

УДК 525.521

Экспериментальное исследование отражения светового излучения от кристаллических частиц в нижней тропосфере

В.П. Галилейский, А.И. Гришин, А.И. Елизаров, А.В. Крючков[✉],
Г.Г. Матвиенко, А.М. Морозов*

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

Поступила в редакцию 7.06.2022 г.;
после доработки 26.07.2022 г.;
принята к печати 24.09.2022 г.

Рассмотрено явление отражения светового излучения от ориентированных в атмосфере кристаллических частиц, а также физические закономерности и возможные условия, способствующие его возникновению. По данным экспериментальных наблюдений проведен анализ зарегистрированных световых пятен, возникающих при отражении излучения от слоев таких частиц. Описан вариант регистрации зеркальных слоев с помощью панорамно-оптической станции (система AllSky).

Ключевые слова: зеркальное отражение, кристаллические частицы, интерференция, дифракция, волновая оптика; specular reflection, crystalline particles, interference, diffraction, wave optics.

Введение

Земная атмосфера содержит большое количество воды в трех фазовых состояниях: пар, жидкость и лед. В каждом конкретном объеме атмосферного пространства фазовое состояние воды определяется температурой, влажностью и атмосферным давлением. Эти параметры зависят от высоты, широты места, сезона года, а также от времени в связи с конвективным и глобальным переносами воздушных масс. Вследствие этих процессов в атмосфере происходят непрерывные взаимные переходы воды из одного фазового состояния в другое.

Морфологические особенности фазовых состояний воды оказывают существенное влияние на характер распространения оптического излучения в атмосфере. При температуре от 0 °С и ниже вода из парообразной и жидкой фаз переходит в твердое состояние — лед. В отличие от жидкой воды (туман, капли дождя) образующиеся ледяные частицы могут иметь существенно большее разнообразие форм: от крупных смерзшихся ядер или снежных хлопьев до почти геометрически идеальных ледяных кристаллов в форме призм, гексагональных пластинок [1]. На образование ледяных частиц большое влияние оказывают температура и влажность среды. При сла-

бых отрицательных температурах (0...–4 °С) в большом диапазоне давления водяного пара при замерзании воды преобладают пластинки. Ориентация кристаллических частиц льда плоскими гранями в горизонтальном направлении может способствовать образованию атмосферного зеркала и других явлений. При зондировании атмосферы отражение света от горизонтально ориентированных кристаллов впервые наблюдалось Платтом [2].

Характер движения кристаллических частиц в земной атмосфере определяют два наиболее значимых механизма: гравитационное воздействие планеты и обтекание частиц атмосферным воздухом [3]. 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. Обтекание частиц атмосферным воздухом может быть ламинарным и турбулентным. Однако в области температурных инверсий турбулентность всегда существенно ослаблена. В этом случае несферические частицы начинают ориентироваться своим наибольшим аэродинамическим размером перпендикулярно направлению движения. Пространственная ориентация кристаллических частиц неизбежно приводит к анизотропии физических свойств атмосферы, в которой располагаются эти кристаллы.

На практике зеркальное отражение просто и надежно может быть зарегистрировано наблюдателем,

* Виктор Петрович Галилейский (gvp@iao.ru); Анатолий Иванович Гришин (aig@iao.ru); Алексей Игоревич Елизаров (alex@iao.ru); Александр Владимирович Крючков (kaw@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко; Александр Михайлович Морозов (mgoroz@iao.ru).

