

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.574.1:551.576.1:545.212.01-12

А.Н. Невзоров

Явление глории и природа жидкокапельной фракции в холодных атмосферных облаках

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный Московской обл.

Поступила в редакцию 20.04.2007 г.

Получены убедительные свидетельства того, что глория в классическом определении формируется в облаках с отрицательными температурами как радуга первого порядка на сферических частицах с показателем преломления 1,81–1,82 и диаметром более 20 мкм. Доказано, что глория на холодном облаке является радугой, образованной на сферах с указанными оптическими свойствами, получено новое подтверждение ранее обнаруженного существования в холодных облаках капель жидкой воды, находящейся в особом состоянии, а именно аморфной воды, или *A*-воды. Видимый размер глории может служить индикатором максимального размера капель *A*-воды, а ее дополнительные кольца могут обозначать присутствие некоторых форм ледяных кристаллов.

Введение

Оптическое явление, именуемое глорией, представляет собой светящееся радужное кольцо вокруг противосолнечной тени наблюдателя на верхней границе облака или тумана. В далеком прошлом глорию изредка наблюдали в горах в виде цветного нимба, окружающего тень головы наблюдателя на нижележащем слое тумана («брокенский призрак»). Сегодня же увидеть это красочное явление с самолета (рис. 1) и из космоса — далеко не редкость.

Согласно всеобщему представлению глория образуется в результате рассеяния света сферическими частицами, т.е. облачными каплями. Что же касается механизма ее формирования, то по этому вопросу до сих пор отсутствуют единое мнение и законченная теория, адекватно описывающая свойства глории. В итоге содержащаяся в этом явлении информация о микрофизическом строении облака все еще далека от полного понимания и остается не востребованной в задачах облачного мониторинга.

Малозаметным и труднообъяснимым оказывается тот факт, что глория типично наблюдается на облаках и туманах с температурами верхней границы ниже 0 °С, в том числе на низкотемпературных облаках верхнего яруса (перистых), традиционно считающихся чисто ледяными. Существование жидких (или замерзших, что не меняет общей сущности) капель в таких холодных облаках (ХО) относится к самым дискуссионным проблемам физики облаков. С одной стороны, оно оспаривается фундаментальными установками замерзания капель и переконденсации переохлажденной воды на лед, но, с другой стороны, обнаруживается совсем не как исключение такими видами наблюдений, как импакторные пробы, «обзрение» облачных кристаллов и др. [22]. Инструментальные измерения

с самолета позволили уточнить, что жидкие капли присутствуют в ХО практически всегда и даже при температурах ниже –40 °С, достигая размеров, как правило, в десятки, а иногда до сотен микрометров [5, 11, 17]. Анализ приборных данных обнаружил, что в облаках, где капли устойчиво сосуществуют с ледяными частицами, заключенная в них жидкая вода значительно отличается от переохлажденной обычной воды такими, в частности, свойствами, как конденсационное равновесие со льдом и аномально высокий показатель преломления, оцененный пределами 1,8÷1,9 [4].

Способность вещества H₂O к полиморфизму при отрицательных температурах удостоверена все более многочисленными лабораторными опытами [6, 10, 12]. Напрашивается вывод, что появление глории на ХО напрямую связано с наличием в них капель полиморфной формы воды, названной нами *A*-водой. Настоящая статья посвящена подтверждению этого вывода и исследованию связи между свойствами глории и микрофизическим строением облаков. По сравнению с ранее опубликованной статьей [20] в ней несколько подправлены расчетные результаты и конкретизированы полученные выводы.

1. Свойства глории как природного явления

Недостаточное внимание исследователей к природному явлению глории выразилось в том, что нам не удалось найти в литературе довольно полного, детального и объективного его описания, которое могло бы пролить свет на связь между его характеристиками и свойствами облака. Нижеследующее описание глории основано на ранних экспериментальных наблюдениях, обобщенных Миннартом

[3], на собственных наблюдениях автора и на анализе около 30 цветных фотографий глории, выполненных с самолета в различное время. Наше описание построено таким образом, чтобы выделить разнородные и, казалось бы, не связанные между собой особенности явления.

1. Радужная gloria типично образуется на облаках с температурами на верхней границе ниже 0°C , в том числе на облаках верхнего яруса, считающихся чисто ледяными. Мы наблюдали изнутри такого неплотного облака наличие глории одновременно с гало и нижним солнцем, порожденными ледяными кристаллами.

2. Неотъемлемым основным элементом глории является светящееся и чаще всего идеально круглое кольцо, составленное из цветных поясов, плавно переходящих друг в друга. Его геометрический центр расположен на теневой проекции точки наблюдения и окружен белым ореолом (рис. 1).

3. Радиальная последовательность цветов в кольце глории включает в себя красную внешнюю кромку, переходящую в оранжевый и желтый пояса и затем в практически не окрашенную внутреннюю часть. Свет во всем кольце поляризован в радиальном направлении (т.е. положительно), как в дождевой радуге.

4. Часто (но не всегда) основное кольцо глории окружено одним — тремя значительно более слабыми кольцами (см. рис. 1), окрашенными подобно основному.

