

УДК 535.2:551.501

Исследования ориентации кристаллических частиц в ледяных облаках сканирующим лидаром

Г.П. Коханенко, Ю.С. Балин, А.Г. Боровой, М.М. Новоселов*

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

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

Приведены результаты исследований горизонтальной ориентации кристаллических частиц, выполненных с помощью сканирующего поляризационного лидара ЛОЗА-МЗ. В 2018 и 2021 гг. проведено несколько серий измерений структуры кристаллической облачности верхних ярусов в режиме зенитного сканирования. В отличие от зондирования только в вертикальном направлении наблюдения зависимости характеристик лидарного сигнала (интенсивности и деполаризационного отношения) от угла наклона оси лидара позволяют идентифицировать фазовый состав облаков (водяные или кристаллические) и измерить распределение отклонения частиц относительно горизонтальной плоскости (флаттер). В слоях с выраженным зеркальным отражением взаимосвязь интенсивности сигнала с наклоном трассы зондирования при небольших углах (до 5°) хорошо описывается экспоненциальной зависимостью. Результаты зондирования при сканировании до углов $45\text{--}50^\circ$ показали высокую вероятность существования уголкового отражения в ледяных облаках.

Ключевые слова: кристаллические облака, поляризационный лидар, деполаризация, ориентация частиц; crystal clouds, polarization lidar, depolarization, particle orientation.

Введение

Перистые облака покрывают значительную часть земной поверхности и поэтому оказывают значительное влияние на радиационный баланс и климат [1, 2]. В отличие от водных облаков кристаллические вызывают большую деполаризацию обратнорассеянного излучения [3]. Наиболее часто в участках облака со случайно ориентированными частицами деполаризационное отношение (ДО) $\delta = I_{\perp}/I_{\parallel} = 0,3\text{--}0,6$ (I_{\parallel} – интенсивность компоненты рассеянного излучения, совпадающей с исходной поляризацией лазера; I_{\perp} – ортогональная к ней компонента) [4, 5]. ДО связано с формой частиц и фазовым составом облака, что учитывается при анализе наблюдений перистой облачности [4, 6–9].

Во многих случаях кристаллические частицы перистой облачности имеют выраженную ориентацию в пространстве. Этим обусловлена оптическая анизотропия, проявляющаяся в разнообразных формах солнечного гало. Анизотропия влияет на прохождение и отражение радиации от облаков и, например, приводит к зависимости отражающей способности от зенитного угла солнца [10, 11].

Наиболее известный феномен – это преимущественная ориентация кристаллов в горизонтальной плоскости. Она может быть вызвана аэродинамиче-

скими силами, возникающими при свободном падении частиц [12]. Участки с горизонтальной ориентацией частиц выглядят как солнечные блики при наблюдениях облачного покрова из космоса [13, 14]. Анализ ширины бликов показывает соответствие гауссовому распределению наклонов кристаллов с полушириной $\sim 0,4^\circ$ [10, 15]. Присутствие горизонтально ориентированных кристаллов обнаруживается и при наблюдении зеркальных пятен от прожектора на облаках [16], ширина флаттера составляет $0,4^\circ$. Однако основную информацию об ориентации частиц дают лидарные наблюдения кристаллических облаков [17–19].

Начиная с работ [20, 21], многочисленные наблюдения подтверждают, что при вертикальной ориентации лидара горизонтально ориентированные частицы вызывают зеркальное отражение, проявляющееся при отсутствии деполаризации и увеличенном обратном рассеянии [3, 22–24]. Анализ данных поляризационного космического лидара в эксперименте CALIPSO выявил, что значительная фракция горизонтально ориентированных частиц наблюдается в интервале температур от -35 до -5°C [25–27] в средних широтах. Отклонение оси лидара от вертикали устраняет эффект зеркального отражения. Например, лидар CALIPSO отклонен на 3° от надира для устранения этого эффекта [28]. Угловая зависимость деполаризации может различаться для облаков с разной температурой [3, 18], но зависимость амплитуды сигнала от угла наклона соответствует гауссовому распределению. В то же время измерения, представленные

* Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (borovoi@iao.ru); Михаил Михайлович Новоселов (novoselov@iao.ru).

в [29], хорошо описываются экспоненциальным распределением. Поэтому требуются дополнительные исследования параметров горизонтальной ориентации частиц.

Другой эффект, вызываемый горизонтально ориентированными столбиками и пластинами, — это угловое отражение при наклоне лидара на значительный угол от зенита [30–34]. Причина этого эффекта — наличие угла 90° между плоскостями кристаллов. Пластинки дают острый максимум в районе больше 30° , столбики — плавный рост ДО до угла $50\text{--}60^\circ$. В этих зонах ДО превосходит единицу, на порядок растет коэффициент обратного рассеяния. Эксперименты при углах наклона трассы зондирования $30\text{--}43^\circ$ проводились в [28, 35–39] и показали высокую вероятность проявления такого эффекта. Однако прямые измерения при сканировании лидара в этих работах не проводились.

