

Кандидат физико-математических наук Анатолий НЕВЗОРОВ.

*Глория по-русски значит
слава,
Это вы запомните легко.*

Б. Слуцкий

Самолёт, освещённый солнцем, летит высоко в небе, а его тень скользит по облакам. Внимательный пассажир, взглянув в иллюминатор, заметит, что тень окружена радужным кольцом. Это кольцо — оптическое природное явление, называемое глорией (лат. *gloria* — действительно и слава и украшение; ореол). Наблюдается глория на облаках, расположенных перед наблюдателем или ниже него, в точке, прямо противоположной источнику света. На земле её можно увидеть только высоко в горах в виде сияющего многоцветного нимба вокруг головы вели-

кана — тени наблюдателя на пелене тумана. Такие «брокенские призраки» впервые были замечены в облаках на горе Брокен в Германии, где их принимали за всяческую «нечисть», которая, по старинным преданиям, там собиралась. Сегодня же наблюдение глории с самолёта и даже из космоса — довольно заурядное событие. Однако это явление продолжает оставаться загадочным и малопонятным даже для серьёзных исследователей, поскольку находится в разительном противоречии с известными законами физики воды, облаков и физической оптики.

В то время как видимый размер тени на облаке сильно меняется в зависимости от расстояния до него, угловой размер глории постоя-

нен. По нашим измерениям он колеблется между 1,5 и 3,8° соответственно для среднего и самого яркого, жёлтого пояса глории. Иногда кольцо глории дополняет одно, реже несколько более слабых внешних колец, едва видимых на снимках (рис. 1).

Механизм формирования глории как оптического явления иллюстрирует рис. 2. Глория возникает, когда свет, рассеивающийся в обратном (в сторону источника) направлении, отражается от частиц преимущественно вдоль образующей конуса с телесным углом 2ϕ при вершине. В глаз наблюдателя или в объектив фотокамеры такие лучи приходят от мириадов частиц, поэтому из общего фона рассеянного света выделяется кольцевое изображение повышенной яркости с угловым радиусом ϕ . Таким образом, вопрос о природе глории упирается в физику образования соответствующего пика интенсивности на диаграмме рассеяния облачной среды.

По утверждению учёных-оптиков, глория может формироваться только на сферических частицах, то есть на каплях воды. В то же время по данным, включающим наблюдения автора, глория практически всегда появляется и устойчиво сохраняется на освещённых солнцем облаках с отрицательными температурами. И это несмотря на то, что, согласно концепции, господствующей в науке о



Рис. 1. Глория вокруг тени самолёта на облаке. Центр кольца глории соответствует местоположению фотоаппарата на борту самолёта. Фото Алексея Королёва.

ЧТО СКРЫВАЕТСЯ ЗА НЕЮ?

физике облаков и отражённой во многих научных статьях, учебниках и монографиях, в таких холодных облаках переохлаждённая жидкокапельная вода если и присутствует, то только временно, как исключение, поскольку быстро замерзает и конденсируется на частицах льда. Считается, что в устойчивом состоянии холодное облако содержит только ледяные кристаллики.

Итак, «капельная» версия терпит фиаско в холодных облаках. Но, может быть, как считают некоторые исследователи, gloria зарождается и в тёплых (с $T > 0^\circ\text{C}$), то есть звездо капельных облаках?

В части формирования пика рассеяния издавна популярна версия дифракции света на каплях воды при его обратном рассеянии. Правда, признанный классик теории рассеяния света голландский физик Ван де Хюлст ещё в 1957 году опроверг возможность дифракционного механизма на том основании, что необходимый для этого направленный световой поток не может идти изнутри облака. Тем не менее вплоть до настоящего времени при описании явления глории обычно ссылаются на эффект дифракции. Сам Ван де Хюлст так и не нашёл убедительного физического объяснения природы глории, а его гипотезы не перешли в разряд строгой теории.

