

УДК 535.36; 535.44

## Восстановление доли ориентированных атмосферных кристаллов по данным рамановского лидара и облакомера

А.В. Коношонкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Кустова<sup>1</sup>, А.Г. Боровой<sup>1,2</sup>, J. Reichardt<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

<sup>3</sup>Richard-Aßmann-Observatorium, DWD, Lindenberg, Germany

Поступила в редакцию 3.03.2017 г.

Представлены результаты восстановления доли ориентированных гексагональных ледяных пластинок в облаке хаотически ориентированных ледяных кристаллических частиц из данных совместного зондирования перистого облака вертикально ориентированного рамановским лидаром и отклоненного от вертикали на угол 5° облакомером. Показано, что в случае отсутствия слоя квазигоризонтально ориентированных частиц перпендикулярная и параллельная составляющие коэффициента обратного рассеяния рамановского лидара совпадают с точностью до постоянного множителя с коэффициентом обратного рассеяния облакомера. В случае появления слоя квазигоризонтальных частиц доля ориентированных частиц и угол преимущественной ориентации могут быть восстановлены из разности профилей коэффициента обратного рассеяния с использованием измеренного профиля коэффициента экстинкции.

*Ключевые слова:* квазигоризонтально ориентированные пластинки, перистые облака, физическая оптика, рассеяние света, ледяные кристаллы; quazi-horizontally oriented ice plates, cirrus clouds, physical optics, light scattering, ice crystals.

### Введение

Восстановление микрофизических параметров перистых облаков, т.е. размеров, форм и ориентаций атмосферных кристаллических частиц, из данных лидарного зондирования — сложная задача атмосферной оптики, которая до сих пор не имеет удовлетворительного решения [1]. При этом микрофизические параметры перистых облаков существенно влияют на их оптические характеристики [2–4] и должны учитываться в климатических моделях краткосрочного и долгосрочного прогноза погоды [5–10].

Одной из проблем изучения перистых облаков традиционными вертикально ориентированными лидарами [11–13] является то, что появление даже небольшой доли квазигоризонтально ориентированных ледяных пластинок вызывает существенное изменение в лидарном сигнале по сравнению с сигналом от хаотически ориентированных частиц. В частности, космический лидар CALIPSO был отклонен на угол 3° от вертикали, чтобы избежать ослепления слоями квазигоризонтально ориентированных частиц [12], а вертикально ориентированный лидар RAMSES [14] был дополнен наклоненным на 5° лазерным облакомером. Это явление имеет простое

объяснение в рамках теории зеркального отражения от горизонтально ориентированных частиц [8, 15–18]. Обширные результаты наблюдений за аномальным обратным рассеянием от слоев ориентированных частиц получены на уникальном поляризационном лидаре Томского государственного университета (ТГУ) [19–22] с использованием метода лазерного поляризационного зондирования [23–26].

В нашей статье показывается возможность определения доли квазигоризонтально ориентированных пластинок и их эффективного угла наклона с использованием данных одновременных измерений рамановского лидара RAMSES и наклонного облакомера. Предложенная идея может быть применена для интерпретации результатов других лидаров. Решение прямой задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах, используемое в работе, получено методом физической оптики [27, 28], основанным на алгоритме трассировки оптических пучков [29–31].

### Методика восстановления микрофизических параметров облаков

В пределах этой статьи будем считать, что перистые облака сформированы частицами двух типов. Основная фракция представляет собой хаотически ориентированные частицы произвольной формы, на фоне которой существует ансамбль квазигоризон-

\* Александр Владимирович Коношонкин (sasha\_tvo@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (borovoi@iao.ru); Jens Reichardt (Jens.Reichardt@dwd.de).

тально ориентированных пластинчатых кристаллов (пластинок), представляющих собой вторую фракцию.

