

Доктор физико-математических наук,
кандидат в мастера спорта по альпинизму
С.Н.Нетреба,
ГУ НПО «Тайфун» Росгидромета

Облака на вершинах мира



Альпинист всегда мечтает покорить самую высокую вершину. К сожалению, сейчас сложилась опасная тенденция – плохо подготовленные зарубежные восходители, уплатив весьма солидную сумму за право восхождения на Эверест, часто там остаются навсегда. Более того, даже альпинисты международного класса, успешно штурмовавшие Эверест, весьма туманно представляют, что такое опасные облачные вихри, которые там возникают. Расскажем немного о некоторых из них.

Маунтанадо Эвереста

Маунтанадо — горный облачный вихрь. Коварство маунтанадо Эвереста состоит не только в его внезапности, но и в том, что гигантский облачный пояс охватывает только середину горы, в то время как вблизи вершины и у основания небо безоблачное. Видеозапись показывает, что маунтанадо вращается по часовой стрелке вокруг вершины, а зарождается из-за особенностей геометрии Эвереста. Световой столб — аналог солнечной дорожки на поверхности моря, роль которой в данном случае играют ледяные кристаллы в воздухе. Такие столбы довольно часто сопровождают облачные вихри. Особенность данного столба — в его необычайной яркости, заметной даже при наблюдении сквозь темные очки. Снимки выполнены через каждые 20 минут при восхождении автора на панорамную вершину Калапатар (высота 5500 м).



«Перо» Джомолунгмы

Так тибетцы называют облачный флаг Эвереста, который тянется на десятки километров от вершины. Даже опытные альпинисты и наблюдатели иногда принимают «перо» за снег, сдуваемый с вершины. Однако видеозапись показывает, что оно образуется при конденсации и кристаллизации водяного пара в вихрях спутного (кильватерного) следа. Возникновению «пера» предшествует формирование специфических слоистых и волновых структур, которые были идентифицированы на основе теории и лабораторного эксперимента. Снимки выполнены через каждые 10 минут вблизи монастыря Тьянго-бо на высоте 4100 м.

Кандидат
физико-математических наук
А.Н.Невзоров,
ведущий
научный сотрудник
Центральной
аэрологической обсерватории
Росгидромета

Из чего состоят облака



РАССЛЕДОВАНИЕ

Наука об облаках

В среднем около 40% поверхности нашей планеты покрыты облаками самых разнообразных форм, в которых содержится порядка 10^{10} тонн чистой воды на планете. При этом более двух третей объема облаков находится при отрицательной температуре.

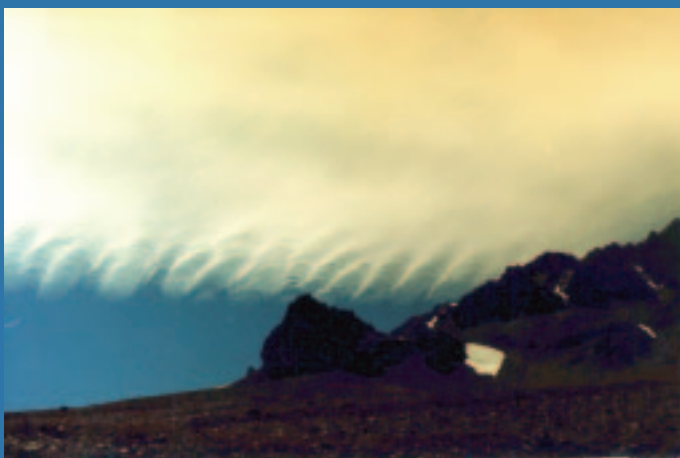
Сегодня облака — не только тема для стихов и светских бесед о погоде. Эти эфемерные, капризные, а порою грозные создания влияют на радиосвязь и радиолокацию, авиацию и космонавтику, гидротехнику, агротехнику, а также, как ни странно, на политику. К примеру, только создав правильные модели облаков, удастся корректно подсчитать тепловой баланс планеты, а ведь на этих расчетах основаны политические решения, направленные на преодоление последствий глобального потепления.

