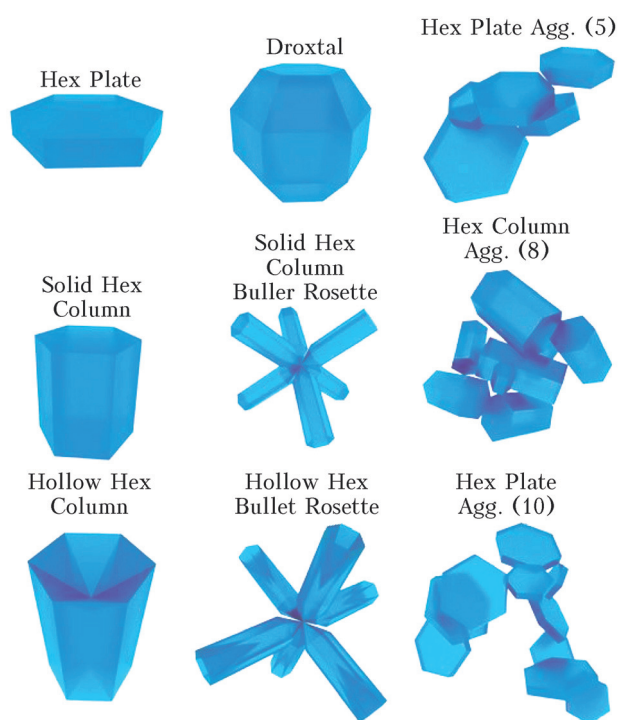


Рис. 1. Формы ледяных кристаллов используемые для интерпретации данных спутниковой системы MODIS [23]

В методе физической оптики используются геометрические модели частиц, состоящих из узловых точек, которые объединены в грани. Суть алгоритма трассировки пучков, который используется в методе, заключается в том, что падающее излучение представляет собой плоскопараллельный пучок света, который при столкновении с гранями частицы делится на отраженный и преломленный пучки меньшего размера. Внутри частицы, т.е. в ближней зоне рассеяния, распространение пучков происходит в рамках приближения геометрической оптики. Множество пучков, которые выходят из частицы в различных направлениях, попадают в дальнюю зону рассеяния, где рассчитываются их МРС с учетом дифракции и интерференции [24].

Таким методом был рассчитан банк данных МРС для частиц типа «столбики», «пластинки», «дрок-

сталлы», «пули» и некоторые частицы произвольной формы. Однако результаты расчетов для таких моделей не всегда согласуются с оптическими характеристиками, полученными из экспериментальных данных, в частности, значения лидарного (LR) и линейного деполаризационного отношений (DR) [25, 26] оказываются ниже измеренных. Как показано в [27], вышеописанные характеристики сильно зависят от эффекта «углового отражения», который образуется за счет наличия прямого двугранного угла между основаниями гексагональных частиц и их боковыми гранями.

В результате решения задачи рассеяния света на частицах искаженной формы можно получить значения оптических характеристик, которые согласуются с данными экспериментов лучше, чем значения для частиц без искажений. Хороший пример таких частиц — «полые столбики», у которых прямой двугранный угол нарушается из-за наличия в гексагональном столбике полостей в основаниях в виде шестиугольных пирамид (рис. 2). Расчет МРС по всем углам рассеяния для такой формы в рамках приближения геометрической оптики показывает разрушение гало 46° и пика в направлении рассеяния назад. Однако такая геометрическая модель требует дополнительных вычислений методом физической оптики в силу того, что частица имеет невыпуклую форму.