В общем случае, когда облако зондируется линейно поляризованным светом, сечение обратного рассеяния для хаотически ориентированных частиц состоит из параллельной и перпендикулярной составляющих:

$$\sigma = \sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp}. \quad (1)$$

С другой стороны, наши предыдущие расчеты [17] позволяют с хорошей точностью утверждать, что квазигоризонтально ориентированные гексагональные пластинки создают только параллельную компоненту сечения обратного рассеяния. Обозначим ее  $\sigma_{pl}$ . Следовательно, измеряемые лидаром RAMSES два коэффициента обратного рассеяния на заданной высоте равны:

$$\beta_{\perp} = c\sigma_{\perp}, \quad (2)$$

$$\beta_{\parallel} = c\sigma_{\parallel} + C\sigma_{pl}, \quad (3)$$

где  $c$  и  $C$  — концентрации основной и добавочной фракций соответственно. Их отношение

$$k = C/c \quad (4)$$

является важной микрофизической характеристикой. Будем называть ее долей пластинок.

Кроме того, RAMSES попутно измеряет коэффициент экстинкции

$$\alpha = 2cs + 2CS, \quad (5)$$

где  $s$  и  $S$  — средние площади проекций хаотически ориентированных кристаллов и квазигоризонтально ориентированных пластинок на горизонтальную плоскость соответственно.

Конструкция облакомера не позволяет измерять деполаризацию света. Он измеряет полное сечение рассеяния (1)  $\sigma_{ceil}$  на длине волны 1064 нм. Ввиду того что облакомер имеет наклон  $5^\circ$  от вертикали, он не чувствителен к свету, рассеянному на ансамбле квазигоризонтальных частиц, когда угол их наклона меньше  $5^\circ$ . Таким образом, сигнал облакомера

$$\beta_{ceil} = c\sigma_{ceil}. \quad (6)$$

В отличие от сечения обратного рассеяния и коэффициента экстинкции деполаризационное отношение  $\delta$  и лидарное отношение  $L$  не зависят от концентрации частиц в облаке. Они характеризуют параметры рассеянного света всей совокупностью частиц, а значит, более информативны с точки зрения интерпретации лидарного сигнала в контексте микрофизических параметров облака.

В случае, когда все частицы облака имеют хаотическую ориентацию, эти оптические характеристики имеют следующий вид:

$$\delta_0 = \beta_{\perp}^0 / \beta_{\parallel}^0 = \sigma_{\perp} / \sigma_{\parallel}, \quad (7)$$

$$L_0 = \alpha_0 / (\beta_{\perp}^0 + \beta_{\parallel}^0) = 2s / \sigma. \quad (8)$$

Для смеси хаотически ориентированных частиц и ансамбля квазигоризонтально ориентированных пластинок

$$\delta = \frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}} = \frac{c\sigma_{\perp}}{c\sigma_{\parallel} + C\sigma_{pl}} = \frac{\delta_0}{1 + k\sigma_{pl}/\sigma}, \quad (9)$$

$$L = \frac{\alpha}{\beta_{\perp} + \beta_{\parallel}} = \frac{L_0 + 2kS/\sigma}{1 + k\sigma_{pl}/\sigma}. \quad (10)$$

Результаты экспериментальных наблюдений показывают, что концентрации фракций  $c$  и  $C$  изменяются с высотой  $h$  значительно быстрее, нежели микрофизические параметры и, следовательно, деполаризационное и лидарное отношения.

Таким образом, когда в облаке отсутствуют квазигоризонтально ориентированные частицы ( $C(h) = 0$ ), все четыре измеряемых профиля (2), (3), (5) и (6) с точностью до постоянного множителя должны демонстрировать одинаковое поведение, описывая зависимость концентрации хаотически ориентированных частиц от высоты  $c(h)$ .

Результаты экспериментального наблюдения для случая, когда отсутствовали слои квазигоризонтально ориентированных частиц, представлены на рис. 1 и 2.

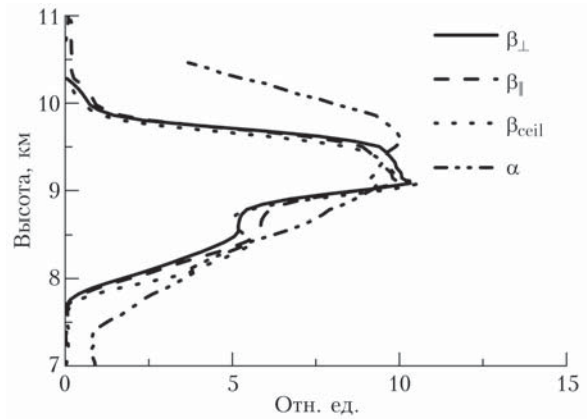


Рис. 1. Два коэффициента обратного рассеяния лидара RAMSES, коэффициент обратного рассеяния облакомера и коэффициент экстинкции с точностью до постоянного множителя. Постоянные множители выбраны такими, чтобы максимумы профилей совпадали. Случай 1

