



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии климатологии и охраны атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
бакалаврская работа

На тему: «Оптические явления в облаках и атмосфере»

Исполнитель Андрианова Елизавета Сергеевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент  
(учебная степень, ученое звание)

Кашлева Лариса Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(учебная степень, ученое звание)

Сероухова Ольга Станиславовна  
(фамилия, имя, отчество)

«07» июня 2022 г.

Санкт-Петербург  
2022

## Содержание

Введение.....	3
I. Физические характеристики оптических явлений в облаках и осадках... 4	
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Радуга.....	4
1.3. Гало.....	17
1.4. Венцы.....	28
II. Расчет параметров оптических явлений на основании геометрической оптики и дифракции света. ....	33
2.1. Влияние размеров капель осадков на физические характеристики радуги.....	33
2.2. Влияние расположения и формы кристаллов в облаке на образующиеся формы гало.....	38
2.3. Влияние водяных капель и ледяных кристаллов на характеристики венцов.....	40
III. Анализ зависимости оптических явлений от микрофизических характеристик облаков.....	44
3.1. Определение микрофизических характеристик облака в зависимости от формы и вида радуги.....	44
3.2. Определение микрофизических характеристик облака в зависимости от видов гало.....	52
3.3. Определение микрофизических характеристик облака в зависимости от формы, вида и способа образования венцов.....	53
Заключение.....	56
Список литературы.....	58

## **Введение**

Оптические атмосферные явления вызваны преломлением, отражением, рассеянием и дифракцией света в облаках и осадках в атмосфере. При помощи оптических явлений можно сделать вывод не только о состоянии соответствующих слоев атмосферы, но и использовать для прогнозирования условий погоды. Этим определяется актуальность исследования оптических явлений в облаках и осадках.

Целью представленной работы является изучение оптических явлений в облаках и осадках для характеристики микрофизического строения облаков.

Для проведения работы были выполнены следующие задачи:

1. Изучение теоретического материала о возникновении оптических явлений;
2. Расчет параметров оптических явлений на основании использования теории геометрической оптики и дифракции света.
3. Анализ полученных результатов с целью определения микрофизических характеристик строения облаков.

В представленной работе были изучены условия возникновения радуг, гало и венцов.

Работа состоит из трех глав. В первой главе описаны физические характеристики оптических явлений и способы их образования. Во второй главе произведены расчеты параметров оптических явлений. В третьей главе приведен анализ зависимости оптических явлений от параметров облака.

В работе показано как микроструктура облаков и осадков определяет исследуемые оптические явления.

# 1.ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ОБЛАКАХ И ОСАДКАХ.

## 1.1Общие сведения.

Оптические атмосферные явления- это явления, возникающие в результате воздействия окружающей среды на свет.

Для лучей света, исходящих от Солнца, либо других небесных тел, атмосфера представляет собой своего рода оптическую систему с регулярно меняющимися параметрами. Находясь на их пути, он отражает часть света, рассеивает его, пропускает через всю толщу атмосферы, обеспечивая освещение земной поверхности, при определенных условиях разбивает ее на составляющие и меняет ход лучей, тем самым вызывает различные оптические явления.

В зависимости от причин возникновения все оптические явления делят на четыре группы:

- 1) Явления, определенные рассеиванием света в атмосфере (сумерки и заря)
- 2) Явления, вызванные преломлением световых лучей в атмосфере, то есть рефракцией (миражи, мерцание звезд)
- 3) Явления, вызванные преломлением и отражением световых лучей на каплях или кристаллах облака (радуга, гало)
- 4) Явления, вызванные дифракцией света в облаках и в тумане (венцы, глории)

## 1.2 Радуга.

Радуга- это атмосферное явление, которое наблюдается при освещении ярким источником света множества водяных капель и представляет собой каустику, возникающую при преломлении и отражении внутри капли плоскопараллельного пучка света.

Радуга выглядит как дуга или круг, состоящая из цветов спектра видимого излучения. Наблюдается в стороне, противоположной Солнцу, на фоне дождевых облаков или дождя. Радуга обычно располагается на расстоянии в один- два км от наблюдателя.

Центр радуги находится на противосолнечной линии. Противосолнечная линия- это прямая, соединяющая Солнце и глаз наблюдателя (Рис.1.2.1).

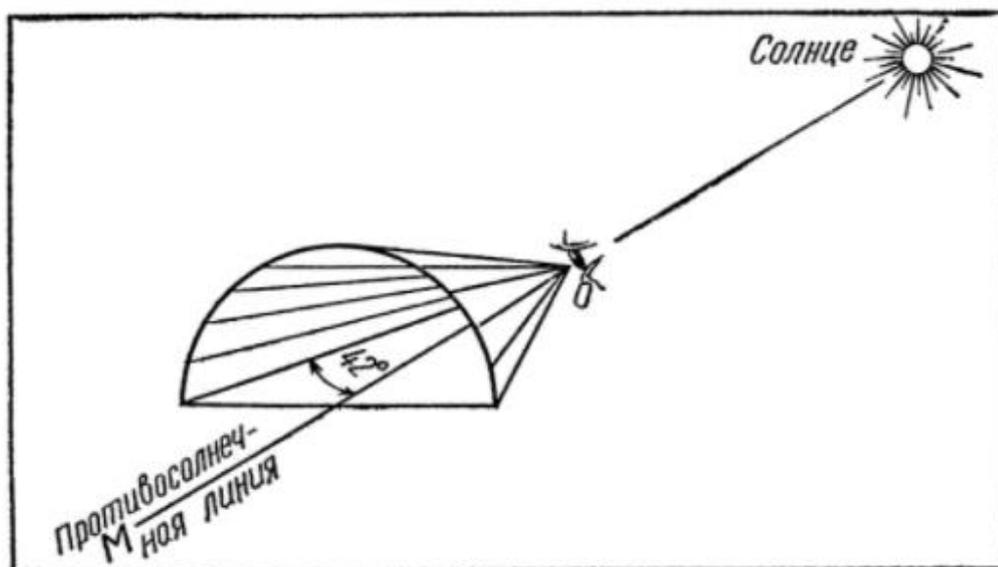


Рис.1.2.1 Схема радуги

Когда солнце восходит, противосолнечная точка находится на линии горизонта, поэтому радуга имеет вид полуокружности. Чем выше уровень поднятия Солнца, тем сильнее противосолнечная точка опускается ниже горизонта, из-за этого размер радуги уменьшается и она выглядит только как часть окружности. [1]

Самым распространенным видом радуги является первичная радуга. В ней цветные полосы различаются по яркости, но их порядок всегда одинаковый. Внутри дуги находится фиолетовая полоса, она переходит сначала в синюю, затем в зеленую, желтую и оранжевую, снаружи радуги находится красная полоса. Реже можно заметить еще одну, вторичную, менее яркую радугу, находящуюся выше первой. Во вторичной радуге цветные полосы располагаются в обратном порядке. Область, расположенная между

первичной и вторичной радугами заметно темнее окружающего неба, и даже когда вторичная радуга не различается, у первичной хорошо выражены светлая и темная области. Эту область называют Александровой полосой, в честь древнегреческого философа Александра, который впервые описал ее в двухсотом году нашей эры (Рис.1.2.2).

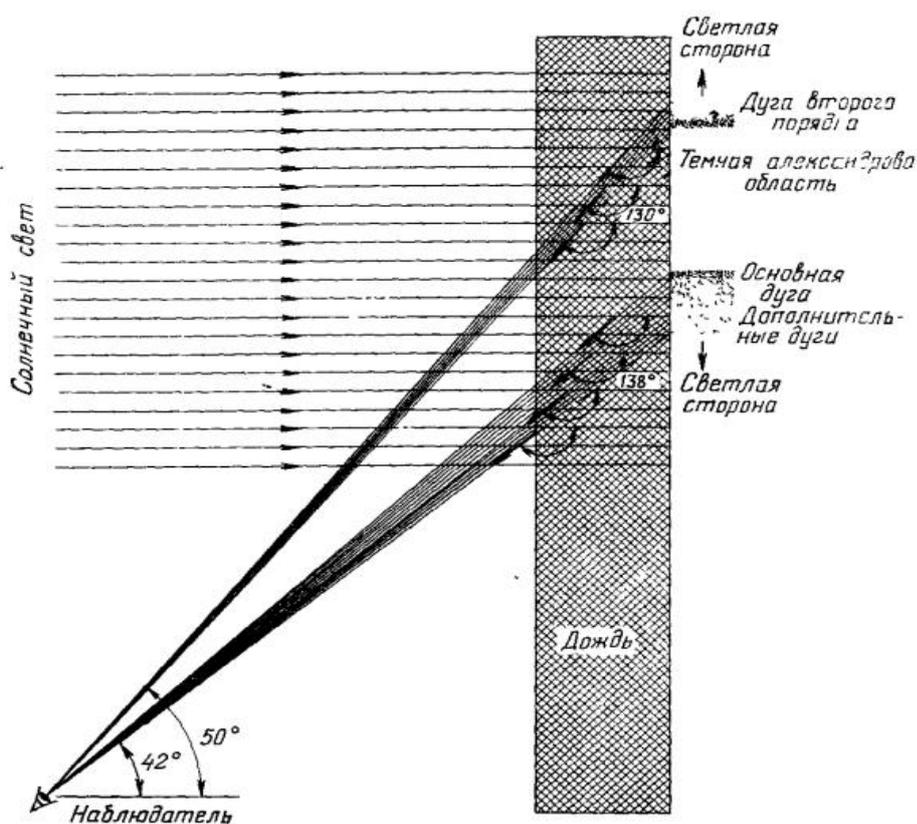


Рис.1.2.2 Геометрия радуги

При освещении солнечными лучами слабый туман, могут образоваться белые радуги, которые называют туманными радугами. При этом радиус капель, из которых состоит туман, не должен превышать 0,025 мм. Помимо основной радуги в виде блестящей белой дуги с едва заметным желтым краем прослеживается иногда слабо окрашенные вспомогательные дуги: очень слабая голубая или зеленая дуга, а затем бледно- красная.

