

Исследование перистых облаков поляризационным лидаром в юго-восточном Китае (г. Хэфей)

Zhenzhu Wang¹, В.А. Шишко^{2,3}, А.В. Коношонкин^{2,3},
Н.В. Кустова², А.Г. Боровой^{2,3}, Г.Г. Матвиенко², Chenbo Xie¹,
Dong Liu¹, Yingjian Wang^{1,4*}

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031 China

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

⁴ University of Science and Technology of China, Hefei, 230026 China

Поступила в редакцию 13.09.2016 г.

Представлены результаты исследования микрофизических характеристик перистых облаков в г. Хэфей, Китай, многоволновым поляризационным лидаром. Измерения проводились в период с декабря 2010 г. по февраль 2013 г. В данном сообщении мы ограничились только одной наиболее надежно измеряемой характеристикой лидарных сигналов — линейным деполаризационным отношением, измеряемом на длине волны 0,532 мкм. Также в работе были впервые численно рассчитаны деполаризационные отношения в зависимости от размеров ледяных гексагональных столбиков и от распределения углов скоса кристаллов. Эти результаты позволяют нам восстановить, с известной долей неопределенности, микрофизические параметры перистых облаков, наблюдаемых в г. Хэфее в данный временной период.

Ключевые слова: поляризационный лидар, перистые облака, приближение физической оптики, рассеяние света, ледяные кристаллы; polarization lidar, cirrus clouds, physical optics approximation, light scattering, ice crystals.

Введение

Перистые облака, расположенные на высотах около 10 км и состоящие из ледяных кристаллов размерами от 10 до 1000 мкм, являются одним из важных климатообразующих факторов. Их радиационные и микрофизические свойства, которые необходимы для современных численных моделей долгосрочного прогноза погоды и глобального изменения климата, изучены недостаточно. Поэтому микрофизические характеристики перистых облаков, т.е. размер, форма и ориентация кристаллов, активно изучаются в настоящее время методами лидарного зондирования как с земли, так и из космоса [1–3].

Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными измерениями

Теоретически задача обратного рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков решена к настоящему времени только для простейшей формы кристаллов — гексагональных столбиков и пластинок идеальной формы [4]. В данном сообщении мы приводим результаты расчетов для более реалистичной модели — хаотически ориентированных гексагональных столбиков с искаженной формой, когда гексагональные грани кристалла скошены относительно прямоугольных граней на небольшой угол ξ , аналогично нашей недавней работе [5]. При таком искажении формы кристаллов прямой угол между гранями кристалла, формирующий пик обратного рассеяния, нарушается, что приводит, вообще говоря, к сильной зависимости обратного рассеяния от размеров кристаллов. Однако усреднение по углам скоса ξ , которое присутствует в реальных облаках, нивелирует зависимость деполаризационного отношения от размеров кристаллов. Таким образом, как показывают наши расчеты, измеренные

* Zhenzhu Wang (zzwang@aiofm.ac.cn); Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru); Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (bogovoi@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Chenbo Xie (cbxie@aiofm.ac.cn); Dong Liu (dliu@aiofm.cas.cn); Yingjian Wang (wyj@aiofm.ac.cn).

значения деполаризационного отношения можно считать слабо зависящими от размеров кристаллов. Следовательно, деполаризационные отношения можно рассматривать как индикатор только формы кристаллов и их пространственной ориентации в облаке.

В данной работе мы впервые рассчитали деполаризационное отношение как функцию размеров кристаллов при различных распределениях углов скоса кристаллов для указанной модели формы кристаллов. Это позволяет нам восстановить, с известной долей неопределенности, микрофизические параметры перистых облаков, наблюдаемых в г. Хефее в период с декабря 2010 г. по февраль 2013 г.

Линейное деполаризационное отношение определяется как [4]:

$$\delta = \sigma_{\perp} / \sigma_{\parallel}, \quad (1)$$

где σ_{\parallel} и σ_{\perp} — сечения обратного рассеяния одного кристалла для перпендикулярной и параллельной компонент относительно падающего линейно поляризованного света, усредненные по статистическому ансамблю кристаллов в облаке. На рис. 1 показано вероятностное распределение значений деполаризационного отношения в перистых облаках, полученных за указанный период измерений.

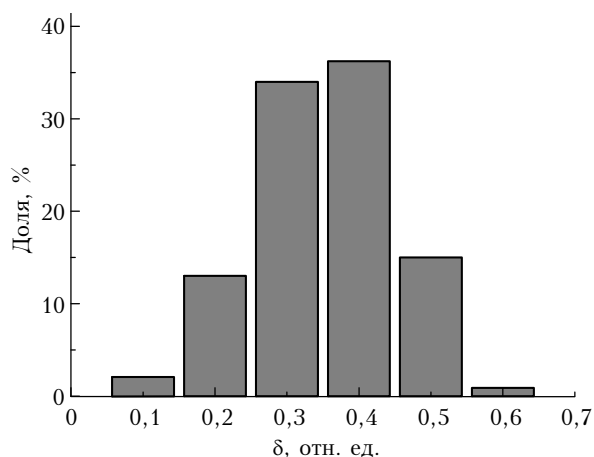


Рис. 1. Вероятностное распределение (в %) линейного деполаризационного отношения (LDR) в перистых облаках в г. Хефее

В наших расчетах размеры гексагональных столбиков определяются одним параметром L — длиной столбика. Диаметр гексагонального столбика D при этом находится из эмпирического соотношения, предложенного в работе [6]:

$$D = \begin{cases} 0,7L, & 10 \leq L < 100; \\ 6,96\sqrt{L}, & 100 \leq L \leq 1000, \end{cases} \quad (2)$$

где L и D берутся в микронах.

