

## Экспериментальные наблюдения зеркального отражения лазерного излучения от ориентированных кристаллических частиц, сосредоточенных в слое атмосферы

В.Н. Маричев, В.П. Галилейский, Д.О. Кузьменков, А.М. Морозов\*

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

Поступила в редакцию 4.05.2009 г.

Приведены результаты экспериментальных наблюдений явления зеркального отражения от локализованных в атмосфере горизонтально-ориентированных плоских кристаллических частиц при облучении их импульсным лазерным излучением. Обсуждаются возможные причины, почему при лидарном зондировании явление зеркального отражения на горизонтально-ориентированных атмосферных плоских ледяных частицах отмечается редко.

*Ключевые слова:* атмосферный лед, слой ориентированных кристаллов, лазерное излучение, зеркальное отражение; atmospheric ice, layer of the oriented crystals, laser radiation, mirror reflexion.

В работе [1] подробно рассматриваются основные механизмы, влияющие на поведение кристаллических частиц в свободной атмосфере. Авторы подчеркивают, что характер движения кристаллических частиц в земной атмосфере в основном определяют два наиболее значимых механизма – гравитационное воздействие планеты и условия обтекания частиц атмосферным воздухом. В спокойной атмосфере в результате действия гравитационной силы и силы сопротивления воздуха каждая частица находится в свободном падении. Это падение может иметь устойчивый и неустойчивый характер. При устойчивом падении несферические частицы преимущественно ориентированы, а при неустойчивом имеют хаотичную ориентацию движения. На характер движения кристаллических частиц оказывает влияние как упорядоченное перемещение воздушных масс в атмосфере, так и их турбулентность. Кроме того, многие исследователи указывают на возможность взаимодействия электрических и аэродинамических сил, которые также могут приводить к упорядоченной ориентации кристаллических частиц [2].

Характер оседания несферических частиц при свободном падении в соответствии с [1] определяется их формой и значением числа Рейнольдса:

$$Re = hu/v,$$

где  $h$  – характерный размер частиц;  $u$  – скорость их оседания и  $v$  – кинематическая вязкость воздуха.

\* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Виктор Петрович Галилейский (gvr@iao.ru); Дмитрий Олегович Кузьменков; Александр Михайлович Морозов (morozy@iao.ru).

При значениях  $Re \leq 0,1$  несферические частицы сохраняют ту угловую ориентацию, при которой началась их седиментация. При увеличении числа Рейнольдса, вплоть до 50, происходит ориентация частиц таким образом, что их сопротивление набегающему потоку становится максимальным. То есть частица ориентируется наибольшим аэродинамическим размером навстречу потоку воздуха. Поскольку главной силой, определяющей направление движения частиц, есть сила тяготения, то преимущественное направление набегающего потока вертикальное, что приводит к выравниванию несферических частиц своим наибольшим размером параллельно горизонту. При значениях  $Re$  больше 50 отмечаются угловые колебания относительно плоскости горизонта несферических частиц, флаттер. В этом случае чаще всего флаттер не превышает  $1-3^\circ$ .

В работе [3] указывается, что в атмосфере нашей планеты реализуется значительный уровень турбулентных движений воздуха. Однако в области температурных инверсий такой вид движения воздуха всегда существенно ослаблен. В этом случае несферические частицы, попадая в зону ослабленного турбулентного движения воздуха, начинают ориентироваться своим наибольшим аэродинамическим размером параллельно поверхности планеты.

Пространственная ориентация кристаллических частиц неизбежно приводит к анизотропии физических свойств атмосферы, в которой располагаются эти кристаллы. Результатом этого является оптическая анизотропия, наблюдаемая в земной атмосфере. Примерами анизотропии в атмосфере могут быть такие оптические явления, как гало, ложные солнца, световые столбы и др.

Более подробно остановимся на одном из таких оптических явлений, обусловленном зеркальным

отражением от пространственно ориентированных кристаллов атмосферной воды. Появившиеся в последние годы публикации на эту тему [4–11] свидетельствуют о возрастающем интересе специалистов к данному явлению. Результаты выполненных исследований зеркального отражения излучения от ледяных кристаллов, сосредоточенных в атмосферных слоях, представлены в работах [7, 9, 10]. В проведении указанных исследований явления был использован прожектор, в котором в качестве источника оптического излучения применялась ксеноновая лампа ДКСЭЛ-4000. Излучение лампы проходило через формирующую оптическую систему, что позволило получить диаграмму направленного излучения расходимостью около  $1^\circ$  (рис. 1, *a*).

