

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

СТЕПЕННЫЕ ЗАКОНЫ ДЛЯ МАТРИЦ ОБРАТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ПРИ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Н.В. Кустова¹, А.В. Коношонкин^{1,2}, А.Г. Боровой¹, Н. Okamoto³, К. Sato³, S. Katagiri³

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

kustova@iao.ru, sasha_tvo@iao.ru, borovoi@iao.ru, okamoto@riam.kyushu-u.ac.jp,

sato@riam.kyushu-u.ac.jp, katagiri@riam.kyushu-u.ac.jp

Ключевые слова: лидары, ледяные кристаллы, перистые облака

Показано, что банк данных матриц обратного рассеяния для ледяных кристаллов перистых облаков, рассчитанный авторами доклада и выставленный в интернет для свободного доступа, в случае хаотически ориентированных кристаллов может быть заменен простыми аналитическими выражениями. Рассчитаны значения четырех микрофизических отношений, измеряемых лидарами, в зависимости от формы и эффективных размеров кристаллов. Эти величины можно использовать для диагностики формы кристаллов в перистых облаках

Перистые облака в настоящее время являются одним из основных источников неопределенности, возникающих в численных моделях радиационного баланса Земли и долгосрочного прогноза погоды. Поэтому микрофизические (т.е. размер, форма и пространственная ориентация ледяных кристаллов, образующих перистые облака) и оптические характеристики перистых облаков (т.е. индикатрисы и матрицы обратного рассеяния ледяных кристаллов) активно изучаются лидарами, расположенными как на земле [1,2], так и в космосе [3-5]. Теоретически задача рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков в направлении рассеяния назад, которое и регистрируется лидарами, долго не поддавалась решению из-за имеющейся сингулярности в решении. И только в последние годы авторам данного доклада удалось получить численное решение задачи для наиболее типичных форм и размеров ледяных кристаллов [6,7]. Полученный банк данных по матрицам обратного рассеяния для ледяных кристаллов находится в открытом доступе в интернете по адресу <https://github.com/sasha-tvo/Beam-Splitting>. Branch: physical-optics.

В настоящем сообщении мы показываем, что в частном случае хаотически ориентированных кристаллов полученный банк данных можно заменить простыми аналитическими аппроксимациями. В частности, как оказалось, элементы матрицы обратного

рассеяния как функции размеров кристаллов с хорошей точностью описываются простыми степенными законами.

Матрица обратного рассеяния света для хаотически ориентированных кристаллов является диагональной матрицей

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{11} - 2M_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где M_{11} – сечение обратного рассеяния, а элемент M_{22} определяет линейное деполяризационное отношение δ по формуле

$$\delta = (M_{11} - M_{22}) / (M_{11} + M_{22}). \quad (2)$$

Таким образом, матрица обратного рассеяния определяется только двумя величинами M_{11} и M_{22} .

Заметим, что хотя размеры кристаллов определяются размерами всех своих граней, в атмосферной оптике принято характеризовать их размер только одной величиной. В частности, на рис. 1а величина L – это длина гексагонального столбика, а его диаметр D определяется из эмпирически найденной формулы [8]:

$$D = 0.7L \text{ для } L < 100 \text{ мкм}; \quad D = 6.96L^{0.5} \text{ для } L > 100 \text{ мкм}. \quad (3)$$

Для гексагональных пластинок диаметр D и толщина L связаны аналогичным соотношением

$$L = 2.020241791D^{0.449}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлены значения элементов M_{11} и M_{22} как функции размеров кристаллов для наиболее типичных форм кристаллов. Здесь точки и крестики – это величины M_{11} и M_{22} , соответственно, взятые из нашего банка данных, а прямые линии – интерполяция этих данных. Интерполяция расчетных данных на рис. 1 прямыми линиями означает, что элементы матрицы M_{11} и M_{22} как функции размеров кристаллов хорошо аппроксимируются степенными законами

$$M_{11} = AD^a, \quad M_{22} = BD^b. \quad (5)$$

Вычисление элементов M_{11} и M_{22} при размерах частиц больше 1000 микрон становится уже ресурсоемкой задачей. Поэтому преимуществом найденной аппроксимации (5) является возможность использовать ее до максимальных размеров кристаллов в 10000 микрон, встречающихся в облаках. Рис. 2 демонстрирует, что аппроксимация (5) остается справедливой и для размеров кристаллов в диапазоне размеров от 1000 мкм до 10000 мкм.