В настоящей статье приведены результаты исследования отражающих свойств кристаллических частиц при зенитном сканировании лидара. Рассмотрены эффекты зеркального отражения и распределение частиц по углам наклона. Представлены результаты наблюдений углового отражения при сканировании лидара на большой угол.

1. Описание лидара

Измерения проводились на территории Академгородка, Томск ($56^\circ 28' \text{ с.ш.}$, 85° в.д.) в 2018 (апрель–октябрь) и 2021 гг. (май–июль). Наблюдения ледяных облаков осуществлялись с помощью сканирующего поляризационного лидара ЛОЗА-МЗ, располагавшегося на крыше здания ИОА СО РАН. Лидар подробно описан в [29] и входит в состав Центра коллективного пользования «Атмосфера». В лидаре используется ND:YAG-лазер Q-Smart 850 (Quantel) с энергией 850 мДж в основной гармонике при частоте следования импульсов 10 Гц. Пучок коллимируется 7-кратным ахроматическим расширителем. В состав приемо-передатчика входят два приемных объектива — линзовый ахромат диаметром 40 мм с фокусом 200 мм для ближней зоны (50–1200 м) и зеркальный объектив Кассегрена диаметром 200 мм с фокусом 1000 мм — для дальней зоны (400 м–15 км). Ирисовая диафрагма в фокальной плоскости объектива определяет поле зрения телескопа в $\sim 1,5$ мрад. В наших экспериментах наблюдались только объекты на большой дистанции (облака среднего и верхнего ярусов), поэтому регистрировались только сигналы от объектива дальней зоны.

Плоскости поляризации для излучения первой (1064 нм) и второй (532 нм) гармоник совмещены, призма Глана улучшает поляризационный контраст. Аналоговые сигналы с фотодетекторов оцифровывались 12-разрядными АЦП LA-n10-12USB (ООО «Руднев–Шиляев»). Калибровка чувствительности поляризационных каналов производилась перед измерениями путем непрерывного вращения $\lambda/2$ фазовой пластины в приемном канале [29].

2. Наблюдения зеркально отражающих частиц в ледяных облаках

Основная цель наблюдения зеркально отражающих кристаллических частиц — изучение законов распределения частиц по углам отклонения от горизонтальной плоскости.

Предполагается, что это распределение совпадает с зависимостью интенсивности сигнала от угла наклона лидара при зенитном сканировании. Это действительно так для крупных частиц (диаметром порядка 100 мкм), для которых дифракционный пик уже, чем масштаб отклонения частиц. В этом случае ширина углового распределения интенсивности отраженного излучения совпадает со средним отклонением частиц от горизонтальной плоскости (флаттер).

Зенитное сканирование при небольших углах отклонения от вертикали проводилось со скоростью $\sim 0,3^\circ/\text{с}$, что соответствует сдвигу направления зондирования между импульсами лазера 2 угл. мин. Угол измерялся от вертикальной позиции лидара, которая устанавливалась с погрешностью ± 10 угл. мин. Излучение лазера линейно поляризовано. Сканирование проводилось так, чтобы ось лидара пересекала направление в зенит (сканирование от -2 до $+6^\circ$). Это дает возможность контролировать точность установки вертикали зондирования. В каждом сеансе зондирования выбирались участки, в которых явно наблюдалась зависимость интенсивности и ДО от угла наклона и не происходило переполнения приемного канала в случае зеркального отражения (4096 значений АЦП с учетом фоновой засветки).

На рис. 1 представлены данные, полученные 2 июля 2021 г. в 11:21 по местному времени. При нанесении данных на цветную карту проводилось суммирование по 6 импульсам, номер записи нанесен на горизонтальной шкале на рис. 1, *a–г*. Общая длительность записи составляет 390 с. По вертикальной шкале на рис. 1, *a, б, г* отложена высота зондируемого объекта. На рис. 1, *a* представлена запись компоненты с исходной поляризацией I_{\parallel} , цветовая шкала показывает величину I_{\parallel} , помноженную на квадрат расстояния R . На рис. 1, *б* показано ДО в процентах. На рис. 1, *в* приводится зенитный угол сканирования α в угловых минутах. Зеркальное отражение особенно хорошо видно на записях № 250–550, где ДО при вертикальном зондировании не превышает 5–8%. Рис. 1, *г* показывает распределение кросс-поляризованной компоненты I_{\perp} , цветовая шкала соответствует рис. 1, *a*. При сопоставлении с записью для компоненты I_{\parallel} видно, что признаков зеркального отражения в компоненте I_{\perp} не наблюдается. Зависимость интенсивности компоненты I_{\parallel} от угла наклона приведена на рис. 1, *д*. Выбран интервал записей № 460–540, для которого наблюдается выраженное зеркальное отражение, и два диапазона высот 7000–7300 (кривая 1) и 7900–8300 м (кривая 2). Зависимости различаются не только интенсивностью сигнала, но и шириной распределения I_{\parallel} от угла α .

