

Зеркально отраженная компонента при рассеянии света на ледяных кристаллах с преимущественной ориентацией

В.П. Галилейский, А.Г. Боровой, Г.Г. Матвиенко, А.М. Морозов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 12.03.2008 г.

Предложена и реализована физическая идея нового метода определения размеров и параметров ориентации ледяных кристаллов в атмосфере в ситуациях, когда ледяные кристаллы проявляют преимущественно горизонтальную ориентацию. Метод заключается в измерении угловых размеров зеркально отраженной компоненты рассеянного света, которая появляется в случае горизонтальной ориентации частиц и имеет ярко выраженный пик в направлении зеркального отражения.

Ключевые слова: рассеяние света, кристаллические облака.

Введение

Зеркальным отражением света от горизонтально ориентированных кристалликов льда обусловлен ряд хорошо известных оптических явлений в атмосфере. Это солнечные столбы, возникающие при отражении солнечного света от перистых облаков, столбы от наземных источников света вблизи поверхности земли в зимнее время и др. При лазерном зондировании атмосферы отражение света от горизонтально ориентированных кристаллов впервые наблюдалось Платтом [1, 2]. До появления этих работ считалось, что любые кристаллические облака, в отличие от жидкокапельных, вызывают существенную деполяризацию лидарных сигналов. Поэтому степень деполяризации лидарных сигналов использовалась как критерий, позволяющий отличать кристаллические облака от жидкокапельных [3]. Но горизонтально ориентированные кристаллы также не вызывают деполяризацию лидарных сигналов, как и капли воды.

Для того чтобы отличить облака с горизонтально ориентированными кристаллами от жидкокапельных облаков, Платт и др. [2] использовали сканирование лидара на несколько градусов относительно вертикали. При этом для жидкокапельных облаков лидарный сигнал незначительно изменялся при отклонении направления зондирования от вертикали, в то время как для облаков с ориентированными кристаллами интенсивность сигнала резко уменьшалась, а степень деполяризации резко увеличивалась. Такая закономерность объясняется тем, что кристаллы в атмосфере ориентированы не строго

горизонтально, а имеют некоторый разброс ориентаций относительно горизонтальной плоскости, который называют флаттером. В настоящее время поляризационные сканирующие лидары по-прежнему используются как инструмент для исследования флаттера в облаках с горизонтально ориентированными ледяными кристаллами [4, 5].

В указанных работах [1–5] использовались моностатические лидары, где рассеянный свет измеряется только в одном направлении рассеяния — в направлении назад, поскольку в моностатической схеме зондирования источник и приемник излучения совмещены в пространстве. Кроме того, в моностатических лидарах используется только импульсное излучение, чтобы по временной развертке лидарного сигнала определять расстояние до исследуемого объекта. Если же источник и приемник излучения разнести в пространстве, то получится бистатическая схема зондирования, где зондирующим излучением является обычно или прожекторный [6], или лазерный пучок света [7]. По сравнению с моностатической бистатическая схема зондирования имеет следующие преимущества. Во-первых, здесь детектируется свет под различными углами рассеяния. Во-вторых, можно пользоваться не импульсным, а непрерывным зондирующим излучением, так как расстояние до точки наблюдения определяется углом относительно горизонта.

Что касается детектирования рассеянного излучения, то здесь как в моностатической, так и бистатической схемах обычно измеряется только одна величина — мощность принимаемого сигнала, соответствующая числу фотонов, приходящих на детектор в единицу времени. Поскольку фотоны приходят на детектор с различными направлениями распространения, то намного более информативным, по сравнению с числом фотонов, является

* Виктор Петрович Галилейский (gvp@iao.ru); Анатолий Георгиевич Боровой (bogovoi@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко; Александр Михайлович Морозов (moroza@iao.ru).