5. Измеренные угловые радиусы желтого пояса основного кольца заключались между $1,5^{\circ}$ и $3,8^{\circ}$. Чем больше размер глории, тем, как правило, ярче ее изображение.

6. Такие характеристики глории, как видимый размер, яркость и цветовой контраст, имеют тенденцию к усилению с повышением прозрачности облака. И наоборот, самая мелкая, еле заметная и бледно окрашенная gloria обычно возникает в наиболее плотных облаках.

Все отмеченные особенности глории могут быть легко удостоверены простыми наблюдениями с самолета. Приводимый ниже анализ физической природы явления всецело опирается на эти особенности.

2. Существующие представления о природе глории

То, что gloria представляет собой эффект обратного рассеяния света именно облачными каплями, общепризнано как аксиома. Разногласия возникают только в вопросе об ее физическом происхождении. Естественно, что за неимением альтернативы все предположенные физические интерпретации глории относились к каплям обычной воды с показателем преломления $n = 1,33$. Действительно, венцы обратного рассеяния света теплым облаком или туманом обнаруживались как в лабораторных экспериментах [2], так и в модели, рассчитанной по теории Ми при $n \approx 1,33$ (например, [16]), к кото-

рой мы обратимся чуть ниже. Однако строго обоснованное объяснение физического принципа этого явления все еще отсутствует. Прежде популярная идея дифракции света на облачных каплях отвергнута еще ван де Хюлстом [7] по причине нереальности образования направленного светового потока изнутри облака, необходимого для создания дифракционной картины. Более убедительное объяснение явления с помощью поверхностных волн, предложенное в [7] и развитое в [15], основано на умозрительных предположениях и потому не может быть признано окончательным.

Вместе с этим возникает и другой вопрос: насколько данная виртуальная модель соответствует реальному природному явлению глории? К сожалению, пользователи этой модели не проводили ни объективных детальных сравнений их свойств, ни исследований микроструктуры конкретных облаков, на которых наблюдались глории. Мы постараемся, насколько возможно, восполнить это упущение.

В данной статье все расчеты светорассеяния по формулам Ми выполнены с помощью программы, разработанной А.Г. Петрушиным, и относятся к единичным каплям или к облаку монодисперсных капель без учета вторичного рассеяния. В качестве размерной характеристики оптического образа, сформированного коллективом капель в обратном направлении, т.е. под углом рассеяния $\beta > 90^{\circ}$, будем использовать угол $\varphi = 180^{\circ} - \beta$ его наблюдения со стороны источника света.

На рис. 2 построены рассчитанные по формулам Ми угловые функции интенсивности света, рассеянного каплями обычной воды различных размеров в область углов φ , характерных для природной глории. Расчеты выполнены для трех спектральных полос с учетом зависимости показателя преломления жидкой воды n от длины световой волны λ . Каждая кривая содержит одиночный пик значимой амплитуды (в отличие от затухающих осцилляций в других известных работах, например [15]), угол вершины и угловая ширина которого зависят от размера рассеивающей капли. В соответствии с рис. 2 последовательность цветов в расчетной модели, в принципе, повторяет картину природной глории. Однако на этом заканчивается формальное сходство между расчетной моделью для $n \approx 1,33$ и реальным явлением, свойственным холодному облаку. Более существенным представляется следующий ряд серьезных противоречий между ними:

1) Согласно рис. 2 расчетный пик понижается и расширяется с увеличением угла наблюдения, в то время как природная gloria обладает противоположной тенденцией.

2) В расчетной модели характерные для глории углы от $1,5$ до $3,8^{\circ}$ обеспечиваются каплями от ~ 8 до ~ 16 мкм в диаметре. Четкое цветное кольцо может образоваться только в облаке практически монодисперсных капель, маловероятном в природе по сравнению с частотой наблюдения глории.

