

Расчет сигнала сканирующего лидара при зондировании перистых облаков, содержащих преимущественно горизонтально ориентированные кристаллы

А.В. Коношонкин^{✉1,2}, Н.В. Кустова¹, В.А. Шишко^{1,2}, Д.Н. Тимофеев¹,
Н. Кан¹, И.В. Ткачев¹, А.Г. Боровой¹, Г.П. Коханенко¹, Ю.С. Балин^{1*}

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

Поступила в редакцию 5.09.2022 г.;
после доработки 26.10.2022 г.;
принята к печати 6.12.2022 г.

Представлены результаты численного моделирования сигнала сканирующего лидара для случая зондирования облака, содержащего квазигоризонтально ориентированные кристаллы пластинчатой формы. Показано, что вертикально ориентированный лидар «ослепляется» зеркальной компонентой рассеянного излучения, в то же время сигнал сканирующего лидара чувствителен к форме кристалла. Результаты численного расчета подтверждают ранее замеченное в эксперименте резкое увеличение деполяризационного отношения в окрестности углов сканирования 30°. Установлено, что такой скачок в деполяризационном отношении является признаком идеальности формы пластинчатого кристалла и может быть использовано для интерпретации данных экспериментальных наблюдений.

Ключевые слова: рассеяние света, сканирующий лидар, метод физической оптики, атмосферные ледяные кристаллы, перистые облака; light scattering, scanning lidar, physical optics method, atmospheric ice crystal, cirrus clouds.

Введение

Перистые облака, состоящие из кристаллов различных форм, размеров и пространственной ориентации, значительно влияют на радиационный баланс Земли и климат [1, 2]. Большинство теоретических работ, направленных на изучение перистых облаков, выполнено в предположении, что частицы в них имеют хаотическую пространственную ориентацию [3]. Однако вертикально ориентированные лидары часто «ослепляются» зеркальным отражением от преимущественно горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов в перистых облаках. В связи с этим лидары, как правило, отклоняются от вертикальной оси на 3–5° [4]. В частности, космический лидар CALIPSO после нескольких лет работы был отклонен от изначального вертикаль-

ного направления на 3°, а планируемый к запуску космический лидар EarthCARE сразу спроектирован с углом наклона в 3°. Таким образом, исследование квазигоризонтально ориентированных частиц в перистых облаках в настоящее время является актуальным как для лазерного зондирования атмосферы, так и для корректного учета переноса излучения в атмосфере [5–7].

Зеркальное отражение лидарного сигнала от перистых облаков впервые было описано в [8], затем изучалось в работе [9] с целью определения параметров пространственной ориентации квазигоризонтально ориентированных кристаллов в перистых облаках. Поскольку в случае хаотически ориентированных кристаллов перистых облаков лидарный сигнал не зависит от угла наклона лидара, а при наличии квазигоризонтально ориентированных кристаллов зависимость от угла наклона лидара очень сильная, именно сканирующие лидары — основной инструмент изучения ориентированных кристаллов [9–20].

В настоящей статье мы впервые показываем, что профиль сигнала сканирующего лидара как функция угла наклона лидара позволяет судить о структуре поперечного сечения квазигоризонтально ориентированных пластинчатых кристаллов перистых облаков.

* Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru); Наталья Валентиновна Кустова (kustova@iao.ru); Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru); Дмитрий Николаевич Тимофеев (tdn@iao.ru); Надежда Кан (n.kan.08@gmail.com); Илья Валерьевич Ткачев (tiv@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (bogovoi@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru).

Методология

Сигнал сканирующего лидара является функцией угла наклона лидара θ , который отсчитывается от зенита ($\theta = 0^\circ$). Основные величины, измеряемые лидаром: коэффициент обратного рассеяния и деполяризационное отношение. Коэффициент обратного рассеяния β зависит от концентрации частиц c в облаке, поскольку представляет собой среднее значение сечения обратного рассеяния σ при усреднении кристаллов в облаке по размерам.

