

О теории и физике образования глории

А.Н. Невзоров*

ГУ Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО)
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 20.09.2010 г.

Сравнение свойств двух теоретических моделей глории на сферах с показателями преломления 1,33 и 1,81 между собой и со свойствами природного явления глории показало, что бытующая версия образования глории на каплях обычной воды с $n = 1,33$ ошибочна и глория возникает на каплях А-воды с $n = 1,81$, устойчиво сосуществующих с ледяной фракцией в облаках смешанной фазы.

Ключевые слова: глория, облака, вода, модель, показатель преломления; glory, clouds, water, model, refractive index.

Известное оптическое явление глории в виде радужного кольца вокруг тени самолета на освещенном Солнцем облаке привлекает внимание не только своим великолепием, но и отсутствием простого и очевидного объяснения [1, 2]. К его непреходящей загадочности добавляется тот факт, что нередко кольцо глории бывает окружено одним, реже двумя сильно уступающими по яркости концентрическими кольцами, по ширине и цветовой палитре повторяющими глорию. Литературные сведения о свойствах природной глории довольно скудны, поэтому автор воспользовался собственным опытом ее многолетних наблюдений в исследовательских полетах на самолете-лаборатории Ил-18 ЦАО, а также серией ее цифровых снимков с фиксированным угловым масштабом.

Начиная с [1], не прекращаются поиски объяснения явления глории на основе анализа обратного светорассеяния прозрачными сферами — облачными каплями — с показателем преломления $n = 1,33$. При конкурирующих подходах к решению этой задачи работы [2–5] и подобные имеют настолько схожие методические основы и результаты, что это позволяет рассматривать их в рамках единой виртуальной модели глории на сферах с $n = 1,33$.

Считается очевидным, что глория на облаке служит верным признаком присутствия в его составе сферических частиц — жидких капель. Между тем устойчивая глория типично наблюдается на холодных (т.е. с $T < 0^\circ\text{C}$) слоистообразных облаках [6], в которых стабильное присутствие жидкокапельной воды противоречит известным представлениям физики облаков и физики воды. Ибо надежно установ-

лено, что капли переохлажденной воды (с $n = 1,33$) в холодных облаках испытывают спонтанное замерзание и фазовую перегонку на растущие ледяные частицы (процесс Вегенера — Бержерона — Финдайзена), а потому непостоянны по размерам и способны существовать лишь временно, в начальной стадии образования льдосодержащего облака (ЛСО). Глория наблюдается также на визуально слабых (перистых) облаках, традиционно определяемых как чисто кристаллические, в том числе при температурах ниже -40°C [7], где существование воды в жидкой форме вообще считается физически запрещенным.

Подобные и другие наблюдения все отчетливее выявляют такую общую тенденцию, как аномальная жизнеспособность облаков смешанного фазового состава [8]. При этом ряд данных показывает, что жидкие капли в ЛСО, даже в присутствии крупных ледяных кристаллов, оказываются на порядок крупнее, чем в чисто водяных (теплых) облаках. Наши самолетными измерениями [9] установлено, что такая крупнокапельная фракция устойчиво содержится практически во всех ЛСО слоистых форм при температурах от 0°C и по крайней мере до -55°C . На основании комплексного анализа результатов наших микрофизических измерений в облаках, лабораторных опытов [10, 11] и ряда положений структурной физической химии в [12–14] получен вывод о том, что жидкая вода в ЛСО находится в особой, аморфной, фазе, названной А-водой. Природа и свойство А-воды и ее место в физике холодных облаков подробно обсуждены в [13, 14]. Наряду с конденсационным равновесием с ледяной фазой и способностью к существованию в жидком состоянии при температурах ниже -40°C , другие инструментально-аналитически определенные физические свойства А-воды существенно отличают ее от переохлажден-

* Анатолий Николаевич Невзоров (an-nevzorov@yandex.ru).

ной обычной воды [15, 16]. Прежде всего, это аномально высокий (не менее 1,8) показатель преломления, впоследствии [17, 18] уточненный значением $1,81 \div 1,82$ в желтом свете, что соответствует плотности вещества H_2O около $2,1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Как показано в [17, 18], виртуальная модель глории, рассчитанная по теории рассеяния Ми для показателя преломления сфер $n = 1,81$, во всех свойствах, кроме наличия концентрических внешних колец, точно совпадает с природным явлением. Такое сходство послужило, прежде всего, убедительным подтверждением существования и особых свойств А-воды в ЛСО. В этих же работах доказывалось, что глория оптически формируется подобно дождевой радуге, т.е. физически является радугой на каплях А-воды крупнее 20 мкм, и предлагается реально возможное объяснение природы окружающих ее колец.