Подобно солнечным, возникают и лунные радуги. Они слабее и появляются только при полной Луне. Лунные радуги явление куда более редкое, чем солнечные. Для их возникновения необходимо выполнение двух условий:

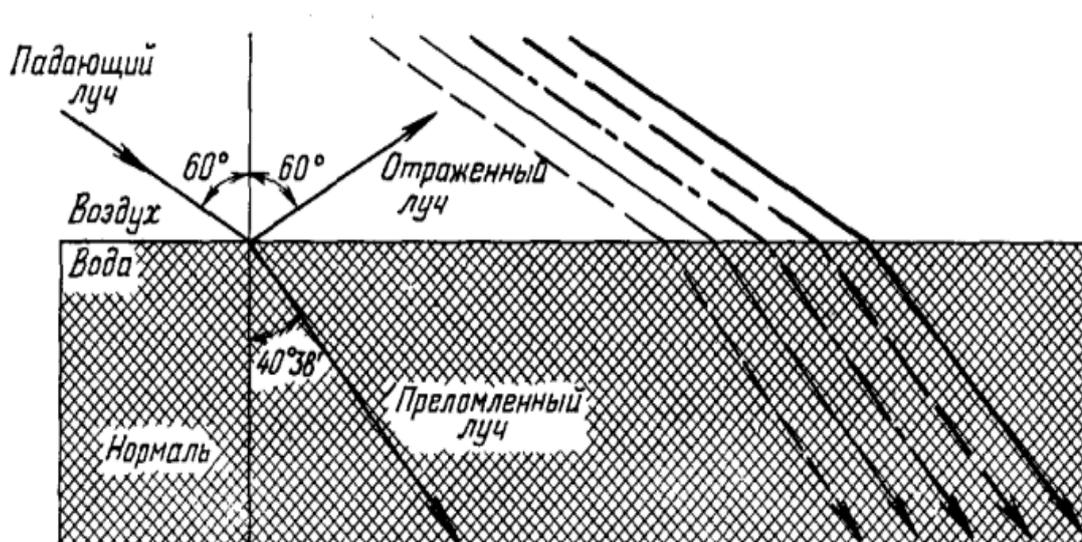
полная Луна, не перекрытая облаками и выпадение ливневого дождя или полос его падения, не достигающих земли.

Радуги, образованные лунными лучами, не имеют радужного спектра и выглядят как совершенно белые дуги. Отсутствие красного цвета у лунных радуг даже при крупных каплях дождя объясняется тем, что при низком уровне освещения ночью полностью теряется чувствительность глаза к лучам красного цвета.

Если радуга появляется за пять или десять минут до захода Солнца, то наблюдается только красный спектр. Это связано с тем, что при опускании Солнца за горизонт, все цвета исчезают, и радуга становится очень яркой и может наблюдаться даже спустя несколько минут после заката.

Причиной возникновения радуги являются лучи света, прошедшие через каплю и претерпевшие одно отражение от ее внутренней поверхности. Вторая дуга образована светом, который отражается дважды. При каждом отражении, интенсивность света ослабляется. Поэтому вторая дуга менее яркая, чем первая.

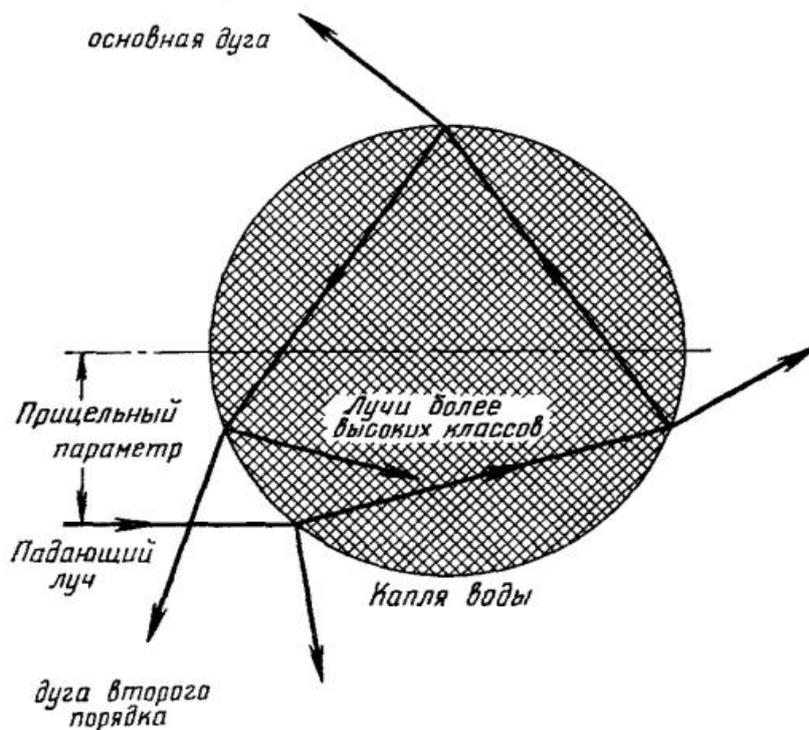
Как было сказано ранее, природа радуги определяется фундаментальными законами взаимодействия света с прозрачной средой, то есть законами отражения и преломления (Рис.1.2.3).



### Рис.1.2.3 Отражение и преломление света на границе между воздухом и водой

Закон отражения состоит в том, что угол отражения света должен быть равен углу его падения. Закон преломления более сложен, так как зависит от свойств той среды, в которой свет распространяется. Скорость света в вакууме определена и является константой, но в материальной среде его скорость зависит от свойств самой среды. Отношение скорости света в вакууме и скорости света в материальной среде называется показателем преломления среды. Для воздуха показатель преломления чуть больше единицы, а для воды примерно 1,33. В связи с этим, проходя из воздуха в воду, луч света на границе затормаживается. Если он попадает на границу двух сред наклонно, то изменение скорости приводит к изменению его направления. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления будет равен отношению показателей преломления этих сред. Это правило является законом Снеллиуса.

Простейшее рассмотрение свойств радуги основывается на использовании законов отражения и преломления применительно к лучу, который распространяется в капле воды. Пусть капля является сферической, то все направления в ней одинаковы и путь луча характеризуется его расстоянием от центра капли (параллельным параметром). Он меняется в пределах от нуля, когда луч проходит через центр капли, до радиуса, когда луч касается ее поверхности. Достигая поверхности, луч частично отражается. Эти рассеянные лучи представляют собой свет, который непосредственно отражен каплей. Оставшаяся часть света попадает внутрь, преломляется и отражается от внутренней поверхности капли. Этим процессом определяется первичная радуга. При следующем столкновении с внутренней поверхностью, с оставшейся в капле частью луча происходит то же самое. В результате этого процесса появляется серия рассеянных лучей, интенсивность которых быстро убывает по мере роста количества внутренних отражений. Если рассеянные лучи претерпели до выхода из капли два отражения, то появляется вторичная радуга (Рис.1.2.4).



Дкт

Рис.1.2.4 Траектории световых лучей, проходящих через каплю согласно законам оптики.

Поскольку капля освещается солнечным светом равномерно, свет рассеивается ею во всех направлениях. Если рассеянные лучи прошли через каплю и однократно отразились, то угол рассеяния достигает минимума в  $138^\circ$ , при значении прицельного параметра порядка  $7/8$  от радиуса и затем снова начинает возрастать. У рассеянных лучей, отраженных дважды, при нулевом прицельном параметре, угол отражения равен нулю, затем он возрастает до максимума, равного  $130^\circ$ , и при последующем увеличении прицельного параметра снова уменьшается до нуля.

Поскольку солнечный свет освещает каплю равномерно, все прицельные параметры равновероятны. Тогда поток рассеянного света будет максимален в том направлении, которое соответствует наиболее слабой зависимости угла рассеяния от прицельного параметра. Другими словами, максимальная скорость достигается тогда, когда в одном направлении собирается свет, рассеянный из наиболее широкого интервала прицельных параметров. Угол рассеяния меньше всего зависит от прицельного параметра вблизи

экстремальных точек. Этим объясняется расположение первичной и вторичной радуги (Рис.1.2.5).

Угол рассеяния определяется двумя показателями преломления и прицельным параметром. Яркость радуги напрямую зависит от скорости изменения угла рассеяния.

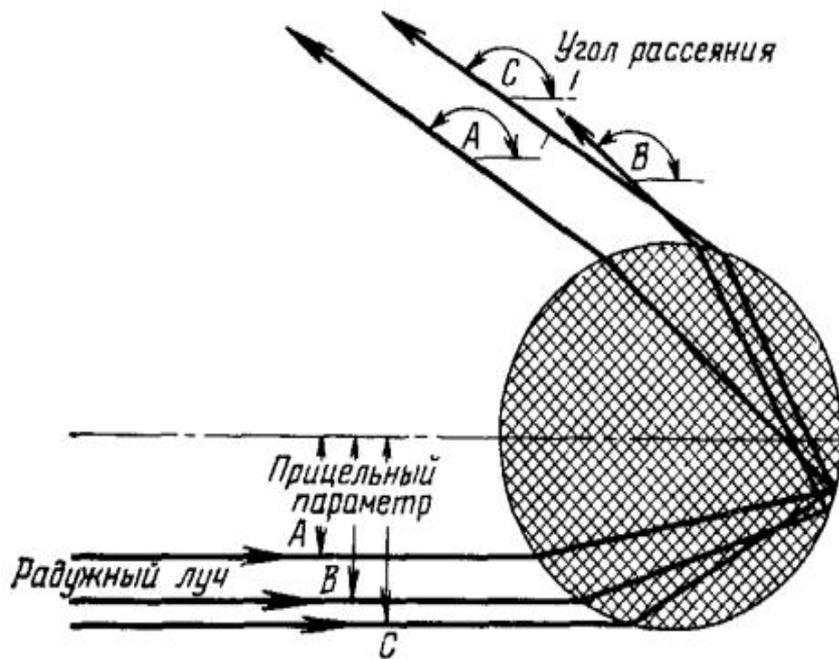


Рис.1.2.5 Оптимальный угол рассеяния.