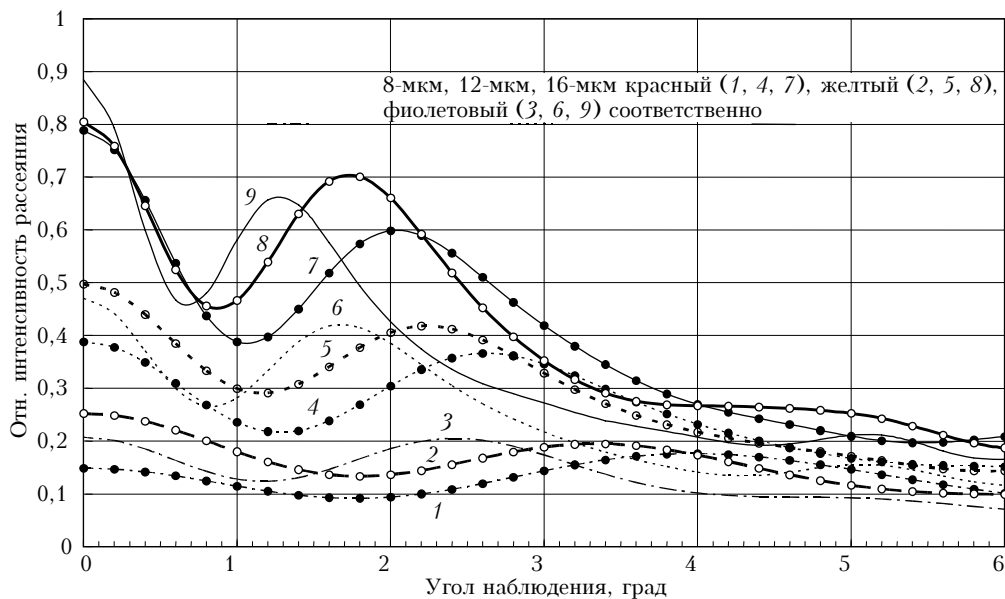


Рис. 2. Угловые функции относительной интенсивности света, рассеянного в обратном направлении каплями воды диаметрами 8, 12 и 16 мкм, для красного ($\lambda = 0,67$ мкм, $n = 1,328$), желтого ($\lambda = 0,58$ мкм, $n = 1,334$) и фиолетового света ($\lambda = 0,42$ мкм, $n = 1,340$). Пик каждой кривой определяет положение венца обратного рассеяния от облака монодисперсных капель

3) Наши расчетные результаты не обнаруживают дополнительных колец, идентичных кольцам, эпизодически окружающим основное кольцо.

4) В расчетной модели для $n \approx 1,33$ свет в пиках интенсивности всегда поляризован в направлении, ортогональном поляризации природной глории. (Все расчетные данные о коэффициентах поляризации единообразны и графически не отображены).

Таким образом, большинство деталей теоретической модели обратного рассеяния для $n \approx 1,33$ не соответствует вышеописанному природному явлению глории. Иными словами, данная модель описывает некоторое другое явление, отличное как по своим свойствам, так, очевидно, и по принципу формирования.

3. Глория как радуга

Идея происхождения глории как радуги с соответствующим угловым размером опровергается всеми расчетами светорассеяния водяными ($n \sim 1,33$) и ледяными ($n \sim 1,31$) сферическими частицами. Для капель обычной воды теория (см. ниже) обнаруживает только известную дождевую радугу с радиальным углом наблюдения около 42° . Тот факт, что в ХО обнаруживается вода, обладающая иными свойствами, позволяет (а по существу, заставляет за безальтернативностью) рассмотреть эту версию.

Визуальное изображение радуги формируется в глазу наблюдателя лучами света, рассеянного пространственным скоплением сферических частиц — капель. Сходящиеся лучи, формирующие радугу, выходят из индивидуальной капли по образующей конуса с определенным углом при вершине (углом радуги). Совокупность таких лучей от скопления частиц достигает наблюдателя в вершине обратного

конуса с тем же самым углом, как показано на рис. 3, создавая таким путем кольцевое изображение повышенной яркости на общем фоне рассеянного света. Чтобы быть отчетливо выраженной, радуга должна сформироваться в таком слое под нижней границей облака, который имеет достаточно малую оптическую толщину. Иначе лучи, формирующие оптическое изображение, будут рассеяны облачной средой.

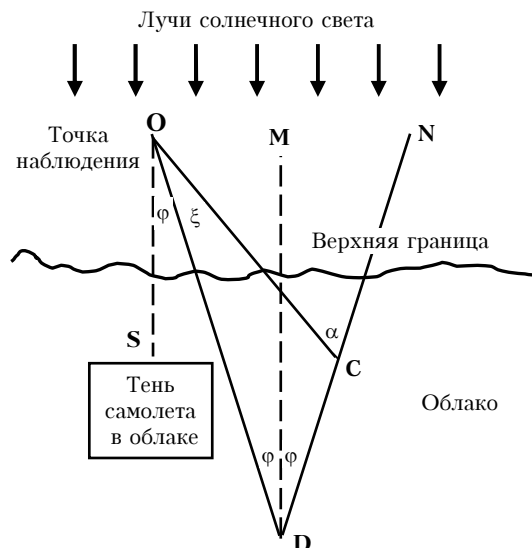


Рис. 3. Схематическая двухмерная диаграмма формирования изображения глории с первым вторичным кольцом. Прямые линии OS и MD — лучи солнечного света, DO и DN — лучи радуги, испускаемые каплями, расположенными в такой точке D , чтобы луч DO проникал в глаз наблюдателя под углом φ с осью радуги OS ($\varphi = \pi - \beta$, где β — угол рассеяния). Линия CO — луч, сформированный предположительно ледяными кристаллами из луча радуги DN под углом гало α (см. разд. 4)

Существуют два подхода к теоретическому описанию свойств радуги: приближенная геометрическая теория и строгая теория Ми. Сравнение результатов двух независимых теорий между собой и со свойствами реальной глории может послужить критерием справедливости предложенной интерпретации ее физической природы.