В порядке ответа на возражения и контраргументы авторов статей [4, 5] по поводу наших результатов¹, считаем разумным сопоставить обе виртуальные модели глории по их соответствию строгой теории Ми и истинному природному явлению.

Как и ранее, наши расчеты индикатрис рассеяния выполнены по теории Ми с использованием компьютерной программы, разработанной А.Г. Петрушиным [19]. Отличительной особенностью этой программы является жесткий критерий сходимости конечного ряда Ми, автоматически управляющий числом суммируемых последовательных членов ряда при каждом значении угла рассеяния, параметра дифракции x и показателя преломления вещества рассеивающих частиц n . Такое построение программы максимально приближает ее по точности к формулам строгой теории Ми. На рассчитанных по этой программе индикатрисах рассеяния для индивидуальных сфер с диаметрами до 160 мкм отсутствуют мелкомасштабные осцилляции по углу рассеяния в области пиков интенсивности, характерные для ряда работ, включая [2–5]. Это лишний раз доказывает, что наложенные на индикатрису осцилляции — это результат неустойчивости суммы ряда Ми при недостаточности его знакопеременных слагаемых членов [20]. При фиксированном числе этих членов остатки частичной суммы ряда (разность между суммами усеченного и бесконечного рядов) закономерно испытывают гармоническую зависимость от угла рассеяния и других параметров.

Таким образом, накладки на расчетной индикатрисе рассеяния в виде затухающей мелкомасштабной «ряби» служат признаком и мерой ошибок вычислений, а вовсе не свойством индикатрисы. Тем не менее авторы [2–5] уверенно отождествляют их с действительностью, интерпретируя как кольца

глории и делая основной упор на взаимное расположение колец. Подбором числа и характера суммируемых членов рядов Ми [5] и ширины спектра размеров капель, по которому усредняется интенсивность рассеяния [3, 4], авторы этих работ по существу пытаются искусственно подогнать локальную форму индикатрисы рассеяния под свойства явления в их собственном, к сожалению, не совсем точном, представлении. Общее и главное их заблуждение состоит в том, что дополнительные кольца вокруг глории (по ее каноническому определению [6]) принимаются ими за неотъемлемый элемент явления.

Примечательно, что подобная концепция базируется не на фактическом материале и не на строгом следовании теории Ми, на что претендуют ее авторы, а на ошибках расчета, т.е. на формальном отклонении от теории Ми. Соответственно ее теоретическое обоснование понятиями и средствами физической оптики заведомо не может быть адекватным и, следовательно, сопряжено в [5] с неточностями физической интерпретации явления. К таковым относится, в частности, использование гипотезы о поверхностных волнах, предложенной ван де Хюлстом [1] в качестве чисто интуитивного возмещения отсутствия реалистического объяснения дополнительных колец глории.

Предлагаемое далее сравнение энергетических характеристик обеих моделей глории выполнено на основе их расчета с помощью единой программы Петрушина. Все расчеты выполнены для рассеяния желтого света ($\lambda = 0,58 \text{ мкм}$) сферами с показателями преломления $n = 1,33$ (обычная вода) и $n = 1,81$ (А-вода).

На рис. 1 представлены для сравнения индикатрисы рассеяния для различных диаметров капель обычной и А-воды, нормированные к полному световому потоку, рассеиваемому единичной каплей.

Обратим внимание, что на кривых для $n = 1,33$ (рис. 1, а) уже при диаметре капель 5 мкм отчетливо проявляется пик дождевой радуги. При $d \sim 10 \text{ мкм}$ максимальная интенсивность рассеяния в пике сравнивается с пиковой интенсивностью в области углов, прилегающих к 180° . Это означает, что глория на водяных (теплых) облаках должна сопровождаться концентрическим светлым кольцом с угловым радиусом около 40° . Однако сколь угодно регулярного наличия такого кольца вокруг природной глории не наблюдается. Из дальнейшего рассмотрения можно заключить, что редчайшие случаи одновременного наблюдения обоих явлений обусловлены предложенным ранее [13, 14] временным присутствием в облаке капель воды обеих полиморфных форм на начальном этапе формирования ЛСО.