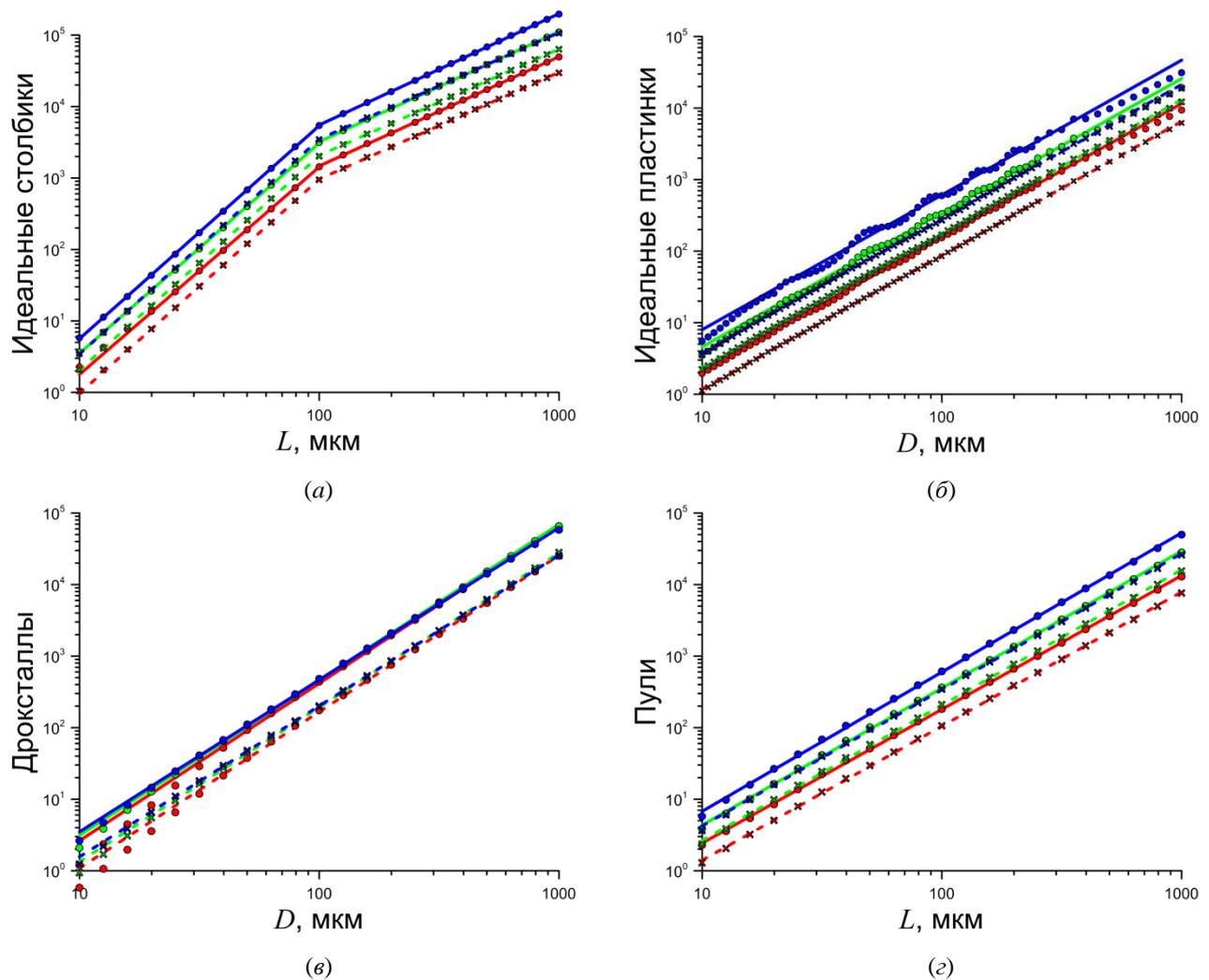


Рис. 1. Элементы матрицы обратного рассеяния для различных форм кристаллов как функции размеров кристаллов. Точки и крестики - данные из банка данных, а прямые линии - их аппроксимация степенными законами. Синий цвет соответствует длине волны 0.355 мкм, зеленый – 0.532 мкм, красный – 1.064 мкм.

