

**В.П. Галилейский, А.И. Гришин, А.М. Морозов, В.К. Ошлаков**

## **ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ ОТ АТМОСФЕРНЫХ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ**

Представлены результаты прожекторного зондирования атмосферных слоев, содержащих пространственно ориентированные частицы несферической формы. Показано, что в результате взаимодействия направленного оптического излучения с таким слоем в рассеянном излучении содержатся компоненты, подчиняющиеся закономерностям диффузного рассеяния и зеркального отражения. В зависимости от условий наблюдений интенсивность зеркальной компоненты может в несколько раз превосходить интенсивность диффузно рассеянного в этом же направлении излучения.

Рассмотрение результатов взаимодействия электромагнитного излучения с несферическими атмосферными частицами, обладающими анизотропными свойствами, представляет как научный, так и практический интерес. Особо следует выделить взаимодействие направленного оптического излучения с пространственно ориентированными атмосферными кристаллами льда, у которых отношение размеров к длине волны излучения много больше единицы. Частицы такого рода часто встречаются в земной атмосфере, их классифицируют как крупные (гигантские и сверхгигантские), они характеризуются многообразием форм и имеют высокие значения коэффициента отражения [1], по отношению к ним возможно применение, наравне с волновой теорией, законов геометрической оптики [2, 3].

Характерной особенностью земной атмосферы являются температурные инверсии, наблюдаемые в различных климатических зонах и во все времена года не только у самой поверхности Земли, но и в свободной атмосфере. В слоях атмосферы, связанных с температурными инверсиями, турбулентность и вертикальные движения существенно ослаблены или вообще отсутствуют [4]. В работе [5] подробно рассмотрены аспекты аэродинамики атмосферных несферических частиц и показано, что в широком диапазоне значений чисел Рейнольдса такие частицы могут так устойчиво ориентироваться своим наибольшим радиусом перпендикулярно набегающему потоку, что при этом обеспечивается максимальное аэродинамическое сопротивление. Ледяные кристаллы, попав в слой, связанные с температурными инверсиями и двигаясь под воздействием силы тяжести и сопротивления набегающему воздушному потоку, могут устойчиво ориентироваться в пространстве наибольшим аэродинамическим радиусом параллельно поверхности планеты, придавая атмосфере как среде распространения излучения, анизотропные свойства.

На основе вышеизложенного была сформулирована гипотеза о зеркальных свойствах слоя нетурбулентной атмосферы, содержащего множество пространственно ориентированных ледяных кристаллов. На практике зеркальное отражение от указанного слоя просто и надежно может быть зарегистрировано наблюдателем, 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. 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 степени ориентированности, наличие частиц, не обладающих выраженными зеркальными свойствами, вызовут вариации отражательных свойств такого слоя.

Для проверки выдвинутой гипотезы была разработана схема эксперимента, проведены наблюдения при наличии инверсионных слоев над пунктом наблюдений и сделаны оценки уровней яркости диффузного рассеяния и зеркального отражения. Наблюдения проводились в ночное время, в осеннезимние периоды. При оценке условий наблюдений использовались данные метеослужбы.

На рис. 1 приведена геометрическая схема эксперимента, где  $S$  – источник излучения;  $S'$  – его мнимое изображение;  $N$  – положение наблюдателя (регистратора);  $OO'$  – условная ось слоя, содержащего пространственно ориентированные несферические атмосферные частицы.

В этом эксперименте использовалась прожекторная установка, в которой в качестве излучателя применены дуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления типа ДКСШ-4000, диаметр сферического зеркала равнялся 500 мм, имелась возможность перестраивать диаграмму направленности в пределах от 1 до 30° с изменением направления зондирования в пределах 25° от вертикали и 90° по горизонтали. Спектральные характеристики лампы ДКСШ-4000 и Солнца в видимом диапазоне спектра практически совпадали. В качестве регистрирующего устройства использовалась видеокамера <НИТАСН-600>. Излучатель и регистратор располагались по бистатической схеме зондирования с переменной базой (от 1 до 100 м). С помощью видеокамеры осуществлялось сканирование полей зрения по прожекторному лучу.