На индикатрисе для $n = 1,81$ (рис. 1, б) интенсивность обратного рассеяния максимальна вблизи угла 180° , где на 2 порядка превосходит пиковую интенсивность при $d = 10 \text{ мкм}$ в модели с $n = 1,33$. Такое же соотношение сохраняется с увеличением размеров капель. Отсюда можно ожидать, что глория

¹ Авторы этих статей, вырвав из контекста работ [17, 18] полученные там выводы и игнорируя их экспериментальное и физическое обоснование, оспаривают их лишь по причине несоответствия общепринятым представлениям, а главное, собственным теоретическим результатам.

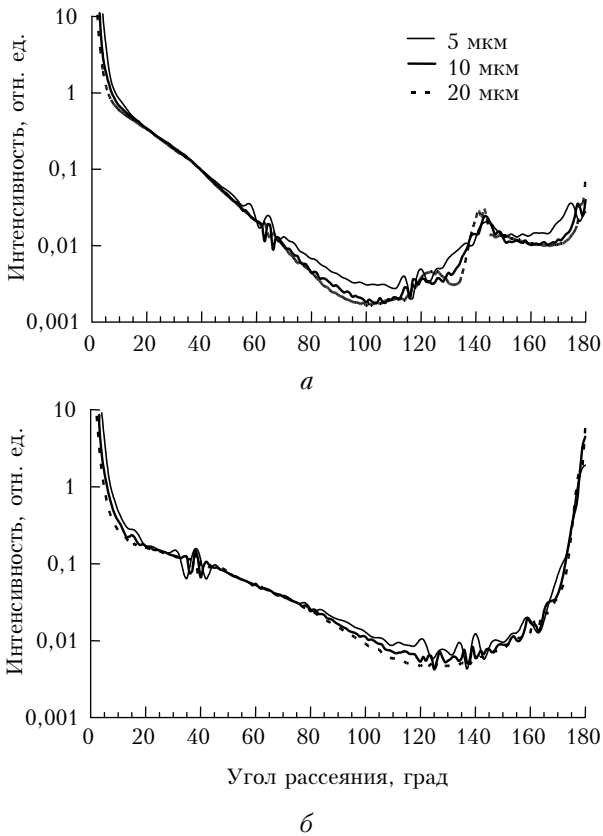


Рис. 1. Нормированные индикатрисы рассеяния света с $\lambda = 0,58$ мкм сферическими каплями различных диаметров с показателями преломления 1,33 (а) и 1,81 (б)

на ЛСО должна быть значительно ярче, чем на облаках обычной жидкой воды. Здесь и далее принимается в расчет, что четкое изображение для обеих моделей формируется не в толще облака, где многократное рассеяние подавляет направленные лучи, а в приграничном облачном слое с эффективной оптической толщиной не более единицы [8]. Это означает, что в идеальном случае в формировании оптического изображения участвуют коллективы капель, обладающие одной и той же суммарной площадью сечения независимо от их показателя преломления, размеров и концентрации, а относительный яркостный контраст изображения согласно рис. 1 определяется показателем преломления капель.

На рис. 2 детальные индикатрисы рассеяния желтого света каплями различных размеров в области углов, включающей экспериментальный диапазон видимого углового радиуса желтого пояса глории от $1,6$ до $3,8^\circ$ [17, 18], построены в общем масштабе для обеих моделей. Чтобы изолировать кривые друг от друга и одновременно отобразить относительный вклад капли диаметра d в яркость оптического изображения, ее нормированная интенсивность рассеяния умножена на относительную площадь сечения d^2/d_0^2 , где $d_0 = 20$ мкм.

Как показывают расчеты, при $n = 1,33$ (обычная вода) отчетливое кольцевое изображение в пределах диапазона углов природной глории в принципе может возникать на почти монодисперсных облачных каплях с диаметром (10 ± 2) мкм. В то же время,