Облучая в ночное время атмосферу в околосветовой области этим источником излучения, иногда можно было наблюдать мнимое изображение источника, возникающее при отражении излучения от слоя горизонтально ориентированных ледяных частиц. То, что отражение именно зеркальное, подтверждалось наблюдениями: при отклонении луча от вертикали излучение от слоя отражалось в соответствии с законами зеркального отражения. Причем зеркальная компонента отчетливо выделялась на фоне общего диффузного рассеяния излучения в слое при изменении наклона и повороте луча прожектора. Эффект зеркального отражения наблюдался, как правило, в холодное время года, при отрицательной температуре, а среди атмосферных ледяных частиц преобладали пластинчатые формы.

Явление зеркального отражения также отмечалось и при лидарном зондировании (отмечалось и ранее) [6], оно описывалось как аномально высокое обратное рассеяние, вызванное ледяными частицами. Немалый интерес, в плане изучения атмосферных ледяных частиц, может представить и другая форма проявления зеркального отражения при облучении их короткоимпульсным коллимированным лазерным излучением, которое наблюдалось в ходе лидарного зондирования на Малой станции высотного зондирования атмосферы (МСВЗА) ИОА. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

Лазерный луч (длина волны 532 нм) с расходимостью 0,1 мрад направлялся вертикально в атмосферу. Энергия отдельного импульса излучения составляла 180 мДж, частота посылки импульсов — 10 Гц, длительность импульса — 10 нс. Белая контрольная площадка размером  $1,2 \text{ м}^2$ , расположенная на поверхности плоской крыши здания, находилась на удалении от оси луча около 2 м. В ходе эксперимента лидар работал в обычном режиме, а фотокамера производила фотосъемку белой контрольной площадки вблизи лидара.

Эксперимент проводился вечером 20 декабря 2008 г. в условиях ясной и безветренной погоды при температуре воздуха  $-18^\circ\text{C}$ . Луч лазера, направленный в атмосферу, отражался и интенсивно рассеивался от тонкого аэрозольного слоя (рис. 3, *a*, вблизи вершины изображения лазерного луча видна яркая точка, вызванная как рассеянием на ледяных частицах, так и отражением излучения от пло-

ских частиц). Рассеивающие частицы создают на контрольной площадке очень слабый монотонный фон. В отличие от них горизонтально-ориентированные ледяные пластинки как микрозеркала отражают назад падающее на них лазерное излучение в сторону контрольной площадки и создают на белом фоне эффект «зеленых зайчиков». На рис. 3, *b* видны световые блики от лазерного луча на снежном покрове, образовавшиеся при зеркальном отражении от ледяных аэрозольных пластинок в атмосфере. Размеры пятен в диаметре составляли от 3 до 10 см. На некоторых четко проявлялись дифракционные кольца. Изображение пятен на рис. 3, *b* получено по нескольким снимкам при суммарной экспозиции 2 мин. За это время в атмосферу было направлено 1200 импульсов лазерного излучения. К моменту начала фотографической регистрации явления началось изменение состояния слоя ледяного аэрозоля. Возможно, это связано с его разрушением, горизонтальным сносом или подъемом. До этого, когда слой был более мощным, нами визуально наблюдались значительно бо́льшая их яркость и частота появления лазерных «зеленых зайчиков» на контрольном участке поверхности.

По данным Станции акустического зондирования ИОА СО РАН [12], расположенной на расстоянии 150 м от места проведения эксперимента, высота зависания слоя над поверхностью планеты на данный момент составляла 200 м, а его толщина — около 25 м.

Несмотря на достаточно ясную природу зеркального отражения излучения от ледяных кристаллов, наблюдать данное явление в естественных атмосферных условиях приходится редко. Схема зондирования атмосферы с вертикальным лазерным лучом применяется в ИОА СО РАН регулярно, начиная с 80-х гг. XX в., но зафиксировать документально описанное явление удалось впервые. Возможно, данную ситуацию можно объяснить или имевшим место недостаточным вниманием к проблеме исследования свойств ледяных кристаллов, или тем редким проявлением условий, когда образуется на относительно небольшой высоте достаточно мощный стабильный аэрозольный слой с горизонтальной ориентацией кристаллов. Но есть также ограничения, которые накладывают существующие методы зондирования на условия наблюдения описанного явления.