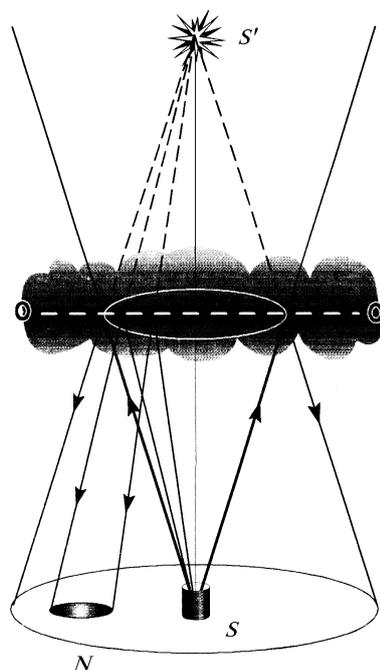


Рис. 1

В результате экспериментов, проведенных в течение двух лет в осенне-зимние периоды, регулярно отмечалось зеркальное отражение от слоев пространственно ориентированных кристаллов, связанных с температурными инверсиями как фронтального, так и приземного типа. Во время работы прожекторной установки (при направлении луча прожектора в зенит и неизменных характеристиках излучателя) обычно наблюдался светящийся конус диффузного рассеяния излучения атмосферными частицами. Но в некоторых случаях наблюдатель, удаляясь от прожектора по горизонтали на расстояние до 100 м, визуально регистрировал яркое <звездообразное> пятно в направлении зондирования. Отмечена устойчивость эффекта: яркое пятно, появившееся на определенной высоте, наблюдалось часами. На рис. 2, а приведено характерное для этой ситуации изображение, полученное с помощью камкордера, расположенного на удалении 2 м по горизонтали от прожектора. На рис. 2, б даны результаты обработки изображения, проведенной с целью выявления максимумов яркостной структуры.

На изображении выделяются две зоны повышенной яркости: в верхней части кадра – мнимое изображение источника (на рис. 2, б обозначено цифрой 1), ниже – область повышенной яркости (обозначена цифрой 2), обусловленной диффузным рассеянием на атмосферных частицах. Форма и яркость наблюдаемого пятна (1, рис. 2, б) зависели от метеорологической ситуации и изменялись от яркого, <звездообразного>, до размытого, незначительно отличающегося по яркости от диффузно рассеянного в сторону наблюдателя излучения (2, рис. 2, б). Наблюдатель, первоначально удаленный из зоны видимости эффекта, регистрировал описы-

ваемое явление либо при увеличении диаграммы направленности излучения, либо при изменении зенитного угла и азимута зондирования в его сторону. По мере наклона прожектора в сторону наблюдателя, последний отмечал изменения в яркости луча, обусловленные индикатрисой рассеяния и геометрией сечения луча с атмосферными слоями. При определенном наклоне прожектора наблюдатель отмечал на некотором угловом удалении вверх от аномально рассеивающего слоя (т.е. не на оси луча) резкое увеличение яркости. Яркость «пятна» при этом увеличивалась по мере уменьшения ширины диаграммы направленности излучения и достигала своего максимума при минимальной расходимости луча. Ниже приведены отношения уровней яркостей, обусловленных зеркальным отражением и диффузным рассеянием, полученных по результатам наблюдений эффекта зеркального отражения с расстояний 2 м и, при изменении направления излучения, 60 м от оси прожектора. Яркости мнимого изображения источника света приведены к одному уровню (255) в шкале условных единиц (0...255).

Удаление наблюдателя от источника света (база наблюдений), м	2	60
Яркость мнимого изображения (относительные единицы), $B_*$ ,	255	255
Яркость диффузного рассеяния в инверсионном слое (относительные единицы), $B_d$	240	12
Отношение яркостей $B_*/B_d$	1,06	21(!)