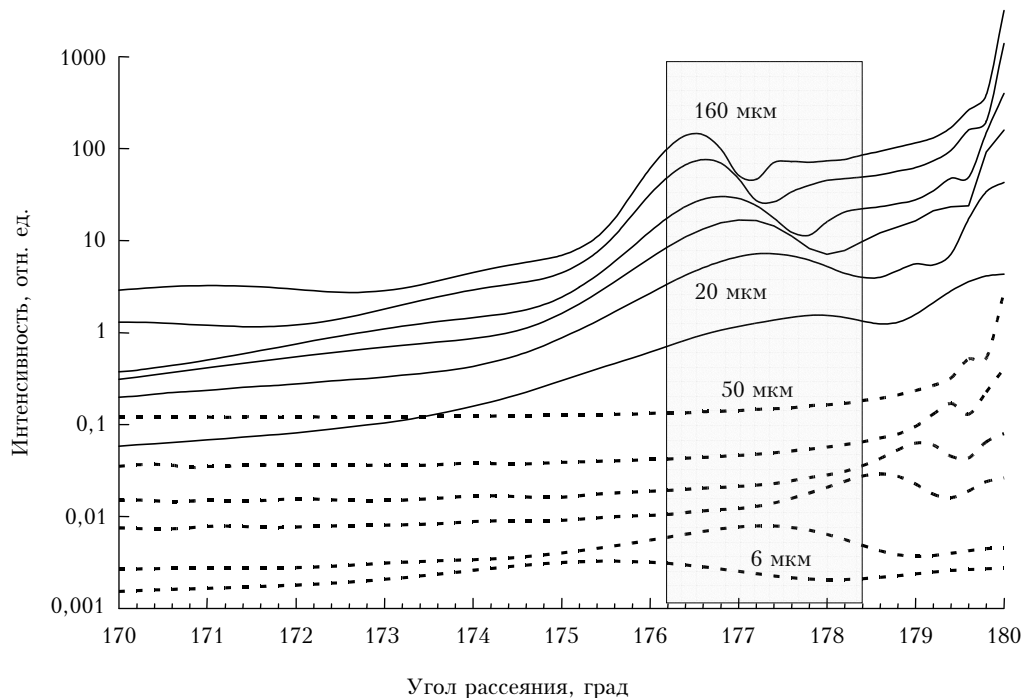


Рис. 2. Индикатрисы обратного рассеяния сферами с показателем преломления 1,33 и диаметрами 6, 10, 15, 20, 30, 50 мкм (пунктир), а также с показателем преломления 1,81 и диаметрами 20, 40, 60, 80, 120, 160 мкм (сплошные кривые). Выделена область изменчивости угловых радиусов природной глории

как установлено многочисленными исследованиями, реальные спектры размеров облачных капель весьма далеки от монодисперсных и в своем большинстве содержат правое крыло размерами до десятков микрометров [8], вследствие чего в соответствии с рис. 2 оптическое изображение типично вырождается в сплошной ореол.

При $n = 1,81$ пики на индикатрисе рассеяния появляются и полностью укладываются в диапазон изменчивости углов природной глории при любых диаметрах капель, превышающих 20 мкм (сплошные кривые на рис. 2). По своему абсолютному возвышению над фоном эти пики на 2–4 порядка превосходят пик при $d = 10$ мкм в случае $n = 1,33$. С увеличением размеров капель пики повышаются, сужаются и смещаются в сторону уменьшения угла рассеяния, так что угловой радиус внешнего, красного, пояса глории связан прямой зависимостью с размерами самых крупных капель, а ширина кольца — с шириной их спектра.

Отмеченная в [17, 18] тенденция возрастания яркостного контраста природной глории с увеличением ее углового размера объясняется их однонаправленной зависимостью от размеров капель. Эту же тенденцию поддерживает диффузное рассеяние направленных лучей каплями с $d < 20$ мкм и ледяными частицами, которое ведет к уточнению облачного слоя, формирующего глорию, и тем самым к снижению яркости и контрастности ее изображения.

На полученных нами индикатрисах для обеих моделей, как и прежде, не обнаруживается никаких пиков, соответствующих дополнительным наружным кольцам вокруг природной глории (см. рис. 2).

С учетом эпизодического появления хотя бы одного (наименьшего по диаметру) из таких колец и изменчивости их относительной яркости в [17, 18] выдвинуто и обосновано предположение, что они создаются пиками рассеяния формирующих глорию лучей ледяными кристаллами тех форм, которые образуют другое явление — гало Ван Бузена [21], т.е. наличие и яркость сопровождающих глорию визуальных колец вероятнее всего находятся в зависимости не просто от двухфазной микроструктуры облака, но также и от формы ледяных кристаллов.

В природе встречается глория лишь единственного типа по определению и свойствам. Проведенный здесь анализ приводит к заключению, что только в тех холодных облаках, где с ледяной фракцией устойчиво сосуществует капельная А-вода, создаются реальные условия для формирования оптического явления, называемого глорией. В облаках же, содержащих только обычную (теплую или переохлажденную) воду, вероятность образования похожего, хотя и несравненно менее яркого явления ничтожно мала.