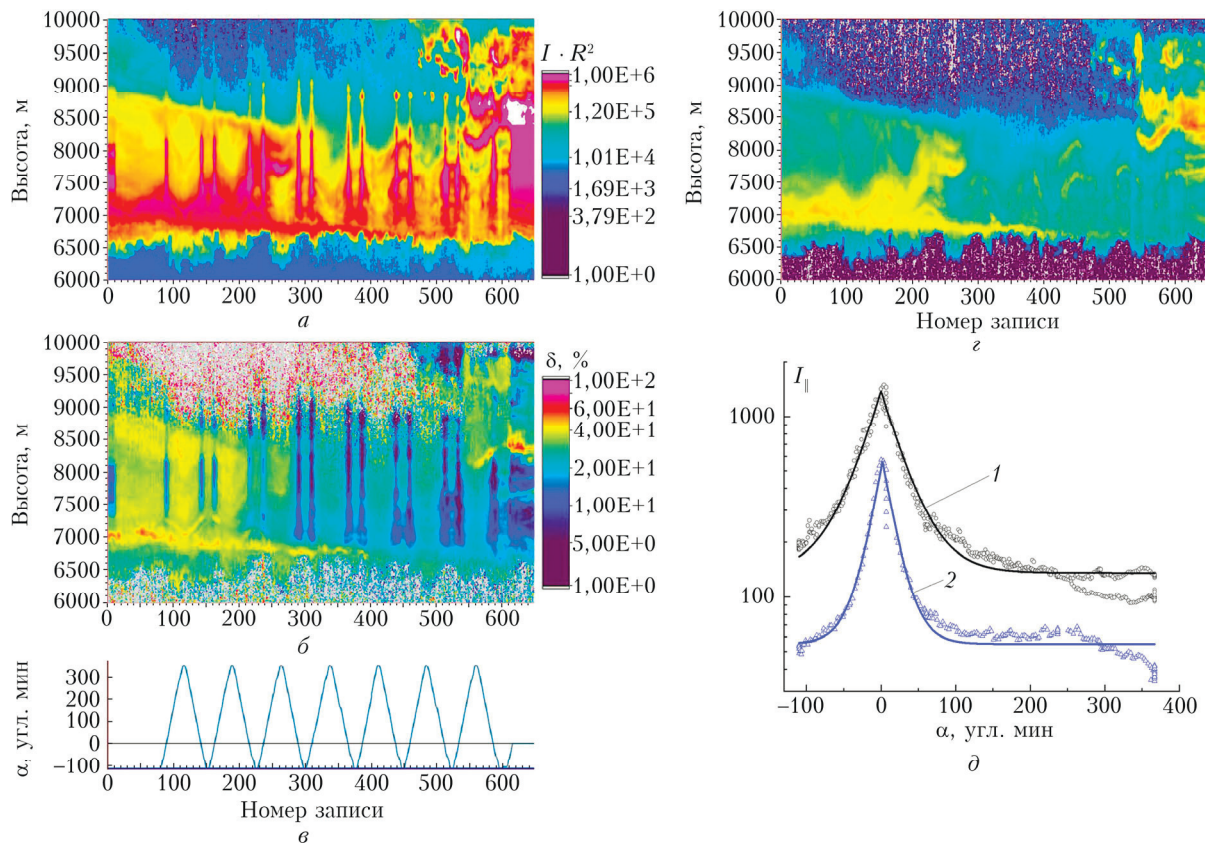


Рис. 1. Наблюдения кристаллических частиц 2 июля 2021 г. в 11:21 по местному времени: компонента с исходной поляризацией I_{\parallel} (а); деполаризационное отношение δ (б); угол наклона лидара α (в); кросс-поляризованная компонента I_{\perp} (г); зависимость компоненты I_{\parallel} от угла наклона (д)

Выбор функции распределения интенсивности рассеянного излучения от угла наклона лидара рассмотрим по данным измерений, представленным на рис. 2. Запись сделана 2 июня 2018 г. в 12:00, сигналы усреднены по слою 11470–11600 м. Приведены зависимости для исходной I_{\parallel} (рис. 2, а)

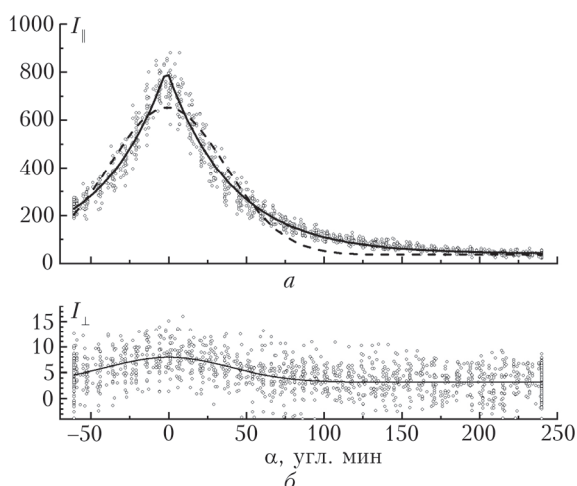


Рис. 2. Зависимости интенсивности сигнала от угла наклона лидара. Исходная поляризация I_{\parallel} (а): пунктирная кривая – гауссова зависимость, сплошная кривая – экспоненциальная зависимость; кросс-поляризованная компонента сигнала I_{\perp} (б)

и кросс-поляризованной I_{\perp} (рис. 2, б) компонент сигнала от угла наклона лидара α .