Геометрическая теория радуги [8] основана на анализе хода световых лучей внутри индивидуальной прозрачной сферы с показателем преломления n , освещенной параллельным пучком света. Радуга образуется в результате схождения части лучей, отраженных от внутренней сферической поверхности и затем выходящих из сферы после k отражений. Полный угол поворота лучей, формирующих радугу k -го порядка, составляет

$$\gamma^{(k)}(n) = k\pi + 2\arcsin\frac{1}{n}\sqrt{\frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}} - 2(k+1)\arcsin\sqrt{\frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}}. \quad (1)$$

Эти лучи покидают частицу под углом рассеяния $\beta^{(k)} = |\gamma^{(k)} - 2\pi j|$, где $j \geq 0$ — целое число, обеспечивающее условие $0 < \beta^{(k)} < \pi$. Угловой радиус радуги обратного рассеяния из глаза наблюдателя составляет

$$\varphi^{(k)} = \pi - \beta^{(k)} < \pi/2. \quad (2)$$

На рис. 4 показаны рассчитанные зависимости углов наблюдения $\varphi^{(k)}$ радуг обратного рассеяния от 1-го до 7-го порядка от показателя преломления n рассеивающихся сфер. Зависимость $n(\lambda)$ влечет за собой зависимость $\varphi^{(k)}(\lambda)$, отображенную в спектральной палитре радуги каждого порядка. Если, как для обычной воды, величина n увеличивается от красной до фиолетовой границы видимого спектра, то радуга k -го порядка, описываемая на рис. 4 спадающей кривой, содержит красный пояс с внешней стороны, а возрастающей кривой — с внутренней. В порядке оценки достоверности геометрического подхода можно убедиться, что при $n \approx 1,33$ число и область угловых размеров радуг различных порядков соответствуют самой полной картине природной дождевой радуги.

Для идентификации величины n по углу наблюдения радуги обратного рассеяния необходимо учитывать, что согласно рис. 4 радуга любого порядка $k > 1$ должна сопровождаться более яркой радугой 1-го порядка. Отсюда следует, что наиболее яркое кольцо глории, видимое под радиальным углом от 1,5 до 3,8°, может принадлежать только радуге первого порядка на сферических частицах с показателем преломления около 1,8.

Рассмотренное геометрическое приближение применимо лишь для углов радуг, но при этом не учитывает влияния размеров капель на величины этих углов за счет сдвига фаз в формирующих лу-

чах. Кроме того, оно не дает информации об относительной интенсивности, угловом профиле и поляризации элементарной радуги. Теория Ми свободна от этих ограничений.

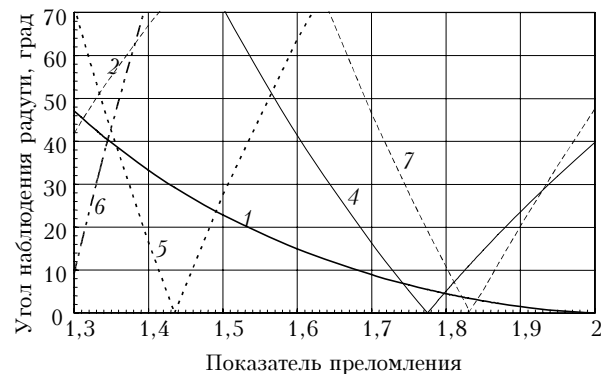


Рис. 4. Углы наблюдения $\varphi(k)$ радуг обратного рассеяния различных порядков $k \leq 7$ (цифры у кривых) в зависимости от показателя преломления n рассеивающих сфер, рассчитанные по геометрической теории безотносительно к размеру частиц

На рис. 5 представлены результаты расчетов по теории Ми индикатрис рассеяния в области углов реальной глории для рассеивающих сфер различного размера с $n = 1,81$. Отчетливый пик на кривой относительной интенсивности рассеяния $I(\varphi)$ возникает, когда размер капли превосходит ~ 20 мкм. С дальнейшим ростом d угол вершины пика $\varphi_m(n, d)$ проходит через значения углов глории, при этом сам пик повышается и одновременно сужается. Расчет обнаруживает также, что на фоне отрицательного коэффициента поляризации присутствуют пики положительной поляризации, совпадающие с пиками интенсивности рассеяния на рис. 5. Отметим, что в области $\varphi < 90^\circ$ на кривых интенсивности и поляризации рассеяния отсутствуют другие пики, по высоте и ширине сопоставимые с указанными пиками.

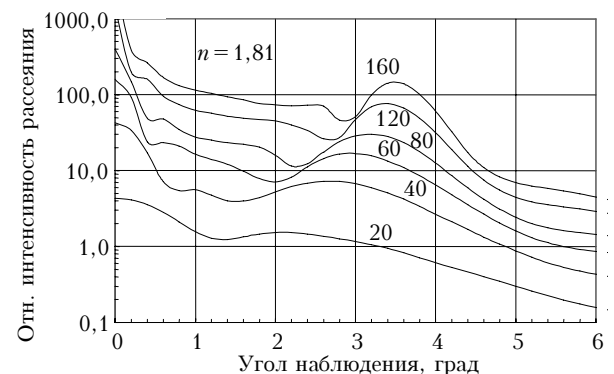


Рис. 5. Индикатрисы рассеяния, рассчитанные по формулам Ми при $n = 1,81$ и $\lambda = 0,58$ мкм (желтый свет), на которых при различных диаметрах рассеивающих сфер d появляются пики интенсивности в области углов глории

На рис. 6 показаны зависимости угла пика от величины n при различных d , полученные из кривых, аналогичных рис. 5. Для сравнения приведена

кривая $\varphi^{(1)}(n)$, рассчитанная по геометрической теории. Легко убедиться, что эта кривая служит геометрическим местом асимптот углов пиков по Ми при $d \rightarrow \infty$. Такое согласие выводов разных независимых теорий означает, что обе они описывают одно и то же физическое явление радуги.