Солнечный свет представляет собой некогерентную смесь линейных поляризаций в одинаковой пропорции. Относительный вес состояний с различной поляризацией меняется после отражения, поэтому поляризация является одним из характерных свойств радуги. При отражении светового луча в капле, геометрической системой отсчета будет плоскость, в которой лежат падающие и отраженные лучи. Эта плоскость называется плоскостью падения. Разложим поляризацию луча на нормальную и тангенциальную к плоскости.

Значение критического угла определяется показателем преломления. Для нормальной и тангенциальной составляющих, значение отражения мало при

углах падения вблизи нормали к поверхности и очень быстро возрастает по мере приближения к критическому углу. Независимо от поляризаций, свет отражается полностью, если углы имеют значения меньше критического (Рис.1.2.6). Однако, при промежуточных углах показатель отражения зависит от поляризации. При возрастании угла падения, доля поперечного поляризованного света все больше возрастает. А показатель отражения тангенциальной компоненты сначала уменьшается и только затем начинает возрастать.

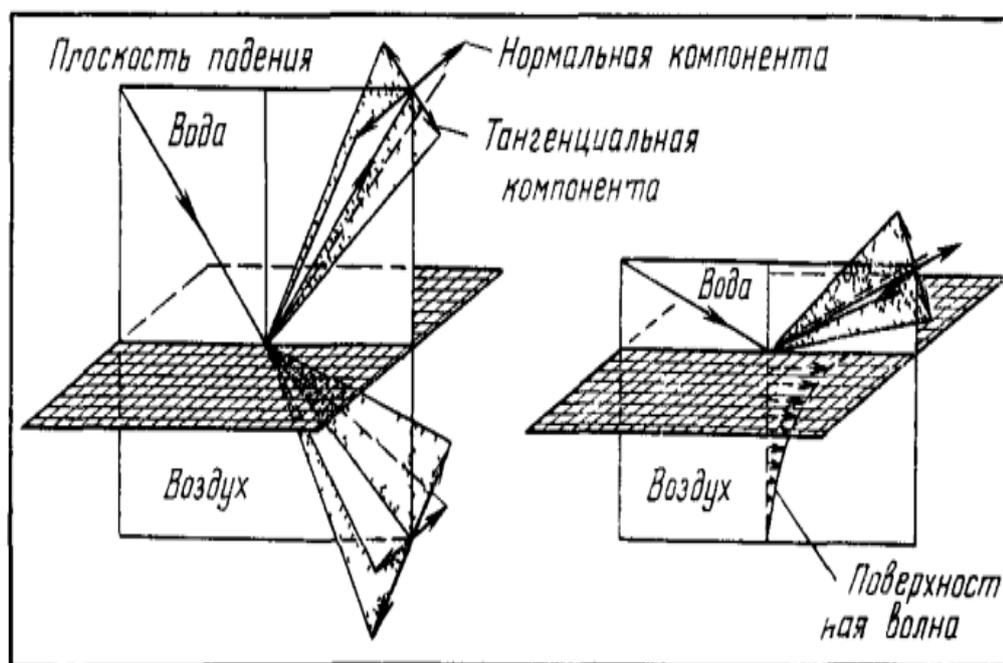


Рис.1.2.6 Разложение на нормальную и тангенциальную компоненты к плоскости падения.

При некотором угле компонента света вообще не испытывает отражения, она полностью проходит через границу раздела между двумя средами. В результате при падении света под этим углом отраженный свет оказывается полностью поляризованным перпендикулярно к плоскости падения. Этот угол называется углом Брюстера в честь Давида Брюстера, впервые указавшего в 1815 г. связанное с ним свойство отражения света. Если рассмотреть радугу через поляризатор и вращать его вокруг направления луча, то можно

убедиться, что радужные лучи поляризованы почти полностью. Это объясняется тем, что лучи, от которых образована радуга, падают на внутреннюю часть капли под углом, близким по значению с углом Брюстера. Вследствие чего, почти вся тангенциальная компонента проходит насквозь, оставаясь в рассеянных лучах, которые прошли через каплю (Рис.1.2.7).

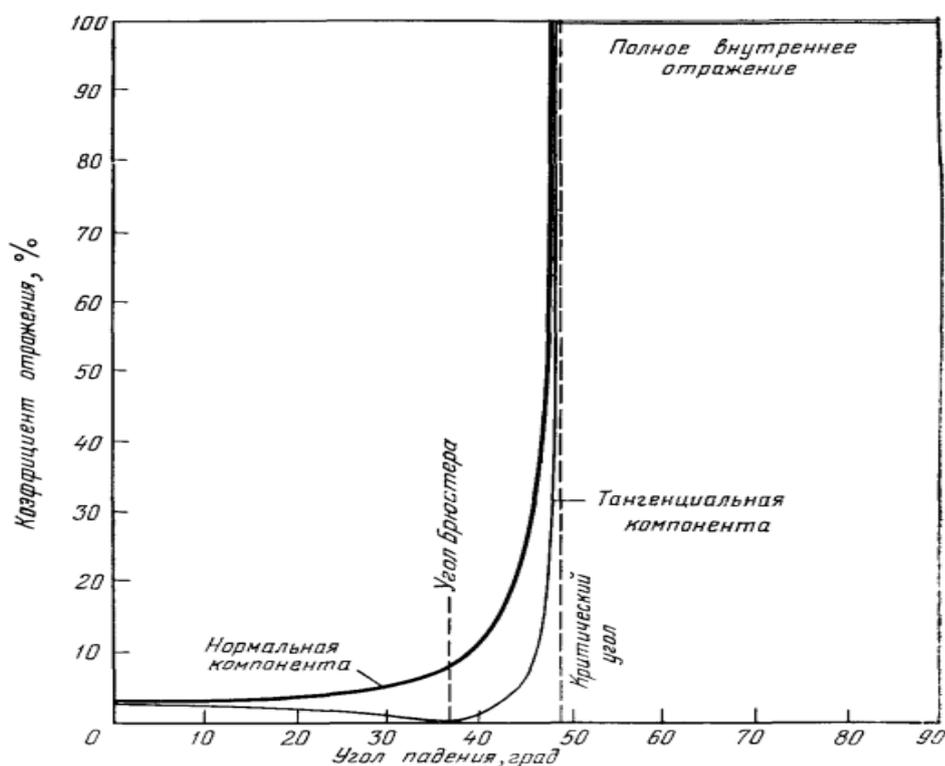


Рис.1.2.7 Зависимость коэффициента отражения от угла падения.

Границы области применения теории радуги расширились после того, как стало известно, что всем материальным объектам присущи волновые свойства. Было выдвинуто объяснение радуг, возникающих из-за атомных и ядерных столкновений. [2]

В геометрической оптике, вместо лучей учитываются траектории частиц, а вместо преломления луча при переходе сред воздух- вода, принято учитывать изменения направлений движения частиц под действием внешних сил.

По мере сближения двух атомов газа, между ними начинает возникать пропорционально возрастающее притяжение. Однако при следующем сближении электронные оболочки этих атомов перекрываются, в результате чего притяжение ослабевает. С уменьшением расстояния, между ними

притяжение переходит в быстро возрастающее отталкивание. Как и в оптике, рассеяние атомов можно исследовать, рассматривая их траектории как функцию прицельного параметра. В отличие от моментального изменения направления светового луча на границе двух сред с разными показателями преломления, атомы в процессе соударения двигаются по криволинейным траекториям, так как силы меняются постепенно и непрерывно. Несмотря на сложность этих траекторий, каждому углу отклонения соответствует определенный прицельный параметр и всегда существует определенный прицельный параметр и всегда существует одна траектория, соответствующая локальному максимуму углового отклонения. Вдоль именно этой траектории наиболее эффективно действует притяжение между атомами. Именно вблизи соответствующего угла и должна наблюдаться значительная концентрация рассеиваемых частиц. Это и есть радуга, возникающая при взаимодействии атомов (Рис.1.2.8).

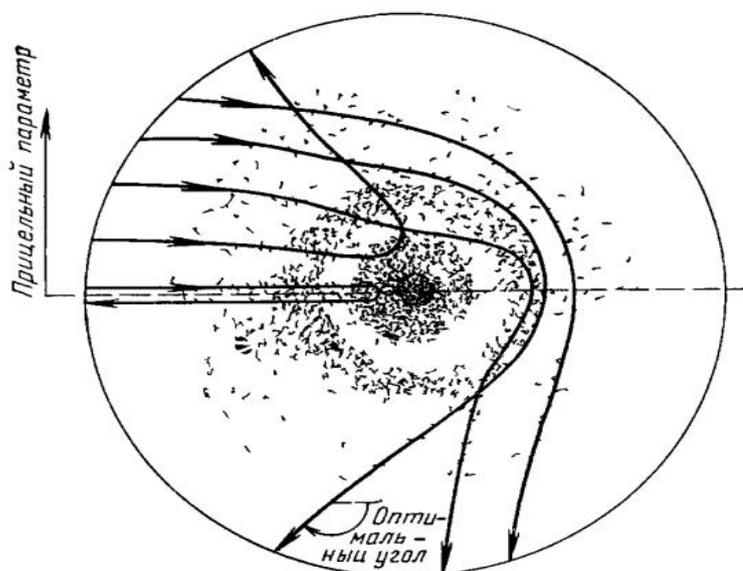


Рис.1.2.8 Образование радуги при рассеянии атомов.