Приемник лидара позволяет разделить сигнал на параллельную и перпендикулярную компоненты: $\beta(\theta) = \beta_{\parallel}(\theta) + \beta_{\perp}(\theta)$. Такое разделение позволяет определить линейное деполяризационное отношение как $\delta(\theta) = \beta_{\perp}(\theta)/\beta_{\parallel}(\theta)$. В силу того, что перпендикулярная и параллельная компоненты измерены при одинаковой концентрации частиц в облаке, деполяризационное отношение может быть также выражено через среднее по ансамблю сечение обратного рассеяния кристаллов в облаке: $\delta(\theta) = \beta_{\perp}(\theta)/\beta_{\parallel}(\theta) = \sigma_{\perp}(\theta)/\sigma_{\parallel}(\theta)$. Важно, что деполяризационное отношение, в отличие от коэффициента обратного рассеяния, не зависит от концентрации частиц в облаке и может использоваться для определения их микрофизических характеристик, таких как размер, форма и пространственная ориентация.

На рис. 1 представлены сечение обратного рассеяния и деполяризационное отношение, рассчитанные для монодисперсного облака, состоящего из квазигоризонтально ориентированных гексагональных пластинок и столбиков. Диаметр гексагонального основания ледяных пластинок $D = 100$ мкм, высота $h = 15,97$ мкм; высота столбиков $h = 100$ мкм, диаметр $D = 70$ мкм. Указанные размеры соответствуют экспериментально установленным зависимостям [21]. Длина волны $0,532$ мкм, угол флаттера 1° . Расчеты выполнены в рамках разработанного в ИОА СО РАН метода физической оптики [22, 23], основанного на алгоритме трассировки пучков [24, 25]. Этот метод существенно превосходит зарубежные аналоги, такие как GOIE [26] и PGON [27], и в отличие от точных численных методов (DDA [28, 29], FDTD [30], PSDT [31] и DGTD [32]) позволяет решать задачу рассеяния света на ледяных кристаллах размерами $100\text{--}1000$ мкм.

В данном расчете квазигоризонтальная ориентация пластинок и столбиков определялась следующим образом. Главная ось кристалла $\mathbf{N}$ выходит из центра гексагональной грани перпендикулярно ей, как указано на рис. 2. В работе предполагалось, что частица равномерно вращается вокруг этой оси (угол γ) и вокруг вертикали $\mathbf{z}$ (угол α). Отклонение частицы от горизонтального положения определяется углом t : $t = \arccos(\mathbf{z} \cdot \mathbf{N})$ для пластинок, $t = \pi/2 - \arccos(\mathbf{z} \cdot \mathbf{N})$ для столбиков. Случай $t = 0$ соответствует полностью горизонтальной ориентации.

В данной работе мы полагаем, что отклонение частиц от горизонтального положения может быть описано усеченным нормальным распределением

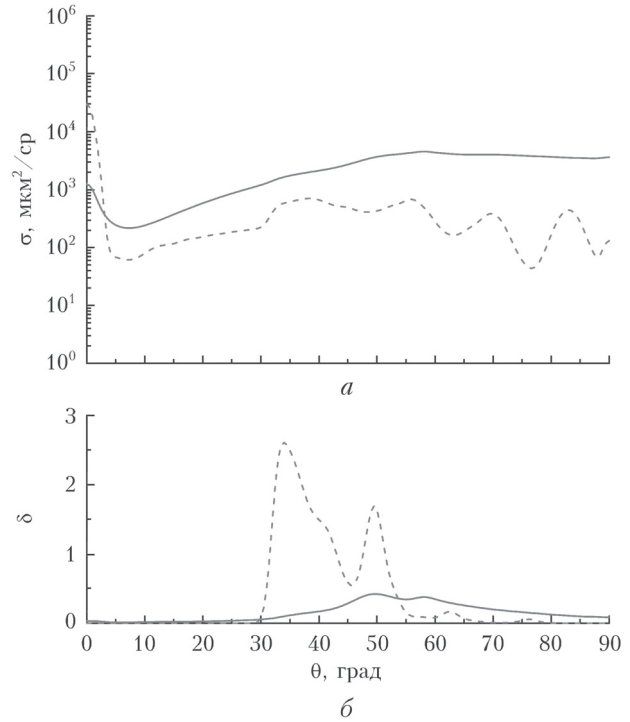


Рис. 1. Сечение обратного рассеяния (а) и линейное деполяризационное отношение (б) для облака квазигоризонтально ориентированных столбиков (сплошная кривая) и пластинок (пунктирная кривая)