Гауссова зависимость, использованная в [18] (пунктир на рис. 2, а), плохо описывает экспериментальные данные для I_{\parallel} , поскольку не учитывает острый пик интенсивности при ориентации лидара точно в зенит. Гораздо лучше полученный массив описывается экспоненциальной зависимостью (сплошная линия)

$$I(\alpha) = I_0 + A \exp(-|\alpha - \alpha_0|/\omega), \quad (1)$$

где I – интенсивность сигнала; I_0 – интенсивность при отсутствии зеркальной компоненты ($\alpha \gg 4^\circ$); A – постоянная, зависящая от вклада зеркального отражения в полную интенсивность; α_0 – погрешность ориентации вертикали лидара; ω – полуширина распределения. Для случая на рис. 2 $\omega = 42$ угл. мин. Экспоненциальная зависимость хорошо описывает все данные измерений как 2018, так и 2021 г. Для зависимостей на рис. 1, д $\omega = 30$ угл. мин для участка $H = 7$ км и 18 угл. мин для $H = 7,9$ км.

Всего в работе обобщены результаты 47 измерений, сделанных в 2018 и 2021 гг. Такое количество наблюдений объясняется возможностью непосредственного зондирования кристаллических облаков при отсутствии нижележащей облачности нижнего яруса.

В июле 2018 г. произведено 19 наблюдений высоких перистых облаков (10000–11500 м, температура -57°C), ширина распределения w изменялась в пределах 46–159 угл. мин, медианное значение составляло 57 угл. мин. Температура в облаке приводится по данным метеозондирования для станции Новосибирск, взятым с сайта <http://weather.uwyo.edu>.

В октябре 2018 г. наблюдались облачные слои на высотах 6000–6600 м с температурой -25°C . Цикл наблюдений составлял 16 измерений, ширина распределения w находилась в пределах 18–48 угл. мин, медианное значение составляло 23 угл. мин. В мае – июле 2021 г. было проведено 17 наблюдений в облаках различной высоты, от 5300 (-7°C) до 13300 м (-64°C); $w = 13$ –311 угл. мин. Медианное значение составляло 26,5 угл. мин. В целом какой-либо зависимости ширины распределения от температуры выявить не удалось. Существенно выбиваются из общего ряда характеристики облака на границе очень высокой тропопаузы (13300 м) в 13:25 2 июля, для которого $w = 311$ угл. мин. При таком широком распределении не удается определить значения фоновой интенсивности I_0 .

Цикл зенитного зондирования ($-2^{\circ} \dots +6^{\circ} \dots -2^{\circ}$) занимает ~ 50 с. За это время конфигурация облака может заметно измениться, что видно по рис. 1, *a* и *г*. Наибольшую неопределенность это вносит в оценку величины фоновой составляющей I_0 и не дает возможности увеличить интервал углов сканирования.

На рис. 3, *a* приведено несколько выбранных зависимостей интенсивности I_{\parallel} от угла наклона лидара, охватывающих весь диапазон наблюдаемых значений w (от 15 до 311 угл. мин). Для кривых 1, 4 приведены данные единичных (в каждом импульсе) измерений интенсивности сигнала. Вероятность появления значений w приведена на рис. 3, *б*. Сплошной линией показано логнормальное распределение с центром в $w_c = 36$ угл. мин; 50% случаев находится в пределах $w = 13$ –42 угл. мин.

Особый интерес представляет поведение кросс-поляризованной компоненты. При френелевском зеркальном отражении от плоской грани излучение не должно содержать кросс-поляризованной составляющей. В измерениях изредка наблюдалось небольшое увеличение сигнала I_{\perp} в углах, близких к зениту, типичный случай представлен на рис. 2, *б*. Однако это увеличение находится на уровне погрешностей измерений. Кроме того, случайные изменения плотности облака за время сканирования могут превосходить изменения в интенсивности компоненты I_{\perp} (см. рис. 1, *г*) и могут случайно совпасть с циклом сканирования. Достоверных данных о связи интенсивности I_{\perp} с углом наклона лидара у нас нет. Поэтому, как и в предыдущей работе [29], мы можем сделать вывод, что в слоях с зеркальным отражением интенсивность компоненты I_{\perp} практически не зависит от угла наклона лидара.