Согласно теории электромагнитного поля, для описания свойств оптической радуги нужно решить задачу рассеяния плоской электромагнитной волны однородной сферой. Но, даже если у нас есть точное решение задачи рассеяния, все равно будет необходимо просуммировать ряд парциальных волн, каждый член которого является сложной математической функцией.

Такое уравнение возможно решить только путем аппроксимации. Чтобы получить хорошую аппроксимацию, нужно оставить такое число членов, которое по порядку величины будет равным упоминающемуся параметру. При рассеянии света, которым объясняется голубой цвет неба, самым эффективным методом будет разложение в ряд по парциальным волнам, потому, что в этом случае, достаточно будет ограничиться только одним членом ряда. Это вызвано тем, что голубой цвет неба определяется рассеянием света на молекулах, при этом размер молекул должен быть меньше длины световой волны. Для получения оптимального приближения методом суммирования парциальных волн необходимо вычислить суммы нескольких тысяч очень сложных функций. Это происходит из-за того, что размер рассеивателя может в сотни и тысячи раз превосходить длину волны падающего на него света. Для решения такой задачи введен метод, позволяющий преобразовать ряд парциальных волн. С помощью этого метода, ряд очень медленно приближается к своему точному значению и переходит в выражение, которое обладает хорошей сходимостью. Этот метод назван методом комплексных угловых моментов или методом Ватсона. Следуя корпускулярной теории, свет- это поток частиц, названные фотонами. Даже беря во внимание тот факт, что у фотонов нет массы, с ними связаны энергия и импульс, которые обратно пропорциональны длине соответствующей волны. При условии, что прицельный параметр равен нулю, то фотон обладает угловым моментом. Тогда, угловой момент такого фотона принято считать равным произведению его импульса на прицельный параметр. Фотон начинает вращаться вокруг центра капли, при этом претерпев ряд последовательных внутренних отражений. Квантовая механика вводит на этот процесс ряд дополнительных ограничений. Первое ограничение заключается в допустимых значениях углового момента рядом дискретных значений. Второе ограничение заключается в том, что принимая во внимание законы квантовой механики, прицельный параметр не может быть определен точно. Каждому дискретному значению углового момента соответствует всего один член в разложении по

парциальным волнам. Для того, чтобы произвести преобразование Ватсона, необходимо рассмотреть значение углового момента, которое, как правило, принято считать нефизическим. В данном случае, применив математический прием, угловой момент, являющийся квантовой величиной, и принимающий в действительности только дискретные значения, будет считаться формально непрерывной переменной, которая способна принимать любые, в том числе комплексные, значения. Другими словами, с математической точки зрения угловой момент рассматривается как некая, комплексная величина, которая имеет вещественную и мнимую части, а областью изменения этой величины принято считать плоскость комплексного углового момента. Во время перехода при помощи преобразования Ватсона в плоскость углового момента, происходит перераспределение вкладов в ряд по парциальным волнам. В итоге, вместо большого числа членов этого ряда, достаточным будет учитывать в соответствующих интегралах только несколько ключевых точек, которые называются седловыми точками и полюсами. Эти полюса называют полюсами Редже в честь итальянского ученого Тулио Редже, который первым обратил внимание на их первостепенное значение. Метод полюсов Редже или метод комплексных угловых моментов- это метод описания или рассеяния элементарных частиц, доказывающий, что состояния в амплитудах рассеяния появляются целыми сериями. Каждую из этих серий характеризует некоторая функциональная зависимость между моментом и квадратом массы.

Применяя к радуге, и полюсы и седловые точки поддаются несложной физической интерпритации. Седловые точки располагаются на вещественной оси и ассоциируются с обычными световыми лучами. Обычно мнимые или комплексные значения принято считать нефизическим решением уравнения. Однако, применительно к распространению волн, мнимая компонента таких решений как правило связана с их затуханием. При полном внутреннем отражении света на границе воздух- вода, световые волны все-таки проходят через отражающую часть, но после этого их амплитуда затухает настолько сильно, что интенсивность приобретает очень малые значения на

глубине равной длине волны. В результате этого процесса свет не попадает в окружающий воздух. Он остается на границе между водой и воздухом и движется вдоль нее. Это явление описывается математически как раз мнимой частью решения. Похожим образом описывается эффект, известный из квантовой механики, под названием туннелирование или туннельный эффект. Смысл туннельного эффекта состоит в том, что частица, проходя сквозь возможный барьер, обладает энергией, меньшей высоты барьера. Такие лучи появляются в теневой стороне каустики и соответствуют быстрому затуханию дифрагированных световых волн.

Вклад полюсов Редже в преобразовательный ряд по парциальным волнам связан с поверхностными волнами иного рода. Эти волны возбуждаются при тангенциальном падении луча на сферу капли. Эти волны двигаются вдоль сферы и по касательной к поверхности активно теряют свое излучение. В связи с этим, волны непрерывно затухают (Рис.1.2.9).

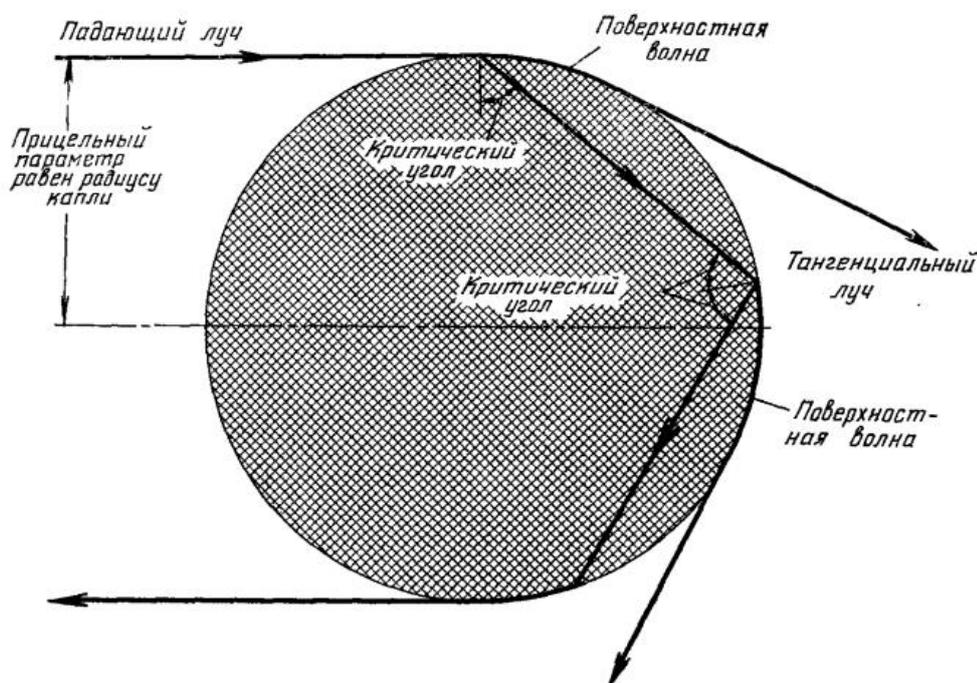


Рис.1.2.9 Ход волны вдоль сферы.

Волна попадает внутрь сферы в каждой точке своего криволинейного движения под углом полного внутреннего отражения и возвращается обратно на поверхность после одного или нескольких таких внутренних преобразований [3].

В хорошо освещенной части радуги имеются два луча, которые излучаются в одном направлении. При наиболее подходящем угле они объединяются в один луч, а в темной области отсутствуют совсем. На основе этого можно сделать вывод, что радуга с математической точки зрения - это ни что иное, как наложение друг на друга двух седловых точек. В затененной области (то есть при углах ниже критического) седловые точки не исчезают, а становятся комплексными. Другими словами, седловые точки смещаются от своей вещественной оси и приобретают мнимую часть. Именно ими определяется свет, дифрагирующий в Александрову темную область.

Мелкомасштабные флуктуации интенсивности, которые присутствуют в точном решении, не воспринимаются в рамках теории комплексных угловых моментов. Но при типичном соотношении между размером капли и длиной световой волны (порядка 1500) точный результат получается ценой суммирования свыше полутора тысяч сложных флуктуаций, в то время как в методе комплексных угловых моментов решение выражается в гораздо более простом виде.

### 1.3 Гало.

Гало - это целая группа сложных атмосферных оптических явлений в атмосфере, характеризующихся возникновением вторичного свечения вокруг источника света, определенных преломлением и отражением света в кристаллах льда. Как правило, гало имеет круглую форму, реже форму дуги или светового столба.

Гало возникают, если солнце или луна просвечивают через тонкие перисто-слоистые облака, состоящие из ледяных кристаллов. Это оптическое явление отличается большим многообразием. В основном, в природе встречаются радужные гало, образующиеся вокруг Солнца с угловым радиусом, равным  $22^\circ$ , реже гало с угловым радиусом  $46^\circ$  (Рис.1.3.1).