если он будет находиться в одной плоскости с падающим на слой и отраженным от него оптическим излучением, с учетом закона равенства углов падения и отражения [4]. Временная устойчивость зеркального отражения будет зависеть от устойчивости пространственной ориентации ансамбля ледяных кристаллов. В этом случае должно наблюдаться мнимое изображение источника света на фоне диффузного рассеяния от молекул и аэрозоля. Разнообразие форм ледяных кристаллов, вариации их концентрации в освещаемом объеме и ориентации, наличие частиц, не обладающих выраженными зеркальными свойствами, обуславливают вариации отражательных свойств такого слоя. Несмотря на достаточно тривиальную природу зеркального отражения излучения от ледяных кристаллов наблюдается данное явление в естественных атмосферных условиях редко.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных наблюдений, полученные при лидарном зондировании, а также при исследовании атмосферы с помощью сверхширокоугольной камеры AllSky. Сочетание активного (лидарное зондирование) и пассивного (камера AllSky) методов позволяет изучить механизм зеркального отражения от ледяных кристаллов с разных точек зрения. Если камера AllSky позволяет просто зафиксировать наличие отражающего слоя и проследить его временную динамику (хотя бы на уровне «есть/нет»), то при активном зондировании можно определить высоту, толщину и конфигурацию (размеры) слоя зеркального отражения.

Отражение лазерного излучения от кристаллов льда в атмосфере

Среди известных методов дистанционного контроля ближнего околоземного пространства (включая воздушное) наиболее перспективными являются методы, основанные на результатах взаимодействия лазерного излучения с веществом. В Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН на протяжении многих лет ведется разработка методов и средств мониторинга и контроля атмосферного пространства. Они позволяют оперативно получать наиболее полную информацию об объекте в наблюдаемом пространстве, обеспечивают высокое пространственное разрешение и могут дать информацию о спектральном распределении размеров частиц.

При распространении оптического излучения в атмосфере, содержащей ледяные кристаллы, наблюдается множество оптических явлений, зависящих, прежде всего, от параметров слоя атмосферы, через который проходит оптическое излучение. Наблюдаемые оптические эффекты часто носят нетривиальный характер и несут в себе глубокий физический смысл. Особенно большое количество наблюдаемых невооруженным глазом явлений сопровождается экспериментами по лазерному зондированию атмосферы. Например, в работе [4] описывается явление отражения лазерного излучения («световых зайчиков») от ледяных пластинок при зондировании

атмосферы в зимнее время (рис. 1, цв. вкладка). Условия проведения эксперимента и основные технические характеристики используемой лидарной системы приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики приземного слоя атмосферы во время зондирования

Характеристика	Значение
Температура воздуха у поверхности	-18 °С
Относительная влажность воздуха	65%
Направление ветра	230° (З-ЮЗ)
Скорость ветра	1-3 м/с
Высота слоя повышенного рассеяния над землей	160 м
Толщина слоя повышенного рассеяния	15 м

Таблица 2

Технические характеристики лидарной системы

Характеристика	Значение
Длина волны	$0,53 \cdot 10^{-6}$ м
Диаметр источника излучения	0,1 м
Угловая расходимость лазерного излучения	100 мкрад
Длительность лазерного импульса	10 нс
Тип фотоприемника	ФЭУ-84
Фиксация «световых зайчиков» на земной поверхности	визуальная и с помощью фотокамеры

По результатам анализа лидарных данных были определены характеристики слоя повышенного рассеяния (зеркального). Его высота составила 160 м над земной поверхностью, а толщина — 15 м. Как видно из рис. 2, отраженные от ледяных кристаллов и попавшие на земную поверхность световые следы имеют разную форму и интенсивность. Анализ изображений следов позволяет разделить их на три типа:

- 1) пятно, имеющее форму окружности диаметром 5–7 см, однородно освещенное по всей поверхности (рис. 2, а);
- 2) такое же пятно (см. п. 1), но окруженное концентрическим кольцом диаметром 15–20 см, которое расположено симметрично центральному пятну (рис. 2, б);
- 3) такое же кольцо (см. п. 2), но без центрального пятна (рис. 2, в).

Для дальнейшего анализа закономерностей формирования световых пятен сделаем несколько замечаний.