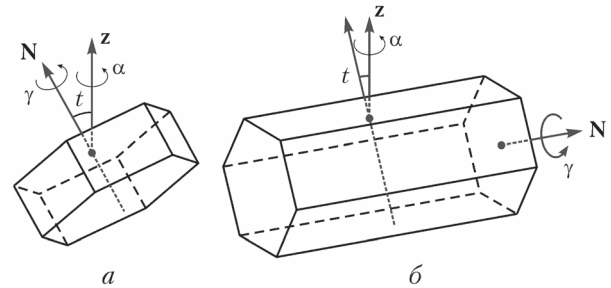


Рис. 2. Определение пространственной ориентации частиц: гексагональная пластинка (а); гексагональный столбик (б)

$$p(t) = \exp(-t^2/2f^2) / \int_0^{\pi/2} \exp(-t^2/2f^2) \sin t \, dt,$$

где f — среднее отклонение частицы от горизонтальной плоскости (угол флаттера).

Численный расчет сигнала сканирующего лидара (см. рис. 1, а) указывает на две интересные особенности. Первая — наличие сильного пика в окрестности $\theta = 0^\circ$. Этот пик интенсивности хорошо известен из экспериментальных наблюдений квазигоризонтально ориентированных частиц. Он соответствует зеркальному отражению света от горизонтально ориентированных граней пластинчатых кристаллов в облаке. Второй особенностью является наличие множественных пиков в решении для пластинок в диапазоне углов наклона лидара $30\text{--}90^\circ$.

В наших предыдущих исследованиях [12, 15] уже было показано, что рассеяние в направлении назад для гексагональных кристаллов формируется в основном за счет углового отражения, при этом в случае тонких пластинок появляется эффект волновода. Важную роль в образовании таких оптических траекторий играет наличие в кристалле двугранного угла 90° и двух параллельных плоскостей. Такие уголкового траектории можно условно разделить на три типа (рис. 3).

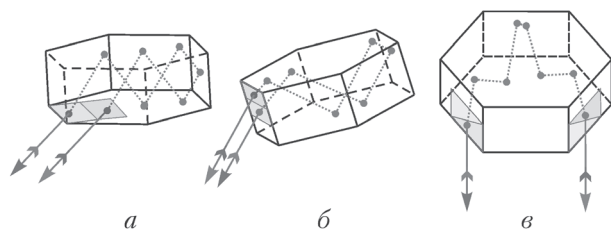


Рис. 3. Рассеяние света в обратном направлении для квазигоризонтально ориентированной пластинки [15]: траектории первого (а), второго (б) и третьего (в) типов

Важно отметить, что траектории третьего типа (рис. 3, в) появляются только при углах наклона лидара более 30° . Их появление приводит к заметному пику в сечении обратного рассеяния (см. рис. 1, а) и существенному росту деполаризационного отношения (см. рис. 1, б).

Сопоставление с данными экспериментальных наблюдений

В настоящее время в мире практически не проводятся экспериментальные исследования перистых облаков сканирующими поляризационными лидарами. Отдельные результаты исследований можно найти в работах [33, 34]. В ИОА СО РАН перистые облака изучаются на уникальном сканирующем лидаре [6, 7].

Упомянутый в предыдущем разделе скачок в деполаризационном отношении при $\theta \approx 30^\circ$ был недавно зафиксирован в наблюдениях сканирующим лидаром в г. Томске [16].

