

УДК 535.3

Оценка влияния поглощения на рассеяние света на атмосферных ледяных частицах для длин волн, характерных для задач лазерного зондирования атмосферы

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

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

Поступила в редакцию 18.01.2019 г.

Представлены результаты анализа численного расчета матриц рассеяния света для ледяных частиц произвольной формы с учетом поглощения, полученных в рамках приближения геометрической оптики. Проведена оценка влияния поглощения на характеристики обратного рассеяния света для задач лазерного зондирования атмосферы. Результаты показывают, что учет поглощения при смещении длины волны вглубь ИК-диапазона приводит к уменьшению интенсивности рассеянного излучения. Влияние поглощения для длин волн 0,355 и 0,532 мкм не превышает сотых долей процента, для 1,064 мкм — единиц процента, а для ближнего ИК-диапазона может превышать десятки процентов.

Ключевые слова: рассеяние света, поглощение, ледяные частицы, геометрическая оптика, перистые облака; light scattering, absorption, ice crystals, geometrical optics, cirrus clouds.

Введение

Перистые облака играют важную роль в процессе рассеяния солнечной энергии. Они составляют приблизительно 1/3 от всех облаков, покрывающих земную поверхность. Перистые облака состоят из кристаллов льда различных форм и размеров, следовательно, процесс рассеяния света сводится к рассеянию на этих частицах [1–4]. Данные, полученные в ходе изучения свойств этих облаков, необходимы для уточнения климатических моделей.

Оптические и микрофизические свойства перистых облаков восстанавливаются из данных, получаемых методом лазерного зондирования. Для их интерпретации необходимо решение прямой задачи рассеяния света с использованием численных методов, которые можно разделить на точные и приближенные. Так как точные методы (например метод конечных разностей во временной области [5–8], метод дискретных диполей [9–15] и разрывной метод Галёркина [16]) требуют большой вычислительной мощности для частиц размером много больше длины волны падающего оптического излучения, то для решения прямой задачи рассеяния

света использовался разработанный в ИОА СО РАН приближенный метод физической оптики [17, 18]. Можно еще отметить зарубежный аналог метода физической оптики — метод РГОН (physical-geometric optics hybrid), разрабатываемый под руководством Р. Yang [19–21], но он не способен разрешить пик интенсивности в направлении рассеяния назад, что явно отражено в [22].

В своей первой модификации метод физической оптики для простоты не учитывал поглощение электромагнитной волны рассеивающей частицей, поскольку предполагалось, что данный эффект не оказывает существенного влияния на решение. С помощью этого метода были успешно решены многие задачи оптики перистых облаков [23–26]. На сегодняшний день накоплен банк данных матриц обратного рассеяния света для основных форм ледяных частиц, характерных для перистых облаков, для длин волн 0,355; 0,532; 1,064 мкм. В представляемой в нашей работе реализации метод физической оптики способен учитывать влияние поглощения на решение задачи рассеяния света, но только за счет увеличения вычислительной сложности алгоритма. Поэтому необходимо оценить влияние этого фактора, т.е. выяснить, к какой погрешности ведет игнорирование эффекта поглощения для кристалла определенного размера, формы и ориентации в зависимости от длины волны излучения. Ответ на этот вопрос позволит, во-первых, уточнить погрешность уже имеющегося банка

* 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); Анатолий Георгиевич Боровой (borovoi@iao.ru).

данных решений задачи рассеяния света, во-вторых, — оптимизировать решение задачи рассеяния света методом физической оптики, игнорируя учет поглощения в задачах, где этот эффект пренебрежимо мал.

В настоящее время при решении задачи рассеяния света в направлении строго назад на ледяных кристаллических частицах поглощение часто игнорируется. Такое положение дел обусловлено тем, что эта задача до сих пор полностью не решена даже в предположении отсутствия поглощения. Попытки ее решения точными методами с учетом поглощения [27] оказались неудачными из-за требований этих методов к вычислительным ресурсам [10, 11], что ограничивает максимальный размер частиц диапазоном 30–50 мкм. Многие существующие модели (например, OPAC [28], модель В.А. Ваум [29]), построенные с учетом поглощения в рамках приближения геометрической оптики и метода РГОН, успешно применяются в решении задач переноса излучения, однако для задач лазерного зондирования их использование некорректно из-за неразрешенной сингулярности в направлении рассеяния назад [30, 31]. Один из вариантов универсального учета поглощения предложен в [30], но этот подход неэффективен с точки зрения объема компьютерных вычислений для нахождения рассеянного поля в ближней зоне кристалла. Тем не менее в [32] на примере ледяной гексагональной частицы продемонстрировано, что влияние поглощения может в некоторых случаях оказаться значительным.