1. Эффекты будем рассматривать исключительно в рамках волновой теории света.
2. Возможно перенесение эффектов, наблюдаемых *in vitro* (например, наблюдение колец Ньютона в отраженном свете в лаборатории), в условия *in situ* (т.е. в натурные условия).
3. Все изображения «световых пятен» на земной поверхности были получены вблизи лидара при нормальном падении (или близких к нормальному с отклонением от вертикали не более 0,005 рад) светового луча на элементы отражающего слоя,

поэтому ход лучей в отражающем слое рассматривается только для случая нормального падения света на отражающие поверхности.

4. Можно предположить, что фигуры всех типов создаются одиночными рассеивателями правильной формы (ледяными пластинками). В этом случае можно считать, что мы имеем дело с точечными источниками излучения, так как отражающие элементы имеют характерный поперечный размер $\sim 0,1-0,5$ мм, что много меньше расстояния от слоя отражения до земной поверхности (сотни метров).

Отражение 1-го типа. В этом случае световые следы имеют вид светового пятна круглой формы, одинаково освещенного по всей поверхности (рис. 2, а). Этот тип светового следа можно объяснить с помощью рис. 3.

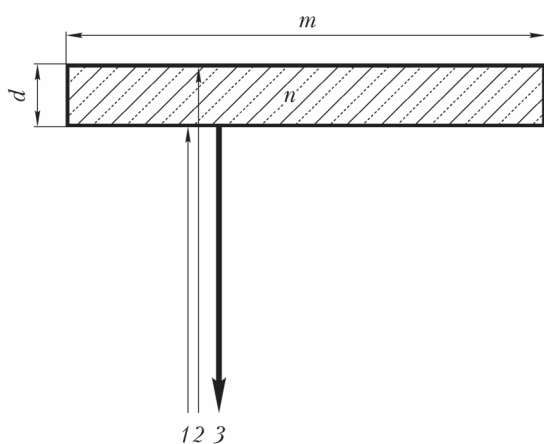


Рис. 3. Схема отражения от плоской ледяной пластинки: d — толщина ледяной плоскопараллельной пластинки; n — показатель ее преломления; m — поперечный размер пластинки; 1 и 2 — лучи лазера, падающие на нижнюю и верхнюю грани соответственно; 3 — результирующий отраженный луч

Обратим внимание, что на рис. 3 $d \ll m$. Также следует учесть, что d в реальных условиях имеет размер порядка длины световой волны. Для выполнения условия максимума разницы оптического хода лучей 1 и 2 для $\Delta d = dn$ должно выполняться равенство

$$\Delta d_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ — целое положительное число; λ — длина волны лазерного излучения, $\lambda = 0,53 \cdot 10^{-6} m$. Иными словами, на расстоянии, равном разности оптических путей лучей 1 и 2 , должно укладываться четное число полуволин падающего излучения.

Другое необходимое условие наблюдения интерференционной картины — когерентность падающих лучей 1 и 2 . Это условие также выполняется, так как толщина ледяных отражающих пластинок лежит в диапазоне $10^{-6}-10^{-5}$ м, что заведомо меньше величины временной пространственной когерентности даже для многомодового лазера.

Другим объяснением появления светового следа 1-го типа может быть наклон верхней грани пла-

стинки относительно нижней, при этом лучи 1 и 2 не интерferируют друг с другом, так как распространяются по разным оптическим путям. В этом случае интенсивность отраженного только от нижней грани излучения и, следовательно, яркость световых следов на поверхности существенно меньше, так как нет усиления интенсивности световой волны за счет сложения амплитуд.

Отражение 2-го типа. В основе одной из гипотез, объясняющих образование световых колец на поверхности земли, лежит дифракционная теория, т.е. причиной образования кольцеобразной структуры является дифракция Фраунгофера на апертуре источника излучения. При этом дифракционный угол [5]:

$$\varphi_d = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

где D — диаметр апертуры лазерного излучателя. Так как $D = 0,1$ м, то $\varphi_d = 6,5 \cdot 10^{-6}$ рад. Для условий эксперимента на высоте 320 м от земной поверхности с учетом эффекта отражения радиус первого дифракционного максимума будет составлять $\sim 2,1 \cdot 10^{-3}$ мм, что не соответствует наблюдаемой в эксперименте картине, так как диаметр колец на земной поверхности равен 15–20 см.