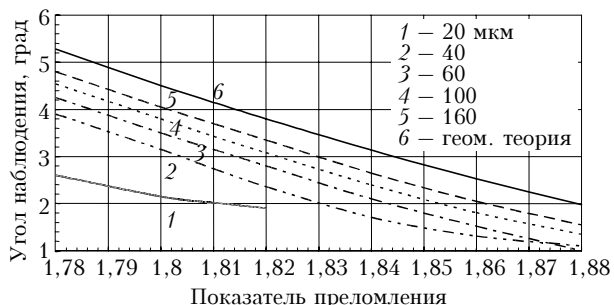


Рис. 6. Зависимость угла радуги $\varphi^{(1)}$ от показателя преломления n , полученная из теории Ми для сфер различных диаметров при $\lambda = 0,58$ мкм (желтый свет) и для сравнения рассчитанная по геометрической теории

Итак, будучи основанной на ранее установленных особенностях микроструктуры ХО (наличие достаточно крупных капель с $n \geq 1,8$ в льдосодержащих облаках), представленная расчетная модель радуги по основным свойствам (диапазон угловых размеров, связь цветовой четкости с размером, знак поляризации) соответствует описанному выше природному явлению глории. Их различие в цветовой палитре легко объяснить тем, что расчетная модель относится к монодисперсному облаку, освещенному монохроматическим светом, в то время как ширина кольца и палитра реального изображения определяются шириной спектра размеров облачных капель и спектральной дисперсией естественного света в них. При разбросе размеров рассеивающих капель изображение формируется смещением полихромных радуг различных размеров, вследствие чего его основная часть, кроме красной внешней кромки, оказывается большей частью обесцвеченной. Из рис. 5 видно, что центральный ореол, присутствующий картине глории (см. рис. 1), присутствует также в виртуальном явлении и по угловой ширине мало зависит от размеров капель, благодаря чему остается белым.

Все сказанное приводит к выводу о том, что естественная глория представляет собой суперпозицию радуг первого порядка, сформированных на содержащихся в облаке полидисперсных каплях А-воды.

Семейство кривых на рис. 6 позволяет уточнить величину показателя преломления А-воды по сравнению с прежней оценкой $n = 1,8 \div 1,9$ [4]. Поскольку диапазон угловых радиусов глории ограничен снизу минимальным «радугообразующим» размером капель (не более 20 мкм), а сверху максимальными размерами капель в ХО порядка сотен микрометров [11], пределы угла от $\sim 1,5$ до $\sim 3,8^\circ$,

вероятнее всего, обусловлены величиной показателя преломления между 1,81 и 1,82 в желтом свете.

Пользуясь тем, что отношение размеров красного и желтого поясов практически (в пределах погрешности их идентификации) постоянно и составляет $1,20 \div 1,25$, мы имеем возможность хотя бы грубо оценить величину n для красного цвета. На рис. 7 построены угловые функции интенсивности рассеяния при $d = 160$ мкм для двух значений показателя преломления капель: $n = 1,81$, приблизительно соответствующего желтому свету для А-воды, и $n = 1,795$, выбранного из условия сохранения указанного соотношения между углами красного и желтого поясов. Таким путем получаем, что в красной спектральной полосе А-вода имеет $n \sim 1,795 \div 1,805$.

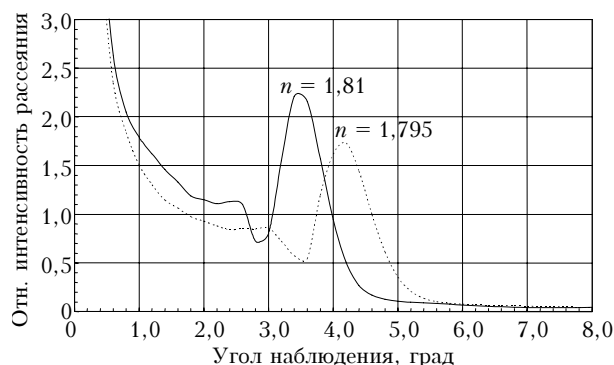


Рис. 7. Отношение угловых размеров красного и желтого поясов глории послужило для ориентировочной оценки разности значений показателя преломления А-воды в соответствующих спектральных полосах

Подчеркнем, что все приведенные здесь количественные оценки носят предварительный, ориентировочный характер, прежде всего по той причине, что положения красного и желтого поясов в общей картине глории определялись визуально и поэтому с некоторой неопределенностью.

4. О дополнительных кольцах и иризации облаков

Как упоминалось выше, теория Ми для $d \leq 160$ мкм не обнаруживает явных признаков колец, охватывающих снаружи радугу первого порядка. В то же время природную глорию могут сопровождать дополнительные кольца в количестве, по крайней мере, до трех штук. Однако это случается далеко не всегда, а регулярно-периодическое расположение дополнительных колец, схожее с основным кольцом по окраске, не соответствует расчетной модели радуг высших порядков. Будучи не в состоянии указать такой механизм вторичного рассеяния света каплями, который приводил бы к указанному эффекту, мы постулируем, что дополнительные кольца глории являются продуктом вторичного рассеяния лучей радуги ледяными кристаллами.