Цель настоящей работы — подробно исследовать и дать количественные оценки влияния поглощения на матрицу рассеяния света. Новизна исследования заключается в том, что впервые представлена оценка влияния поглощения на характеристики обратного рассеяния света на идеальных и неидеальных ледяных частицах, характерных для перистых облаков.

Постановка задачи

Влияние поглощения электромагнитной волны на матрицу рассеяния света в значительной степени зависит от размера частицы и длины волны, поскольку степень поглощения пропорциональна длине оптического пути внутри частицы, размеры которой могут варьироваться в широком диапазоне, а для разных длин волн поглощающие свойства льда существенно различаются. Ориентация и форма частицы оказывают меньшее влияние ввиду того, что параметр формы (*aspect ratio*) ледяных частиц перистых облаков, как правило, не превышает 5–7 [33, 34]. Исключение здесь — крупные гексагональные ледяные пластинки с большим параметром формы, но они, как правило, имеют в облаке квазигоризонтальную ориентацию, при которой основной вклад в лидарный сигнал формируется за счет внешнего зеркального отражения и поглощение электромагнитной волны частицей практически не происходит.

В связи с этим информативным является исследование влияния поглощения как функции размера частицы для четырех активно используемых в задачах лазерного зондирования длин волн: 0,355; 0,532; 1,064; 1,6 мкм. Чтобы определить влияние формы частицы, логично рассмотреть два предельных случая: идеальную гексагональную частицу и частицу случайной формы. Все возможные формы ледяных частиц с точки зрения влияния поглощения будут укладываться в диапазон между этими двумя предельными случаями.

Для решения поставленной задачи нет необходимости использовать ресурсоемкий метод физической оптики, поскольку поглощение происходит внутри частицы, т.е. в ближней зоне, а решение в ближней зоне строится в приближении геометрической оптики [35].

Будем решать задачу с помощью разработанного в ИОА СО РАН метода трассировки пучков MBS-1 [36] (реализованного в приближении геометрической оптики), в рамках которого уменьшение амплитуды электромагнитной волны внутри частицы определяется экспоненциальным множителем

$$\exp\left(-\frac{2\pi N_i l}{\lambda}\right),$$

где N_i — мнимая часть комплексного показателя преломления; λ — длина волны; l — расстояние, преодоленное фронтом волны внутри поглощающей среды [37].

На рис. 1 приведена зависимость мнимой части показателя преломления льда от длины волны в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне по данным [38]. Видно, что при смещении значения длины волны вглубь ИК-диапазона мнимая часть показателя преломления увеличивается, следовательно, увеличивается влияние поглощения средой частицы.

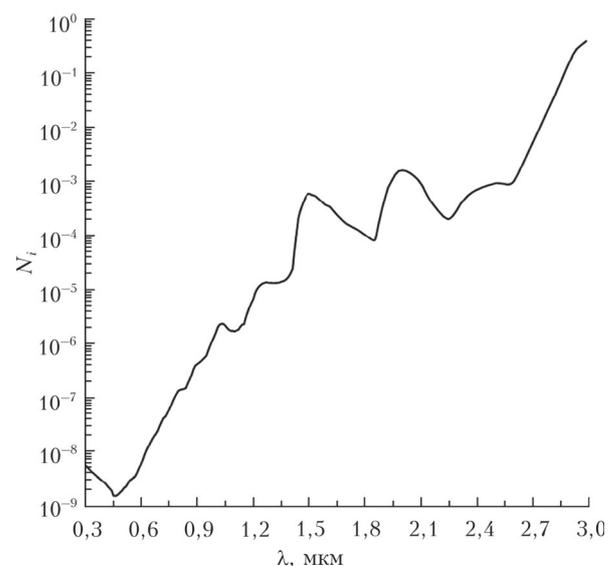


Рис. 1. Спектральная зависимость мнимой части показателя преломления льда в видимом и ближнем ИК-диапазонах

В качестве расчетных моделей были выбраны выпуклые частицы: гексагональный ледяной столбик и частица случайной формы (рис. 2). Расчет проводился при хаотической пространственной ориентации частиц для четырех длин волн при соответствующих показателях преломления (таблица).