Покажем, что такой скачок в деполаризационном отношении при $\theta \approx 30^\circ$ свидетельствует о наличии в облаках пластинчатых кристаллов правильной формы. Под правильной формой мы понимаем пластинчатый кристалл, у которого присутствуют две плоскопараллельные грани (верхняя и нижняя), а боковые грани расположены строго под углом 90° к ним и при этом попарно образуют угол $\sim 60^\circ$.

Для того чтобы подтвердить данный факт, мы решили задачу рассеяния света для кристаллов пяти различных форм. На рис. 4, а представлена классическая шестигранная ледяная пластинка правильной формы, а на остальных рисунках — варианты искажения формы данной пластинки.

Для всех указанных частиц на основе решенной задачи рассеяния света проведено численное моделирование сигнала сканирующего лидара. Результаты представлены на рис. 5 (цв. вкладка). Видно,

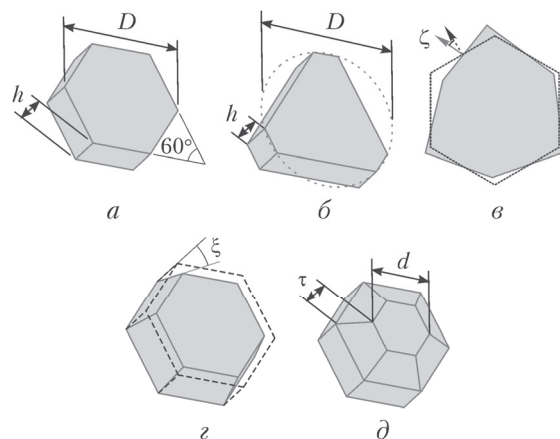


Рис. 4. Различные формы пластинчатых кристаллов, используемые для численного моделирования: классическая шестигранная пластинка размерами D и h (а); вырожденные пластинки в усеченный треугольник с соотношением боковых сторон 2:1 (б); шестигранная пластинка с нарушением угла 60° на случайный угол $\xi \approx 3^\circ$ (в); пластинка с нарушением угла 90° на $\xi = 1^\circ$ (г); пластинка с искажением одной из плоскопараллельных граней на величину $\tau = h/2$ при $d = D/2$ (д)

что даже незначительное нарушение угла 90° на угол $\xi = 1^\circ$ приводит к резкому изменению лидарного сигнала (см. рис. 5, синяя кривая). В этом случае наблюдается резкое уменьшение сечения обратного рассеяния в диапазоне углов наклона лидара $15\text{--}80^\circ$, а также полное отсутствие скачка деполаризации в окрестности углов 30° .

Похотный результат мы видим и в случае искажения плоскопараллельной грани (рис. 4, д). Здесь резко (практически в 10 раз) уменьшается сечение обратного рассеяния, хотя пик деполаризации сохраняется. Интересно, что ни вырождение гексагональной частицы в треугольную (рис. 4, б), ни значительное искажение угла 60° (рис. 4, в) не привели к существенному изменению результатов моделирования лидарного сигнала. Важно понимать, что в природе облака редко состоят лишь из ориентированных частиц, как правило, наблюдается некоторая их смесь.

Для дальнейшего анализа мы моделировали облако, состоящее из хаотически ориентированных гексагональных столбиков и квазигоризонтально ориентированных гексагональных пластинок размерами 100 мкм в соотношении 1:1. Результаты представлены на рис. 6 (цв. вкладка).