Таким образом, явление глории служит практически достаточным признаком наличия в облаке

капель А-воды. Приведенный в [3] единичный пример не может служить доказательством обратного, поскольку в статье не обозначены ни температура, ни фазовый состав облака, а яркостной контраст и стабильность описанного феномена характерны как раз для типичной картины глории на слоистообразном облаке с отрицательной температурой на верхней границе.

Остается заключить, что последователи версии образования глории на каплях обычной воды невольно впадают в заблуждение, отождествляя соответствующую виртуальную модель с природной глорией на каплях А-воды, устойчиво сосуществующих с ледяной фракцией в холодных облаках смешанной фазы.

Выражаем надежду, что представленные здесь результаты получат объективную проверку в экспериментальных исследованиях связи между свойствами глории и микрофизическим строением облаков с учетом полиморфной формы воды, заключенной в жидкой дисперсной фазе смешанных облаков.

Автор благодарен А.Г. Петрушину за обсуждение работы.

1. *ван де Хюлт Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
2. *Laven P.* How are glories formed? // *Appl. Opt.* 2005. V. 44, N 27. P. 5675–5683.
3. *Mayer B., Schröder M., Preusker R., Shüller L.* Remote sensing of water cloud droplet size distribution using the backscattering glory: a case study // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 5. P. 1255–1263.
4. *Mayer B., Emde K.* Comment on “Glory phenomenon informs of presence and phase state of liquid water in cold clouds” by Anatoly N. Nevzorov // *Atmos. Res.* 2007. V. 84, N 4. P. 410–419.
5. *Романов Н.П., Дубниченко С.О.* Физика образования и аналитическое описание свойств глории // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 7. С. 549–560.
6. *Миннарт М.* Свет и цвет в природе. М.: Наука, 1969. 344 с.
7. *Sassen K., Arnott W., Barnett J., Aulenbach S.* Can cirrus clouds produce glories? // *Appl. Opt.* 1998. V. 37, N 9. P. 1427–1433.
8. *Облака и облачная атмосфера: Справочник* / Ред. И.П. Мазин, А.Х. Хргиан. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.
9. *Невзоров А.Н., Шугаев В.Ф.* Экспериментальные исследования фазово-дисперсного строения облаков слоистых форм при отрицательных температурах // *Метеорол. и гидрол.* 1992. № 8. С. 52–65.
10. *Скрипов В.П., Коверда В.П.* Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. М.: Наука, 1984. 231 с.
11. *Angell C.A.* Amorphous water // *Annu. Rev. Phys. Chem.* 2004. V. 55, N 1. P. 559–583.
12. *Невзоров А.Н.* Исследования по физике жидкой фазы в льдосодержащих облаках // *Метеорол. и гидрол.* 1993. № 1. С. 55–68.
13. *Невзоров А.Н.* Биморфизм и свойства жидкокапельной воды в холодных облаках // *Вопросы физики облаков.* Памяти С.М. Шметера. М.: Метеорол. и гидрол., 2008. С. 268–298

14. *Nezovor A.N.* Liquid-state water bismorphism in cold atmospheric clouds // *Atmos. Sci. Res. Progr.* New York: Nova Sci. Publ., 2009. P. 15–58.
15. *Nezovor A.N.* Some properties of metastable states of water // *Physics of Wave Phenomena.* 2006. N 1. P. 45–57.
16. *Невзоров А.Н.* Свойства метастабильных свойств воды: новая интерпретация эксперимента // *Мир измерений.* 2009. № 8. С. 38–45.
17. *Nezovor A.N.* Glory phenomenon informs of presence and phase state of liquid water in cold clouds // *Atmos. Res.* 2006. V. 82, N 1–2. P. 367–378.
18. *Невзоров А.Н.* Явление глории и природа жидкокапельной фракции в холодных облаках // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 8. С. 674–680.
19. *Петрушин А.Г.* Матрица преобразования для составляющих электрического поля рассеянного излучения диэлектрическим шаром при угле рассеяния $\theta = 90^\circ$ // *Труды ИЭМ.* 1989. Вып. 49(139). С. 59–63.
20. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
21. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.

A.N. Nezovor. **On the theory and physics of glory formation.**

The comparison between properties of two theoretical models of glory on spheres with the refractive indexes of 1.33 and 1.81 and these of the natural glory phenomenon shows that the current version of glory formation by droplets of ordinary water with $n = 1.33$ is wrong, and the glory is formed by the droplets of A-water with $n = 1.81$, stably coexistent with the ice fraction in phase-mixed clouds.