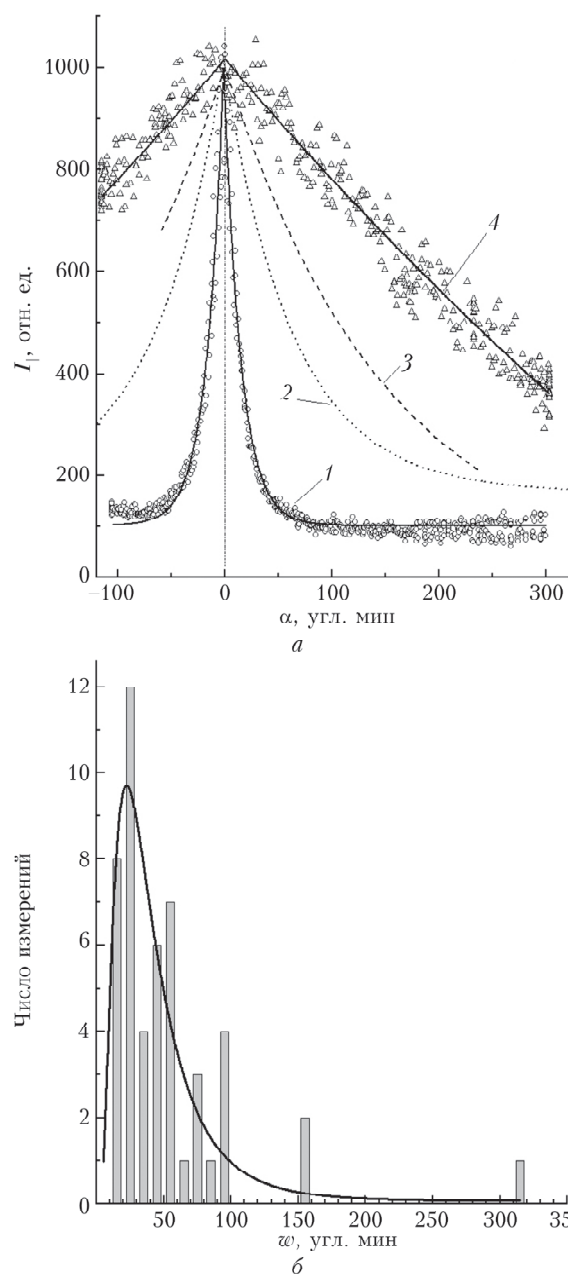


Рис. 3. Выбранные зависимости интенсивности I_{\parallel} от угла наклона, охватывающие весь диапазон наблюдаемых значений w (*a*): кривая 1 – наблюдения 21 мая 2021 г., $w = 15$ угл. мин; 2 – 6 июля 2021 г., $w = 65$ угл. мин; 3 – 2 июля 2018 г., $w = 150$ угл. мин; 4 – 2 июля 2021 г., $w = 311$ угл. мин. Частота появления ширин распределения w в интервале 10 угл. мин (*б*); сплошная кривая – логнормальное распределение с центром в $w_c = 36$ угл. мин

3. Особенности поляризационной структуры облаков при сканировании на большой угол

Одной из задач исследования было обнаружение углового отражения в кристаллических облаках. Как уже указывалось, хаотически ориентированные кристаллические частицы вызывают значительную

деполяризацию обратнорассеянного излучения, обычно ДО находится в пределах 0,3–0,6. Частицы, преимущественно ориентированные длинными осями в горизонтальной плоскости, вызывают зеркальное отражение света и имеют при зондировании в зенит ДО, близкое к нулю, и повышенное обратное рассеяние [3]. Отклонение оси лидара от вертикали устраняет эффект зеркального отражения, уменьшает интенсивность сигнала и возвращает ДО к величине, характерной для хаотической ориентации частиц. Эксперименты, проводимые по программе CALIPSO поляризационным лидаром космического базирования [25, 39], показывают выраженную отрицательную корреляцию деполяризации и интегрированного обратного рассеяния для кристаллических частиц. Это свидетельствует о том, что выраженная горизонтальная ориентация частиц весьма распространена. Однако при большом отклонении линии зондирования от вертикали может проявиться эффект уголкового отражения, причиной которого является наличие прямого угла между плоскостями кристаллов [30, 32].

Ожидается, что при рассеянии на пластинках в зоне углов наклона более 32° ДО превышает единицу, а коэффициент обратного рассеяния увеличивается на порядок. Однако в реальных условиях всегда имеется смесь хаотически ориентированных и горизонтально ориентированных частиц. Также

нужно принимать во внимание, что кристаллы могут иметь неправильную форму. В этих условиях наличие уголкового отражения, скорее всего, проявится в незначительном изменении ДО и интенсивности сигнала.