распределение этих фотонов по направлениям распространения. Распределение фотонов $I(\mathbf{r}, \mathbf{n})$ по направлениям распространения \mathbf{n} в точке расположения детектора \mathbf{r} называется лучевой интенсивностью. Отметим, что лучевая интенсивность является основополагающей величиной в ряде разделов физики, включая оптику рассеивающих сред. В частности, фундаментальное уравнение переноса излучения формулируется как раз для лучевой интенсивности (см., например, [8]). В оптике лучевая интенсивность легко измеряется экспериментально. Действительно, в любой оптической системе, формирующей изображение, например в стандартной фотокамере, распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости можно трактовать как лучевую интенсивность (усредненную по поверхности приемного объектива).

Если объединить бистатистическую схему зондирования с детектированием лучевой интенсивности, то такая схема, названная «бистатистическое зондирование + детектирование изображения», приобретает определенные преимущества по сравнению с традиционными схемами дистанционного зондирования атмосферы. В частности, сошлемся на недавнюю работу [9], где обсуждается использование этой схемы для лазерного зондирования атмосферного аэрозоля.

В данном эксперименте мы использовали схему «бистатистическое зондирование + детектирование изображения» для исследования размеров и ориентации ледяных кристаллов в атмосфере. Цель нашей работы — показать, что для измерения микрофизических параметров кристаллов льда в атмосфере, когда они проявляют преимущественно горизонтальную ориентацию, целесообразно выделять зеркально отраженную компоненту в рассеянном излучении. Ценность зеркально отраженной компоненты заключается в том, что она содержит информацию как о горизонтальных размерах кристаллов, так и об их флаттере в достаточно простой форме. В результате зеркально отраженная компонента оказывается удобным инструментом для решения обратных задач рассеяния, т.е. для восстановления указанных микрофизических параметров кристаллических облаков из экспериментально измеренного рассеянного излучения.

1. Диффузная и зеркально отраженная компоненты рассеянного излучения

Чтобы пояснить физическую сторону обсуждаемой в данной статье проблемы, рассмотрим простейший случай, представленный на рис. 1, *а*. Здесь вертикально направленный расходящийся пучок света с угловой расходимостью α освещает кристаллическое облако в виде тонкого слоя, находящегося на высоте h . Если кристаллы в облаке ориентированы хаотически, то очевидно, что за счет рассеянного света наблюдатель увидит диффузное пятно радиусом $r \approx h\alpha$, находящееся на высоте h .

Но если в облаке часть кристаллов имеет преимущественно горизонтальную ориентацию, то в рассеянном свете появляется зеркально отраженная компонента, которая наблюдается не как пятно, а как яркая точка типа звезды, находящаяся уже на удвоенной высоте $2h$. Эту точку можно интерпретировать как мнимый точечный источник излучения с ограниченной угловой апертурой. Зеркально отраженная компонента образует на земле круг радиуса $r \approx 2h\alpha$. Наблюдатель, находящийся в этом круге, будет видеть яркую точку зеркально отраженной компоненты на фоне диффузного пятна.

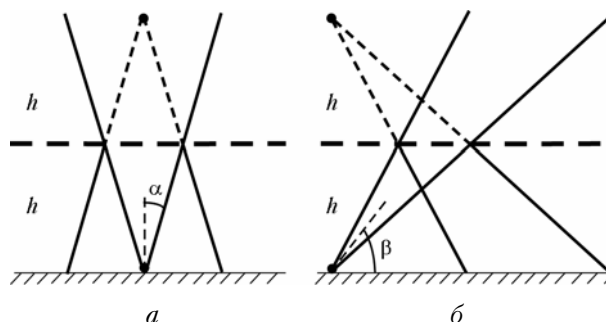


Рис. 1. Схема наблюдения зеркально отраженной компоненты рассеянного света для горизонтально ориентированных кристаллов: *а* — вертикальное, *б* — наклонное освещение слоя кристаллов

Очевидно (рис. 1, *б*), что расположение в пространстве мнимого точечного источника строго фиксировано, оно не зависит ни от угловой расходимости пучка α , ни от наклона пучка β относительно вертикали. Угловая расходимость и наклон пучка влияют только на размеры и положение пятна на земле, внутри которого наблюдается зеркально отраженная компонента.