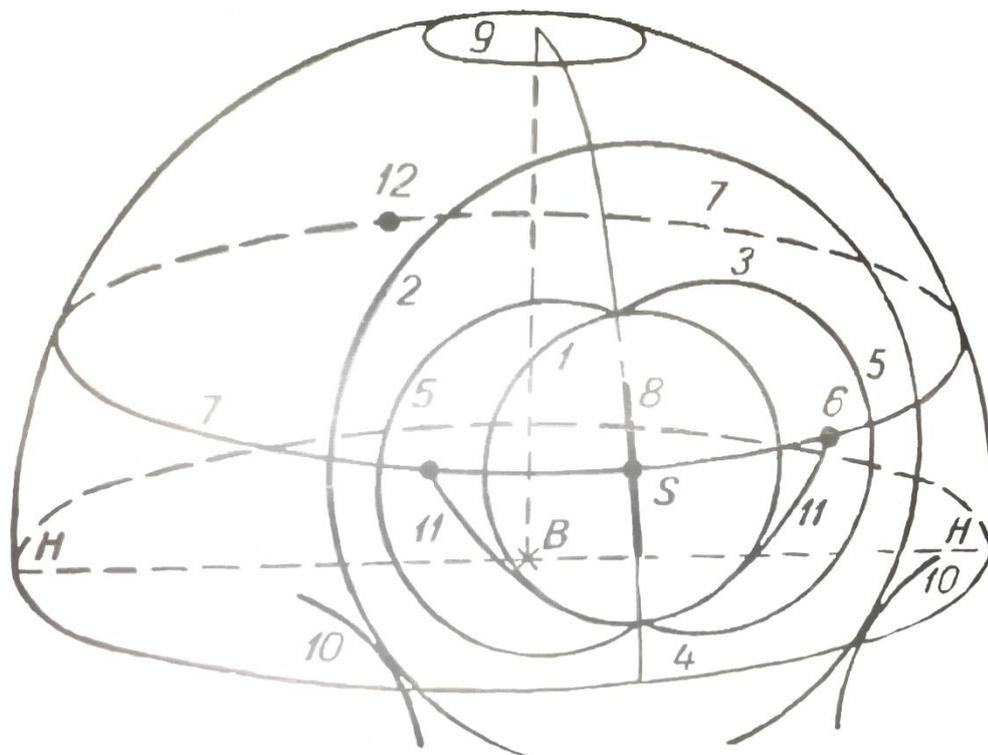


Рис.1.3.1 Главные формы гало.

1-малый круг  $22^\circ$ ; 2-большой круг  $46^\circ$ ; 3-касательная верхняя дуга к кругу  $22^\circ$ ; 4-касательная нижняя дуга к кругу  $22^\circ$ ; 5-описанное гало; 6-ложные солнца; 7-горизонтальный круг; 8-столбы; 9-околозенитная дуга; 10-боковые касательные дуги к кругу  $46^\circ$ ; 11-дуги Ловица; 12-противисолнце.

Свет, который падает под другими углами, создает впечатление небольшой дымки вокруг Солнца. Самыми редкими видами гало являются гало с радиусом в  $90^\circ$ , получившие название гало Гевелия.

$90^\circ$  гало представляют собой очень слабо светящиеся, практически бесцветные кольца, которые имеют общий центр с двумя другими гало. Если оно окрашено, то имеет только красный цвет на внешней стороне кольца. Такие гало образуются только в том случае, если кристаллы имеют плоские правильные основания. Эта форма гало является наиболее редкой по тому, что льдинки далеко не всегда имеют правильную форму шестигранного основания (Рис.1.3.2).

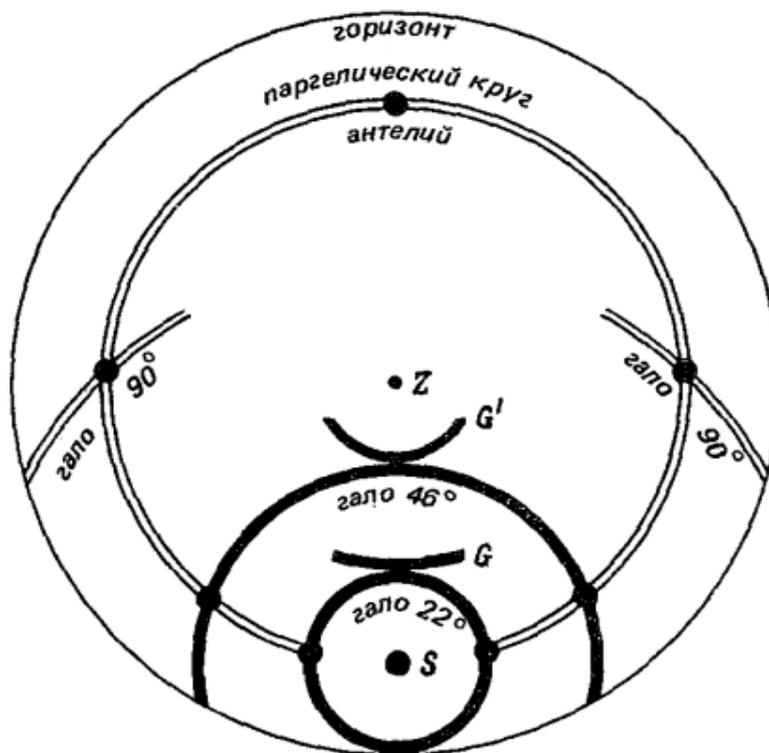


Рис.1.3.2 Положение 90° гало.

Временами можно заметить белый горизонтальный или паргелический круг, который проходит через Солнце параллельно плоскости горизонта. На пересечении этого круга с кругами гало, радиус которых  $22^\circ$  и  $46^\circ$ , проявляются яркие радужные пятна, получившие название ложных или побочных солнц- паргелиев, а так же ложные луны- парселены.

При низком положении Солнца, в тихую погоду, когда солнечные лучи проходят через наиболее низко расположенные облака, в которых льдинки во время своего падения, принимают вертикальную позицию, образуются паргелии. На той высоте, где образуются облака, редко бывают достаточно низкие температуры, по этому, паргелии куда более редкое явление, чем гало. Более яркий преломленный свет поступает под углом  $22^\circ$  с граней, расположенных вертикально. В связи с этим явлением и создаются вертикальные столбы по обе стороны от Солнца по горизонту. Эти столбы бывают особо яркими, создавая впечатление ложного солнца.[4]

Одним из видов гало, являются касательные дуги, направленные к кругам гало. Эти дуги возникают по причине преломления света в кристаллах, которые имеют общую ориентацию оси, но не вертикальную, а как в случае с паргелиями, на горизонтальную- лежат на боку. Если облако обладает достаточным количеством таких кристаллов (что бывает достаточно редко), то дуги наблюдаются.

В те моменты, когда Солнце находится на небольшой глубине под горизонтом (момент восхода и захода Солнца), над ним образуются световые столбы. Они представляют собой яркую вертикальную полосу, которая тянется от источника света (Рис.1.3.3).

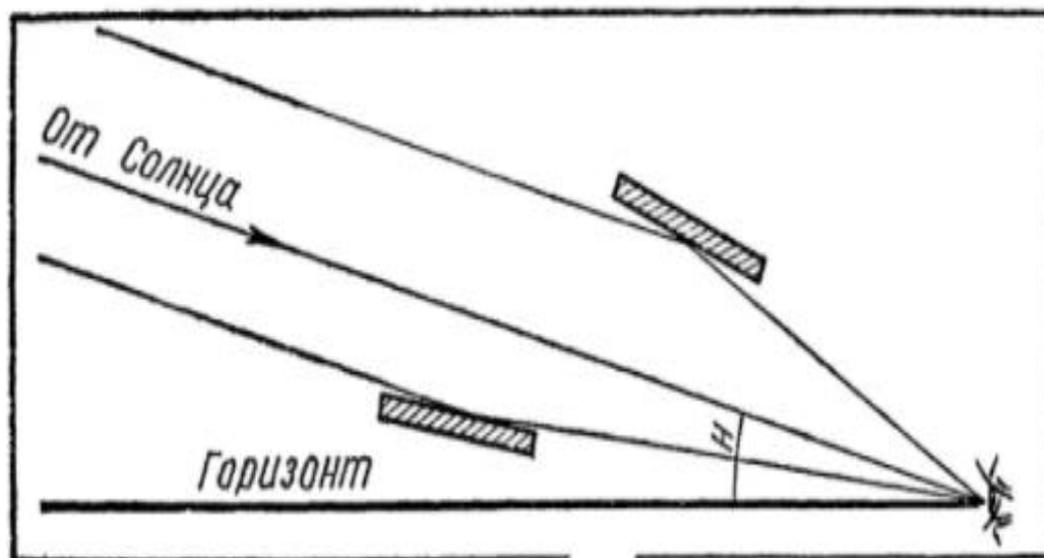


Рис.1.3.3 Образование светящихся столбов.

Световые столбы образуются процессом, связанным с преломлением и отражением света на практически горизонтальных плоских гранях шестиугольных или столбовидных ледяных кристаллов, взвешенных в воздухе. Падая, столбовидные кристаллы опускаются вертикальными рядами, а плоские, напротив, принимают горизонтальное положение. Так, находясь в холодной атмосфере, они фактически выполняют роль призмы, преломляя и отражая лучи света. Эти кристаллы образуются в высоких перистых и перисто-слоистых облаках. Такие облака образуются на высоте около 8 тыс.км над

уровнем моря. Световые столбы образуются в морозную погоду. Это связано с тем, что при достаточно низких температурах, кристаллы образуются в более низких слоях атмосферы.

На паргелическом круге против Солнца или Луны возникают светлые пятна, получившие названия противосолнце (антелей) или противолуна (антиселена). Антелей или противосолнце располагается на той же высоте над горизонтом, что и настоящее, но противоположно ему. Появление антелия определено преломлением и внутренним отражением света в нескольких мельчайших кристаллах льда, взвешенных в атмосфере.

Антиселена или противолуна аналогична противосолнцу. Представляет собой светлое пятно, расположенное напротив лунного диска, на одной высоте с ним над горизонтом.