Полный цикл сканирования нашего лидара от вертикали до 50° и обратно занимает ~ 4 мин. За это время плотность облаков может измениться, кроме того, структура облачного поля в направлении зенита и под углом 32° с большой вероятностью различна. Скачки интенсивности сигнала могут быть вызваны как уголковым отражением, так и изменением плотности облака. Поэтому наблюдения изменений ДО более информативны для обнаружения эффекта уголкового отражения, чем наблюдения изменений интенсивности сигнала.

В настоящей работе приведены данные измерений, проведенных 21 мая 2021 г. в 10:40. Сканирование проводилось со скоростью $0,4^\circ$ в секунду, плоскость поляризации лазера совпадала с горизонтальной плоскостью. На рис. 4, *a* показано распределение интенсивности I_{\parallel} , помноженной на квадрат расстояния. Длина записи составляла 9 мин, по вертикали отложена дистанция зондирования R . Угол наклона лидара показан на рис. 4, *б*, дополнительно проведена линия, соответствующая углу 32° . Карты зондирования приведены на рис. 4, *a*, *в*, *г*; по горизонтальной шкале

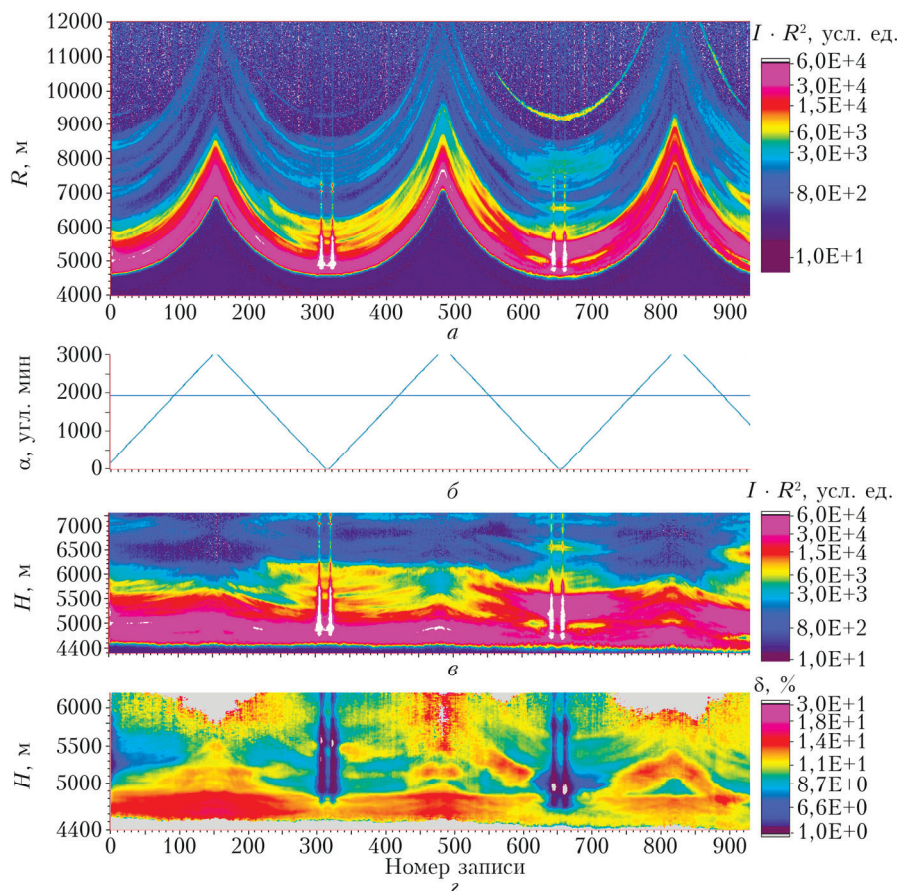


Рис. 4. Наблюдения 21 мая 2021 г., 10:40, продолжительность записи 9 мин: интенсивность I_{\parallel} , помноженная на квадрат расстояния (*a*); угол наклона лидара α (*б*); интенсивность I_{\parallel} (*в*), вертикальная шкала пересчитана на высоту облака; деполяризационное отношение δ (*г*) (цвет. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.12>)

указан номер записи. На рис. 4, *в*, *г* вертикальная шкала пересчитана на высоту облака $H = R/\cos\alpha$. На рис. 4, *г* участки, где величины сигналов меньше шума и ДО не могут быть вычислены, показаны серым.

На рис. 4 выделяются слои на высотах 4800–7000 м, в которых при зондировании в зенит видно зеркальное отражение. Отметим, что при сканировании лидар переходил через вертикаль на 2°, что проявляется в виде двойных линий с повышенной интенсивностью (рис. 4, *в*) и минимальным ДО (рис. 4, *г*). На всех высотах величина ДО растет с наклоном лидара. Скорость роста ДО различна, вероятно, из-за различного соотношения горизонтально ориентированных и хаотических частиц.

На рис. 5 приведен график зависимости величины ДО от угла наклона лидара для двух слоев на высотах 5000–5200 и 5200–5400 м. В этих слоях скачок ДО хорошо виден в области 30–32°.