Хаотически ориентированные гексагональные столбики характеризуются деполаризационным отношением $\delta \approx 0,2$. Поскольку они хаотически ориентированы, эта величина не зависит от угла наклона лидара, как и их сечение обратного рассеяния. Квазигоризонтально ориентированные пластинчатые кристаллы имеют значительный пик сечения обратного рассеяния при $\theta \approx 0\text{--}5^\circ$, который сопровождается низким значением деполаризационного отношения (зеркальное рассеяние). Именно поэтому на рис. 6 в окрестности углов $0\text{--}5^\circ$ наблюдается провал деполаризационного отношения — в этом

диапазоне углов доминирующий вклад вносят квазигоризонтальные кристаллы. В диапазоне углов $5\text{--}30^\circ$ доминирующий вклад вносят хаотически ориентированные частицы, следовательно, мы наблюдаем $\delta \approx 0,2$. В диапазоне углов $30\text{--}40^\circ$ частицы, для которых характерен скачок сечения обратного рассеяния (см. рис. 4, *a–в*), обуславливают скачок в деполяризационном отношении для всей смеси (красная, фиолетовая и черная кривые на рис. 6). При этом частицы, для которых характерно низкое значение сечения рассеяния (рис. 4, *г, д*) даже при наличии скачка деполяризации, в общей смеси не вызывают скачка деполяризации (синяя и зеленая кривые на рис. 6).

Таким образом, экспериментальные результаты [16], в которых видно увеличение деполяризационного отношения при $\theta \approx 30^\circ$, могут быть интерпретированы как смесь хаотически ориентированных кристаллов с преимущественно ориентированными кристаллами правильной формы. В частности, кривая 1 на рис. 7 (цв. вкладка) соответствует численной модели смеси, состоящей из 20% ориентированных гексагональных пластинок с углом флаттера 3° , 60% хаотически ориентированных гексагональных столбиков и 10% хаотически ориентированных частиц нерегулярной формы [35]. Кривая 2 на рис. 7 соответствует смеси из 20% ориентированных гексагональных пластинок с углом флаттера 1° и 80% случайно ориентированных столбиков. В обоих случаях совпадение результатов экспериментальных наблюдений с данными численного моделирования достаточно хорошее.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают возможность восстановления формы кристаллов из данных сканирующего поляризационного лидара. В частности, резкий пик деполяризационного отношения при $\theta \approx 30^\circ$ указывает на наличие ледяных пластинок простой гексагональной или треугольной формы. Частицы сложной формы, такие как снежинки, не могут вызвать такой пик. Данные о форме кристаллов важны для задач моделирования переноса излучения в случае квазигоризонтально ориентированных частиц, поскольку эти частицы существенно по-разному рассеивают солнечное излучение.

Важно понимать, что результаты настоящей работы не окончательные, а лишь показывают возможность, поскольку получены для монодисперсного облака. Такие результаты не обеспечивают количественную оценку, но дают представление о принципах формирования лидарного сигнала. В дальнейшем мы планируем провести более точное численное моделирование с учетом распределения частиц по размерам для получения количественных оценок.

Тем не менее даже представленная нами простая модель монодисперсного облака позволяет сделать еще несколько важных практических выводов.

1. Полученные данные дают возможность оценить микрофизические параметры смеси хаотически ориентированных частиц с квазигоризонтально ориентированными частицами. Основой такой оценки является различие величины деполяризационного отношения в диапазоне углов лидара $20\text{--}30^\circ$ по сравнению с деполяризационным отношением при вертикальном зондировании, поскольку деполяризация при углах наклона лидара $20\text{--}30^\circ$ формируется главным образом хаотически ориентированными частицами, а при вертикальном зондировании — как хаотически, так и квазигоризонтально ориентированными.

2. Мы видим явное отклонение в поведении теоретически рассчитанного сигнала в окрестности зеркального рассеяния от данных экспериментальных наблюдений (диапазон углов $0\text{--}5^\circ$). На наш взгляд, причиной является использование нормального закона распределения частиц по углам наклона. Скорее всего, в будущих исследованиях следует использовать экспоненциальный закон.

3. Поскольку в перистых облаках существует большое разнообразие форм, размеров и ориентаций кристаллов, следует провести большое количество экспериментальных наблюдений сканирующим поляризационным лидаром, чтобы получить важную для прикладных задач статистическую информацию о микрофизических параметрах ледяных кристаллов. Это также позволит определить, насколько характерно наличие пика деполяризации при $\theta \approx 30^\circ$ в общей выборке наблюдений.