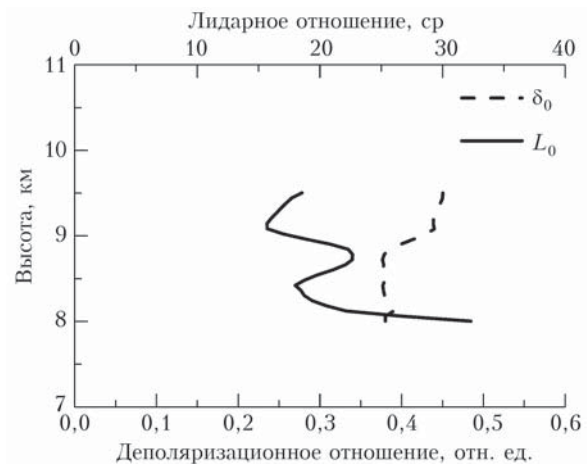


Рис. 2. Лидарное и деполаризационное отношения в зависимости от высоты. Случай 1

Действительно, поведение всех четырех профилей на рис. 1 очень похоже. Видна их существенная зависимость от концентрации. Совпадение данных облакомера с данными вертикального лидара RAMSES также указывает на хаотическую ориентацию частиц. При этом на рис. 2 видно, что и деполаризационное, и лидарное отношения, напротив, слабо меняются с высотой. Далее будем называть этот случай первым (случай 1).

Стоит отметить, что представленные на рис. 2 значения  $\delta_0 \approx 0,4$  и  $L_0 \approx 20$  — типичные для наблюдаемых перистых облаков при помощи лидара RAMSES. Согласно рассчитанной нами базе данных матриц обратного рассеяния для кристаллических частиц различной формы [32] такие значения лучше всего соответствуют деформированным гексагональным ледяным столбикам [33].

### Интерпретация экспериментальных данных

На рис. 3–5 представлены результаты наблюдений, которые будем в дальнейшем называть случаем 2.

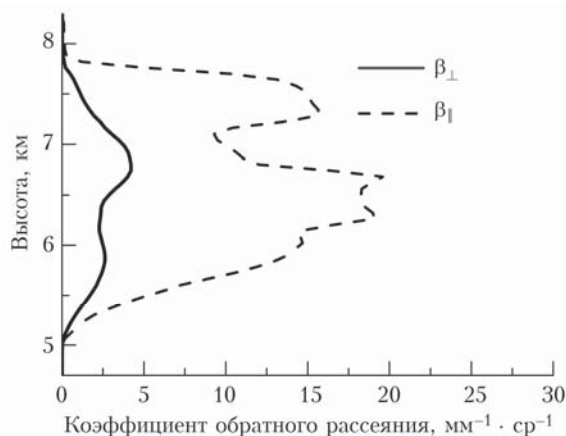


Рис. 3. Два коэффициента обратного рассеяния лидара RAMSES в абсолютных величинах. Случай 2

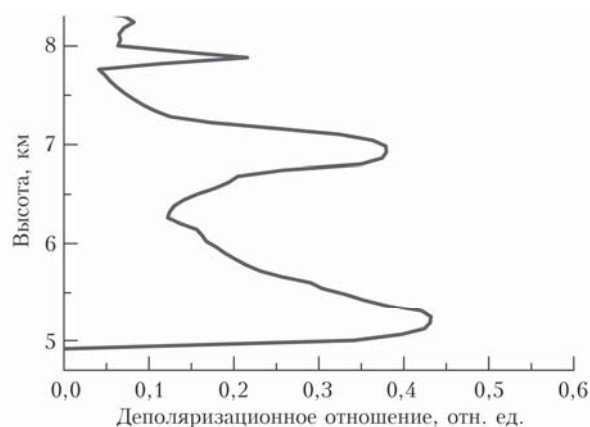


Рис. 4. Деполаризационное отношение в зависимости от высоты. Случай 2

Здесь наличие слоя квазигоризонтально ориентированных пластинок обнаруживается по различному поведению перпендикулярной и параллельной составляющих сечения рассеяния, представленного на рис. 3. Коэффициент обратного рассеяния облакомера в данном случае совпадает с перпендикулярной составляющей, подтверждая наличие ориентированных пластинок.