Лишь сравнительно недавно, в 40-х годах XX века, физику облаков выделили в самостоятельную науку. Ее фундаментом послужили априорные концепции, вытекающие из прочных физических предпосылок. Однако последовавшие натурные эксперименты позволили не только уточнить детали исторически сложившихся представлений, но и выявить новые свойства облаков. Зачастую они расходятся с господствующими теориями, а порой вступают с ними в серьезное противоречие. К сожалению, большинство ученых, причастных к облачной науке, предпочитают не замечать подобную ситуацию, и лишь меньшинство, в том числе автор этих строк, пытаются дать системное объяснение всей совокупности явлений, связанных с облаками.

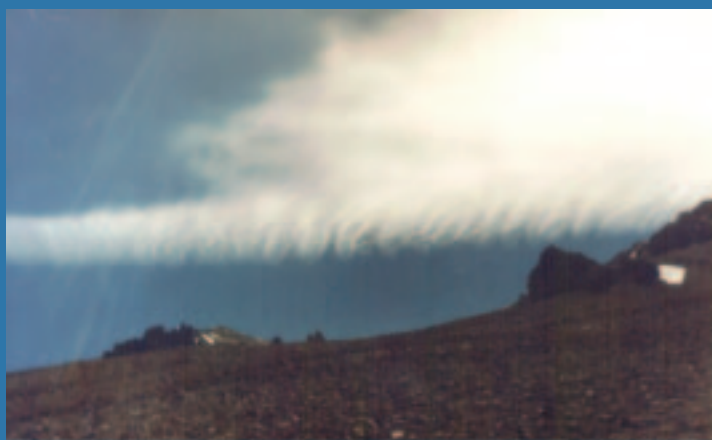
Аномалии холодного облака

В метеорологии существует несколько способов разделить облака на виды. Наиболее простая классификация — по температуре, согласно которой облака делят на теплые и холодные, то есть «живущие» соответственно при положительных и отрицательных температурах по Цельсию.

Теплые облака и туманы состоят из микронных капелек самой обыкновенной воды. Их простейший

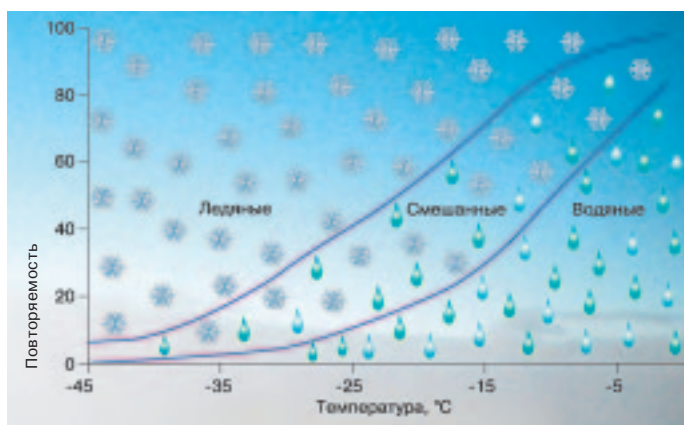


ФОТОИНФОРМАЦИЯ



Шквал Аконкагуа

Аконкагуа (высота 6990 м) — высшая точка Западного полушария. Эта вершина была бы относительно простой для восхождения, если бы не крайне опасные шквальные ветры. Шквальные облака Аконкагуа состоят из цепочки туго скрученных спиральных вихрей, и, когда эта цепочка разрывается, часть вихрей опускается и быстро скатывается вниз по склону. Хотя некоторые особенности такого шквала и воспроизводятся в экспериментах, автору неизвестна природа его внезапной неустойчивости. Можно только предположить, что появление светового столба в таком облаке служит своеобразным сигналом тревоги для горовосходителей. Снимки выполнены через каждые 10 минут с высоты 5200 м при восхождении на Аконкагуа.