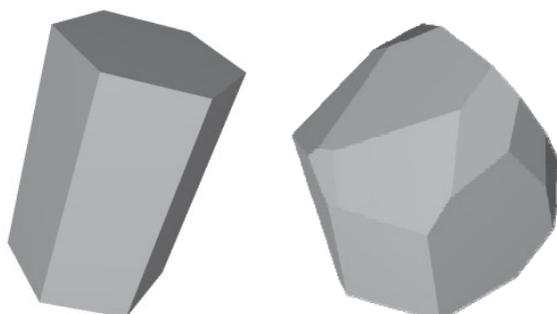


Рис. 2. Гексагональный ледяной столбик (слева) и частица произвольной формы (справа)

Длина волны, мкм	Показатель преломления
0,355	$1,3243 + i3,6595 \cdot 10^{-9}$
0,532	$1,3116 + i2,6180 \cdot 10^{-9}$
1,064	$1,3004 + i1,9000 \cdot 10^{-6}$
1,600	$1,2893 + i3,5365 \cdot 10^{-4}$

Размер частиц варьировался от 10 до 1000 мкм. Форма гексагонального столбика подчинялась зависимости L. Mitchell [39]. Частица произвольной формы масштабировалась пропорционально. За ее размер принималось максимальное расстояние между двумя вершинами (D_{\max}). Трехмерные модели кристаллов были сгенерированы в формате .STL, затем конвертированы в читаемые вычислительной программой файлы формата .DAT с помощью утилиты-конвертера, созданной авторами для этой задачи.

Результаты исследования

Типичный профиль индикатрисы рассеяния для гексагонального столбика показан на рис. 3. Для задач лазерного зондирования интерес представляет только точка рассеяния света в направлении строго назад (180° на рис. 3), а для задач переноса излучения — вся индикатриса. Оценку влияния поглощения в направлении строго назад удобно выразить величиной χ :

$$\chi = \frac{M_{11}(180^\circ) - \bar{M}_{11}(180^\circ)}{M_{11}(180^\circ)} \cdot 100\%,$$

а для всей индикатрисы — величиной ψ :

$$\psi = \frac{\int_0^\pi \bar{M}_{11}(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\int_0^\pi M_{11}(\theta) \sin(\theta) d\theta},$$

где M_{11} — интенсивность рассеянного излучения без учета поглощения; \bar{M}_{11} — с учетом поглощения.

Зависимости величин χ и ψ от размера частицы приведены на рис. 4–5.

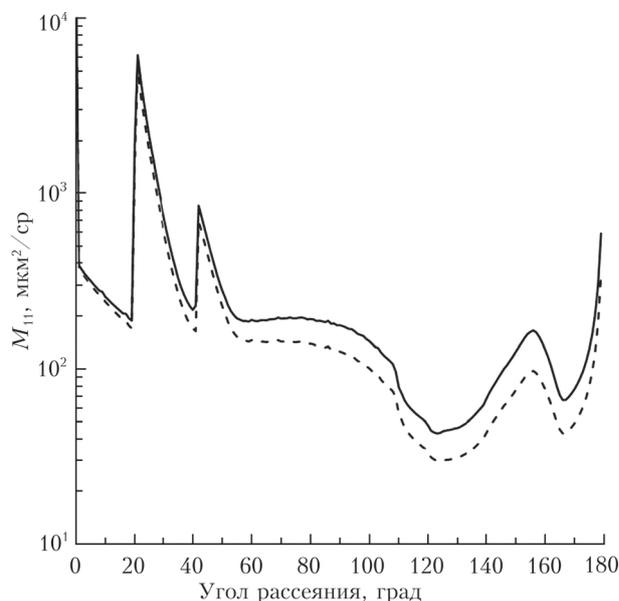


Рис. 3. Индикатриса рассеяния для гексагонального столбика размером 100 мкм на длине волны 1,6 мкм без учета поглощения (сплошная кривая) и с его учетом (пунктирная кривая)

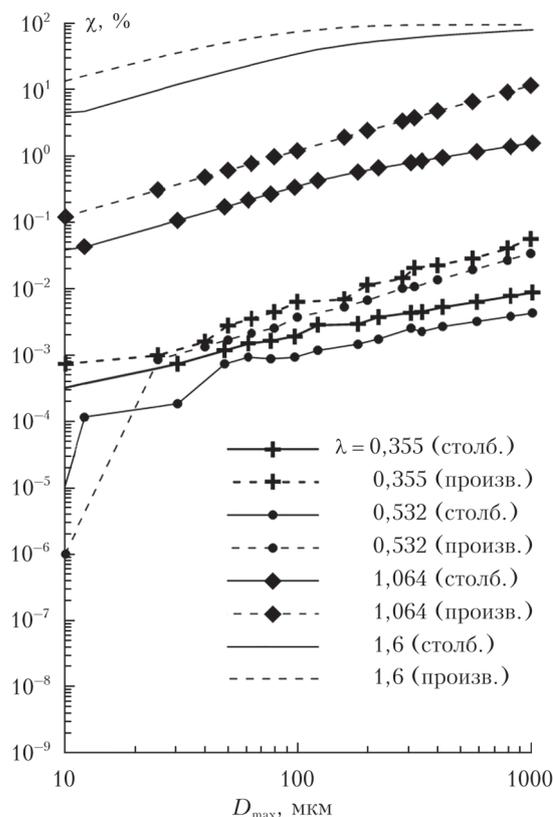


Рис. 4. Зависимость величины χ от размера гексагонального столбика и частицы произвольной формы для четырех длин волн