Заметим, что использованная здесь схема «бистатистическое зондирование + детектирование изображения» полностью соответствует наблюдению неба невооруженным глазом, когда наблюдатель находится на некотором расстоянии от источника излучения. Такие визуальные наблюдения зондирующего прожекторного пучка, а также регистрация рассеянного света CCD-камерой проводились нами ранее [10]. В настоящей статье содержатся более новые экспериментальные данные. Кроме того, приведена теоретическая интерпретация этих данных и рассматривается их использование для решения обратной задачи рассеяния.

На рис. 2 представлено экспериментально наблюдаемое распределение интенсивности света, полученного в фокальной плоскости CCD-камеры в схеме эксперимента (рис. 1, *б*). Рис. 2 представляет последовательность картин, получаемых CCD-камерой при отклонении прожекторный луча от вертикального направления. Центральная картина (рис. 2, *в*) соответствует вертикальному направлению, где верхнее яркое пятно является зеркально отраженной компонентой. Затем прожектор отклоняется вправо перпендикулярно линии, соединяющей наблюдателя и прожектор.

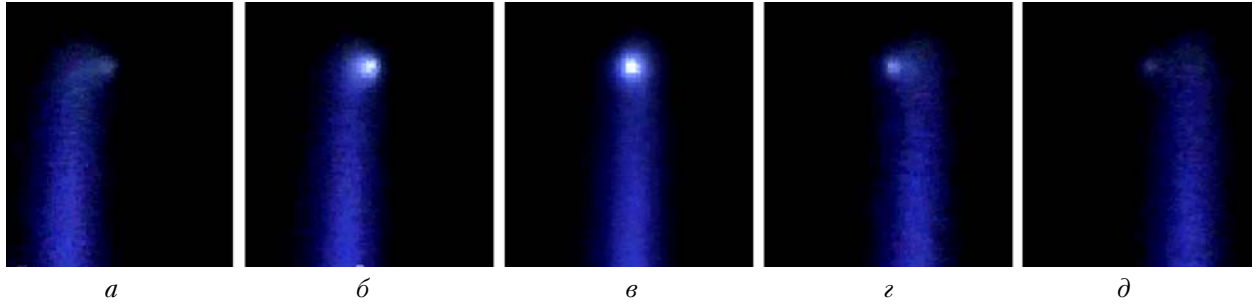


Рис. 2. Диффузная и зеркально отраженная компоненты рассеянного света при сканировании прожекторного пучка относительно вертикали

Мы видим, что диффузное пятно следует за осью прожектора (рис. 2, *г*), тогда как зеркальная компонента остается на прежнем месте, поскольку положение в пространстве мнимого точечного источника неизменно. Пятно зеркальной компоненты исчезает только при таких наклонах прожектора, когда направление, соответствующее зеркальному отражению, оказывается вне конуса угловой расходимости прожектора (рис. 2, *д*). Та же картина демонстрируется на рис. 2, *а, б* при отклонении прожектора в противоположном направлении.

Перейдем к теоретическому описанию наблюдаемого явления. Применим к задаче рассеяния света на облаке ледяных кристаллических частиц перистых облаков стандартные представления оптики рассеивающих сред. В оптике рассеивающих сред каждая частица характеризуется сечением рассеяния и индикатрисой рассеяния. Если кристаллические частицы ориентированы в пространстве более или менее хаотично, то лучевая интенсивность рассеянного излучения $I(\mathbf{r}, \mathbf{n})$ имеет типичный для оптики рассеивающих сред вид плавно изменяющейся функции обеих переменных. Но значительная доля ледяных кристаллов часто принимает преимущественно горизонтальную ориентацию. В этом случае лучевая интенсивность рассеянного излучения разделяется на две качественно различающиеся части:

$$I(\mathbf{r}, \mathbf{n}) = I_d(\mathbf{r}, \mathbf{n}) + I_z(\mathbf{r}, \mathbf{n}), \quad (1)$$