1
Эта классическая диаграмма построена в середине прошлого века по визуальным наблюдениям

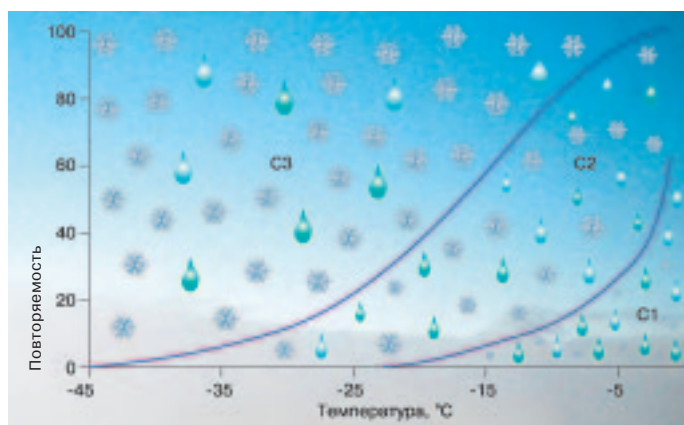
аналог — «пар» из носика кипящего чайника. Что касается холодных облаков, то по существующим в метеорологии представлениям они могут состоять или из одних жидких капель сферической формы, или только из ледяных кристаллов, или из тех и других вместе. В последнем случае их называют смешанными по фазе. Аксиоматически принимается, что жидкая фаза во всех холодных облаках представляет собой ту же воду, что и в теплых, но находящуюся в переохлажденном состоянии. Казалось бы, все очень просто. Однако не будем спешить с выводами.

Дело в том, что каплям переохлажденной воды трудно выжить в холодном облаке и вообще невозможно — в одном облаке с ледяными частицами. Во-первых, часть капель в этих условиях попросту замерзает. Вероятность их замерзания растет с понижением температуры облака от нуля при 0°C до 100% при минус 40°C и ниже. Во-вторых, при одной и той же температуре парциальное давление насыщенного пара над водой выше, чем над льдом. Поэтому при появлении ледяных частиц в капельном облаке сразу же начинается конденсация пара на лед, что вызывает испарение жидких капель. Такая фазовая перегонка, или переконденсация, называемая процессом Бергерона — Финдайзена, положена в основу современной науки о холодных облаках как фактор, обязанный за считанные минуты переводить двухфазное облако в конечно устойчивое ледяное состояние. Однако все это в теории. А что происходит в действительности?

Более полувека назад выдающийся исследователь облаков А.М.Боровиков, обработав тысячи случаев наблюдений фазового состояния облаков с исследовательских самолетов, получил температурную диаграмму его повторяемости (рис.1). Согласно этим, ставшим классическими, данным, капельные и смешанные холодные облака встречаются гораздо чаще и живут неизмеримо дольше, чем предсказывают лабораторные опыты и теоретические расчеты. Это подтверждают и современные, более совершенные наблюдения. Такое разительное противоречие между теорией и опытом побудило нас провести в рамках тематики Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) Росгидромета специальные исследования свойств естественных холодных облаков и заключенной в них жидкой воды.

Лед и вода холодных облаков

По существующей в ЦАО традиции, объектом исследований стали облака слоистых форм, которые преобладают на небосводе, живут дольше всего (часы и сутки) и дают большинство всех осадков в наших широтах. Специально оборудованные самолеты Ил-18Д пересекли при-



2
А эта диаграмма построена в конце XX века на основании точных измерений

мерно 350 отдельных облаков с температурами от 0°C до минус 55°C при суммарной протяженности полетов в облаках около 20 тысяч километров.

Полученные данные привели в смятение даже опытных специалистов: оказалось, что почти все холодные облака содержат одновременно и воду, и лед, то есть принадлежат к числу смешанных. Тщательный анализ позволил выделить три базовых типа их фазово-дисперсной структуры (рис. 2).

Те холодные облака, которые традиционно считаются чисто водяными, на самом деле содержат ледяные частицы с размерами менее 20 мкм, не различимые современными стандартными методами. Их мы отнесли к структурному типу С1. Неотъемлемый атрибут микроструктуры двух других типов смешанных облаков, С2 и С3, — ледяные кристаллы, размер которых бывает существенно больше не только 20 мкм, но и 200 мкм; вот почему их легко обнаружить. По этому признаку объединим облака типов С2 и С3 под термином «льдосодержащие облака» (ЛСО). Разница между двумя типами ЛСО состоит в том, что только в структуре С2 приборы обнаруживают частицы с размерами менее 20 мкм. Все эти структуры могут перемежаться в одном и том же облаке, а переходные формы между ними занимают малую часть пространства.