Рис. 2, а

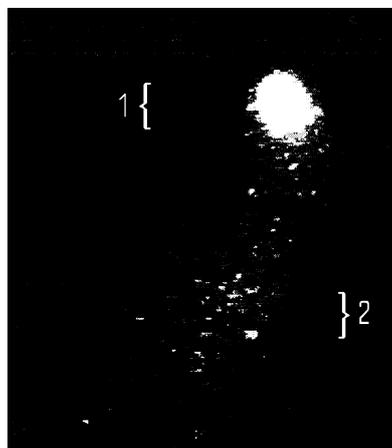


Рис. 2, б

Анализ вышеприведенных данных показывает, что в обоих случаях яркость мнимого изображения источника света превосходила яркость диффузного рассеяния. Во втором случае (при базе наблюдений 60 м) яркость мнимого изображения многократно превосходила яркость диффузного рассеяния, это наглядно демонстрирует значимость зеркального отражения при взаимодействии оптического излучения с атмосферой, содержащей пространственно ориентированные ледяные кристаллы. В наблюдаемых случаях, при приземном типе температурной инверсии и вертикальном направлении зондирования, наблюдатель оставался в конусе отраженного излучения до удалений не более 30 м, а при фронтальном типе инверсий это удаление было не менее 100 м, что дало возможность оценить высоту слоев – не более 800 и 3000 м соответственно. Нередко вместо одного яркого пятна наблюдались несколько пятен разной яркости, расположенных на одной прямой и иногда соединенных относительно яркой перемычкой. Возможно, это связано с наличием в отражающем слое нескольких подслоев, содержащих пространственно ориентированные ледяные кристаллы различных форм и размеров. На рис. 3 приведены изображение и схема, предположительно объясняющая наблюдаемое явление.

Неучет зеркального отражения оптического излучения от ансамбля пространственно ориентированных атмосферных частиц несферической формы (ледяных кристаллов) может исказить модельные представления, существенно затруднить интерпретацию получаемых результатов и привести к неверному трактованию некоторых наблюдаемых в атмосфере явлений (появление НЛЮ и т.д.). В частности, при наклонном оптическом зондировании часть излучения может быть просто отведена в сторону от направления зондирования и в этом случае не

удастся корректно учесть уровень энергии, доставленной до зондируемого объема, расположенного выше инверсионного слоя, а при вертикальном – отраженная в сторону приемника часть излучения может явиться причиной световой перегрузки фотоприемника, т.к. появление в диффузно рассеянном излучении зеркальной компоненты проявляется как резкое увеличение амплитуды оптического сигнала. Кроме того, учет зеркальной компоненты необходим при расчете радиационного баланса системы <земля-атмосфера>.

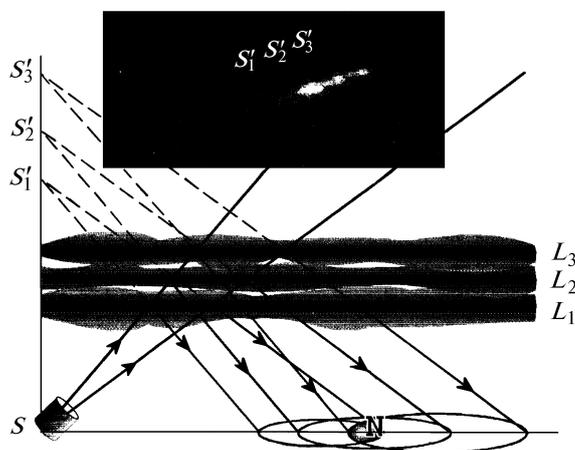


Рис. 3. Фрагмент видеокadra (удаление 100 м от прожектора) и схема образования сложных отражений при наклонном зондировании:  $S$  – прожектор,  $N$  – наблюдатель,  $S'_1, S'_2, S'_3$  – мнимые изображения прожектора на отражающих слоях  $L_1, L_2, L_3$

1. Облака и облачная атмосфера. Справочник. / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 648 с.
2. Петрушин А.Г., Свиркунов П.Н. // Мат-лы Всесоюзного совещания по распространению оптического излучения в дисперсной среде. М.: Гидрометеиздат, 1978. С. 47–50.
3. Hodgkinson J.R. Light scattering and extinction by irregular particles larger than wavelength. // Electromagnetic scattering. Ed. Kerker M., Pergamon Press, 1963. P. 87–100.
4. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Т. 1 и 2.
5. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 198 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
8 июня 1994 г.

V.P. Galileiskii, A.I. Grishin, A.M. Morozov, V.K. Oshlakov. **Specular Reflexion from Atmospheric nonspherical particles.**

Results of floodlight sounding of atmospheric layers containing spatially oriented particles of nonspherical form are presented. An interaction of oriented optical radiation with such a layer is shown to cause an arising of components in the scattered radiation yielding to regularities of diffuse scattering and specular reflexion. Depending on observation conditions, the reflexion component intensity may be several times higher the intensity of the radiation scattered diffusively in the same direction.