Заключение

Представлены результаты численного моделирования сигнала сканирующего лидара для случая зондирования облака, содержащего квазигоризонтально ориентированные кристаллы пластинчатой формы. Моделирование проводилось для монодисперсного облака квазигоризонтально ориентированных частиц размером 100 мкм, а также для облака, содержащего смесь хаотически ориентированных частиц различных форм размером 100 мкм и квазигоризонтально ориентированных частиц размером 100 мкм.

Рассматривались пять различных форм пластинчатых кристаллов. Результаты моделирования показали хорошее согласие с данными экспериментальных наблюдений. Показано, что увеличение деполяризационного отношения в диапазоне углов сканирования лидара $30\text{--}40^\circ$ свидетельствует о наличии в облаке пластинчатых кристаллов правильной формы.

Полученные данные имеют важное значение для исследования микрофизических параметров перистых облаков методом поляризационного лазерного зондирования, а также полезны для моделирования переноса излучения в облаках, содержащих квазигоризонтально ориентированные пластинчатые кристаллы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-77-10089).

Список литературы

1. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor K.B., Miller H.L. (eds.). New York: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. Baker B.M. Cloud microphysics and climate // Science. 1997. V. 276. P. 1072–1078.
3. Liou K.N., Yang P. Light Scattering by ice Crystals: Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 460 p.
4. Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2002. V. 4893. DOI: 10.1117/12.466539.
5. Kikuchi M., Okamoto H., Sato K. A climatological view of horizontal ice plates in clouds: Findings from nadir and off-nadir CALIPSO observations // J. Geophys. Res.: Atmos. 2021. V. 126. P. e2020JD033562.
6. Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Nasonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilova S.V. Scanning polarization Lidar LOSA-M3: Opportunity for research of crystalline particle orientation in the clouds of upper layers // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13, N 3. P. 1113–1127.
7. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 293–299.
8. Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T. Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates // J. Appl. Meteorol. 1978. V. 17. P. 1220–1224.
9. Noel V., Sassen K. Study of ice crystal orientation in ice clouds from scanning polarization lidar observations // J. Appl. Meteorol. 2005. V. 44. P. 653–664.
10. Del Guasta M., Vallar E., Riviere O., Castagnoli F., Morandi V.M. Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 4878–4887.
11. Westbrook C.D., Illingworth A.J., O'Connor E.J., Hogan R.J. Doppler lidar measurements of oriented planar ice crystals falling from supercooled and glaciated layer clouds // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2010. V. 136, N 646. P. 260–276.
12. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. Backscattering Mueller matrix for quasi-horizontally oriented ice plates of cirrus clouds: Application to CALIPSO signals // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 28222–28233.
13. Hayman M., Spuler S., Morley B. Polarization lidar observations of backscatter phase matrices from oriented ice crystals and rain // Opt. Express. 2014. V. 22, N 14. P. 16976–16990.
14. Veselovskii I., Goloub P., Podvin T., Tanre D., Ansmann A., Korenskiy M., Borovoi A., Hu Q., Whiteman D.N. Spectral dependence of backscattering coefficient of mixed phase clouds over West Africa measured with two-wavelength Raman polarization lidar: Features attributed to ice-crystals corner reflection // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. V. 202. P. 74–80.
15. Borovoi A.G., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Veselovskii I.A. Contribution of corner reflections from oriented ice crystals to backscattering and depolarization characteristics for off-zenith lidar profiling // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2018. V. 212. P. 88–96.
16. Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Borovoi A.G., Klemasheva M.G., Nasonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilova S.V. Application of polarization lidars to study the orientation of crystalline particles in ice clouds // Proc. SPIE. 2021. V. 12086. P. 120860Q.
17. He Y., Liu F., Yin Z., Zhang Y., Zhan Y., Yi F. Horizontally oriented ice crystals observed by the synergy of zenith- and slant-pointed polarization lidar over Wuhan (30.5° N, 114.4° E), China // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 268. P. 107626.
18. Eloranta E. High Spectral Resolution Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere / Weitkamp C. (ed.). New York: Springer, 2005. 456 p.
19. Marinou E., Voudouri K.A., Tzikoudi I., Drakaki E., Tsekeri A., Rosoldi M., Ene D., Baars H., O'Connor E., Amiridis V., Meleti C. Geometrical and microphysical properties of clouds formed in the presence of dust above the Eastern Mediterranean // Remote Sens. 2021. V. 13, N 24. P. 5001.
20. Gouveia D., Baars H., Seifert P., Wandinger U., Barbosa H., Barja B., Artaxo P., Lopes F., Landulfo E., Ansmann A. Application of a multiple scattering model to estimate optical depth, lidar ratio and ice crystal effective radius of cirrus clouds observed with lidar // EPJ Web. Conf. 2018. V. 176. P. 05037.
21. 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.
22. 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 атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 830–843.
23. 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.
24. Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G. 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.
25. 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.
26. Yang P., Liou K.N. Geometric-optics–integral-equation method for light scattering by nonspherical ice crystals // Appl. Opt. 1996. V. 35, N 33. P. 6568–6584.
27. 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.
28. Purcell E.M., Pennypacker C.R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains // Astrophys. J. 1973. V. 186. P. 705–714.
29. Yurkin M.A., Maltsev V.P., Hoekstra A.G. The discrete dipole approximation for simulation of light scat-