На небосводе облака структуры С2 выглядят плотными, непрозрачными и по виду мало отличаются от теплых облаков и облаков структуры С1. Структура С3 обычно представлена полупрозрачными или совсем слабыми облачными слоями, которые расположены на самых больших высотах и далеко не всегда видимы с Земли сквозь нижележащие плотные облака. Смешанные облака типа С2 — это наиболее вероятный источник осадков в виде дождя либо снегопада, в зависимости от приземной температуры.

Аппаратура и методика исследований

Исследования выполнены с помощью разработанного в ЦАО самолетного приборного комплекса, который был создан к концу 1980-х годов и до сих пор остается уникальным по функциональным возможностям и техническим характеристикам (к сожалению, ныне он бездействует в связи с ликвидацией спецотряда исследовательских самолетов). Входящие в комплекс приборы могут непрерывно измерять целый набор облачных характеристик на трассе полета. Важнейшие из них таковы:

- фазовый состав, концентрация и спектр размеров облачных частиц от 20 до 200 мкм; все это устанавливают по поляризационным и амплитудным эффектам рассеяния света индивидуальными частицами;
- концентрация и спектр размеров частиц крупнее 200 мкм (теневой оптический метод);

Изучение ЛСО дало очередной удивительный результат. Оказалось, что вопреки правилу Бергерона — Финдайзена жидкие капли в них не только сохранились, но и увеличились в размерах более чем на порядок, до сотен микрон в диаметре! Кстати, сферические частицы с размерами от десятков до сотен микрон замечали в ЛСО и прежде. Они, как правило, присутствовали в пробах облачных частиц как в обособленном виде (непонятно, в жидкой или ледяной фазе), так и в виде примерзших к ледяным кристаллам шариков. Однако эти факты почему-то никто не признавал закономерными и тем самым заслуживающими серьезного внимания.

Кризис облачного знания

Способность структуры С1 существовать по многу часов не вызывает особых вопросов. Во-первых, ледяная фаза возникает практически одновременно с зарождением капельного облака. Во-вторых, пока частицы достаточно малы и потому неподвижны относительно воздуха, процесс Бергерона — Финдайзена протекает в очень медленном режиме молекулярной диффузии. В результате на начальном этапе развития облака капли растут быстрее, чем испаряются. С ростом размера капель и кристаллов ускоряется их осаждение под действием силы тяжести, а вызванные этим эффекты обдува и перемешивания воздуха на порядки увеличивают скорость массообмена. Опережающий рост ледяных частиц приводит к лавинообразному переходу облака в стадию ЛСО. При этом, казалось бы, рост капель должен смениться их испарением вплоть до полного исчезновения.

Однако в ЛСО жидкие капли не только сохраняются, но даже увеличиваются в размерах; при этом общая масса воды в каплях оказывается сравнима с массой ледяной компоненты. Более того, с увеличением содержания льда в облаке увеличивается и содержание жидкой воды, хотя процесс Бергерона — Финдайзена должен давать обратный эффект. Добавим сюда постоянное наличие жидких капель в облаках с температурами ниже минус 40°C — доказанным пределом физического существования переохлажденной жидкой воды, и получится, что свойства реальных облаков отнюдь не соответствуют установке на хорошо известные физико-химические свойства H_2O .

Вплоть до недавнего времени ведущие исследователи или публично не признавали эти факты, или обходили их вниманием, или, в лучшем случае, выдвигали несостоятельные гипотезы вроде влияния растворимых примесей. Самыми любимыми конструкторами были сомнения в достоверности измерений и их интерпретации (в общем случае не совсем обосновательные). Но мы попробуем пойти другим путем.

— водность (массу конденсированной воды в кубометре воздуха) жидкой и ледяной дисперсных фаз по отдельности находят по теплоте испарения облачной воды, осевшей из встречного потока на горячие тела специальной формы;

— оптическая плотность облачной среды, которую измеряют по ослаблению искусственного светового потока.