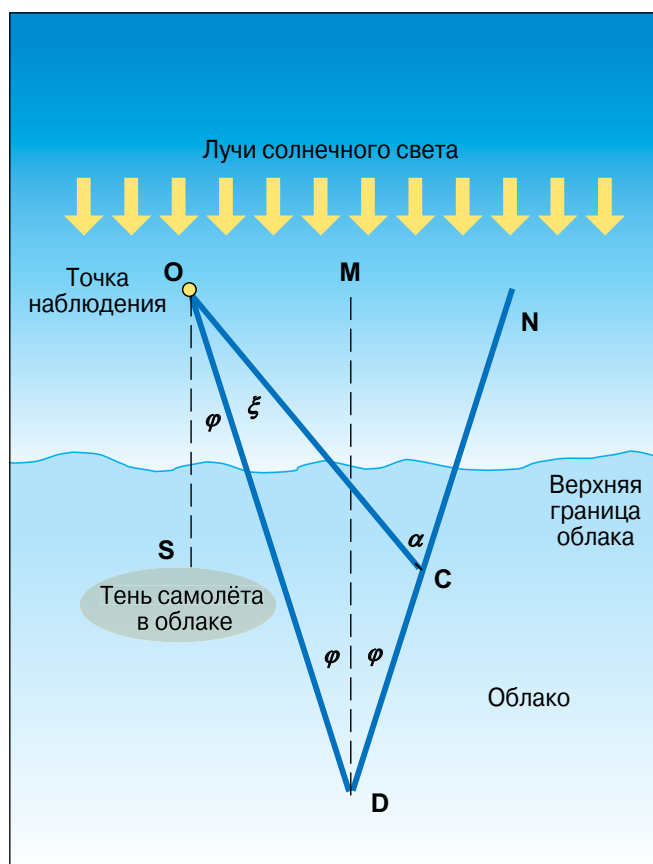
Рис. 2. Двухмерная радиальная схема формирования изображения глории. OS и MD — лучи солнечного света; DO и DN — направленные лучи, испускаемые каплями из такой точки D, что луч DO попадает в глаз наблюдателя; CO — направленный луч, рассеянный ледяными кристаллами из луча DN, создающий дополнительные кольца глории.

Новые возможности в изучении рассеяния света сферическими частицами появились сравнительно недавно в связи с компьютерным моделированием сложнейших расчётов по строгой волновой теории рассеяния Ми (Mie), опубликованной ещё в 1908 году. Мы обратились к его теории, воспользовавшись добротной расчётной программой, разработанной и предоставленной А. Г. Петрушиным.

Расчёты по формулам Ми диаграмм рассеяния для капель с показателем преломления $n = 1,33$ только подтвердили установленный другими авторами факт появления пиков интенсивности в об-

ласти углов, характерных для глории. К сожалению, отчётливые пики обнаруживаются лишь для узкого диапазона диаметров капель — по нашим расчётам, от -10 до -16 мкм (рис. 3). На графике видно, что последовательность цветов на расчётной модели напоминает картину природной глории. Однако на этом их сходство заканчивается, и в остальных свойствах обнаруживаются существенные несовпадения, которые, впрочем, не мешают некоторым авторам отождествлять данную расчётную модель с природной глорией.