На рис. 2 представлены рассчитанные в нашем приближении физической оптики деполаризационные отношения для хаотически ориентированных гексагональных столбиков, угол скоса ξ у которых распределен по гауссовому закону:

$$p(\xi) = (\sqrt{2\pi}\xi_{eff})^{-1} \exp[-\xi^2 / (2\xi_{eff}^2)], \quad (3)$$

где ξ_{eff} — эффективный угол скоса граней кристалла. Как видно из рисунка, достаточно сильное искажение формы кристаллов $\xi_{eff} > 3^\circ$ нивелирует зависимость деполаризационного отношения от размеров кристалла и поднимает его значение от $\delta \approx 0,2$, типичного для кристаллов правильной формы, до $\delta \approx 0,35$.

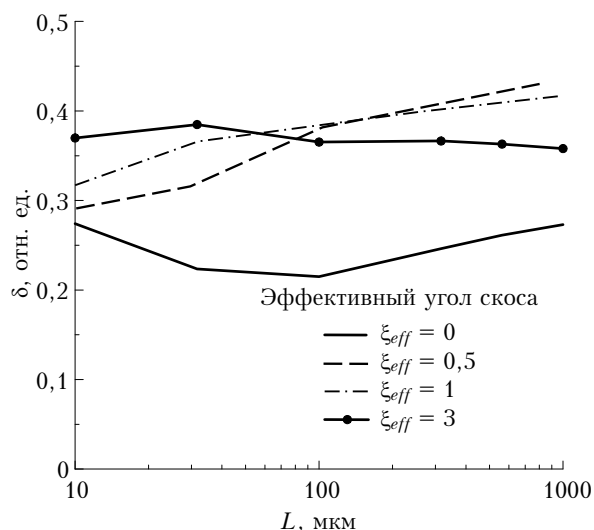


Рис. 2. Линейное деполаризационное отношение (LDR), рассчитанное для хаотически ориентированных гексагональных столбиков с эффективным углом скоса граней 0; 0,5; 1 и 3° как функция длины кристаллов при длине волны падающего света 0,532 мкм

Величина деполаризационного отношения $\delta \approx 0,2$, как известно [4], является границей, разделяющей квазигоризонтальную и хаотическую ориентацию кристаллов. На основании рис. 1 можно утверждать, что в 85% случаев $\delta \geq 0,3$, т.е. кристаллы в перистых облаках были хаотически ориентированными. При этом большие значения деполаризационного отношения $\delta \geq 0,5$ естественно отнести к кристаллам сложной формы типа агрегатов.

Таким образом, опираясь на вышеизложенное и рис. 1 и 2, можно заключить, что из 85% случаев наблюдения хаотически ориентированных частиц в период с декабря 2010 г. по февраль 2013 г. в 70% случаев форма кристаллов была достаточно простой, типа гексагональных столбиков (bullet или bullet-rosette), и лишь в 15% случаев хаотически ориентированные кристаллы имели форму агрегатов.

Работа выполнена при поддержке РФФ (соглашение 14-27-00022) в рамках расчетов деполаризационного отношения, грантов РФФИ (15-05-06100, 15-55-53081, 16-35-60089), грантов Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-8199.2016.5 и МК-6680.2015.5, грантов NSFC (41305022, 41511130028) и Chinese Academy of Sciences President's International Fellowship Initiative (No. 2016VEA044).

1. *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.
2. *Wang Z., Borovoi A., Liu D., Tao Z., Ji C., Xie C., Wang B., Zhong Z., Wang Y.* Properties of cirrus cloud by a three wavelength Raman Mie polarization lidar: Observation and model match // *Proc. SPIE*, 2016. V. 10035. (в печати).
3. *Ding J., Yang P., Holz R.E., Platnick S., Meyer K.G., Vaughan M.A., Hu Y., King M.D.* Ice cloud backscatter study and comparison with CALIPSO and MODIS satellite data // *Opt. Express*. 2016. V. 24, N 1. P. 620–636.
4. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscatter ratios for arbitrary oriented hexagonal ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Lett.* 2014. V. 39, N 19. P. 5788–5791.
5. *Borovoi A., Kustova N., Konoshonkin A.* Interference phenomena at backscattering by ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Express*. 2015. V. 23, N 19. P. 24557–24571.
6. *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 // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. P. 817–832.

Zhenzhu Wang, V.A. Shishko, A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, A.G. Borovoi, G.G. Matvienko, Chenbo Xie, Dong Liu, Yingjian Wang. **Observation of cirrus clouds by the polarization lidar in South-East China (Hefei).**

This work presents the results of the study of microphysical characteristics of cirrus clouds by multiwavelength polarization lidar located in China (Hefei). Measurements were carried out from December 2010 to February 2013. In this paper, we consider only dependable characteristics of lidar signal, which is the linear depolarization ratio measured at a wavelength of 532 nm. In addition, the dependences of depolarization ratios on both the size parameter and the distribution of the distortion angle of ice crystals were calculated in this work for the first time. These results were used for retrieving, with some uncertainties, the microphysical parameters of cirrus clouds observed in Hefei within that time period.