Такой набор параметров позволил разными методами (а это снижает возможность ошибки) получить одни и те же наиболее важные результаты, в частности определить наличие в облаке каждой из дисперсных фаз. С их помощью можно также оценить характеристики облаков, не охваченные прямыми измерениями, например средний размер облачных капель. В некоторых случаях удается по измеренным спектрам размеров частиц рассчитать значения интегральных параметров — водности и оптической плотности, чтобы сравнить их с непосредственно измеренными величинами.



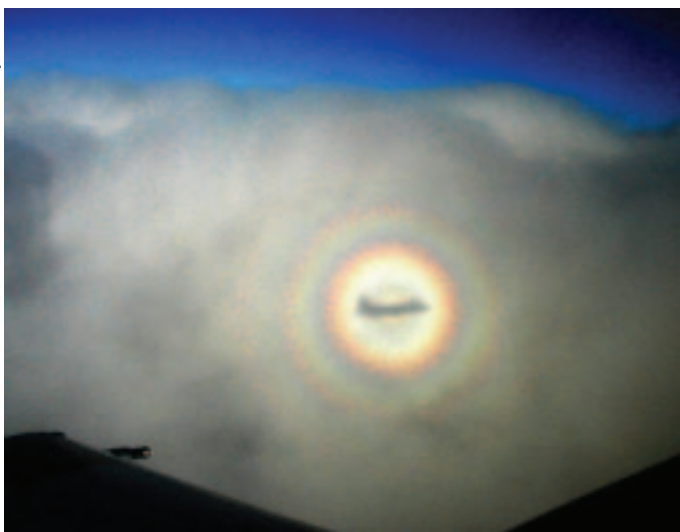
Допустив взаимосвязанность описанных свойств жидкой дисперсной фазы, легко увидеть в них полный набор признаков ее конденсационного равновесия с ледяной фазой. Остается выбор между двумя версиями: либо наблюдаемая картина воспроизводится раз за разом под влиянием каких-то разнородных факторов, не исключая артефактов, либо она закономерно связана с особыми свойствами жидкой фазы в ЛСО. Трудно сказать, которая из этих версий выглядит фантастичнее. Но нам вторая версия показалась логичнее, тем более что она подтверждается экспериментальными свидетельствами.

Действительно, если предположение об особых свойствах жидкой воды в ЛСО верно, то по основным физическим характеристикам она должна отличаться от обычной воды. Чтобы убедиться в этом, мы использовали тот факт, что градуировочные характеристики наших приборов напрямую зависят от того или иного свойства вещества капель: например, для термического измерителя водности — от теплоты испарения L и плотности ρ , а для светорассеивающего спектрометра частиц — от показателя преломления n . Сначала эти приборы были отградуированы для обычной воды: $\rho=1$ г/см³, $n=1,33$ и $L=2580$ Дж/г.

При этих условиях мы сравнили значения интегральных параметров облаков (водности и оптической плотности), с одной стороны, измеренные непосредственно, а с другой — рассчитанные по измеренным размерам облачных частиц. Для этого были использованы результаты одновременных измерений всеми приборами в облаках структуры С3. Из них отобрали те случаи, в которых размеры капель полностью укладывались в диапазон измерений светорассеивающего спектрометра частиц, а влияние ледяной фазы на показания приборов было минимальным и поддавалось исключению. И оказалось, что расчетные значения оптической плотности, обусловленной только жидкими каплями, систематически превосходят измеренные примерно в семь раз, а для водности жидкой фазы подобные расхождения достигли 40-кратной величины! Такие знаки и величины расхождений, как и их постоянство, трудно объяснить методическими ошибками.

Мы пришли к единственно возможному выводу: вещество облачных капель обладает иными свойствами, нежели предполагалось изначально. Возникающее предположение о влиянии растворенных примесей на свойства обычной воды быстро отпадает, ибо если вещество, способное так изменить свойства воды, и существует в атмосфере, то в заведомо ничтожной концентрации. Еще труднее предположить, что химическая формула жидкокапельной субстанции в ЛСО отличается от H_2O .