Для объяснения появления световых следов 2-го типа в рамках волновой теории возможно привлечение гипотезы о существовании ледяных пластинок, обладающих линзовидной структурой. Это значит, что одна из граней ледяной пластинки (или даже обе!) имеет вогнутую форму (рис. 4). Возможность появления ледяных пластинок с подобной геометрией подробно рассмотрена в [6]. В этой работе также описывается возможный механизм образования ледяных пластинок с вогнутой поверхностью.

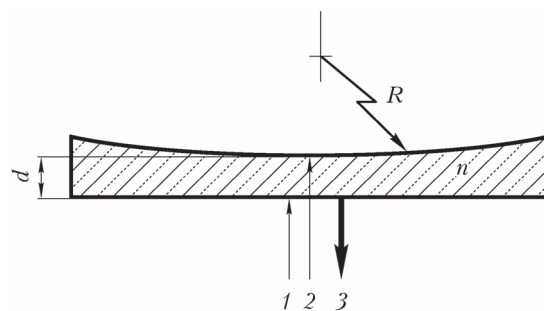


Рис. 4. Схема отражения от ледяной пластины, имеющей форму линзы. Обозначения те же, что и на рис. 3; R — радиус кривизны для верхней поверхности пластинки

Будем учитывать, что $d \sim \lambda$. В этом случае для оптической разности хода Δd условие максимума (светового пятна в центре) определяется формулой (1), а условие минимума (области между центральным пятном и кольцом)

$$\Delta d_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, условие минимума — это наличие нечетного числа полуволин на оптической разности хода между интерферирующими лучами.

Образование кольца вокруг светового пятна происходит, если выполняется условие максимума, но интерферируют лучи, находящиеся на некотором расстоянии от центра линзы. Это расстояние определяется набегом Δd для лучей 1 и 2 при смещении этих лучей от центра на периферию, пока на Δd не будет размещаться четное число полуволн. В результате на поверхности экрана (в данном случае земной поверхности) наблюдается световое кольцо.

Важно отметить, что наблюдаемые интерференционные образы не являются локализованными в пространстве, т.е. наблюдаемыми только в определенной точке. Радиус кольца r_k на земной поверхности можно рассчитать по формуле

$$r_k = G \left(\frac{(2\mu - 1)R\lambda}{2n} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где G — коэффициент увеличения, зависящий от геометрии эксперимента и равный отношению размера кольцевой структуры, наблюдаемой на земной поверхности, к размеру кольца вблизи элемента отражения; μ — номер кольца; R — радиус кривизны отражающего элемента (кристалла льда); n — показатель преломления отражающего элемента.

В итоге световые кольца вокруг светового пятна в центре — это проекции интерференционной картины (кольца Ньютона) на земную поверхность, увеличенные вследствие конечной расходимости лазерного излучения.

Величину G можно рассчитать, используя рис. 5, по выражению

$$\frac{H + dH}{dH} = \frac{L}{x} = G, \quad (5)$$

где x — размер изображения кольца вблизи отражающей пластинки; L — размер изображения кольца на земной поверхности.

Отсутствие колец более высокого порядка, для которых $k > 1$, можно объяснить малыми размерами отражающих ледяных пластинок. Действительно,