Лидарный луч, как правило, хорошо коллимирован с относительно небольшим поперечным сечением и занимает в пространстве существенно меньший объем, чем прожекторный луч, а значит, на своем пути встречает значительно меньшее число ледяных частиц. Кроме того, длительность лидарного импульса, составляющая сотые доли микросекунд, сокращает и время облучения (экспозицию), и размеры освещенного объема с отражающими частицами. Следует учесть и такой факт, что при зеркальном отражении излучение отклоняется в сторону под двойным углом по отношению к нормали ледяной частицы и, чтобы был зарегистрирован отраженный сигнал, его линейное смещение на

уровне приемной апертуры лидара не должно превышать его диаметра. Таким образом, при высоте слоя  $H$  и диаметре апертуры  $D$  предельный угол отражения  $\alpha_{\max}$ , при котором отраженное излучение будет зарегистрировано, составит  $\alpha_{\max} = D/H$ . Это означает, что при высоте слоя 1000 м и апертуре 1 м лидар регистрирует зеркально-отраженное излучение только от тех ледяных пластинок, флаттер которых не превышает  $0,06^\circ$ . Для высоты 200 м этот угол расширяется до  $0,3^\circ$ , что уже сопоставимо с углами флаттера, но приземная область атмосферы для лидарных систем, как правило, недоступна. Для данной лидарной системы «слепая» зона достигает 1,5 км.

Что касается визуального проявления зеркального отражения лидарного излучения, то поперечник области видимости световых бликов на поверхности земли при флаттере ледяных пластинок до  $3^\circ$  для тех же высот составляет соответственно 50 и 10 м. При этом с увеличением высоты отражающего слоя уменьшаются по обратному квадратичному закону численная плотность бликов на поверхности и их яркость. Накладываются ограничения и сезонный характер образования в атмосфере зеркально-отражающих слоев, и поверхность, на которую падает отраженное излучение. Если принимать все это во внимание, становится понятным, почему описанное в статье явление не отмечалось ранее. Имеется и другая сторона этого явления. При определенных условиях с некоторой вероятностью отраженное лазерное излучение может попадать на вход приемника излучения. В этом случае излучение может оказаться опасным для глаз человека и для приемных систем.

Авторы благодарят А.Г. Борового и Б.В. Кауля за полезные обсуждения и замечания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект № 2.1.1./6939) и гранта РФФИ № 07-05-00734а «Исследование влияния метеопереноса на механизмы формирования и вертикальную

структуру аэрозольных слоев в средней и верхней атмосфере».

1. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.
2. Кауль Б.В. Влияние электрического поля на ориентацию частиц ледяных облаков // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 10. С. 835–840.
3. Хрзуан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1978. В 2 т.
4. Sassen K. Remote sensing of planar ice crystal fall attitudes // J. Meteorol. Soc. Japan. 1980. V. 58. N 5. P. 422–429.
5. Nikiforova N.K., Pavlova L.N., Petrushin A.G., Snykov V.P., Volkovitsky O.A. Aerodynamic and optical properties of ice crystals // J. Aerosol. Sci. 1977. V. 8. Iss. 4. P. 243–250.
6. Platt C.M.R. Lidar backscattering from horizontal ice crystal plates // J. Appl. Meteorol. 1978. V. 17. N 4. P. 482–488.
7. Галилейский В.П., Гришин А.И., Морозов А.М., Ошляков В.К. Зеркальное отражение от атмосферных несферических частиц // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 9. С. 1301–1305.
8. 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.
9. Галилейский В.П., Боровой А.Г., Матвиенко Г.Г., Морозов А.М. Зеркально отраженная компонента при рассеянии света на ледяных кристаллах с преимущественной ориентацией // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 9. С. 773–778.
10. 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. Iss. 11. P. 7625–7633.
11. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков  $Ci$ : Часть 1. Ориентация при падении // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 953–967.
12. Одицов С.Л., Федоров В.А. Исследование вариаций скорости ветра мезометеорологического масштаба по содарным наблюдениям // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. N 11. С. 980–985.

*V.N. Marichev, V.P. Galileyskii, D.O. Kuz'menkov, A.M. Morozov. Experimental observation of mirror reflection of laser radiation from the oriented crystal particles concentrated in the atmospheric layer.*

The results of experimental observation of the phenomenon of mirror reflexion from a horizontal oriented flat crystal particles, localised in atmosphere, under acting of pulse laser radiation are presented. Possible reasons are discussed, why at lidar sounding the phenomenon of mirror reflexion from the horizontal oriented atmospheric ice particles is seldom marked.