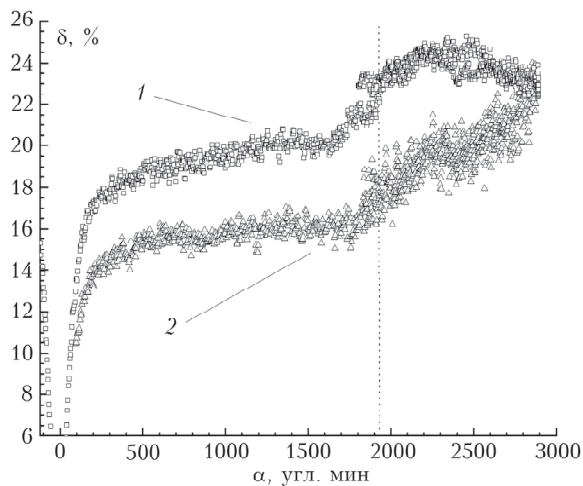


Рис. 5. Зависимость ДО от угла наклона лидара: кривая 1 – слои 5000–5200 м, кривая 2 – 5200–5400 м

Наблюдаемая на рис. 5 картина с высокой вероятностью соответствует явлению уголкового отражения в кристаллическом облаке.

Заключение

В 2018 и 2021 гг. проведены наблюдения ледяных облаков на высотах 4–13 км с использованием сканирующего поляризационного лидара ЛОЗА-МЗ. Полученные данные о поляризации лидарного сигнала показывают высокую вероятность преимущественно горизонтальной ориентации кристаллических частиц в облаках. Распределение наклонов частиц относительно горизонтальной плоскости хорошо описывается экспоненциальной зависимостью с полушириной от 13 до 311 угл. мин. Зенитное сканирование до углов 50° выявило высокую вероятность существования уголкового отражения в ледяных облаках.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Министерства науки и выс-

шего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661), при финансовой поддержке РФФИ и Томской области (грант № 19-48-700014-р в части модернизации приемопередатчика лидара и проведения наблюдений, грант № 21-55-53027 в части теоретической оценки оптических свойств кристаллов) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН в части разработки программного обеспечения и обработки данных зондирования.

1. Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // J. Geophys. Res. 1986. V. 103. P. 1799–1805.
2. Sassen K., Griffin M.K., Dodd G.C. Optical scattering and microphysical properties of subvisual cirrus clouds, and climatic implications // J. Appl. Meteorol. 1989. V. 28, N 2. P. 91–98.
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. Noel V., Chepfer H., Ledanois G., Delaval A., Flamant P.H. Classification of particle effective shape ratios in cirrus clouds based on the lidar depolarization ratio // Appl. Opt. 2002. V. 41, N 21. P. 4245–4257.
5. You Y., Kattawar G.W., Yang P., Hu Y.X., Baum B.A. Sensitivity of depolarized lidar signals to cloud and aerosol particle properties // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2006. V. 100, N 1–3. P. 470–482.
6. Hoareau C., Keckhut P., Moel V., Chepfer H., Baray J.-L. A decadal cirrus clouds climatology from ground-based and spaceborne lidars above the south of France (43.9°N–5.7°E) // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 6951–6963.
7. Stillwell R.A., Neely III R.R., Thayer J.P., Shupe M.D., Turner D.D. Improved cloud-phase determination of low-level liquid and mixed-phase clouds by enhanced polarimetric lidar // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. P. 835–859.
8. Haerig M., Engelmann R., Ansmann A., Veselovskii I., Whiteman D.N., Althausen D. 1064 nm rotational Raman lidar for particle extinction and lidar-ratio profiling: cirrus case study // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 4269–4278.
9. Campbell J.R., Vaughan M.A., Oo M., Holz R.E., Lewis J.R., Welton E.J. Distinguishing cirrus cloud presence in autonomous lidar measurements // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 435–449.
10. Lavigne C., Roblin A., Chervet P. Solar glint from oriented crystals in cirrus clouds // Appl. Opt. 2008. V. 47, N 3. P. 6266–6276.
11. Klotzsche S., Macke A. Influence of crystal tilt on solar irradiance of cirrus clouds // Appl. Opt. 2006. V. 45, N 5. P. 1034–1040.
12. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков Ci: Часть 1. Ориентация при падении // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
13. Chepfer H., Brogniez G., Goloub P., Breon F.M., Flamant P.H. Observations of horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds with POLDER-1/ADEOS-1 // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1999. V. 63. P. 521–543.
14. Masuda K., Ishimoto H. Influence of particle orientation on retrieving cirrus cloud properties by use of total and polarized reflectances from satellite measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 85. P. 183–193.
15. Breon F.-M., Dubrulle B. Horizontally oriented plates in clouds // J. Atmos. Sci. 2004. V. 61. P. 2888–2898.