При этом на рис. 4 и 5 видно, что значения деполаризационного и лидарного отношений только на высоте около 7 км близки к значениям из случая 1. Результаты наблюдений указывают на то, что хаотически ориентированные частицы наблюдались только на высоте около 7 км, а ниже присутствует слой квазигоризонтально ориентированных пластинок.

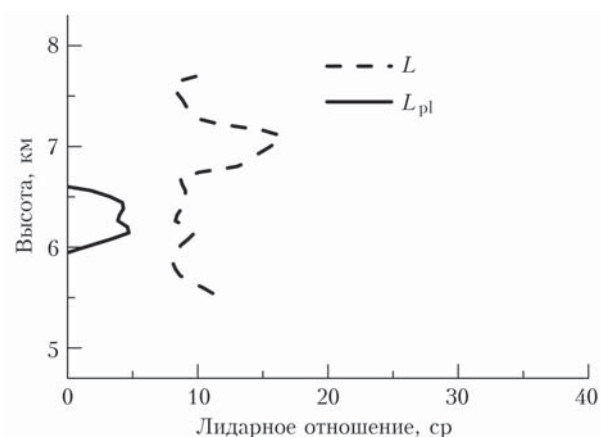


Рис. 5. Лидарные отношения в зависимости от высоты. Случай 2

Далее можно восстановить некоторые микрофизические характеристики пластинок для случая 2. Для начала используем следующее приближение: микрофизические свойства хаотически ориентированных частиц слабо меняются с высотой. Следовательно, их не зависящие от концентрации оптические параметры соответствуют значениям на высоте 7 км, а именно  $\delta_0 \approx 0,38$  и  $L_0 \approx 15$  (см. рис. 4, 5). Как результат, применяя выражения (7)–(10), восстанавливаем отношение

$$L_{pl} = 2S/\sigma_{pl}, \quad (11)$$

которое представляет собой лидарное отношение для квазигоризонтально ориентированных пластинок. Восстановленный профиль  $L_{pl}$  показан на рис. 5.

Лидарное отношение (11) может быть использовано для нахождения эффективного угла наклона (по отношению к горизонту) квазигоризонтально ориентированных пластинок. Для этого было получено лидарное отношение  $L_{pl}$  как функция эффективного угла наклона согласно нашему банку данных [32]. Результаты представлены на рис. 6. Данная зависимость позволяет преобразовать профиль лидарного отношения (см. рис. 5) в профиль эффективных углов наклона  $\theta$  (рис. 7). Эффективный угол наклона имеет значение около  $3^\circ$ .

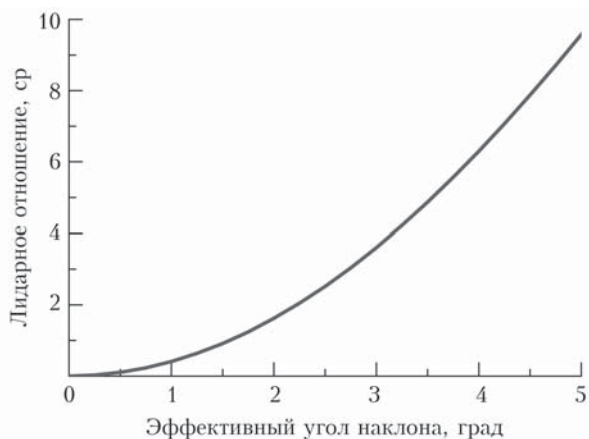


Рис. 6. Лидарное отношение для квазигоризонтально ориентированной пластинки в зависимости от эффективного угла наклона

Наконец, выражения (9) и (10) позволяют найти величину

$$B = 2k \frac{S}{\sigma}, \quad (12)$$

где  $S$  и  $\sigma$  зависят от размеров пластинок и столбиков. Это отношение может быть оценено либо исходя из экспериментальных данных, либо на основе модельных приближений. В данной работе сделано предположение, что размеры пластинок и столбиков подчиняются гамма-распределению, при этом их модальные размеры полагаются равными. Исходя из этого предположения, удается восстановить долю пластинок, которая также изображена на рис. 7.