где диффузная компонента I_d остается по-прежнему плавной функцией своих переменных, а зеркально отраженная компонента I_z является острой функцией направления распространения фотонов \mathbf{n} . В предельном случае зеркально отраженная компонента описывается дельта-функцией Дирака

$$I_z(\mathbf{r}, \mathbf{n}) \approx c(\mathbf{r}) \delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0), \quad (2)$$

где в частном случае (см. рис. 1) \mathbf{n}_0 — направление от мнимого точечного источника излучения в точку наблюдения, а явный вид функции $c(\mathbf{r})$ несуществен для дальнейшего изложения.

Появление яркой зеркально отраженной компоненты объясняется тем, что рассеивающая среда относительно этой компоненты эквивалентна сплошному горизонтально ориентированному зеркалу. Здесь под зеркалом подразумевается плоская граница раздела между средами с некоторым коэффи-

циентом отражения, меньшим единицы. Зеркально отраженную компоненту легко найти из элементарных лучевых построений геометрической оптики. То, что зеркало на самом деле не сплошное, а состоит из отдельных кусочков размерами, намного превышающими длину волны, в рамках геометрической оптики не изменяет физическую картину явления.

Это разделение рассеянного излучения на диффузную и зеркально отраженную компоненты как раз и наблюдалось экспериментально авторами работы [10]. Заметим, что если требуется обнаружить появление горизонтально ориентированных кристаллов в атмосфере, то прожектор имеет преимущество перед лазерным излучением. Действительно, для лазерных пучков с малой угловой расходимостью круг на земле радиуса $r \approx 2h\alpha$, где наблюдается зеркальная компонента, будет сравнительно малым. И тогда, если пучок направлен не строго вертикально, этот круг может оказаться вдали от наблюдателя (см. рис. 1, *б*) и зеркальная компонента не будет зафиксирована. Те же самые проблемы возникнут и в случае, когда слой с ориентированными кристаллами наклонен как целое в атмосфере за счет негоризонтального движения воздушных масс.

2. Угловая структура зеркально отраженной компоненты

2.1. Горизонтально ориентированные кристаллы

Если бы все кристаллы, образующие зеркальную компоненту, были ориентированы строго в горизонтальной плоскости, то наблюдатель или фотокамера зарегистрировали бы яркую точку в направлении на точечный мнимый источник излучения, что описывается формулой (2). Подчеркнем, что лучевые построения геометрической оптики в данном случае являются не абстракцией, а описывают реальное рассеянное поле, причем такое поле, которое реализуется в ближней зоне кристаллических частиц. Например, типичный размер кристалликов льда в перистых облаках равен $D \approx 30$ мкм. Взаимодействие падающего света с отдельным кристаллом сводится, в первую очередь, к отражению падающей волны от его освещенных граней.

В результате в ближней зоне кристалла, т.е. до расстояний порядка $R \approx D^2/\lambda \approx 2$ мм от поверхности кристалла, рассеянный свет представляет собой совокупность узких пучков света с поперечными размерами порядка размера кристалла D , причем эти пучки распространяются в различных направлениях согласно законам геометрической оптики. Поскольку всегда выполняется условие $D/h \ll 1$, то можно пренебречь кривизной волнового фронта падающей волны в окрестности одного кристалла. Тогда свет, отраженный (т.е. рассеянный) от нижней горизонтальной грани кристалла на расстоянии $R \ll D^2/\lambda$, можно считать плоскопараллельным пучком, распространяющимся в направлениях \mathbf{n}_0 , где, в данном случае, \mathbf{n}_0 — направление из мнимого точечного источника в центр данной частицы. Кроме того, к рассмотренным пучкам добавляются аналогичные узкие пучки света, образовавшиеся в результате прохождения света внутрь кристалла и испытавшие многократное отражение и преломление на других гранях кристалла [11].