Схема формирования дополнительного внешнего кольца представлена на рис. 3. Помимо прямых лучей радуги DO , сформированной на каплях под углом рассеяния β и наблюдаемой под углом $\varphi = \pi - \beta$, к наблюдателю приходят лучи, рассеянные частицами облака от диаметрально симметричных лучей DN той же самой радуги. Видимое кольцо выделяется из рассеянного светового фона благодаря пику интенсивности рассеяния под углом α , свойственным ледяным кристаллам некоторых типов. Такие пики обуславливают формирование гало с различными угловыми радиусами α , временами наблюдаемых вокруг Солнца или Луны, просвечивающих сквозь оптически слабое облако [1, 3].

Из рис. 3 можно видеть, что угол DOC между основным и дополнительным кольцами равен $\xi = \alpha - 2\varphi$, откуда радиальный угол COS дополнительного кольца составляет

$$\varphi_1 = \xi + \varphi = \alpha - \varphi. \quad (3)$$

Соответствующий угол гало может быть легко определен из непосредственно измеренных угловых размеров:

$$\alpha = 2\varphi + \xi. \quad (4)$$

Согласно измерениям для ближайшего (минимального по углу) дополнительного кольца величина α сохраняет постоянство от случая к случаю, составляя $8,5 \div 9^\circ$. Это значение практически совпадает с углом пика рассеяния, образующего так называемое гало Ван Бузена и присущего пирамидальным кристаллическим формам [1]. Происхождение колец большого размера может быть результатом последовательных шагов вторичного рассеяния на таких кристаллах. Кроме того, среди отмеченного в литературе разнообразия углов гало встречаются углы, почти кратные углу гало Ван Бузена. Во всяком случае, похоже, что формы кристаллов, образующие дополнительные кольца глории, достаточно типичны для облаков верхней тропосферы.

Интересно упомянуть еще одно оптическое явление, наблюдаемое в передней, в отличие от глории, полусфере рассеяния солнечного света. Это так называемая иризация облака, т.е. радужная окраска обращенных к Солнцу краев облака либо радужные пятна в слабых облаках. Такие пятна часто возникают на угловом расстоянии $40-5^\circ$ от Солнца, бывают вытянуты в дугу окружности и в противоположность дождевой радуге имеют красную кромку, обращенную к центру (Солнцу). Расчеты показывают, что такие пятна иризации реально могут представлять собой фрагменты радуги 2-го порядка, образованной на сферических частицах с $n = 1,81 \div 1,82$.

5. Обсуждение

Расчеты индикатрис рассеяния света сферическими частицами с различными показателями преломления, выполненные по теории Ми, показали, что в пределах угловых размеров природной глории

(радиус желтого пояса от $\sim 1,5$ до $\sim 3,8^\circ$) пик индикатрисы рассеяния может иметь двойное происхождение. В случае обычной жидкой воды с показателем преломления $n \approx 1,33$ — это корона обратного рассеяния солнечного света каплями практически одинакового диаметра от ~ 8 до ~ 16 мкм. Облака такой микроструктуры в природе слишком маловероятны, чтобы обеспечить типичное появление глории именно на холодных облаках. Однако пик индикатрисы в той же области углов появляется и в том случае, когда показатель преломления рассеивающих сферических частиц составляет $1,81 \div 1,82$ и их размеры превосходят ~ 20 мкм. Из сравнения с независимой геометрической теорией для угла сходящегося пучка лучей, рассеянного сферой, сделан вывод о том, что данная модель относится к радуге первого порядка, сформированной на таких частицах подобно тому, как известная дождевая радуга образуется на каплях обычной воды. В отличие от короны обратного рассеяния, полученная виртуальная модель радуги детально воспроизводит все свойства природной глории. С другой стороны, ранее [4, 5, 18, 19] было экспериментально обнаружено, что капли размерами значительно выше 30 мкм и с аномально высоким показателем преломления являются по меньшей мере типичным атрибутом льдосодержащих облаков, на которых практически всегда наблюдается глория вокруг солнечной тени самолета.

Таким образом, наличие глории на холодном облаке означает, что это облако содержит жидкокапельную фракцию, состоящую из капель A -воды. Угловой размер и ширина кольца, как и его фотометрические и цветовые характеристики, несут уникальную дистанционную информацию о наличии в облаке капель A -воды и об их размерах. Наконец, внешние дополнительные кольца в полной картине глории, вероятнее всего, указывают на присутствие в облаке ледяных кристаллов специфических форм [20].

Тот факт, что на верхней границе облаков, содержащих ледяную фазу, глория при подходящих условиях наблюдается практически всегда, подтверждает прежний вывод о таком свойстве A -воды, как ее конденсационное равновесие с ледяной фазой. Последнее должно означать, что так называемый «квазижидкий» слой, покрывающий поверхность ледяных частиц [13, 14], фактически состоит из A -воды и последняя служит промежуточной ступенью фазового «скачка» по Оствальду в переходе пар — лед. Плотность A -воды, рассчитанная по формуле Лоренц—Лорентца из показателя преломления воды в желтом свете [9], близка к $2,1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, что удовлетворительно согласуется с наиболее достоверными измерениями плотности аморфного льда, составившей около $2,3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ при $\sim 100 \text{ К}$ [6, 10]. Такое сходство служит одним из оснований заключить, что A -вода физически представляет собой расплав твердого аморфного конденсата [8, 9]. Более детальный анализ свойств A -воды и ее места в ряду полиморфных состояний H_2O дается в работе [21].