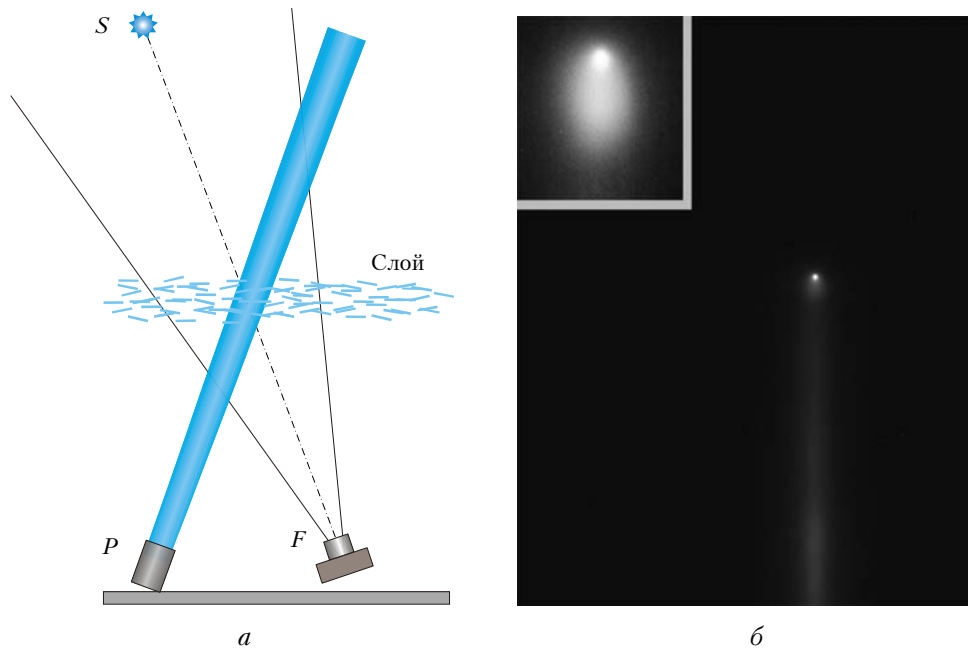


Рис. 1. Схема эксперимента с прожектором (*а*) и фотография мнимого изображения источника излучения (*б*) – яркое пятно в центре области диффузного рассеяния излучения на слое ориентированных кристаллов атмосферного льда

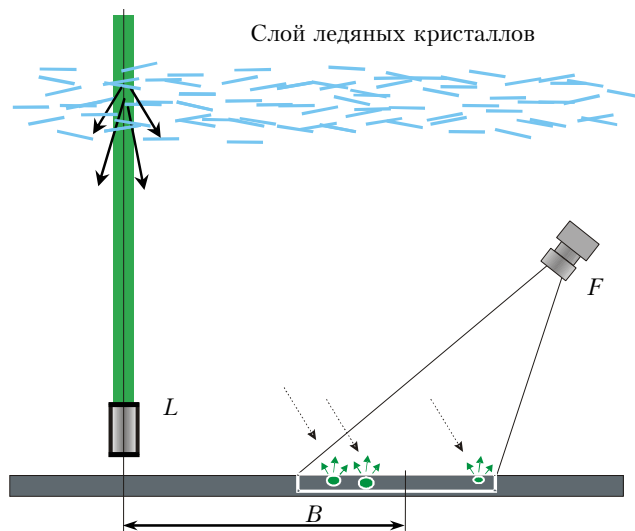


Рис. 2. Схема эксперимента с лазерным лучом: *L* – лидар; *F* – фотокамера; *B* – база между лидаром и контрольной площадкой

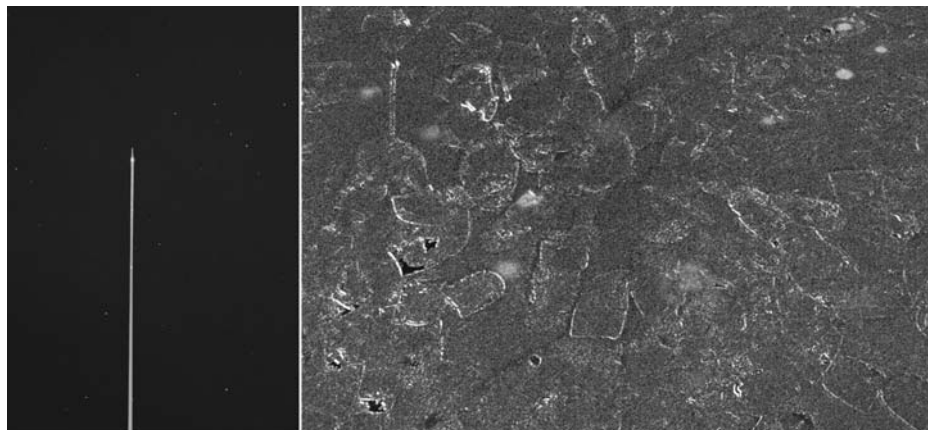


Рис. 3. Изображения лазерного луча (*а*) и «зеленых зайчиков» на контрольной площадке (*б*) во время эксперимента 20 декабря 2008 г.