На расстояниях $R > D^2/\lambda$ от кристалла все эти пучки размываются в пространстве согласно дифракции Френеля. Затем в волновой зоне $R \gg D^2/\lambda$ каждый пучок трансформируется в сферическую волну, расходящуюся от центра частицы. Именно эта сферическая волна соответствует стандартным представлениям оптики рассеивающих сред и характеризуется стандартными величинами: сечением рассеяния и индикатрисой рассеяния. Индикатриса рассеяния $S(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)$ в данном случае является острой функцией направления рассеяния \mathbf{n} , сосредоточенной вокруг геометрической оптики направления распространения первоначального пучка в ближней зоне \mathbf{n}_0 . Согласно классической теории дифракции Фраунгофера [12], эта индикатриса рассеяния $S(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)$ обращается практически в нуль вне конуса вокруг направления \mathbf{n}_0 , угловой радиус которого

$$(\Delta\theta)_d \approx \lambda/D. \quad (3)$$

В атмосфере зеркальное отражение создается, главным образом, горизонтально ориентированными пластинчатыми кристаллами. Здесь зеркально отраженная компонента образуется не только пучками света, непосредственно отраженными от нижних освещенных горизонтально ориентированных граней кристаллов. В нее включаются и пучки, переотраженные верхними горизонтально ориентированными гранями, поскольку все эти пучки в ближней зоне частиц имеют одно и то же направление рассеяния. Но иногда в атмосфере реализуются ситуации, когда главная ось гексагонального столбика, проходящая через центры гексагональных граней, произвольно ориентирована в горизонтальной плоскости, а две прямоугольные грани всегда остаются горизонтальными. Такая ориентация и соответствующая ей картина гало связывается с именем Parry [13, 14]. Таким образом, Parry-ориентированные столбики также создают зеркально отраженную компоненту.

Обсудим теперь детектирование зеркально отраженной компоненты рассеянного поля произвольной оптической системой, строящей изображение. Как известно, любая оптическая система, создающая изображение, собирает все фотоны, приходящие от точечного источника, в одну точку, формируя его изображение. Поскольку мы наблюдаем частицы, находящиеся на большом расстоянии от фотоприемника, то приближенно за плоскость изображения можно принимать фокальную плоскость и при измерениях фокусировать объектив на бесконечность. Таким образом, в произвольную точку ρ фокальной плоскости собираются все фотоны, приходящие на приемный объектив с направлением распространения \mathbf{n} , удовлетворяющим следующему условию: $\mathbf{n}_\perp = \rho/f$, где \mathbf{n}_\perp — проекция направления распространения фотона \mathbf{n} на плоскость приемного объектива; f — фокусное расстояние оптической системы.

Таким образом, каждая кристаллическая частица, размер которой порядка 30 мкм и которая обычно находится на расстояниях свыше 1 км от фотоприемника, образует точку в фокальной плоскости, причем с интенсивностью, соответствующей индикатрисе рассеяния $S(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)$. Тогда совокупность кристаллов, занимающих в облаке круг радиуса $h\lambda/D$, даст в фокальной плоскости пятно, которое будет описываться функцией

$$I_s(\mathbf{r}, \mathbf{n}) \approx c(\mathbf{r})S(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0). \quad (4)$$

В результате яркая точка в направлении \mathbf{n}_0 , которая наблюдалась бы при сплошном зеркале, помещенном на высоте h , и которая описывалась бы аналитически уравнением (2), размывается в пятно с угловым радиусом, определяемым формулой (3), за счет раздробленности этого зеркала на кусочки размерами D .

Отметим, что если источник света имеет узкую угловую расходимость $\alpha < \lambda/D$, то в эксперименте будет фиксироваться соответствующим образом обрезанная дифракционная картина. Также отметим, что формула (4) остается справедливой при произвольном расстоянии между частицей и фотоприемником и не зависит, например, от размеров приемной линзы. Этот факт доказывается усреднением картины, получаемой от каждой частицы в фокальной плоскости приемной системы, по ее расположению в горизонтальной плоскости.