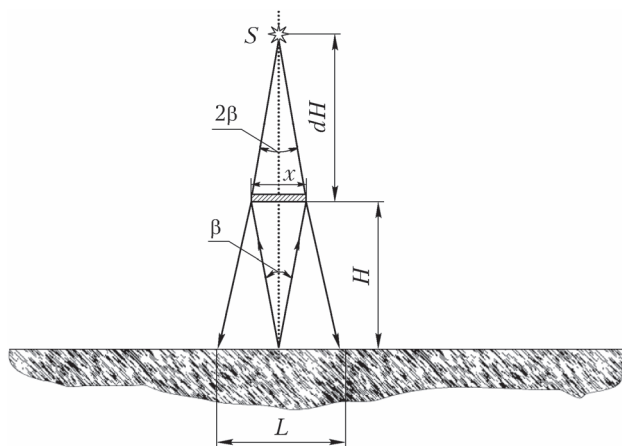


Рис. 5. Геометрия отражения от пластинки льда: β — расходимость источника излучения; S — мнимое изображение источника излучения; H — расстояние от земной поверхности до отражающего элемента; dH — расстояние от отражающего слоя до мнимого источника излучения

радиус первого кольца при $R = 1$ м, $n = 1,31$, вычисленный по формуле (4), без учета коэффициента увеличения равен приблизительно 0,5 мм, что близко к предельному размеру ледяных пластинок, находящихся в атмосфере во взвешенном состоянии и парящих в воздухе. Для появления колец более высокого порядка необходимы более крупные частицы. Однако следует учесть, что масса частиц пропорциональна размеру в третьей степени, поэтому более крупные пластинки быстро седиментируют на поверхность земли и таким образом не участвуют в образовании световых пятен.

Отражение 3-го типа. В этом случае наблюдается кольцо без центрального пятна. Этот тип отражения полностью укладывается в картину отражения 2-го типа, но для центрального пятна выполняется условие минимума (3).

Наблюдение за зеркальным отражением в атмосфере с помощью камеры AllSky

Зарегистрировать факт наличия зеркального отражения в ходе лидарного зондирования является достаточно сложной задачей. Кроме того, практически невозможно оценить протяженность зеркальных слоев. Для оценки состояния атмосферы с помощью лидара потребуется выполнить многочисленное зондирование по большому количеству направлений — азимуту и углу места. Тем не менее существует возможность обнаружения и локализации протяженных зеркальных слоев. Для этих целей можно воспользоваться высокоразрешающей широкоугольной системой для наблюдения рассеянного в атмосфере оптического излучения [7–9]. В ИОА СО РАН была разработана и успешно эксплуатируется автоматизированная программно-техническая система мониторинга состояния атмосферы AllSky [10, 11]. Эта система позволяет круглосуточно вести наблюдения и выполнять обработку данных для решения ряда задач, связанных с мониторингом оптико-физического состояния атмосферы.

На основе регулярных наблюдений [12] с помощью разработанной системы стало возможным регистрировать слои с зеркальным отражением [13]. Особенно часто это явление над г. Томском проявляется в осенне-зимний период, когда происходит максимальное образование слоев температурных инверсий, которые предположительно выступают в качестве задерживающих частицы слоев. Обработка регистрируемых изображений и соотношение характерных точек на местности позволяют оценить высоту зеркального облачного слоя. Естественно, что для ее более точного определения целесообразно проводить комплексные наблюдения с применением систем лидарного зондирования.

Для обнаружения зеркальных слоев, расположенных на небольших высотах (до 1000 м), возможно использование мощного прожектора с низкой расходимостью луча ($\sim 0,02$ рад) с одновременной регистрацией изображений системой мониторинга AllSky. При взаимодействии излучения прожектора со слоем аэрозольных частиц происходит диффузное

свечение освещенного прожектором участка аэрозольного слоя. При наличии зеркальных свойств указанного слоя возможно зарегистрировать мнимое изображение источника излучения (рис. 6, цв. вкладка).

Следует отметить, что наблюдаемые при прожекторном зондировании и представленные на рис. 6 слои зеркального отражения были подтверждены данными лидарного зондирования. Они показали, что слои зеркального отражения располагались в диапазоне высот от 98 до 365 м, что хорошо коррелирует с данными прожекторного зондирования.

Заключение

Таким образом, на основании результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. При лазерном зондировании в определенных условиях можно наблюдать отраженные от соответствующих слоев атмосферы световые следы, располагающиеся на земной поверхности вблизи источника излучения.