- tering by particles much larger than the wavelength // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2007. V. 106. P. 546–557.
30. *Taflove A.* Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston: Artech House, 1998. 735 p.
 31. *Liu C., Panetta R.L., Yang P.* Application of the pseudo-spectral time domain method to compute particle single-scattering properties for size parameters up to 200 // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2012. V. 113. P. 1728–1740.
 32. *Grynko Y., Shkuratov Y., Förstner J.* Light scattering by randomly irregular dielectric particles larger than the wavelength // Opt. Lett. 2013. V. 38, N 23. P. 5153–5156.
 33. *Noel V., Sassen K.* Study of ice crystals orientation in ice clouds based on polarized observations from the FARS scanning lidar // Proc. of 22th Intern. Laser Radar Conf., July 12–16, Matera, Italy. P. 309–312.
 34. *Eloranta Ed., Razenkov I., Garcia J.* Near zenith variation of the lidar ratio—high spectral resolution lidar observations of oriented ice crystals // Proc. of 29th Intern. Laser Radar Conf., June 24–28, Hefei, China. P. S8-82–84.
 35. База данных матриц обратного рассеяния. URL: ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics/Backscattering/.

A.V. Konoshonkin, N.V. Kustova, V.A. Shishko, D.N. Timofeev, N. Kan, I.V. Tkachev, A.G. Borovoi, G.P. Kokhanenko, Yu.S. Balin. **Calculation of scanning lidar returns while sounding cirrus clouds with quasi-horizontally oriented crystals.**

The results of numerical simulation of a scanning lidar return for the case of sounding a cloud containing quasi-horizontally oriented plate-like crystals are presented. It is shown that a vertically oriented lidar is "blinded" by the specular component of the scattered radiation, while the scanning lidar return is sensitive to the crystal shape. The results of the numerical calculation confirm a sharp increase in the depolarization ratio in the vicinity of scanning angles of 30°, which was earlier observed in experiments. It is found out that this depolarization ratio enhancement is a marker of the perfect shape of a plate-like crystal and can be used to interpret experimental data.