Все формы гало образуются в результате преломления солнечных или лунных лучей в ледяных кристаллах облака, или в результате отражений от боковых гранях или оснований кристаллов, форма которых представлена как шестигранные столбцы или пластины. Другими словами, на кристаллах происходит дифракция солнечных или лунных лучей. Если опираться на законы геометрической оптики, то ледяные кристаллы облаков принадлежат к гексагональной системе и за счет сочетания их различных форм, они могут принимать самый разнообразный вид. Есть два основных типа кристаллов, при которых образуются гало. Первый тип кристаллов- это кристаллы с хорошо развитой главной осью, имеющие форму шестигранных столбцов или ледяные иглы с плохо развитой главной осью, имеющие форму шестигранных пластин (Рис.1.3.4).

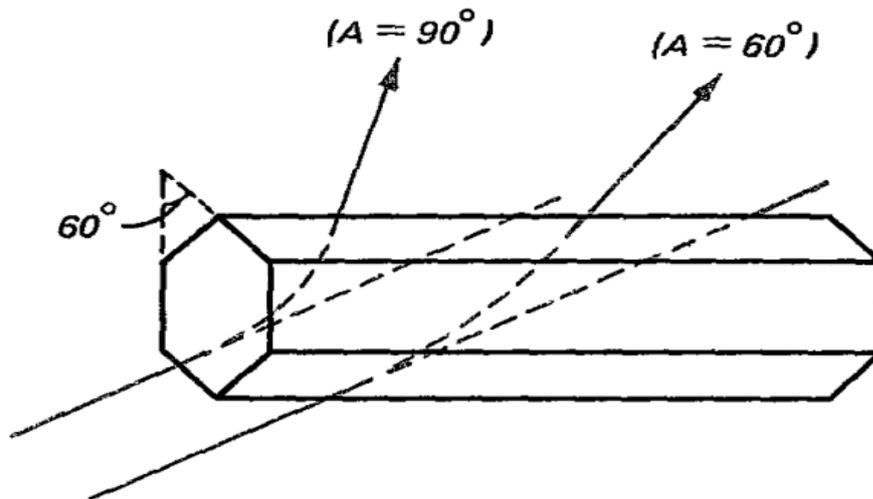


Рис.1.3.4 Кристалл с хорошо развитой главной осью.

Второй тип кристаллов- это все типы снежинок (Рис.1.3.5).

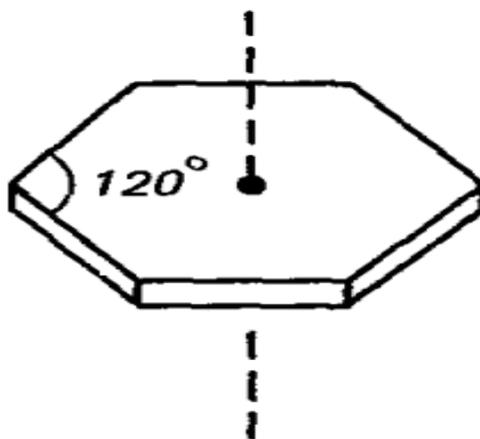


Рис.1.3.5 Кристалл с плохо развитой главной осью.

В облаке кристаллы совершают разнообразное движение и то опускаются вниз, то поднимаются из- за разнообразных процессов, возникающих в различных частях облака.

Кристаллы обтаивают и опускаются в более теплые слои или, наоборот, на их концах и углах может откладываться изморозь. Кристаллы смерзаются, слипаются и в результате этого процесса теряют свою правильную форму. При

образовании различных форм гало, важную роль играет ориентация кристаллов в пространстве, другими словами, положение их оси при падении в атмосфере. Во время падения, кристаллы в воздухе испытывают аэродинамическое торможение и стремятся ориентироваться так, чтобы встретить максимальное сопротивление воздуха. Но, в это же время, броуновское движение и атмосферные флуктуации способствуют хаотической ориентации кристаллов. Самое сильное влияние эти факторы оказывают на кристаллы маленьких размеров. Именно поэтому у них преобладает хаотическая ориентация в пространстве. Поскольку на кристаллы больших размеров, при падении, оказывает влияние аэродинамическое торможение, то они падают ориентированно. Переход хаотического положения к ориентированному определяется отношением толщины кристалла к его длине. Если отношение толщины кристалла к его длине равно единице, то такие кристаллы называют кубикообразными. Во время падения главные оси больших ледяных столбцов или игл, принимают горизонтальное положение, другими словами, боковыми гранями вниз. Достаточно большие пластины или снежинки падают так, что их главные оси принимают вертикальное положение, другими словами, основанием вниз. Различные кристаллы, имеющие неправильную форму, падают при хаотическом положении главных осей.

Луч света, прошедший в ледяной кристалл (шестигранную призму), может выйти из него при условии, что двугранный преломляющий угол будет иметь значение меньше  $99^{\circ}32'$ . В кристаллах находятся два угла, соответствующие данному условию. Первый угол равен  $60^{\circ}$  и располагается между боковыми гранями, принятыми через одну. Вторым углом равен  $90^{\circ}$  и находится между боковой гранью и основанием. Гало образуется лучами, претерпевшими минимальное отклонение при прохождении через кристалл. [5]

Существует несколько случаев прохождения лучей через кристаллы. Первый случай возникает, при условии, что главные оси кристаллов вертикальны. Солнце находится в горизонте, и его лучи проходят в боковые грани и выходят

так же через боковые грани, взятые через одну. При данном пути луча, шестигранный ледяной кристалл представляет собой трехгранную призму с преломляющим углом в  $60^\circ$ . Из кристалла образуются цветные лучи, которые образуют собой пятна ложных солнц (во время преломления лучей происходит дисперсия) по обеим сторонам от Солнца. В это время красные лучи должны находиться на угловом расстоянии в  $21^\circ 34'$ , а фиолетовые лучи на расстоянии  $22^\circ 22'$ , все остальные лучи занимают промежуточное положение между красными и фиолетовыми спектрами. Лучи, упавшие на грани кристаллов под другими углами, испытают большее отклонение и образуют собой световые хвосты ложных солнц. Они обращены в сторону, противоположную Солнцу. Второй случай возникает при условии, что главные оси кристаллов горизонтальны, Солнце находится в горизонте. В этом случае, так же как и в предыдущем появляются ложные солнца на том же угловом расстоянии. При третьем случае, ориентация главных осей кристаллов хаотичная. В этом случае во всех возможных направлениях возникнут ложные солнца и образуют круг гало с радиусом в  $22^\circ$ . Для небольших кристаллов льда и кристаллов неправильной формы, хаотическая ориентация будет наиболее вероятной. По этой причине чаще появляются круглые гало и намного реже ложные солнца (Рис.1.3.6).

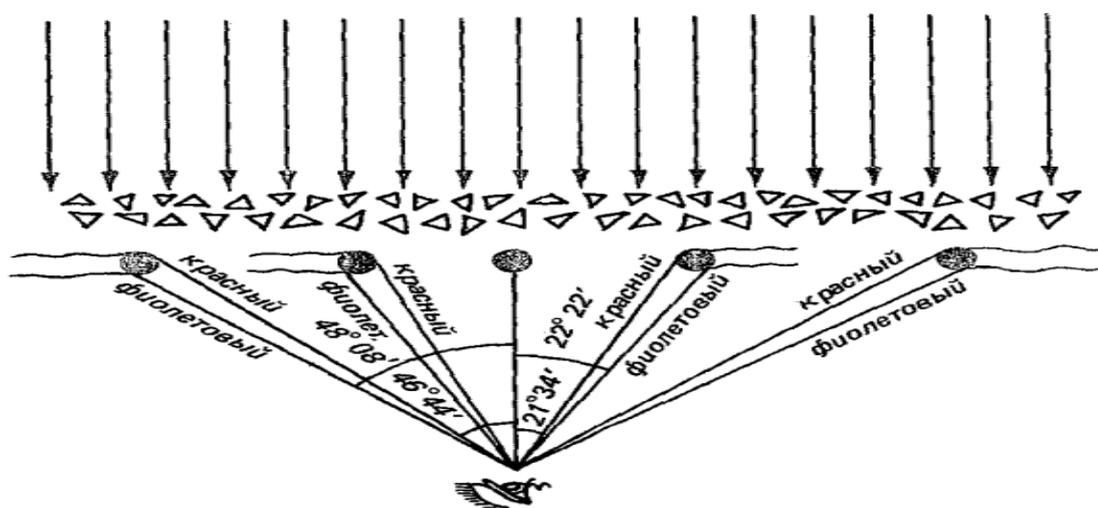


Рис.1.3.6 Образование ложных солнц и гало радиусом  $22^\circ$  и  $46^\circ$ .

Если минимальное отклонение красных лучей составит  $45^{\circ}44'$ , а фиолетовых  $48^{\circ}08'$ , то во время хаотической ориентации главных осей, вокруг Солнца и Луны могут образоваться гало с радиусом  $46^{\circ}$  с таким же расположением цветных лучей, как у гало с радиусом в  $22^{\circ}$ . Если высота Солнца увеличивается с  $0^{\circ}$  до  $30^{\circ}$ , то радиус гало увеличится от  $22^{\circ}$  до  $28^{\circ}$ , а хвосты ложных солнц станут короче. Если положение Солнца окажется выше  $30^{\circ}$ , то гало практически не наблюдается.