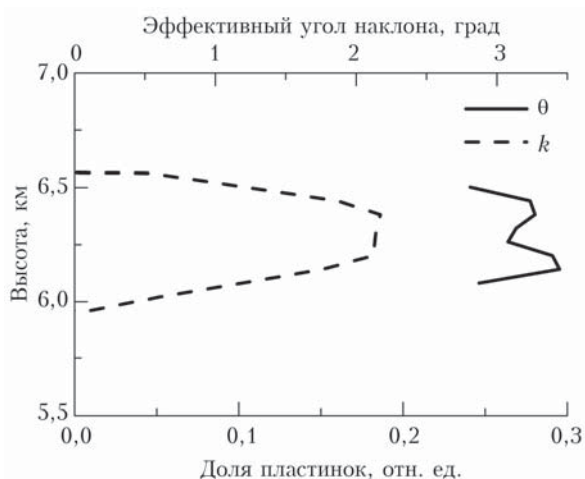


Рис. 7. Восстановленный профиль эффективных углов наклона и доля пластинок в зависимости от высоты. Случай 2

Совместное измерение параллельной и перпендикулярной компонент сечения обратного рассеяния и коэффициента экстинкции лидаром RAMSES при зондировании перистых облаков позволило обнаружить и, в некоторой степени, охарактеризо-

вать слой квазигоризонтальных ледяных пластинок. Для смеси квазигоризонтально ориентированных пластинок с хаотически ориентированными столбиками удалось восстановить приближенную долю пластинок и их эффективный угол наклона.

Особо стоит отметить возможность применения описанной методики для уникального поляризационного лидара ТГУ. Поскольку этот лидар способен измерять полную матрицу обратного рассеяния, то с хорошей точностью можно осуществить выборку характерных для данного региона оптических параметров хаотически ориентированных гексагональных частиц. Для таких частиц матрица обратного рассеяния всегда может быть приведена к виду [4, 34]:

$$\mathbf{M} = M_{11} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & e \\ 0 & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d-1 & 0 \\ -e & 0 & 0 & 1-2d \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $e = 0$  для идеальных гексагональных частиц и  $e < 0,05$  для деформированных гексагональных столбиков. Облако хаотически ориентированных частиц характеризуется тем, что элемент  $d$  в нем практически не меняется. Осуществив выборку матриц, удовлетворяющих виду (13), можно определить деполаризационное отношение хаотически ориентированных частиц

$$\delta_0 = \frac{d}{2-d}. \quad (14)$$

Далее полученное  $\delta_0$  необходимо подставить в (9), где  $\delta(h)$  – профиль деполаризационного отношения в случае присутствия слоя квазигоризонтально ориентированных пластинок. При этом, подставляя рассчитанное на основе теоретической базы данных отношение  $\sigma_{pl}/\sigma_{\parallel}$ , можно определить долю ориентированных пластинок.

Необходимо, однако, иметь в виду, что этот параметр зависит не только от модального размера частиц, но и от неизвестного угла флаттера пластинок.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 15-05-06100, 16-35-60089) и Президента РФ (гранты МК-2495.2017.5, НШ-8199.2016.5).