Чтобы оценить свойства этой, как видно, особой модификации воды, пришлось решать систему уравнений, которая включала в себя зависимость градуировочной характеристики каждого прибора от свойств вещества капель, а также связь показателя преломления n с плотностью вещества капель согласно известной формуле Лоренц-Лорентца для H_2O . Не углубляясь в детали сложного многоходового решения, назовем его конечные результаты. Оказалось, что согласие между измеренными и расчетными данными



3

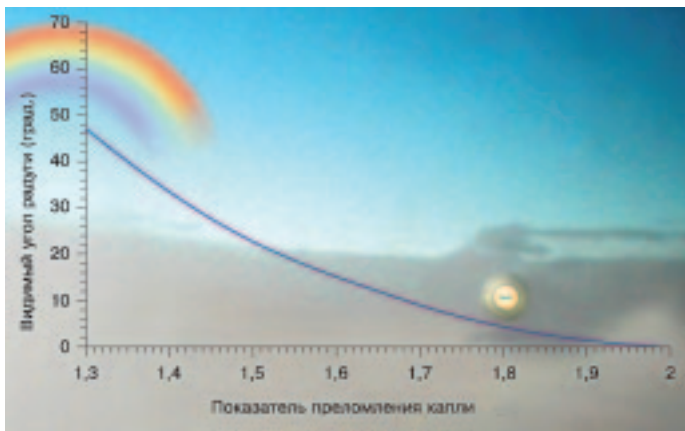
Снимки сделаны с самолета, летящего невысоко над облаком. Центр глории совпадает с теневой проекцией объектива фотокамеры. Из окна самолета она видна со средним (по желтому кольцу) угловым радиусом около трех градусов, то есть ее угловой размер составляет примерно шесть градусов. Это в десять раз больше видимого размера диска Солнца или Луны

достигается, если показатель преломления n жидких капель лежит в пределах 1,8—1,9, что соответствует плотности капельной воды 2,1—2,2 г/см³. Тогда для удельной теплоты ее испарения при минус 30°C получается значение 550±90 Дж/г — это примерно в пять раз меньше, чем у обычной воды, и близко к характеристике такого летучего вещества, как ацетон. Напомним, что более летучая жидкость испаряется быстрее, но быстрее и конденсируется. Следовательно, и капли растут быстрее.

Как мы видим, разброс найденных величин невелик, и это исключает влияние случайных ошибок измерений. В то же время полученная плотность оказалась весьма близкой к плотности твердого конденсата, осажденного из водяного пара при температуре около 100 К, а именно 2,32±0,17 г/см³ (А.Н. Delsemme, А. Wenger, «Superdense water ice», «Science», 1970, т. 167, № 3914). Такое сходство позволяет предположить, что капельная вода в ЛСО представляет собой расплав этого самого конденсата. Но пожалуй, самое убедительное подтверждение наших результатов предоставило известное природное явление, связанное с холодными облаками. Речь идет об обыкновенной и в то же время таинственной глории.

Что скрывается за глорией в облаках

Глорией называется более или менее яркое радужное кольцо вокруг тени наблюдателя на освещенной солнцем верхней границе тумана или облака. В некоторых случаях



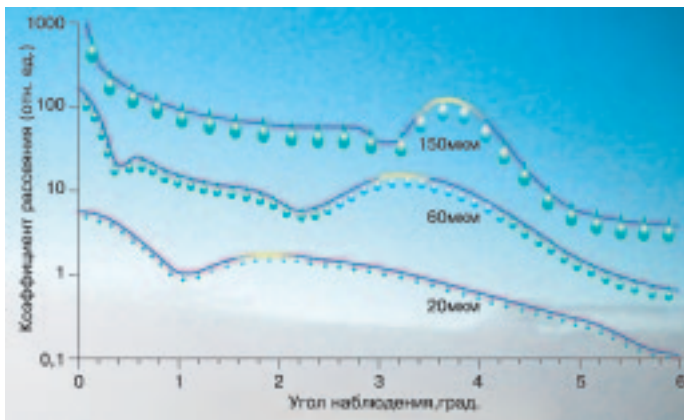
4 Радуга первого порядка лежит в области углов глории при показателе преломления капеле около 1,8