Решающий аргумент против такого отождествления вытекает из наложенного



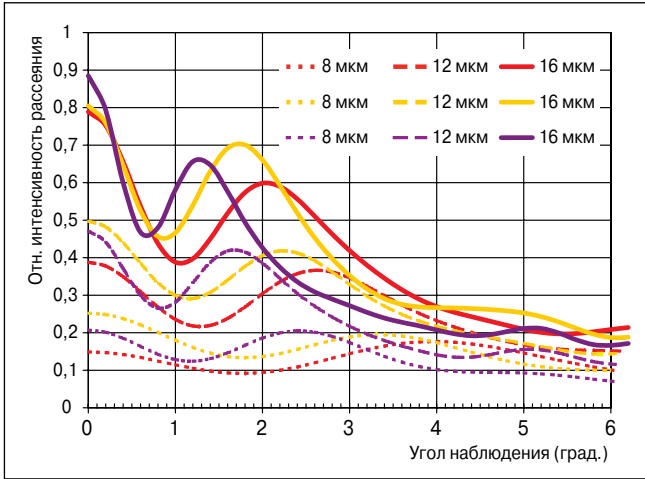


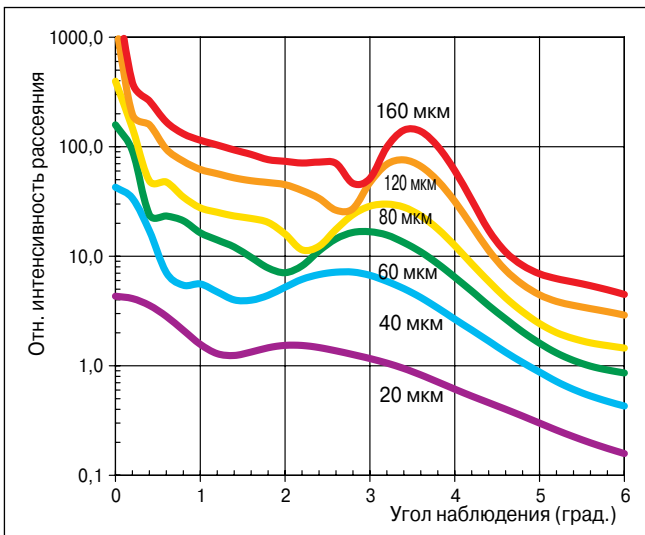
Рис. 3. Угловые функции обратного рассеяния красного, жёлтого и фиолетового света (соответственно цвету кривых) каплями воды. На графике справа указаны диаметры капель.

на модель условия, что облако состоит из капель одинаковых и узко ограниченных размеров. Но многочисленные измерения масс капель и пробы показывают, что в любом облаке, будь оно тёплое или холодное, их размеры имеют разброс, совершенно неприемлемый для работы модели. Слияние же изображений от капель разных размеров рисует картину, отличную от природной глории. И действительно, тень самолёта на вершинах тёплых облаков бывает окружена не радужным кольцом, а в лучшем случае сплошным белым ореолом. Таким об-

разом, расчётная модель для $n = 1,33$ описывает явление, отличающееся от глории и по свойствам, и, очевидно, по принципу формирования.

Всё вышесказанное приводит к парадоксальному выводу, что разгадку природы глории следует искать в наименее подходящих для этого холодных облаках. И для такого утверждения есть убедительное основание.

А именно, ещё в конце 1980-х годов с помощью уникальной самолётной аппаратуры мы обнаружили, что в облаках, которые содержат ледяные кристаллы и составляют



подавляющую часть холодных облаков, на самом деле практически постоянно присутствуют также жидкие капли необычно крупных размеров — в десятки и сотни микрометров. Анализ полученных данных с учётом известных положений физической химии привёл к выводу, что они состоят из воды в особом (полиморфном) состоянии, отличном от обычной жидкой H_2O . Эта аморфная, или \dot{A} -вода, служит оптимальной промежуточной фазой в конденсационном образовании льда, но склонна и к самостоятельному существованию при $T < 0^\circ C$. В отличие от обычной воды она находится в термодинамическом равновесии со льдом, чем и обусловлены аномально большие размеры капель и их устойчивое сосуществование с ледяными кристаллами. Показатель преломления \dot{A} -воды оценён пределами 1,8—1,9, что соответствует её плотности 2,1—2,2 г·см⁻³.

Имеют ли отношение к глории капли столь необычной воды? Наши расчёты по Ми показали, что при диаметре сферической частицы более десятков микрометров, на диаграмме рассеяния появляются заметные групповые или одиночные пики. Их амплитуды возрастают с увеличением размера частицы, а угол ϕ (см. рис. 2) максимального пика, несколько зависящий от размера частицы, сужается с увеличением показателя преломления от 1,3 до 1,9. При $n = 1,33$ рас-

Рис. 4. Индикатрисы рассеяния, рассчитанные по формулам Ми для разных диаметров частиц с $n = 1,81$.