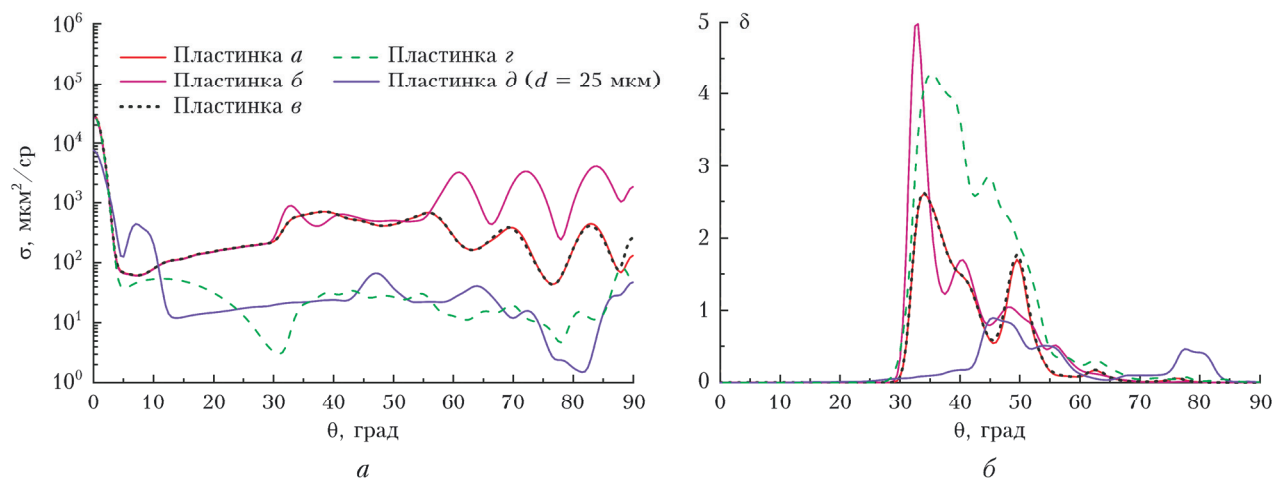


Рис. 5. Сечение обратного рассеяния (а) и линейное деполаризационное отношение (б) для пластинчатых кристаллов, представленных на рис. 4

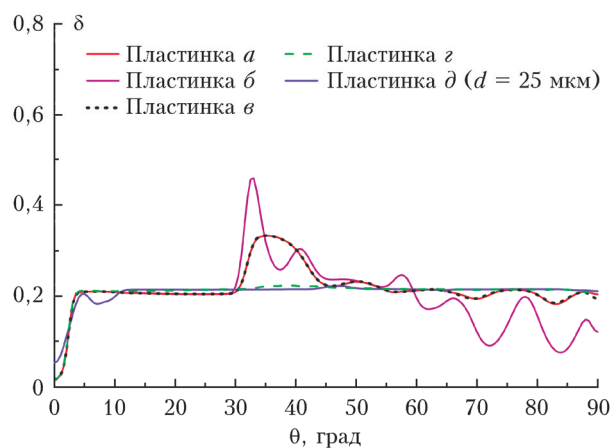


Рис. 6. Линейное деполаризационное отношение для смеси пластинчатых кристаллов с флаттером 1° и хаотически ориентированных гексагональных столбиков в соотношении 1:1

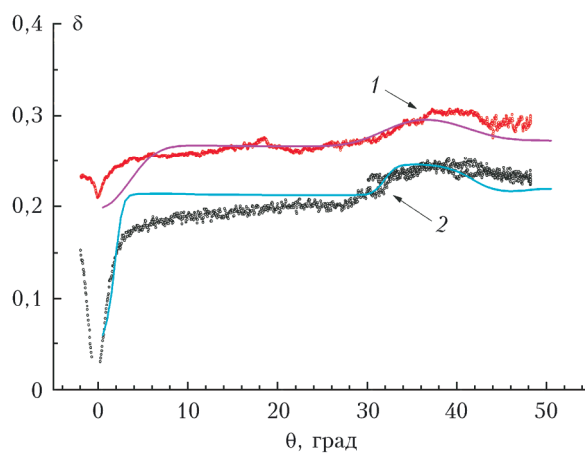


Рис. 7. Зависимости линейного деполаризационного отношения для нескольких сеансов зондирования: 1 – 31 мая 2021 г. (красные точки); 2 – 21 мая 2021 г. (черные точки) [16]