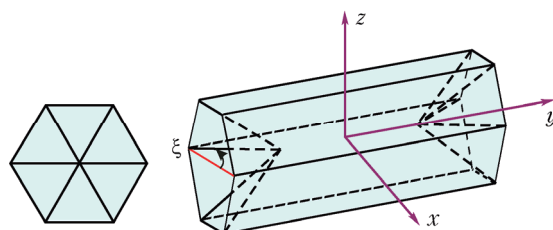


Рис. 2. Частица типа «полый столбик» с углом полости ξ

Альтернативный способ искажения прямого двугранного угла в гексагональных частицах — скос оснований на угол ξ , описанный в [28] (рис. 3). При этом форма частицы остается выпуклой, а симметрия по углам наклона и вращения нарушается. Здесь и далее для удобства такие частицы будут называться «скошенные столбики». Кристаллы подобной формы нарушают законы кристаллографии, однако в [29] показано, что МОРС, рассчитанные

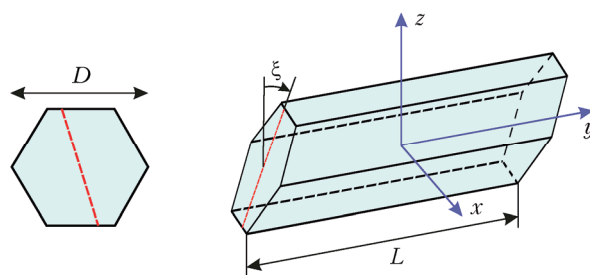


Рис. 3. Искажение гексагонального столбика длиной L с диаметром описанной окружности D методом скоса оснований на угол ξ

для таких частиц при ξ порядка $1-5^\circ$, показывают значения LR и DR , близкие к эксперименту.

Третий способ искажения – добавление пирамидальных пиков к основаниям гексагонального столбика. Такие частицы при рассеянии теоретически могут порождать пучки, которые выходят в тех же направлениях, что и пучки у «полых столбиков», при одинаковых углах искажения ξ , однако форма частиц остается выпуклой и не требует больших вычислений методом физической оптики. В настоящей работе для краткости такая форма будет обозначаться как «двойная пуля» (рис. 4).

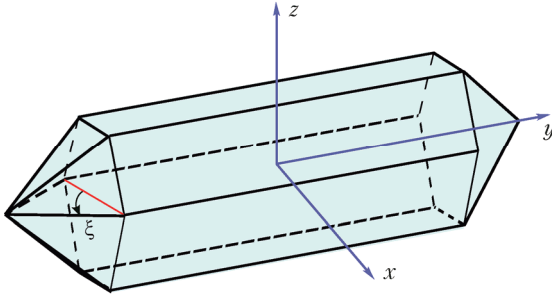


Рис. 4. Частица типа «двойная пуля» с углом основания пирамидального пика ξ

Цель настоящей работы – сравнение характеристик обратного рассеяния света для трех способов искажения частицы типа «гексагональный столбик» при $\xi = 0-50^\circ$ в рамках приближения физической оптики. Новизна исследования заключается в получении оптических характеристик частиц типа «полый столбик» и «двойная пуля» в рамках используемого метода.

Расчет матриц обратного рассеяния света

Первая программная реализация метода физической оптики была ориентирована только на частицы выпуклой формы, поэтому в качестве геометрических форм с нарушением уголкового отражения использовались скошенные столбики. Вторая программная реализация учитывает особенности распространения пучков в кристаллах невыпуклой формы, а именно взаимное затенение граней, траектории пучков типа «кристалл – воздух – кристалл» и образование пучков неправильной формы. В настоящей работе необходимо было рассчитать МОРС для «полых столбиков» и «двойных пуль» в дополнение к уже имеющимся данным для «скошенных столбиков». В качестве размеров базового гексагонального столбика были выбраны высота 31,62 мкм и внешний диаметр 22,14 мкм, взятые из [30], как наиболее часто встречающиеся размеры частиц перистых облаков. Значение длины волны было выбрано 1,064 мкм, характерное для задач лазерного зондирования. При такой длине волны значение показателя преломления для льда будет 1,3004 [31]. Максимальное количество внутренних столкновений света с гранями частицы было ограничено числом 12,

при котором достигается достаточная точность расчета. Так как пространственная ориентация частиц является хаотической, были заданы интервалы вращения исходя из симметрии частиц по углу наклона $0-90^\circ$, по углу вращения $0-60^\circ$. Путем варьирования угла скоса оснований столбика в диапазоне $0-50^\circ$ получаются «скошенные столбики», 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 дифракционное кольцо приходилось по 5 точек.