Из разнообразных касательных дуг появляются горизонтальные дуги (верхняя и нижняя) к гало, радиус которых составляет  $22^{\circ}$ . У столбовидных кристаллов, во время всех изменений кристаллов в облаке, дольше всего сохраняется двугранный угол в  $60^{\circ}$ . Такие кристаллы падают при горизонтальном расположении главных осей. Во время преломления в них образуются ложные солнца. Из-за вибрации главных осей кристаллов льда, в горизонтальной плоскости ложные солнца размываются в верхние и нижние касательные дуги. Поскольку гало с радиусом  $22^{\circ}$  образуются кристаллами, которые падают при вертикальном положении осей, другими словами платинами или снежинками, но эти кристаллы содержат много пузырьков воздуха и полостей. Тогда лед в них неоднороден и они редко могут дать правильное прохождение света. Поэтому боковые касательные дуги к гало с радиусом в  $22^{\circ}$  образуются чрезвычайно редко.

Принцип окраски цветных гало всегда одинаковый. Та часть гало, что обращена к Солнцу, окрашена в красный цвет, а противоположная - в фиолетовый. У кругов гало красным будет внутренний край гало, у касательных дуг - часть дуги и у ложных солнц - красным будет бок, который обращен к Солнцу.

Все белые (неокрашенные) гало образуются в результате отражения Солнечных или Лунных лучей от граней или оснований ледяных кристаллов. Такие гало будут белыми, если не происходит дисперсии при отражении. Для образования бесцветных гало очень важна ориентация отражающих частей кристаллов, выполняющих роль зеркала. Если боковые грани ледяных

столбцов и основания пластин или снежинок принимают горизонтальное положение отражающих частей кристаллов, при этом кристаллы совершают небольшие колебания. Тогда при отражении от них появляются световые столбы над и под Солнцем. Если при падении основания ледяных столбцов и боковых граней пластин примут вертикальное положение отражающих частей кристалла, то тогда угол падения луча на отражающие части кристаллов может принять значение от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . В данном случае отраженные лучи двигаются во всех возможных направлениях и образуют собой белый горизонтальный круг. Там где пересекается белый горизонтальный круг и гало с радиусом  $22^\circ$  или  $46^\circ$ , образуются кресты. Если в центре креста располагается Солнце, то это значит, что крест образован пересечением световых столбов с горизонтальным кругом.

Самые необыкновенные, редко наблюдаемые формы гало могут быть образованы преломлением света в кристаллах необычных, нетипичных форм, а так же за счет того, что в кристаллах помимо преломления происходит больше одного внутреннего отражения. Например, одним из таких редких форм гало является гало Бугера. Это гало представляет собой белый круг вокруг антисолярной точки, радиус которого измеряется в пределах от  $35^\circ$  до  $38^\circ$ . Его можно легко спутать с белой радугой, которая близка к нему по угловому размеру и цвету. В отличие от слабо окрашенной белой радуги, внешним спектром которой будет желтый, гало Бугера не окрашено совершенно и не имеет никаких дополнительных дуг и наблюдается только совместно с другими явлениями гало.

Из описанного можно сделать вывод, что самыми распространенными видами гало являются гало  $22^\circ$  и более редким гало  $46^\circ$ , которые образуются хаотически ориентированными тонкими ледяными иглами. Более крупные кристаллы в форме столбцов создают касательные дуги и световые столбы, а кристаллы в форме пластины ответственны за образование ложных солнц, нижних солнц, околосенитной радуги и горизонтального круга.  $46^\circ$  гало возникает намного реже, чем  $22^\circ$  гало из-за того, что оно возникает во время

преломления света в сплошных ледяных столбцах и в ограниченном диапазоне высоты Солнца. Но гало в  $22^\circ$  может возникать и в сплошных ледяных столбцах и в кристаллах, имеющих форму пластин, включающих в себя воздушные пузырьки. При всех происходящих в облаке сложных процессах, которым подвергаются кристаллы, у них дольше всего сохраняется двугранный угол  $60^\circ$ , который обеспечивает возникновение всех форм гало на угловом расстоянии в  $22^\circ$  от Солнца. [6]

Поляризация света, которая исходит от гало, возникает за счет двух процессов: обычного (Френелевского) преломления и двойного лучепреломления в кристаллах. Двойное лучепреломление в кристаллах- это определяющий фактор поляризационных характеристик (Рис.1.3.7).

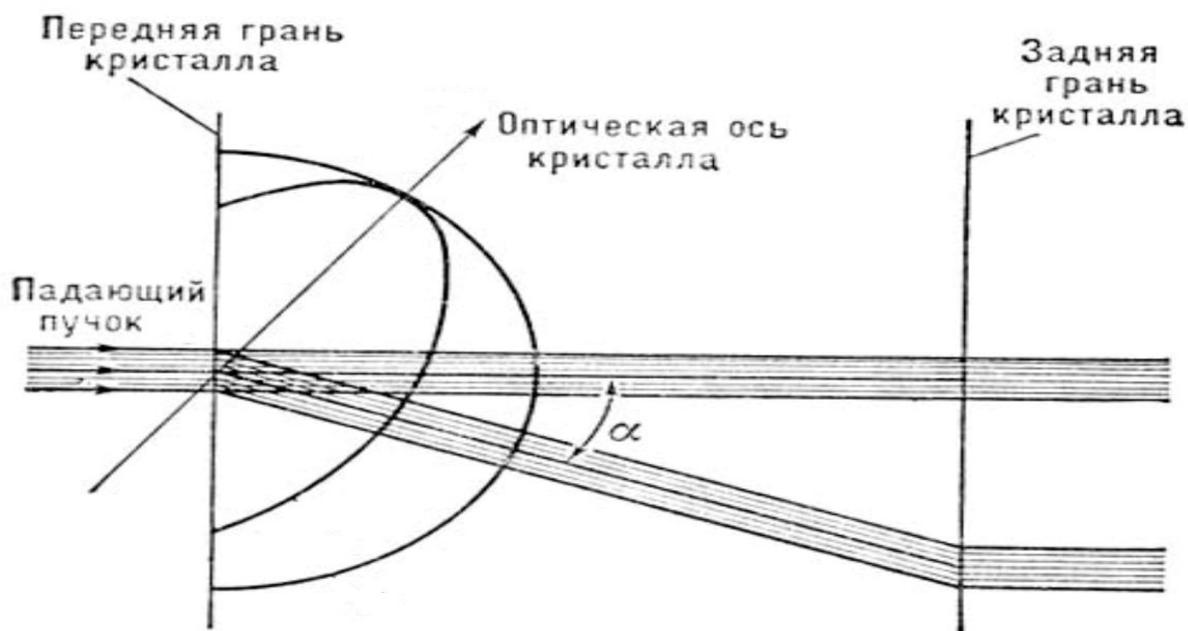


Рис.1.3.7 Схема двойного лучепреломления в кристалле.

В целом, каждая компонента двойного лучепреломления образует свое гало, они смещаются относительно друг другу на  $0,11^\circ$ . На внутреннем красном крае заметна только одна компонента с полной степенью поляризации (100%), а в сторону от Солнца из- за наложения второй поляризационной компоненты, поляризация становится меньше. На расстоянии  $0,5^\circ$  появляется второй

максимум поля поляризации с характером поляризации, обратный первому. Полный максимум поляризации возможно заметить только в монохроматическом красном свете. Поскольку другие цветные максимумы накладываются друг на друга, то они не прослеживаются. Высокая степень поляризации прослеживается у внутренних краев паргелиев и у касательных дуг, околоренитной дуги. Это позволяет определить паргелии по поляризационному максимуму. Средняя степень поляризации в белом свете у гало  $22^\circ$  около 4%, а у гало в  $46^\circ$  около 16%. Максимум поляризации можно заметить визуально, если рассматривать через фильтр поляризаций.

#### 1.4 Венцы.

В момент, когда Солнце и Луна просвечивают сквозь тонкие облака, которые состоят из водяных капель или кристаллов льда, они часто кажутся окруженными голубым сиянием в виде кольца, который примыкает к диску источника света и оканчивается наружным красным краем. Подобное явление называют ореолом или венцом первого порядка. Вслед за ореолом следуют концентрические с ним венцы последующего второго, третьего и следующих порядков, которые разделены между собой затемненными промежутками. Расположение цветов в венцах всегда одинаковое: внутренний край синезеленый, который переходит в желтый, далее идет оранжевый и последний, внешний спектр- это красный. Чаще всего в природе встречается только один ореол, реже число колец может достигать трех- четырех значений. Так же самыми различными бывают и их размеры. Чаще всего угловой радиус красного спектра ореола меняется в пределах от долей градуса до  $45^\circ$ .

Венцы образуются в капельно- жидких облаках, таких как тонкие высококучевые и слоистокучевые. Из кристаллических облаков чаще всего дают венцы перисто- слоистые, реже перисто- кучевые.

Венцами, как правило, называют малыми кругами вокруг Солнца и Луны, в отличие от больших кругов гало, размер которых варьируется от  $22^\circ$ ,  $46^\circ$  и более. Они одинаково часто появляются вокруг Солнца или Луны, но при ярком свете Солнца и неба, окружающего него, венцы плохо различимы. Их

можно заметить через дымчатые очки или наблюдая отражение Солнца в спокойной воде.

Обычно, у венцов в облаках, состоящих из капель (высоко- кучевых и слоистокучевых), заметен только один ореол, окрашенный в светло- голубое сияние, красный край у него практически не заметен. Это связано с наличием в данных облаках капель различного размера. Каждый размер капель ответственен за образование венца определенного размера. Каждый венец, наложившись друг на друга, начинают смазывать картину. В облаках, состоящих из кристаллов льда (перистых и перистослоистых) кристаллы ближе друг к другу по размерам и цвета в них образуются более яркими. Ореол сопровождается несколькими добавочными кольцами.

Венцы образуются вокруг Солнца или Луны образуются за счет однократного рассеяния, или дифракции лунного или солнечного света на каплях и кристаллах, из которых состоят облака. Распределение яркости в венцах определяется теорией дифракции вокруг малых отверстий (капель) или узких щелей (кристаллов) (Рис.1.4.1).