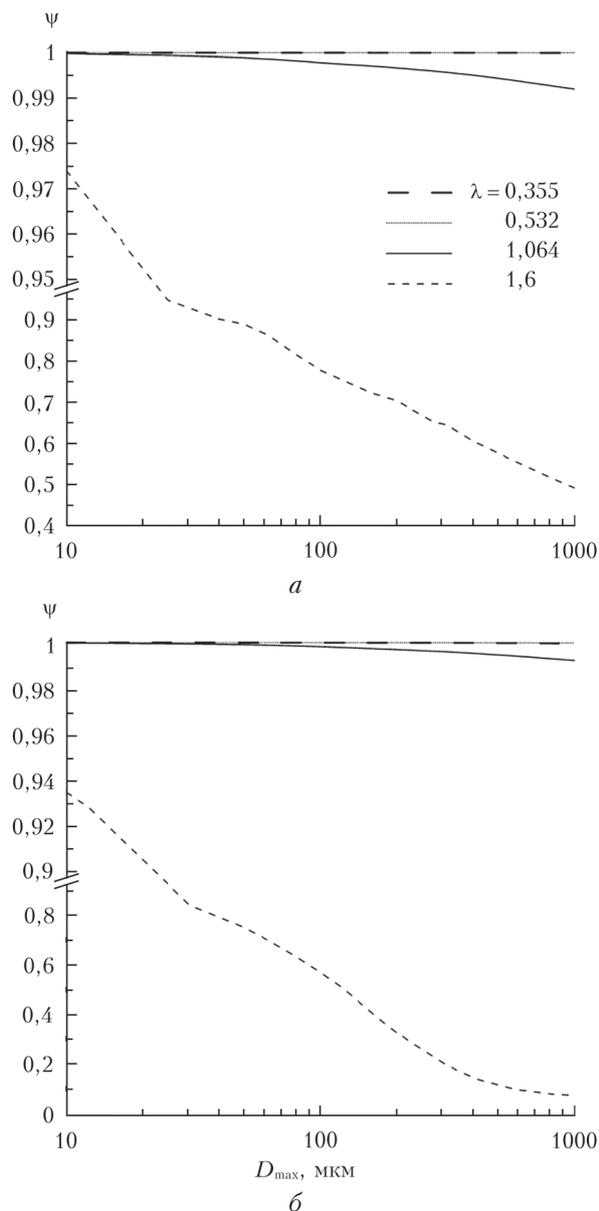


Рис. 5. Зависимость величины ψ от размера гексагонального столбика (a) и частицы произвольной формы (b) для четырех длин волн

Заключение

Результаты исследования показали, что для ультрафиолетовой и видимой частей спектра (длины волн 0,355 и 0,532 мкм) влиянием поглощения при решении задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков можно пренебречь, поскольку оно не превышает сотых долей процента независимо от формы, ориентации и размера частиц. В ближней ИК-области влияние поглощения может достигать десятков процентов практически во всем диапазоне форм и размеров кристаллов. В качестве границы раздела этих двух случаев для задач лазерного зондирования логично выбрать длину волны 1,064 мкм, для которой мнимая часть показателя преломления равна $1,9 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, для всех длин волн, для которых мнимая часть показателя преломления больше $1,9 \cdot 10^{-6}$ (ближний ИК-диапазон), при решении прямой задачи рассеяния света необходимо учитывать влияние поглощения. При этом для $\lambda = 1,064$ мкм влияние поглощения в значительной степени определяется размером и формой частицы. Для гексагональных ледяных столбиков, характерных для перистых облаков, влияние поглощения не превышает 2% во всем диапазоне размеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (соглашение 18-77-10035) в части решения задачи для идеальных гексагональных ледяных частиц, при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-05-00568, 18-55-53046) и государственного бюджета.