Для каждой полученной частицы из двух наборов «полых столбиков» и «двойных пуль» были рассчитаны МОРС. По значениям элементов матриц были получены сечение обратного рассеяния, которое соответствует первому элементу МОРС (M_{11}), DR - и LR -отношения. Их зависимости от ξ для трех типов частиц приведены на рис. 5 (цв. вкладка).

Из сравнения M_{11} (рис. 5, а) для разных типов частиц видно, что у «полых столбиков» происходит быстрое падение интенсивности с увеличением ξ по сравнению с другими типами частиц. Кроме того, как у «полых столбиков», так и у «двойных пуль» исчезает пик интенсивности в интервале ξ от 0 до 2° , свойственный «скошенным столбикам», из-за интерференции косых уголкового траекторий [32]. Также у «скошенных столбиков» наблюдаются схожие с «полыми столбиками» скачки интенсивности в интервале ξ от 5 до 20° .

Усреднение характеристик по модальному углу искажения

Расчеты, представленные выше, были выполнены для частиц с конкретно заданными формой и размером в случае однократного рассеяния, однако в реальных облаках существует некое распределение этих параметров, которое заранее неизвестно. В качестве попытки описать рассеивающие характеристики облаков, состоящих из таких частиц, можно использовать гамма-распределение:

$$\langle R(\xi_{\text{mod}}) \rangle = C \cdot \int_0^{50} R(\xi) \cdot \xi^{k-1} \frac{\exp(-\xi/\theta)}{\theta^k \Gamma(k)} d\xi,$$

$$\xi_{\text{mod}} = (k-1)\theta,$$

$$C = \left[\int_0^{50} \xi^{k-1} \frac{\exp(-\xi/\theta)}{\theta^k \Gamma(k)} d\xi \right]^{-1},$$

где R – усредненная характеристика (M_{11} , DR или LR); ξ_{mod} – модальный угол искажения формы; C – нормализующий коэффициент; $\Gamma(k)$ – гамма-функция; k – параметр распределения. Применяя данное распределение при $k = 2$, получаем зависимости, представленные на рис. 6 (цв. вкладка).

Исходя из экспериментальных данных [22], для кристаллов перистых облаков DR начинается

со значения $\sim 0,4$. Как видно из рис. 6, б, для «полых столбиков» это значение выше при $\xi_{\text{mod}} = \sim 3^\circ$, для «скошенных столбиков» и «двойных пуль» — $\sim 4^\circ$.

Значения LR , характерные для частиц перистых облаков, должны колебаться в диапазоне 40–60. На рис. 6, в этим значениям соответствуют «скошенные столбики» с ξ_{mod} от 2 до 4° , «полые столбики» — от 1,5 до 2° , «двойные пули» — от 2,5 до 5° .

Заключение

В работе выполнено сравнение характеристик обратного рассеяния для искаженных гексагональных частиц размером ~ 30 мкм, характерных для перистой облачности. Искажения формы частиц получены тремя методами: скос, выпуклость и вогнутость. Характеристики рассчитаны методом физической оптики из матриц обратного рассеяния света; длина волны падающего излучения в расчетах составляла 1,064 мкм.

Сравнение сечений обратного рассеяния показывает, что значение резко уменьшается с ростом угла искажения для всех рассмотренных типов частиц, однако сильнее всего это выражается у «полых столбиков».

Для частиц типа «двойная пуля», в отличие от остальных форм, можно выделить диапазон значений модальных углов искажения, в котором значения линейного деполяризационного и лидарного отношений лучше всего совпадают с экспериментальными данными (от 4 до 5°). Исходя из этого, частицы такой формы нуждаются в более подробном исследовании.

Что касается попытки описать характеристики рассеяния «полых столбиков» с помощью частиц других форм, то ни одна из исследованных форм не имеет подобных характеристик, поэтому МРС для данной формы необходимо рассчитывать напрямую.