Выше мы подразумевали, для упрощения изложения, что все кристаллические частицы находятся на одной высоте h . Распределение частиц по высоте в кристаллическом облаке приведет к размыванию по высоте точки мнимого изображения и, соответственно, к размыванию плоскости изображения в приемной оптической системе. В фокальной плоскости это проявится как дополнительное, по сравнению с формулой (4), уширение пятна зеркально отраженной компоненты. В атмосфере кристаллические облака обычно образуются в виде достаточно тонких слоев, поэтому корректировка формулы (4) для учета конечной толщины облака представляется, на данном этапе исследований, несущественной.

2.2. Флаттер

Флаттер горизонтально ориентированных кристаллов, т.е. небольшие отклонения их ориентации от горизонтальной, приводит, очевидно, к размыванию в пространстве точки мнимого изображения источника. Мнимое изображение источника становится пятном вокруг точки, которая существовала бы без флаттера и которая изображена на рис. 1. Соответственно в фокальной плоскости приемной оптической системы первоначальное направление на точечный мнимый источник излучения \mathbf{n}_0 , использованное в уравнениях (2) и (4), размывается в некоторый конус с угловым радиусом $(\Delta\theta)_f$.

Угловое размывание пятна зеркально отраженной компоненты за счет флаттера полностью определяется геометрической оптикой. Действительно, в этой задаче требуется выразить направление распространения пучка света, отраженного от соответствующей грани кристалла, через отклонение ориентации кристалла от горизонта. Поэтому достаточно рассматривать рассеянное поле не в волновой, а в ближней зоне кристалла.

Пусть зенитный угол нормали к отражающей грани кристалла γ пробегает при флаттере интервал $[0, F]$ с плотностью вероятности $p(\gamma)$. Величину F будем называть углом флаттера. В простейшем случае, когда свет падает на отражающую пластинку вертикально, очевидно, что отклонение отражающей грани на угол γ от вертикали приводит к отклонению отраженного пучка на удвоенный зенитный угол $\theta = 2\gamma$. Таким образом, индикатриса рассеянного света в этом случае будет отличной от нуля в интервале зенитных углов $[0, 2F]$, вдвое превышающих угол флаттера F , т.е.

$$(\Delta\theta)_f \approx 2F. \quad (5)$$

Можно показать, что индикатриса рассеяния в данном случае имеет вид $S(\theta) \sim p(\theta/2)$. При наклонном падении света зависимость между индикатрисой рассеяния и плотностью вероятности флаттера становится более громоздкой. Не останавливаясь на этих громоздких формулах, в данной статье мы ограничимся простейшим случаем, когда угловая расходимость исходного пучка излучения α и его угол наклона относительно вертикали β невелики (см. рис. 1). Тогда свет падает на все кристаллы почти нормально и эффективный угловой радиус можно по-прежнему определить формулой (5).

Таким образом, угловая структура зеркально отраженной компоненты формируется за счет размывания идеализированной дельта-функции Дирака $\delta(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)$, введенной в формулу (2), по обоим переменным. Дифракция размывает дельта-функцию по переменной \mathbf{n} , а флаттер — по переменной \mathbf{n}_0 . В принципе, эти процессы независимы друг от друга, если не учитывать зависимость флаттера от размеров частиц, которая обсуждается, например, в [15]. Тогда результирующий угловой радиус пятна зеркально отраженной компоненты будет суммой выражений (3) и (5):

$$\Delta\theta \approx 2F + \lambda/D, \quad (6)$$

где величина D интерпретируется как эффективный горизонтальный размер тех кристаллов, которые формируют зеркально отраженную компоненту.