16. Borovoi A., Galileiskii V., Morozov A., Cohen A. Detection of ice crystal particles preferably oriented in the atmosphere by use of the specular component of scattered light // *Opt. Express* 2008. V. 16, N 11. P. 7625–7633.
17. Platt C.M.R. Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17. P. 482–488.
18. Noel V., Sassen K. Study of ice crystal orientation in ice clouds from scanning polarization lidar observations // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44, N 5. P. 653–664.
19. Chen W.N., Chiang C.W., Nee J.B. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds // *Appl. Opt.* 2002. V. 41, N 30. P. 6470–6476.
20. Platt C.M.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.
21. Sassen K. Ice crystal habit discrimination with the optical backscatter depolarization technique // *J. Appl. Meteorol.* 1977. V. 16. P. 425–431.
22. Sassen K. Corona-producing cirrus cloud properties derived from polarization lidar and photographic analyses // *Appl. Opt.* 1991. V. 30, N 24. P. 3421–3428.
23. Platt C.M.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.
24. Thomas L., Cartwright J.C., Wareing D.P. Lidar observation of the horizontal orientation of ice crystals in cirrus clouds // *Tellus*. 1990. V. 42B. P. 211–216.
25. 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. Express* 2008. V. 16, N 6. P. 3931–3948.
26. Noel V., Chepfer H. A global view of horizontally oriented crystals in ice clouds from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D00H23.
27. Yoshida R., Okamoto H., Hagihara Y., Ishimoto H. Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D00H3.
28. Hunt W.H., Winker D.M., Vaughan M.A., Powell K.A., Lucker P.L., Weimer C. CALIPSO lidar description and performance assessment // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009. V. 26, N 7. P. 1214–1228.
29. Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Naonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilo-va 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. P. 1113–1127.
30. Borovoi A., Grishin I., Naats E., Ooppel U. Backscattering peak of hexagonal ice columns and plates // *Opt. Lett.* 2000. V. 25, N 18. P. 1388–1390.
31. Konoshonkin A., Wang Zh., Borovoi A., Kustova N., Liu D., Xie Ch. Backscatter by azimuthally oriented ice crystals of cirrus clouds // *Opt. Express* 2016. V. 24, N 18. P. A1257–1268.
32. Borovoi A.G., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Veselovskii I.A. Contribution of corner reflection 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.
33. Шишко В.А., Брюханов И.Д., Ну Е.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В. Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 3. С. 186–192; Shishko V.A., Bryukhanov I.D., Nie E.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Konoshonkin A.V. Algorithm for interpreting light backscattering matrices of cirrus clouds for the retrieval of their microphysical parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 393–399.
34. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Шишко В.А., Кустова Н.В., Ну Е.В., Коношонкин А.В., Локтюшин О.Ю., Тимофеев Д.Н. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 3. С. 193–201; Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Shishko V.A., Kustova N.V., Nie E.V., Konoshonkin A.V., Loktyushin O.Yu., Timofeev D.N. Estimation of microphysical characteristics of contrails by polarization lidar data: theory and experiment // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 400–409.
35. Del Guasta M., Vallar E., Riviere O., Castagnoli F., Venturi V., Morandi M. Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds // *Appl. Opt.* 2006. V. 45, N 20. P. 4878–4887.
36. Hayman M., Spuler S., Morley B., VanAndel J. Polarization lidar operation for measuring backscatter phase matrices of oriented scatterers // *Opt. Express* 2012. V. 20, N 28. P. 29553–9567.
37. 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.
38. Neely R.R., Hayman M., Stillwell R.A., Thayer J.P., Hardesty R.M., O'Neill M., Shupe M.D., Alvarez C. Polarization lidar at summit, greenland for the detection of cloud phase and particle orientation // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2013. V. 30. P. 1635–1655.
39. Hu Y., Vaughan M., Liu Zh., Lin B., Yang P., Flittner D., Hunt B., Kuehn R., Huang J., Wu D., Rodier Sh., Powell K., Trepte Ch., Winker D. The depolarization–attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory // *Opt. Express* 2007. V. 15, N 9. P. 5327–5332.

G.P. Kokhanenko, Yu.S. Balin, A.G. Borovoi, M.M. Novoselov. Studies of the orientation of crystalline particles in ice clouds by scanning lidar.

Results of studies of the horizontal orientation of crystalline particles carried out using a scanning polarization lidar LOSA-M3 are presented. During 2018–2021, several series of measurements of the structure of high-level crystalline clouds were carried out in the zenith scanning mode. In contrast to sounding only in the vertical direction, observations of the dependence of the lidar signal characteristics (intensity and depolarization ratio) on the angle of lidar axis inclination make it possible to identify the phase composition of clouds (water or crystalline) and measure the distribution of particle deviation relative to the horizontal plane (flutter). In layers with a pronounced specular reflection, the relationship between the signal intensity and the slope of the sounding path at small angles (up to 5°) is well described by an exponential dependence. The results of sounding when scanning up to angles of 45–50° showed a high probability of the existence of a corner reflection in ice clouds.