На практике микрофизика перистых облаков характеризуется четырьмя отношениями, известными как деполаризационное δ , лидарное η , спектральное χ и q – отношения. Деполаризационное отношение определено уравнением (2); лидарное отношение равно $\eta = 2s / M_{11}$, где s – площадь проекции кристалла; спектральное отношение равно отношению элемента M_{11} при двух длинах волн $\chi = M_{11}(\lambda_1) / M_{11}(\lambda_2)$; и $q = M_{11} / v$, где v – объем кристалла. Чтобы сравнить эти экспериментально измеряемые величины с расчетными данными, нужно усреднить расчетные данные по распределению кристаллов по размерам в облаке. Как известно, распределение кристаллов по размерам описывается гамма-распределением

$$p(l) = l \exp(-l / D_m) / \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} l \exp(-l / D_m) dl, \quad (6)$$

где l – максимальная длина внутри кристалла и параметр D_m является модальным значением максимальной длины внутри кристалла.

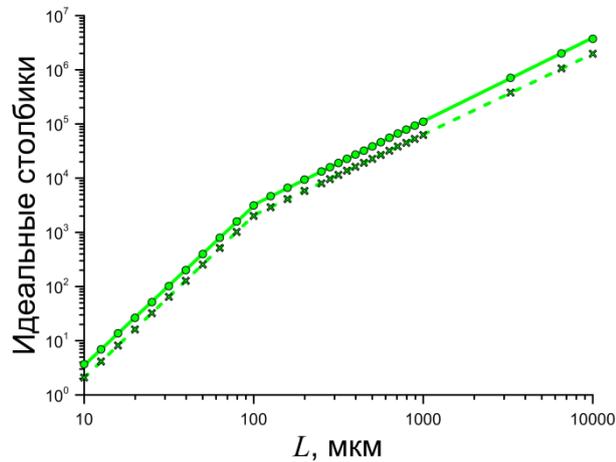
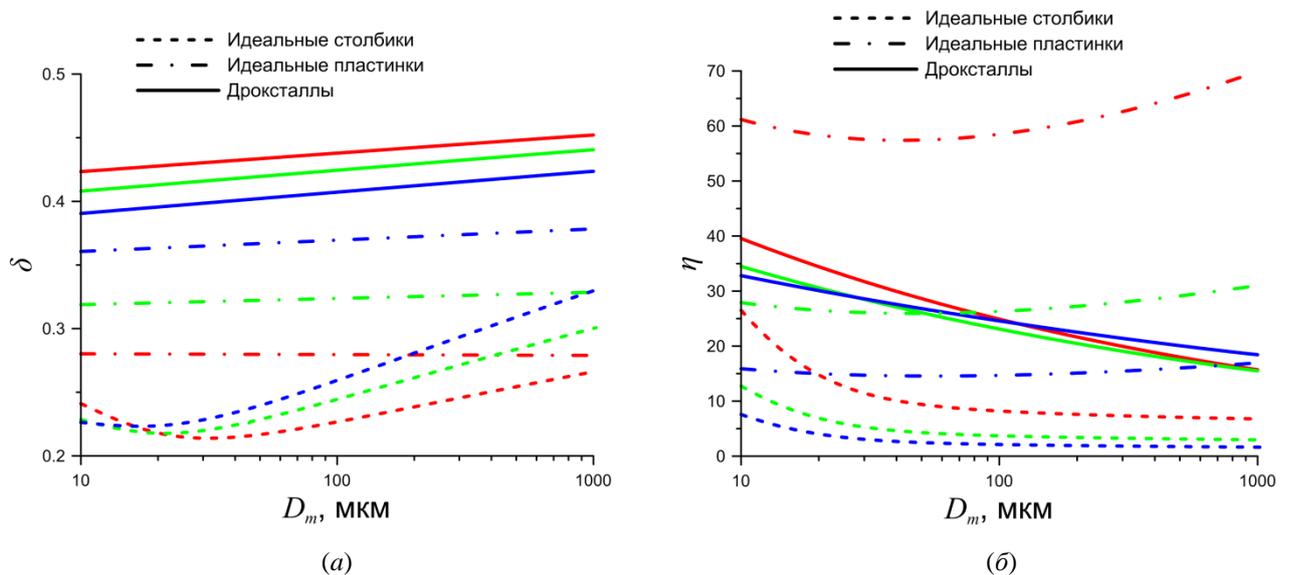


Рис. 2. Проверка аппроксимации матрицы обратного рассеяния степенным законом до размеров кристаллов в 10000 мкм.