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. Konoshonkin A.V., Shishko V.A., Kustova N.V., Borozoi A.G., Timofeev D.N. Problem of light scattering by atmospheric ice crystals // Proc. SPIE. 2017. P. 104662C.
5. Kunz K.S., Luebbers R.J. Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993. 464 p.
6. Taflove A. Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston: Artech House, 1998. 735 p.
7. Ishimoto H., Masuda K., Mano Y., Orihara N., Uchiyama A. Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2012. V. 113, N 8. P. 632–643.
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. 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. P. 546–557.
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. Liu J., Bi L., Yang P., Kattawar G.W. Scattering of partially coherent electromagnetic beams by water droplets and ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. V. 134. P. 74–84.
13. Ori D., Kneifel S. Assessing the uncertainties of the discrete dipole approximation in case of melting ice par-

- ticles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2018. V. 217. P. 396–406.
14. *Arienti M., Geier M., Yang X., Orcutt J., Zenker J., Brooks S.D.* An experimental and numerical study of the light scattering properties of ice crystals with black carbon inclusions // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2018. V. 211. P. 50–63.
 15. *Fenni I., Haddad Z.S., Roussel H., Mitra R.* Efficient calculation of orientationally averaged scattering from complex-geometry ice particles // *IEEE Intern. Geosc. and Remote Sensing Sympos. Texas, 2017.* P. 4471–4474.
 16. *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.
 17. *Borovoi A.G., Grishin I.A.* Scattering matrices for large ice crystal particles // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2003. V. 20. P. 2071–2080.
 18. *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.
 19. *Bi L., Yang P.* Physical-geometric optics hybrid methods for computing the scattering and absorption properties of ice crystals and dust aerosols // *Light Scattering Reviews 8.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 69–114.
 20. *Bi L., Yang P., Kattawar G.W., Hu Y., Baum B.A.* Scattering and absorption of light by ice particles: Solution by a new physical-geometric optics hybrid method // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112, N 9. P. 1492–1508.
 21. *Sun B., Yang P., Kattawar G.W., Zhang X.* Physical-geometric optics method for large size faceted particles // *Opt. Express.* 2017. V. 25, N 20. P. 24044–24060.
 22. *Zhou C., Yang P.* Backscattering peak of ice cloud particles // *Opt. Express.* 2015. V. 23, N 9. P. 11995–12003.
 23. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscattering by hexagonal ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, N 15. P. 2881–1884.
 24. *Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г.* Особенности в деполяризованном отношении лидарных сигналов для хаотически ориентированных ледяных кристаллов перистых облаков // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, N 5. С. 385–387.
 25. *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.
 26. *Коношонкин А.В.* Моделирование сигнала сканирующего лидара от монодисперсного облака квазигоризонтально ориентированных частиц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 12. С. 1053–1060.
 27. *Baran A.J.* On the scattering and absorption properties of cirrus cloud // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2004. V. 89, N 1–4. P. 17–36.
 28. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // *Bull. Am. Math. Soc.* 1998. V. 79. P. 831–844.
 29. *Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemer A., Cole B.H., Merrelli A., Schmitt C., Wang C.* Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2014. V. 146. P. 123–139.
 30. *Cai Q., Liou K.-N.* Polarized light scattering by hexagonal ice crystals: Theory // *Appl. Opt.* 1982. V. 21. P. 3569–3580.
 31. *Macke A.* Scattering of light by polyhedral ice crystals // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. P. 2780–2788.
 32. *Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G.* Backscattering matrices calculation for atmospheric ice crystals within the physical optics approximation with absorption effect // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. P. 10833–174.
 33. *Auer A.H., Veal D.L.* The dimension of ice crystals in natural clouds // *J. Atmos. Sci.* 1970. V. 27, N 6. P. 919–926.
 34. *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.
 35. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 198 с.
 36. *Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В.* Алгоритм Modified beam-splitting 1 (MBS-1) для решения задачи рассеяния света на невыпуклых ледяных атмосферных частицах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 6. С. 473–480; *Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V.* Modified Beam-Splitting 1 (MBS-1) Algorithm for solving the problem of light scattering by nonconvex atmospheric ice particles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 642–649.
 37. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
 38. *Warren S.G.* Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. P. 1206–1225.
 39. *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.

D.N. Timofeev, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, V.A. Shishko, A.G. Borovoi. **Influence of absorption on light scattering on atmospheric ice crystals for wavelengths typical to lidar sounding.**

The numerical solution within the geometrical optics approximation of the light scattering matrices for ice crystals with arbitrary shape taking the absorption into account were presented. The results show that the absorption decreases the intensity of scattered light when a wavelength goes far to the IR. It was shown that the influence of absorption is less than basis points for 0.355 and 0.532 μm wavelengths, and less than several percent for 1.064 μm . For the near IR the influence of that effect could be more than several dozen percent.