3. Восстановление размеров и угла флаттера ледяных кристаллов из эксперимента

Ансамбль ледяных кристаллов в облаке определяется в общем случае двумерной плотностью распределения частиц как по размерам, так и по ориентациям $P(D, \gamma)$. Выше мы показали, что угловая структура зеркально отраженной компоненты $I_3(\mathbf{r}, \mathbf{n})$ с физической точки зрения достаточно просто выражается через плотность вероятности $P(D, \gamma)$, что позволяет ставить обратную задачу рассеяния, т.е. определять или всю функцию $P(D, \gamma)$, или некоторые ее параметры из экспериментально измеренной функции $I_3(\mathbf{r}, \mathbf{n})$. Но обратным задачам свойственна неустойчивость решений, что требует при решении таких задач значительных усилий как при получении достаточно точных экспериментальных данных, так и при их математической обработке.

В данной статье мы используем для решения обратной задачи рассеяния только угловой радиус пятна, определяемый формулой (6). Полученная формула (6) представляется весьма перспективной для практического использования. Действительно, измеряя размер пятна $\Delta\theta$ на двух длинах волн, мы получаем два важных микрофизических параметра ледяных облаков: эффективный горизонтальный размер кристаллов D и угол флаттера F . Формула (6) не зависит от высоты облачного слоя h , что является ее существенным преимуществом при практическом использовании. Кроме того, такие геометрические параметры эксперимента, как угловая расходимость зондирующего пучка α , его угловая структура и угол наклона пучка β (см. рис. 1), не являются существенными при выводе формулы (6).

На рис. 3,а приведена фотография пятна зеркально отраженной компоненты, сделанная цифровой CCD-фотокамерой, которая дает оцифрованное изображение в трех интервалах длин волн.

На рис. 3,б представлена оцифровка изображения этого пятна по диаметру в красном ($\lambda_1 \approx 0,7$ мкм) и синем ($\lambda_2 \approx 0,4$ мкм) диапазонах длин волн. В любой дифракционной картине, из-за большого динамического диапазона значений интенсивности, обычно хорошо детектируется либо яркая центральная часть, либо слабая периферийная. Нам требуется только периферийная часть пятна, чтобы определить его угловой радиус. В результате для ситуации, зафиксированной на фотографии (рис. 3,а), мы получаем $(\Delta\theta)_1 \approx 54$ мрад и $(\Delta\theta)_2 \approx 36$ мрад, что дает диаметр частиц $D \approx 17$ мкм и угол флаттера $F \approx 7$ мрад $\approx 0,4^\circ$.

Разумеется, предлагаемая методика определения указанных микрофизических параметров горизонтально ориентированных кристаллов является

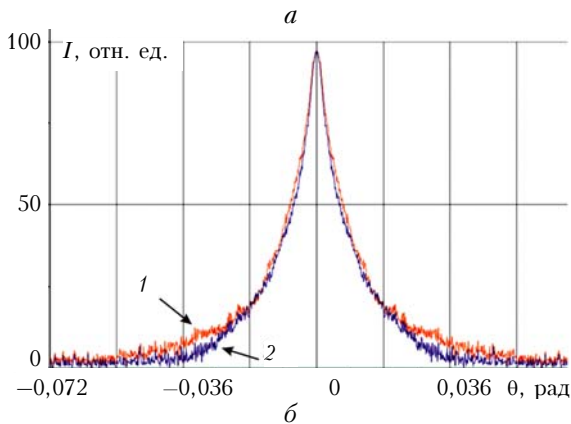
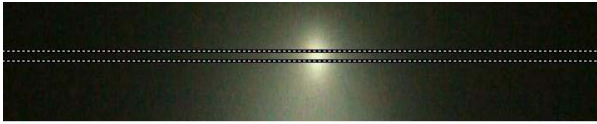


Рис. 3. Угловая структура зеркально отраженной компоненты: *a* – изображение зеркально отраженной компоненты, полученное CCD-камерой; *б* – изображение для красного (1) и синего (2) диапазонов длин волн, оцифрованное вдоль диаметра пятна между двух горизонтальных линий (*a*)

приближенной и должна совершенствоваться в будущем в нескольких направлениях. Во-первых, определение углового радиуса пятна является достаточно субъективной процедурой. Вместо этого желательно использовать всю кривую, представленную на рис. 3, *б*, через какой-либо ее интегральный параметр. Использование лазерного излучения вместо прожектора должно увеличить точность экспериментальных данных за счет монохроматичности излучения и т.д. С другой стороны, эксперименты по измерению зеркально отраженной компоненты являются достаточно трудоемкими из-за эпизодического характера явления. Поэтому использование предложенной методики для оценки размеров и угла флаттера ледяных кристаллов представляется оправданным на данном этапе исследований.