Расчеты матриц обратного рассеяния света для частиц типа «двойная пуля» выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Расчеты матриц обратного рассеяния света для частиц типа «полый столбик» и «скошенный столбик» выполнены при финансовой поддержке РФФ (№ 21-77-10089).

1. Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // *Mon. Weather. Rev.* 1986. V. 114, N 6. P. 1167–1199.
2. 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.
3. 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.
4. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16, № 4. С. 354–361.

5. Банк данных матриц обратного рассеяния света [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/> (дата обращения: 12.11.2021).
6. 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.
7. Kunz K.S., Luebbers R.J. Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. Boca Raton: FL CRC Press, 1993. 448 p.
8. Yang P., Bi L., Kattawar G., Panetta R.L. Optical properties of nonspherical atmospheric particles and relevant applications // *AAPP Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti, Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali.* 2011. V. 89, suppl. 1. DOI: 10.1478/C1V89S1P012.
9. Purcell E.M., Pennypacker C.R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains // *Astrophys. J.* 1973. V. 186. P. 705–714.
10. Grynko Y., Shkuratov Y., Förstner J. Light scattering by irregular particles much larger than the wavelength with wavelength-scale surface roughness // *Opt. Lett.* 2016. V. 41, N 15. P. 3491.
11. 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.
12. Jacobowitz H. A method for computing the transfer of solar radiation through clouds of hexagonal ice crystals // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1971. V. 11, N 6. P. 691–695.
13. Macke A., Mueller J., Raschke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystal // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53, N 19. P. 2813–2825.
14. Borovoi A.G., Grishin I.A. Scattering matrices for large ice crystal particles // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2003. V. 20. P. 2071–2080.
15. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. The physics optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2014. V. 146. P. 181–189.
16. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Особенности в деполяризационном отношении лидарных сигналов для хаотически ориентированных ледяных кристаллов перистых облаков // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 5. С. 385–387.
17. Konoshonkin A., Wang Z., Borovoi A., Kustova N., Liu D., Xie C. Backscatter by azimuthally oriented ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Express.* 2016. V. 24, N 18. P. A1257–A1268.
18. 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.

19. *Bi L., Yang P.* Physical-geometric optics hybrid methods for computing the scattering and absorption properties of ice crystals and dust aerosols // *Light Scatt. Rev.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. P. 69–114.
20. *Zhou C., Yang P.* Backscattering peak of ice cloud particles // *Opt. Express*. 2015. V. 23. P. 11995–12003.
21. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscattering by hexagonal ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, N 15. P. 2881–1884.
22. *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.
23. *Yang P., Stegmann P., Tang G., Hioki S., Ding J.* Improving scattering, absorption, polarization properties of snow, graupel, and ice aggregate particles from solar to microwave wavelengths in support of the CRTM // *JCSDA quarterly*. 2018. N 59. P. 8–14. DOI: 10.7289/V5/Q-JCSDA-59-2018.
24. *Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г.* Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 1. Теоретические основы алгоритма // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 4. С. 324–330; *Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G.* Beam splitting algorithm for the problem of light scattering by atmospheric ice crystals. Part 1. Theoretical foundations of the algorithm // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 5. P. 441–447.
25. *Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Reichardt J.* Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Express*. 2017. V. 25. P. 22341–22346.
26. *Chen W.-N., Chiang C.-W., Nee J.-B.* Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. P. 6470–6476.
27. *Kustova N.V., Borovoi A.G., Konoshonkin A.V., Veselovskii I.A.* Appearance of the corner reflection effect in cirrus clouds for off-zenith lidar profiling // *Proc. SPIE*. 2018. P. 1083346. DOI: 10.1117/12.2504123.
28. *Del Guasta M.* Simulation of LIDAR returns from pristine and deformed hexagonal ice prisms in cold cirrus by means of “face tracing” // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2001. V. 106. P. 12589–12602.
29. *Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G.* Main types of optical beams giving predominant contributions to the light backscatter for the irregular hexagonal columns // *Proc. SPIE*. 2017. P. 1046646. DOI: 10.1117/12.2288275
30. *Mitchell D.L., Arnott W.P.* A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus clouds. Part II. Radiation // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. P. 817–832.
31. *Warren S.G.* Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. P. 1206–1225.
32. *Коношонкин А.В., Боровой А.Г., Кустова Н.В., Шущко В.А., Тимофеев Д.Н.* Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах в приближении физической оптики. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. 219 с.