2. Вид и размер этих следов позволяет объяснить их появление на основе теории интерференции.

3. С помощью широкоугольной камеры AllSky (ИОА СО РАН) можно наблюдать за появлением в атмосфере зеркальных отражающих слоев, которые создают ряд нетривиальных эффектов.

4. Анализ изображений, получаемых прожектором и системой AllSky, позволяет определить высоту расположения зеркального слоя.

Список литературы

1. *Curry J.A., Webster P.J.* Thermodynamics of atmospheres and oceans // *Academ. Press.* 1999. V. 65. DOI: 10.1016/S0074-6142(99)80027-8.
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. Climatol.* 1978. V. 17, N 8. P. 1220–1224.
3. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 198 с.

4. *Маричев В.Н., Галилейский В.П., Кузьменков Д.О., Морозов А.М.* Экспериментальные наблюдения зеркального отражения лазерного излучения от ориентированных кристаллических частиц, сосредоточенных в слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 12. С. 1145–1147; *Marichev V.N., Galileyskii V.P., Kuz'menkov D.O., Morozov A.M.* Experimental observation of the mirror reflection of laser radiation from oriented particles concentrated in the atmospheric layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 23, N 2. P. 128–131.
5. *Лансберг Г.С.* Оптика. М.: Наука, 1979. 480 с.
6. *Libbricht K.* The physics of snow crystals // *Progress Phys.* 2005. DOI: 10.1088-4886/68/4/RO3 – Source OAI.
7. *Галилейский В.П., Морозов А.М.* Панорамный фотометрический комплекс // *Оптика атмосфер. и океана.* 1993. Т. 6, № 9. С. 1131–1135.
8. *Ugolnikov O.S., Maslov I.A.* Optical properties of the undisturbed mesosphere from wide-angle twilight sky polarimetry // *Cosmic Res.* 2013. V. 51, N 4. P. 235–240.
9. *Kassianov E., Long C.N., Christy J.* Cloud-base-height estimation from paired ground-based hemispherical observations // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44. P. 1221–1233.
10. *Кокарев Д.В., Галилейский В.П., Елизаров А.И., Морозов А.М.* Устройство наблюдения оптического состояния неба в пределах видимой полусферы // Патент на полезную модель № 191582 от 13.08.2019. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) (RU).
11. *Galileyskii V.P., Elizarov A.I., Kokarev D.V. et al.* Software and hardware system for monitoring and control of the optical-physical state of the atmosphere: Part 1: Panoramic optical station // *Proc. SPIE.* 2021. P. 119168K. DOI 10.1117/12.2603231.
12. *Galileyskii V.P., Elizarov A.I., Kokarev D.V. et al.* Software and hardware system for monitoring and control of the optical-physical state of the atmosphere: Part 2: Methods and algorithms for data processing // *Proc. SPIE.* 2021. P. 119168L. DOI 10.1117/12.2603233.
13. *Морозов А.М., Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В.* Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 1. С. 88–92.

V.P. Galileyskii, A.I. Grishin, A.I. Elizarov, A.V. Kruchkov, G.G. Matvienko, A.M. Morozov. Experimental study of the reflection of light radiation from crystalline particles in the lower troposphere.

The phenomenon of reflection of light radiation from crystalline particles oriented in the atmosphere, as well as the physical laws and possible conditions contributing to its occurrence, are considered. A variant of registration of mirror layers using a panoramic optical station (AllSky system) is described.