Перечень физических свойств *A*-воды, установленных к настоящему времени, дается в таблице.

По нашему мнению, наиболее убедительное подтверждение концепции облачной *A*-воды состоит в том, что она предоставляет универсальный ключ к пониманию все еще не решенных проблем физики холодных облаков, таких как аномальная устойчивость смешанного фазового состава слоистообразных облаков; сверхвысокая концентрация облачных кристаллов по сравнению с концентрацией обнаружимых льдообразующих ядер; происхождение так называемого переохлажденного дождя или смешанных зимних осадков и другие труднообъяснимые явления, связанные с холодными облаками. В этот ряд входит и явление глории.

Таблица 1

Экспериментально установленные физические свойства аморфной воды

Параметр	Характеристика	Условие	Примечание
Температура размягчения	(135 ± 1) К	$\eta = 10^{12}$ Н·с·м ⁻²	1
Температура предела текучести	~ 150 К	$\eta = 10^8 \div 10^9$ Н·с·м ⁻²	1
Динамическая вязкость η	< 10 ⁻² Н·с·м ⁻²	$T > 218$ К	1, 2
Плотность	2,3 кг·дм ⁻³	Твердое состояние, $T \approx 100$ К	3
		Жидкое состояние	4
Удельная теплота испарения	$0,55 \cdot 10^6$ Дж·кг ⁻¹ ± 20%	$T = 243$ К	5
Скрытая удельная теплота кристаллизации в лед I	$2,29 \cdot 10^6$ Дж·кг ⁻¹ ± 5%	$T = 243$ К	6
Оптическая форма	Прозрачная, бесцветная		1
Показатель преломления	1,795 ÷ 1,805	Красный свет Желтый свет	7
	1,81 ÷ 1,82		

Примечания: 1 — по [8]; 2 — экстраполяция экспериментальной зависимости $\eta(T)$ из [8]; 3 — по [6]; 4 — расчет из показателя преломления; 5 — по [5]; 6 — разность между теплотой испарения льда I и *A*-воды; 7 — данная статья.

Заключение

В статье показано, что оптическое явление глории на облаках представляет собой радуго, сформированную в рассеянном солнечном свете сферическими частицами крупнее ~20 мкм, обладающими показателем преломления 1,81 ÷ 1,82 в желтом свете. Тем самым получено подтверждение существования в природных льдосодержащих облаках капель жидкой воды в особом фазовом состоянии аморфной воды, или *A*-воды.

Мы убеждены, что концепция *A*-воды должна восполнить недостающее звено в существующих знаниях о холодных облаках и потому заслуживает дальнейшего исследования и внедрения. Полученные результаты показывают, что детальное изучение и мониторинг явления глории представляют большой интерес, так как само ее появление, а также геометрические и фотохроматические характеристики обеспечивают уникальную дистанционную информацию о дисперсных фазах в холодных облаках. Угловые размеры элементов глории могут служить индикатором размеров капель *A*-воды, а ее дополнительные кольца могут обозначать присутствие некоторых форм ледяных кристаллов.

Не исключено, что сферические частицы, оптически обнаруженные в стратосферных облаках Земли и в облачном покрове других планет, также могут состоять из *A*-воды.

1. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.
2. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 428 с.
3. Миннарт М. Свет и цвет в природе. М.: Наука, 1969. 344 с.
4. Невзоров А.Н. Исследования по физике жидкой фазы в льдосодержащих облаках // Метеорол. и гидрол. 1993. № 1. С. 55–68.
5. 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.
6. Скрипов В.П., Коверда В.П. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. М.: Наука, 1984. 231 с.
7. Хьюлст Г., ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. литературы, 1961. 536 с.
8. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 242 с.
9. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 280 с.
10. Angell C.A. Amorphous water // Annu. Rev. Phys. Chem. 2004. V. 55. P. 559–583.
11. Cober S.G., Strapp J.W., Isaac G.A. A case study of freezing drizzle formed through a collision coalescence process // J. Appl. Meteorol. 1996. V. 35. P. 2250–2260.
12. Delsemme A.H., Wenger A. Superdense water ice // Sci. 1970. V. 167. N 3914. P. 44–45.
13. Fletcher N.H. The chemical physics of ice. Cambridge: Cambr. Univ., 1970. 271 p.
14. Jellinek H.H.G. Liquid-like (transition) layer on ice // J. Colloid and Interface Sci. 1967. V. 25. N 2. P. 192–197.
15. Laven P. Simulation of rainbows, coronas, and glories by use of Mie theory // Appl. Opt. 2003. V. 42 N 3. P. 436–444.
16. Laven P. How are the glories formed? // Appl. Opt. 2005. V. 44. N 27. P. 5675–5683.
17. Mazin I.P., Nevzorov A.N., Shugaev V.F., Korolev A.V. Phase structure of stratiform clouds // 11th Int. Conf. on Clouds and Precipitation. Montreal, Canada, 1992. P. 332–335.