это кольцо окружено одним или несколькими более слабыми кольцами (рис. 3). В древности такое явление наблюдали только с высоких гор и придавали ему мистическое значение, называя «великолепием Будды» или «призраком горы Брокен». Еще бы — вид великана с сияющим венцом вокруг головы дает немалый простор для фантазии. На самом же деле великаном была тень самого наблюдателя на облаках, образованная лучами низко расположенного Солнца, а венцом — всего лишь рассеянный в том же облаке свет.

Ныне глаорию легко наблюдать с самолета, она возникает вокруг его бегущей тени на высоко расположенных облаках и должна быть хорошо знакома как пилотам, так и любознательным пассажирам воздушного флота. И не может не показаться странным то обстоятельство, что механизм формирования и свойства такого, в сущности, обыденного явления до сих пор остаются неизученными. Сама возможность того, что глория несет в себе какую-то информацию о внутреннем строении облака, вызывает вопрос: почему она до сих пор не привлекла серьезного внимания исследователей облаков?

Главное связанное с глорией противоречие состоит в том, что, по признанию ученых-оптиков, она образуется в результате рассеяния солнечного света на сферических частицах, и в то же время, по мнению ученых-облачников, в облаках, на которых она наблюдается, таких частиц в виде жидких капель быть не может. В итоге отсутствует физическая интерпретация явления, которая исчерпывающе объясняла бы все его особенности и связывала их с микрофизическим строением облака.

А его основные особенности таковы. Во-первых, цветная глория образуется только в облаках, у которых температура на верхней границе ниже 0°C. Во-вторых, ее основное кольцо обладает такой же красной внешней кромкой и поляризовано в том же направлении, что и в дождевой радуге. В-третьих, диапазон угловых радиусов (угловым радиусом оптики называют угол между линиями, которые соединяют глаз наблюдателя с точками на окружности и в ее центре. — Примеч. ред.) среднего, желтого,



5

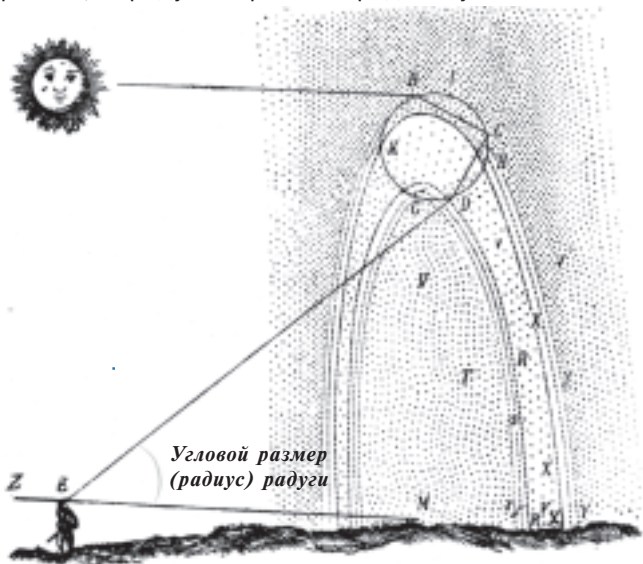
Результаты расчета по теории Ми рассеяния света каплями с показателем преломления 1,81

пояса составляет от $1,6^\circ$ до $3,8^\circ$ независимо от удаления наблюдателя от облака. В-четвертых, яркость и цветовой контраст глории в целом заметно усиливаются с увеличением ее углового радиуса.

Некоторые попытки объяснить явление глории были основаны на использовании строгой теории рассеяния света сферическими частицами, известной как теория Ми. Эта теория действительно предсказывает появление максимума яркости света, рассеянного каплями обычной воды (то есть с показателем преломления $n=1,33$), в наблюдаемой для глории области углов. Однако для этого облако должно состоять из капель практически одинакового размера в интервале 8—12 мкм. В природе встретить такое облако даже теоретически невозможно. Кроме того, у «теоретической» глории при $n=1,33$ все свойства, кроме углового размера и цветовой палитры, отличаются от перечисленных выше. Но самое удивительное (и никакая теория этого не объясняет) — почему глория в описанном виде появляется только при отрицательной температуре рассеивающих сфер?