D.N. Timofeev, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, V.A. Shishko. **Light backscattering properties of atmospheric hexagonal ice particles with distorted shape within physical optics approximation.**

The calculation of the light backscattering matrices of atmospheric hexagonal ice particles distorted with different methods within the physical optics approximation for the case of arbitrary spatial orientation and single scattering was carried out. The hexagonal prism with height of 31.62 μm and external diameter of 22.14 μm , which is typical for “column” shape that is occurs in cirrus clouds, was chosen as the base geometrical shape for distortion. The calculation was carried out for particles generated with three methods of distortion of base facets: tilt, pike, and cavity. The angle of distortion varied from 0 to 50° for every type of particles. The wavelength of incident radiation was equal to 1.064 μm .

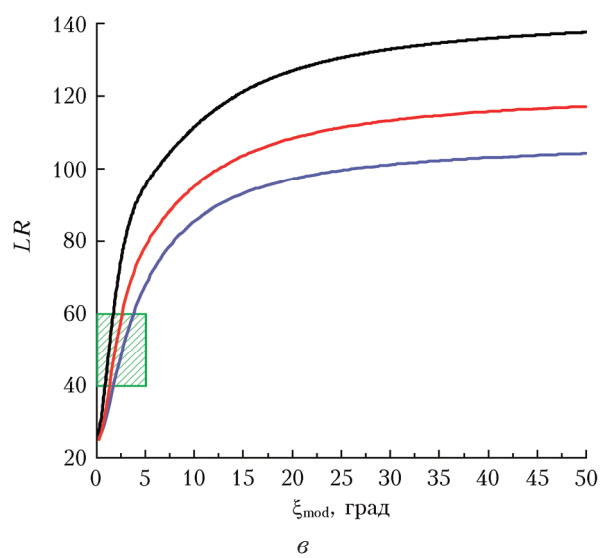
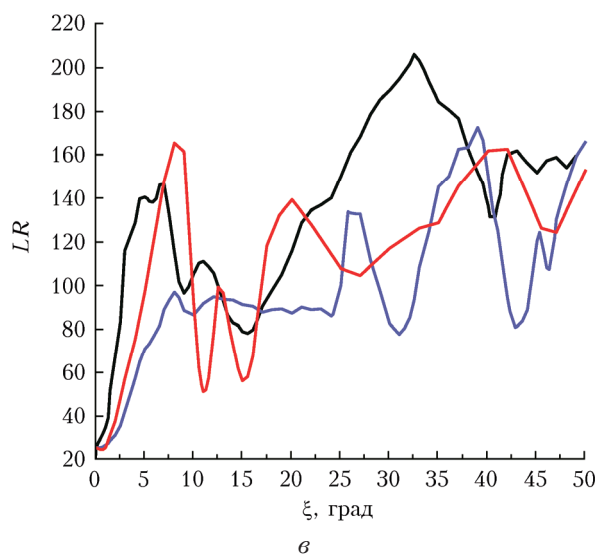
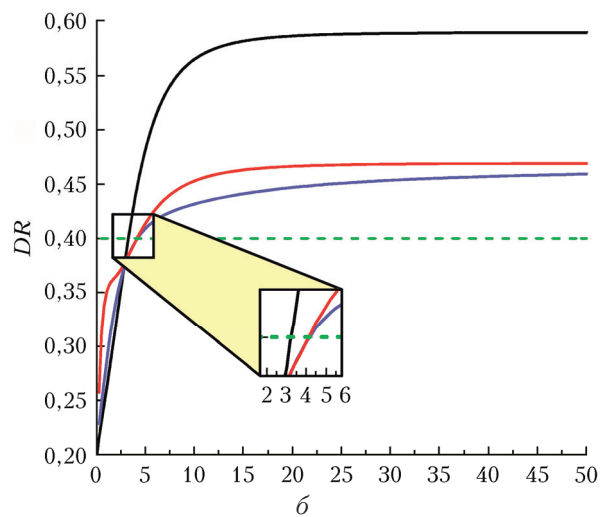
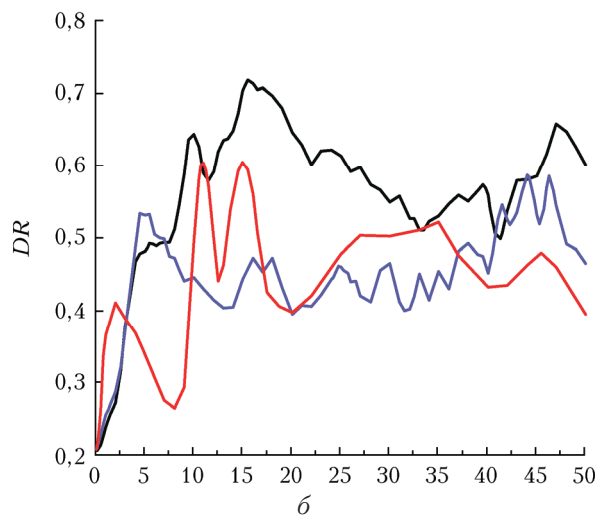
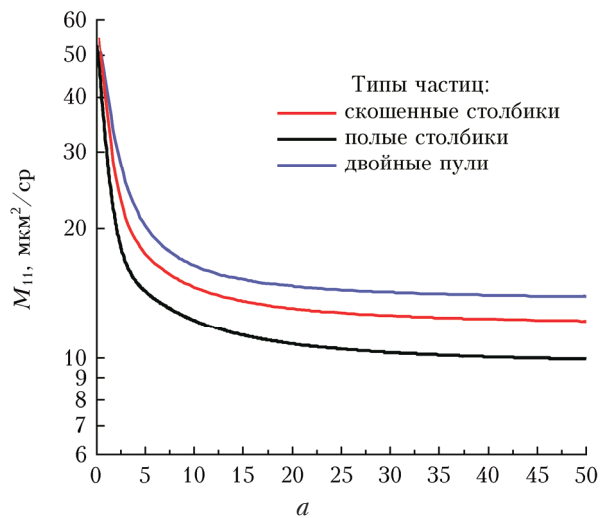
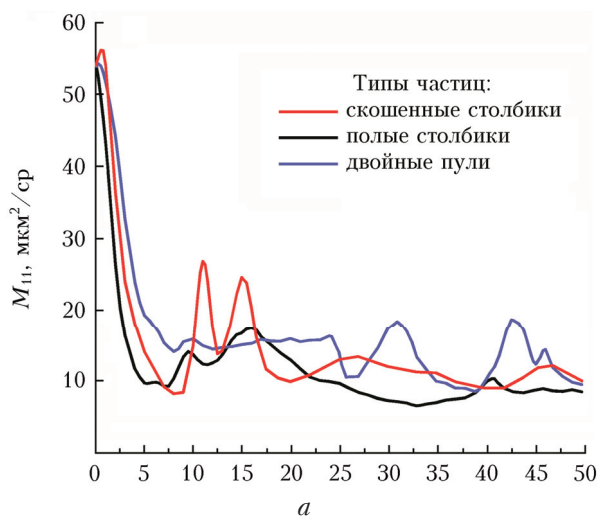


Рис. 5. Зависимости характеристик обратного рассеяния от ξ : $a - M_{11}$; $b - DR$; $c - LR$

Рис. 6. Усредненные зависимости характеристик обратного рассеяния от ξ_{mod} : $a - M_{11}$; $b - DR$; $c - LR$