1. Reichardt J., Reichardt S., Lin R.-F., Hess M., McGee T.J., Starr D.O. Optical-microphysical cirrus model // J. Geophys. Res. D. 2008. V. 113. P. 22201.
2. Baran A.J. A review of the light scattering properties of cirrus // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 14–16. P. 1239–1260.
3. 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.
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. *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.
6. *Stephens G.L., Tsay S.-C., Stackhouse P.W., Flatau P.J.* The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47, N 14. P. 1742–1754.
7. *Baran A.J.* From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward // *Atmos. Res.* 2012. V. 112. P. 45–69.
8. *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.
9. *Кузьмин В.А., Дикинис А.В.* Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока // *Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та.* 2011. Т. 22. С. 16–27.
10. *Солдатенко С.А., Тертышников А.В., Ширшов Н.В.* Оценка влияния спутниковой информации на качество численных прогнозов погоды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. Т. 12, № 4. С. 38–47.
11. *Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Nasonov S.V., Zhivotenyuk I.V., Stykon A.P.* Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering // *Russ. Phys. J.* 2013. V. 55, N 8. P. 925–929.
12. *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. P. L20805. DOI: 10.1029/2012GL053116.
13. *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 атмосфер. и океана.* 2006. Т. 19, № 11. С. 995–999.
14. *Reichardt J., Wandinger U., Klein V., Mattis I., Hilber B., Begbie R.* RAMSES: German Meteorological Service autonomous Raman lidar for water vapor, temperature, aerosol, and cloud measurements // *Appl. Opt.* 2012. V. 51, N 34. P. 8111–8131.
15. *Platt C.N.R., Abshire N.L., McNice G.T.* Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17, N 8. P. 1220–1224.
16. *Borovoi A., Balin Y., Kokhanenko G., Penner I., Konoshonkin A., Kustova N.* Layers of quasi-horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds observed by a two-wavelength polarization lidar // *Opt. Express.* 2014. V. 22, N 20. P. 24566–24573.
17. *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, N 27. P. 28222–28233.
18. *Коношонкин А.В.* Моделирование сигнала сканирующего лидара от монодисперсного облака квазигоризонтально ориентированных частиц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 12. С. 1053–1060.
19. *Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л., Самохвалов И.В.* Поляризационное зондирование аэрозольных образований верхнего яруса // *Оптика атмосфер. и океана.* 1991. Т. 4, № 4. С. 394–403.
20. *Кауль Б.В., Кузнецов А.Л., Половцева Е.Р., Самохвалов И.В.* Исследование кристаллических облаков на основе локационных измерений матриц обратного рассеяния света // *Оптика атмосфер. и океана.* 1993. Т. 6, № 4. С. 423–430.
21. *Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л., Половцева Е.Р., Самохвалов И.В., Стыкон А.П.* Лидарные исследования ориентации частиц в кристаллических облаках // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10, № 2. С. 191–201.
22. *Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д.* Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.
23. *Кауль Б.В.* Опτικο-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2004. 219 с.
24. *Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В.* Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16, № 4. С. 354–361.
25. *Ромашов Д.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Банк данных для интерпретации результатов поляризационного зондирования кристаллических облаков // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13, № 9. С. 854–861.
26. *Самохвалов И.В., Насонов С.В., Брюханов И.Д., Боровой А.Г., Кауль Б.В., Кустова Н.В., Коношонкин А.В.* Анализ матрицы обратного рассеяния перистых облаков с аномальным обратным рассеянием // *Изв. вузов. Физика.* 2013. Т. 56, № 8/3. С. 281–283.
27. *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.
28. *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.
29. *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 атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 4. С. 324–330; *Konoshonkin A., Kustova N., Borovoi A.* 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.
30. *Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г.* Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 2. Сравнение с алгоритмом трассировки лучей // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 4. С. 331–337; *Konoshonkin A., Kustova N., Borovoi A.* Beam splitting algorithm for the problem of light scattering by atmospheric ice crystals. Part 2. Comparison with the ray tracing algorithm // *Atmos. Ocean Opt.* 2015. V. 28, N 5. P. 448–454.
31. *Konoshonkin A., Kustova N., Borovoi A.* Beam-splitting code for light scattering by ice crystal particles within geometric-optics approximation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2015. V. 164. P. 175–183.
32. *База данных матриц обратного рассеяния.* URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical\_optics/Backscattering

33. Коношонкин А.В. Оптические характеристики деформированных атмосферных ледяных столбиков // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 7. С.

34. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. Т.В. Водопьянова. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.

*A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, A.G. Borovoi, J. Reichardt. Retrieving the fraction of quasi-horizontally oriented ice crystals from a Raman lidar and a ceilometer.*

The study shows the results of retrieving the fraction of quasi-horizontally oriented ice plates in a cirrus cloud of randomly oriented ice columns from the data of simultaneously sounding Raman lidar and ceilometer. It is shown that in the case of absence of a layer of quasi-horizontally oriented particles the perpendicular and parallel components of the backscatter coefficient of vertically oriented Raman lidar coincide up to a constant factor with the backscatter coefficient of 5° inclined ceilometer. If quasi-horizontally oriented plates appear in a cloud, the fraction of the plates and the flutter angle can be retrieved from the difference of the backscattering coefficient profiles with help of the extinction coefficient profile.