Используя полученную аппроксимацию (5), мы впервые вычислили все четыре микрофизических отношения для данных форм кристаллов как функции модальной длины в интервале от $D_m = 10$ мкм до значений $D_m = 1000$ мкм для трех типичных длин волн лидаров: 0.355 мкм, 0.532 мкм и 1.064 мкм, что представлено на рис. 3. Кривые, представленные на рис. 3, дают уникальную возможность определять форму кристаллов в перистых облаках по совокупности значений четырех микрофизических характеристик.



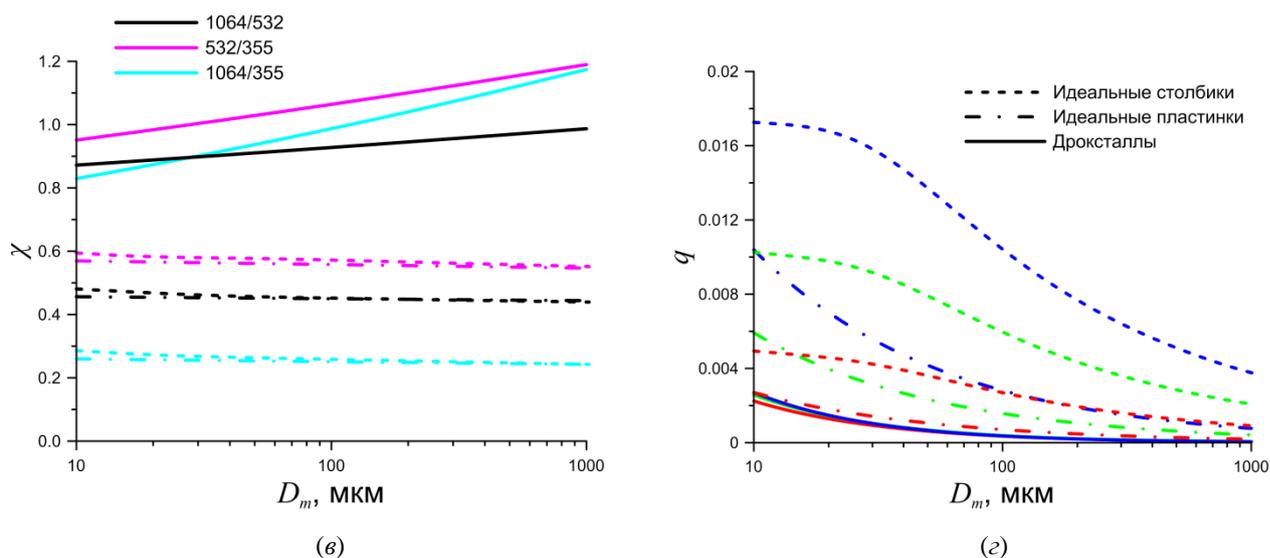


Рис. 3. Микрофизические отношения для лидарных сигналов как функции эффективного размера кристаллов в перистых облаках.

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).

1. Самохвалов И.В., Бобровников С.М., Гейко П.П., Ельников А.В., Кауль Б.В. Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 11. С. 995-999.
2. Balin Y. S., Kaul B. V., Kokhanenko G. P., Penner I. E. Observations of specular reflective particles and layers in crystal clouds // Opt. Exp. 2011. V. 19. N 7. P. 6209-6214.
3. Sassen K., Kayetha V. K., Zhu J. Ice cloud depolarization for nadir and off-nadir CALIPSO measurements // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. N 20. L20805. doi:10.1029/2012GL053116.
4. 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. 115(D22). D22209. doi:10.1029/2009JD013383.
5. Cho H. M., Yang P., Kattawar G. W., Nasiri S. L., Hu Y., Minnis P., Trepte C., Winker D. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements // Opt. Exp. 2008. V. 16 N.6 P. 3931-3948.
6. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. V. 146. P. 181-189.
7. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Осипов В.А., Боровой А.Г., Masuda K., Ishimoto H., Okamoto H. Метод физической оптики для решения задачи рассеяния света на кристаллических ледяных частицах: сравнение дифракционных формул // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28. № 9. С.830-843.
8. Mitchell D.L., Arnott W.P. A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus clouds. Part II: dependence of absorption and extinction on ice crystal morphology // Journal of the Atmospheric Sciences. 1994. V. 51 N 6. P. 817-832.