18. *Nevezorov A.N.* Permanence, properties and nature of liquid phase in ice-containing clouds // 11th Int. Conf. on Clouds and Precipitation. Montreal, Canada, 1992. P. 270–273.
19. *Nevezorov A.N.* Cloud phase composition and phase evolution as deduced from experimental evidence and physico-chemical concepts // 13th Int. Conf. on Clouds and Precipitation. Reno, Nevada, USA, 2000. P. 728–731.
20. *Nevezorov A.N.* Glory phenomenon informs of presence and phase state of liquid water in cold clouds // *Atmosph. Res.* 2006. V. 82. N 1–2. P. 367–378.
21. *Nevezorov A.N.* Some properties of metastable states of water // *Phys. of Wave Phenomena.* 2006. N 1. C. 45–57.
22. *Pruppacher H.R., Klett J.D.* Microphysics of clouds and precipitation. Dordrecht: Reidel. 1978. 714 p.

A.N. Nevezorov. **Glory phenomenon and a nature of liquid-drop fraction in cold clouds.**

Although the optical phenomenon of glory on cloud tops with negative temperatures is now widely known to be observable from aircraft, the information thereby obtained on cloud microphysics remains not called for. The analysis made in the present work is based on a comparison between the features of the glory phenomenon, geometric theory of bow formation, and Mie scattering theory. The convincing evidence has been provided that this sort of glory forms as a first-order bow from spherical particles with a refractive index of 1.81–1.82 and diameter over 20 μm . Thus obtained are solutions of two interrelated problems: (i) the cold-cloud glory is proved to be a bow formed from spheres with those unusual optical properties, (ii) once more corroboration is gained of earlier discovered existence in cold clouds of droplets of liquid water in specific phase state referred to amorphous water, or *A*-water. Physico-chemical and genetic peculiarities of *A*-water are briefly summarized here. The results obtained show that a detailed study and monitoring of the glory phenomenon are of great interest since the occurrences of the phenomenon itself as well as its geometrical and photo-chromatic characteristics provide unique remote information about the disperse phases of cold clouds. The visible size of the glory can serve as an indicator of the maximum size of *A*-water droplets, and its extra outer rings must reveal the presence of some forms of ice crystals.

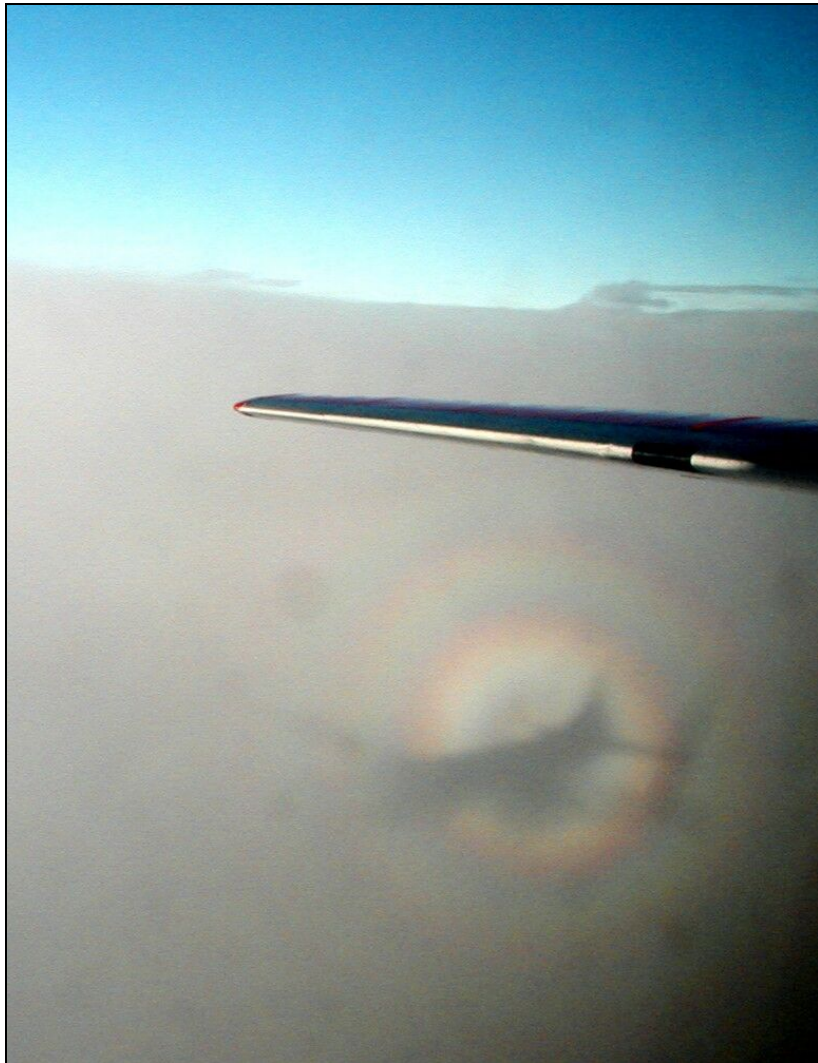


Рис. 1. Глория вокруг тени самолета на облаке (фото А.В. Королева).
Геометрический центр кольца глории соответствует местоположению фотокамеры в самолете