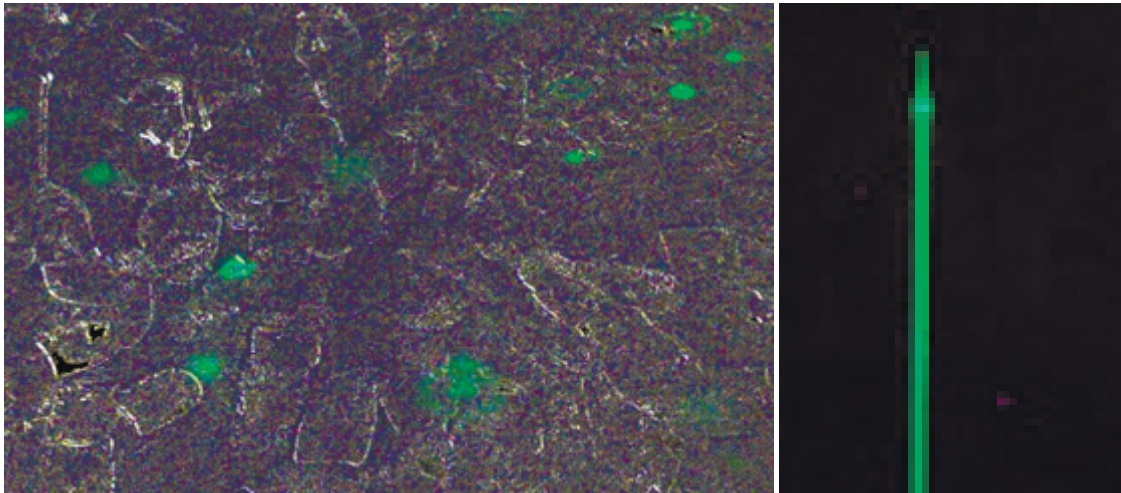


Рис. 1. Снимок световых пятен при отражении лазерного излучения от зеркального слоя кристаллических частиц (слева). Снимок распространения лазерного излучения в аэрозольной атмосфере; в верхней части виден слой повышенного рассеяния (справа)

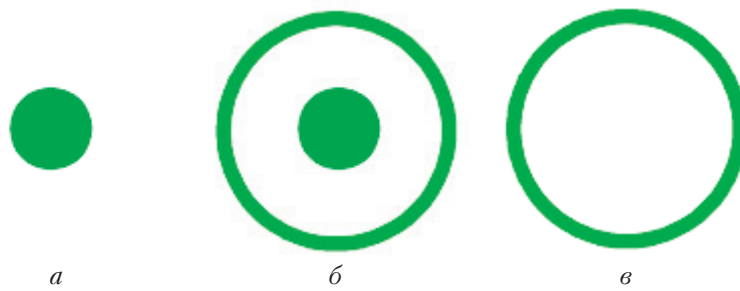


Рис. 2. Схематичное изображение формы световых пятен на земной поверхности

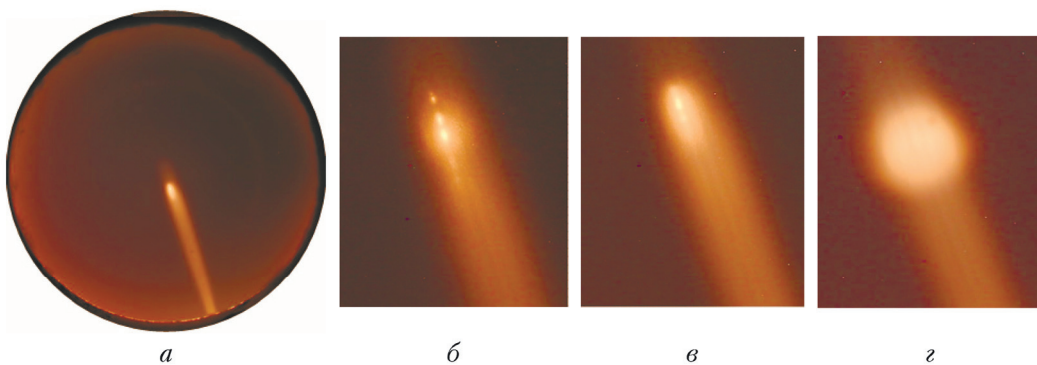


Рис. 6. Изображения зеркального отражения в случае прожекторного зондирования: *a* – пример изображения, регистрируемого системой AllSky; *б–z* – фрагменты изображений с локализованным отражением излучения от зеркального слоя