Заключение

Предложена и обоснована физическая идея нового метода исследования микрофизических параметров кристаллических облаков в атмосфере для ситуаций, когда ледяные кристаллы проявляют преимущественно горизонтальную ориентацию. Метод заключается в выделении и измерении параметров зеркально отраженной компоненты рассеянного излучения, которая появляется при горизонтальной ориентации кристаллов. Экспериментальная апробация подтвердила работоспособность предложенного метода. По сравнению с используемым ранее методом исследований поляризационными ска-

нирующими лидарами наш метод технически легко реализуется на базе недорогих стандартных источников света и фотоприемников.

Авторы выражают благодарность В.В. Веретенникову за полезное обсуждение первоначального варианта статьи, а также Н.И. Вагину, О.В. Савченко, К.В. Зуеву и Б.В. Каулю за участие в экспериментальных измерениях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-05-39014 и 06-05-65141) и INTAS (№ 05-1000008-8024).

1. Platt C.M.R. Lidar backscattering from horizontal ice crystal plates // J. Appl. Meteorol. 1978. V. 17. N 4. P. 482–488.
2. 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.
3. Sassen K. Ice crystal habit discrimination with the optical backscatter depolarization technique // J. Appl. Meteorol. 1977. V. 16. N 4. P. 425–431.
4. Noel V., Roy G., Bissonnette L., Chepfer H., Flamant P. Analysis of lidar measurements of ice clouds at multiple incidence angles // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. N 29. P. 014828 (1–4).
5. Noel V., Sassen K. Study of planar ice crystal orientations in ice clouds from scanning polarization lidar observations // J. Appl. Meteorol. 2005. V. 44. N 5. P. 653–664.
6. Прожекторный луч в атмосфере / Под ред. Г.В. Розенберга. М.: Изд. АН СССР, 1960. 244 с.
7. Reagan J.A., Byrne D.M., Herman B.M. Bistatic lidar: a tool for characterizing atmospheric particulates // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1982. V. GE-20. N 3. P. 229–243.
8. Исмаиру А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1981. 280 с.
9. Barnes J.E., Sharma N.C.P., Kaplan T.B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system // Appl. Opt. 2007. V. 45. N 15. P. 2922–2929.
10. Галилейский В.П., Гришин А.И., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Зеркальное отражение от атмосферных несферических частиц // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 9. С. 1301–1305.
11. Borovoi A.G., Grishin I.A. Scattering matrices for large ice crystal particles // J. Opt. Soc. Amer. A. 2003. V. 20. N 11. P. 2071–2080.
12. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
13. Tape W. Atmospheric halos. Washington: American Geophysical Union, Antarctic Research Series. 1994. V. 64. 134 pp.
14. Sassen K., Takano Y. Parry arc: a polarization lidar, ray-tracing, and aircraft case study // Appl. Opt. 2000. V. 39. N 36. P. 6738–6745.
15. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков *Сi*: Часть 1. Ориентация при падении // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 963–967.

V.P. Galileiskii, A.G. Borovoy, G.G. Matvienko, A.M. Morozov. **Specularly reflected component at light scattering by ice crystals with a predominant orientation.**

A new physical idea for measurement of sizes and orientation parameters of ice crystals in the atmosphere is proposed and realized in the situations when the ice crystals reveal their preferably horizontal orientation. The method consists of measurements of angular width for the specular component of the scattered light. The specular component appears for the horizontally oriented crystals and it has a sharp peak in the direction of mirror reflection.