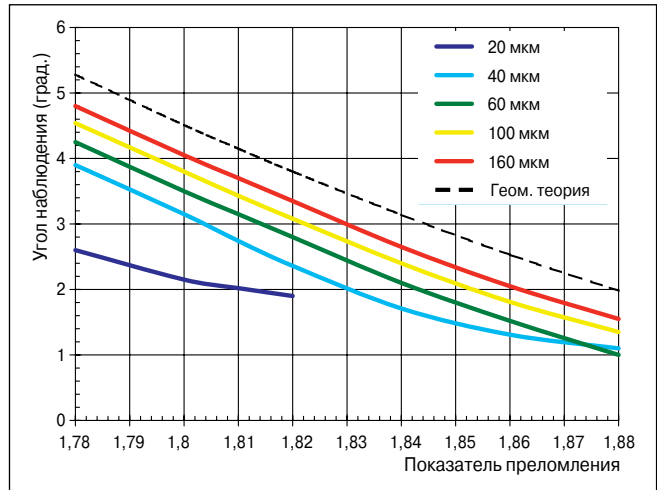
Рис. 5. Зависимость углового размера радуги первого порядка от показателя преломления n , полученная из теории Ми для сфер различных диаметров и рассчитанная по геометрической теории (верхняя кривая).

чётный угол самого высоко-го пика составляет около $40\text{--}42^\circ$, что соответствует дождевой радуге и заодно подтверждает достоверность расчётов. Типичную же для глории область углов между $1,5$ и $3,8^\circ$ занимают пики рассеяния частицами крупнее 20 мкм, имеющими показатель преломления чуть более $1,8$ (рис. 4). Но мы уже установили, что подобными свойствами обладают капли А-воды — постоянный атрибут льдосодержащих холодных облаков. Вот почему настоящая глория образуется именно в таких и только в таких облаках.

Возникает мысль, что глория формируется по тому же физическому принципу, что и дождевая радуга, то есть сама оказалась радугой в физическом понимании.

Радуга появляется при рассеянии сферической частицей световых лучей, испытавших внутреннее отражение от её поверхности и выходящих наружу под определёнными углами. Наиболее яркой всегда бывает радуга первого порядка, образованная одним отражением и всегда направленная в сторону Солнца. Радуги более высоких порядков быстро ослабевают с увеличением числа внутренних отражений, направлены в разные стороны и далеко не всегда доступны наблюдению. Существует теория расчёта углов радуг, основанная на законах геометрической оптики и не учитывающая размеров частиц, с которыми связаны волновые эффекты.

На рис. 5 приведены графики зависимости угло-



го распределения вершин пиков от показателя преломления, рассчитанные по теории Ми для капель различных размеров и по «геометрической» теории. Видно, что при дальнейшем возрастании размеров капель теория Ми переходит в «геометрическую». Это окончательно убеждает в том, что глория представляет собой «маленькую радугу», порождённую рассеянием прямого солнечного света каплями А-воды. На основании графиков значение её показателя преломления уточнено: для жёлтого света он лежит в пределах $1,81\text{--}1,82$.

Цветовую палитру глории определяет зависимость показателя преломления вещества капли (и, следовательно, углового размера кольца радуги) от длины световой волны, а также разброс размеров облачных капель, вызывающий уширение кольца глории и смешение в нём цветов. Любопытно: если, согласно расчёту, дождевая радуга сопровождается радугами порядков 2, 5 и 6, что действительно порой наблюдается в природе, то для глории никаких пиков на месте дополнительных колец расчёт не обнаруживает. Остаётся заключить, что их появление обязано

не радугам высших порядков, а направленному рассеянию ледяными кристаллами (см. рис. 2). Оно порождает другое оптическое явление — гало. В остальном свойства расчётной модели, природной глории и дождевой радуги согласуются между собой.

Итак, в результате анализа физической природы столь загадочного оптического явления — глории на облаках — неожиданное решение получили сразу две задачи. Во-первых, установлено, что глория представляет собой радугу, сформированную солнечным светом, рассеянным в облаке сферическими частицами неограниченно крупнее 20 мкм, имеющими показатель преломления $1,81\text{--}1,82$. Во-вторых, явление глории подтверждает существование в холодных льдосодержащих облаках капель жидкой воды в полиморфной форме, или А-воды, свойства которой объясняют малопонятные особенности фазового строения и эволюции таких облаков.

Автор благодарит А. В. Королёва и А. Г. Петрушина за оказанную помощь.