Любому из нас прекрасно известен другой эффект обратного рассеяния света каплями обычной ($n=1,33$) воды. Это дождевая радуга, видимая в противоположной от солнца стороне. Ее угловой радиус $41\text{—}42^\circ$. Отчетливая дождевая радуга образуется при рассеянии прямого солнечного света множеством капель дождя или мороси с размерами свыше 50 мкм. Механизм ее формирования таков. Луч света, падающий на отдельную каплю, частично проникает в нее, затем частично отражается от поверхности внутри капли, после чего (опять же частично) выходит наружу (рис. 6). В глаз наблюдателя попадают сходящиеся пучки от тех капель, которые расположены на образующей конуса с вершиной в зрачке. Угол при этой вершине равен угловому радиусу радуги. Так формируется природная радуга — геометрическая область повышенной яркости на рассеянном световом фоне. Поскольку показатель преломления и, следовательно, угол радуги зависят от длины световой волны, то солнечный свет раскладывается в спектр. Порой можно увидеть дополнительные менее яркие дуги: это радуги более высоких порядков, образованные лучами, испытавшими несколько внутренних отражений.

На анализе хода лучей построена геометрическая теория, которая устанавливает зависимость углов радуги от показателя преломления вещества частицы (рис. 4). Легко убедиться, что эта теория отображает существование при $n=1,33$ радуги первого порядка с углом около 41° .



6
Так Рене Декарт представлял себе образование дождевой радуги. Линия ZM соединяет солнце, зрачок и центр радуги



РАССЛЕДОВАНИЕ

Но главное для нас состоит в том, что эта же теория обнаруживает наличие радуги первого порядка именно в области углов, характерной для глории, если показатель преломления рассеивающих сфер несколько превосходит 1,8.

Однако геометрическая теория радуги не учитывает влияния размеров формирующих ее частиц и никак не объясняет наблюдаемый разброс углового размера глории. И здесь на помощь снова приходит теория Ми. На рис. 5 представлен фрагмент угловой функции коэффициента рассеяния в области углов глории, рассчитанной по формулам Ми для различных размеров сферических частиц с показателем преломления 1,81. Заметный пик на кривой появляется только при диаметрах частиц свыше 20 мкм. С увеличением размера частицы значение угла для максимума пика увеличивается, а сам пик становится выше и сужается. Это означает, что с увеличением углового радиуса радуги усиливаются и ее яркость, и цветовой контраст. Согласно расчету, поляризация света в пике яркости одинакова для радуги-глории и дождевой радуги. Подобное поведение расчетной радуги для $n=1,81$ полностью соответствует отмеченным выше свойствам природной глории. Что касается эпизодически появляющихся дополнительных колец в полной картине глории, то расчет по теории Ми их не обнаруживает. Происхождение этих колец удастся объяснить вторичным рассеянием лучей радуги ледяными кристаллами.

Полученные результаты позволяют утверждать, что глория — это радуга обратного рассеяния от сферических капель с показателем преломления $n=1,81\text{—}1,82$. Плотность вещества этих капель, оцененная по формуле Лоренц-Лорентца применительно к H_2O , оказывается близкой к $2,1 \text{ г/см}^3$. Такая жидкая вода находится в конденсационном равновесии с кристаллическим льдом и способна сохранять свое состояние по крайней мере до минус 55°C . Механизм образования такой фазовой модификации воды и ее место в фазовой иерархии вещества H_2O уже выходят из узких рамок физики облаков и становятся проблемой физической химии воды.

Что еще можно прочитать о необычной воде и об удивительных оптических явлениях в облаках
А. Н. Невзоров. Исследования по физике жидкой фазы в льдосодержащих облаках. Метеорология и гидрология, 1993, № 1

М. Миннат. Свет и цвет в природе. М.: Наука, 1969