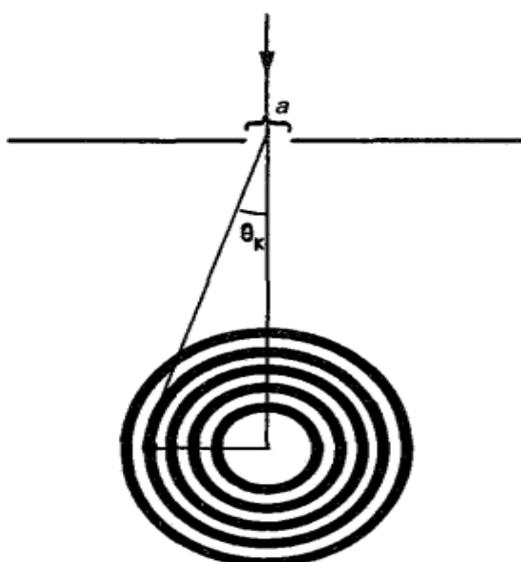


Рис.1.4.1 Дифракция света на каплях и кристаллах облака.

Иризация в облаках- это довольно редкое оптическое явление, при котором очень тонкие облака, которые находятся недалеко от Солнца, окрашиваются в

цвета спектра. Явление определено дифракцией света на капельных облаках. Чаще всего такие облака встречаются высоко в горах. Это происходит по тому, что в горной местности воздух не содержит примесей, поэтому каплям воды необходимо больше времени для преобразования в кристаллы. А для возникновения иризации переохлажденная вода благоприятнее кристаллов льда. Достигая облачной капли, солнечный свет отклоняется по прямой траектории, причем угол отклонения зависит от длины волны, поэтому дифракция определяет разложение света на спектр.

В то время, когда Солнце или Луна просвечивают сквозь тонкие слоисто-кучевые, высоко- кучевые или перисто- кучевые облака, эти облака на малых и больших площадях на угловых расстояниях от Солнца до  $30^\circ$  и иногда больше или только в отдельных местах светятся радужными цветами, преобладающими будут красный и зеленый цвета. Облака часто переливаются различными цветами, похожий на перламутр. Особенно интенсивная иризация встречается на краях облака- иризирующие пятна на облаках. Чаще всего они представляют собой части венцов, а на больших расстояниях от Солнца круги гало.[7]

Иризация чаще всего образуется в облачных слоях за самолетами. Согласно в теории дифракции, на начальной стадии возникновения конденсационных самолетных следов диаметр облачных капель составляет 13 мкм. Так же как и венец, иризация чаще всего наблюдается в пределах угловых расстояний от Солнца не более  $20^\circ$ . Но венцы как правило имеют меньший  $36^\circ$  угловой радиус и создается куда более крупными каплями, в то время как иризация может наблюдаться на несколько больших угловых расстояниях и создается теми частями облака, где есть много мелких капель различных размеров.

Иризирующие облака могут наблюдаться даже из космоса. Так, при полете на орбитальной станции «Салют- 6» в 1978 году, космонавты увидели радужные облака примерно в области  $55^\circ$ -  $60^\circ$  южного шара. У облаков был желто-коричневый цвет, за что получили название «горчичные». Высота облаков

достигала порядка 40- 50 км. Незадолго до восхода Солнца, на высоте 15- 20 км, космонавты два раза наблюдали фиолетовые облака.

Появление окрашенных облаков- это тоже процесс иризации. Появление окраски таких облаков объясняется тем, что при движении кристаллов в облаке всегда есть такие по- ориентации ледяные пластины, которые дают отраженный свет в направлении наблюдателя. Интерференция лучей, отраженных от передних и задних поверхностей ледяных пластин и образуют собой радужную окраску. Цвет облаков в данном случае определяется толщиной пластин. Облако приобретает яркий окрас, если ледяные пластины из которых состоит облако, одинаковой толщины.

Радужные и горчичные облака, которые наблюдались космонавтами, можно считать разновидностью перламутровых облаков, которые могут наблюдаться с Земли.

Во время сильного вулканического извержения в атмосферу выбрасывается большое количество пепла, вулканической пыли, газа, водяного пара. Вулканическая пыль может достигнуть больших высот, порядка 25- 30 км, и разносится воздушными течениями по всему земному шару. После извержения Кракатау в 1883 году и Агунга в 1963 году, в Индонезии, Катмая в 1912 году, на Аляске, Мауна- Лоа в 1985 году, на Гавайских островах всегда вокруг Солнца наблюдалось коричнево- красное кольцо с внешним угловым радиусом в  $22^\circ$  и шириной  $10^\circ$ . Небо внутри кольца окрасилось в голубоватый оттенок.

Такое явление получило название кольца Бишопа в честь его первого исследователя. Судя по размеру, кольцо можно было принять за круг гало радиусом в  $22^\circ$ . Но это был огромный венец, а не гало. На это указало расположение цветов в кольце Бишопа, но его наружный край был красным , как и у венца. Необычно большой размер венца объясняется маленькими размерами частиц, кристаллизирующихся в верхних слоях атмосферы из газообразных продуктов, выброшенных во время вулканической деятельности.

## 2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВАНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА.

### 2.1 Влияние размеров капель осадков на физические характеристики радуги.

Явление радуги определено отражением и преломлением солнечных лучей в водяных каплях.

Если рассматривать монохроматический луч, падающий на каплю, а затем вышедший из нее, то можно определить изменение направление луча.

Луч, который падает на каплю и претерпевает одно отражение, может быть воспринят наблюдателем, если точка падения относится к верхней части капли как  $(y > 0)$ . Если луч претерпевает два отражения, то наоборот, луч падает на часть капли при  $(y < 0)$  (Рис.1.2.1).

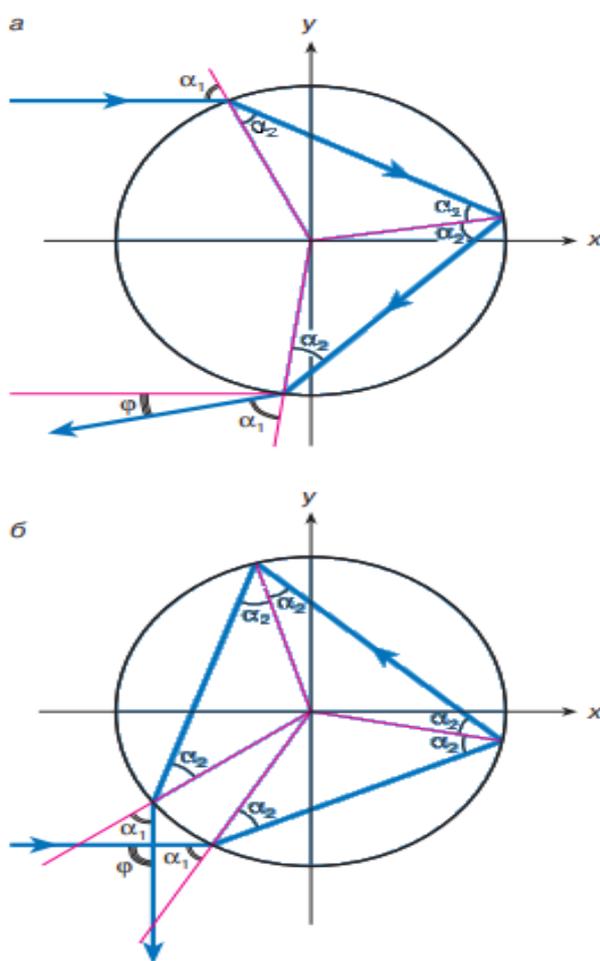


Рис.2.1.1 Ход лучей в капле воды а- при одном отражении, б- при двух отражениях.

Примем, что сначала капля располагается в вертикальной плоскости, которая проходит через положение Солнца и глаз наблюдателя. То падающие, преломленные и отраженные лучи лежат в той же плоскости. Углы а и б

вышедшего луча по отношению к падающему для первичной радуги будет равен

$$\varphi_1 = 4\alpha_2 - 2\alpha_1, \quad (1)$$

А для вторичной радуги

$$\varphi_2 = \pi - 6\alpha_2 + 2\alpha_1, \quad (2)$$

При этом  $\alpha_1$ - это угол падения, а  $\alpha_2$ - угол преломления.

Согласно закону преломления

$$\sin\alpha_2 = \frac{\sin\alpha_1}{n}$$

Здесь  $n$ - показатель преломления воды. Примем условно радиус капли за единицу длины. В этом случае получим выражение:

$$\sin\alpha_1 = y, \quad \sin\alpha_2 = \frac{y}{n},$$

$$\sin\alpha_1 = y, \quad \sin\alpha_2 = -\frac{y}{n}$$

Соответственно для первичной и вторичной радуг. Теперь из уравнений (1) и (2) получаем

$$\varphi_1 = 4\arcsin\frac{y}{n} - 2\arcsin y, \quad y > 0, \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \pi + 6\arcsin\frac{y}{n} - 2\arcsin y, \quad y < 0, \quad (4)$$

Построим графики углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в виде функций  $y$  для показателя  $n=1,331$  (показатель преломления для красного цвета). Анализируя график, можно заметить, что если значение прицельного параметра  $y = 0,85$ , то максимум угла  $\varphi_1$  достигает  $42^\circ$ , а угол  $\varphi_2$  достигает минимума на уровне  $53^\circ$  если  $y = -0,95$ . Теперь необходимо доказать, что данным точкам соответствуют максимумы интенсивности света, который отражен каплей.

Для этого рассмотрим некоторый малый интервал изменения прицельного параметра (для определенности первичной радуги)  $y, y + \Delta y$ . При помощи графика можно определить изменение угла  $\varphi$  с интервалом  $\Delta\varphi$  (Рис. 2.1.2)

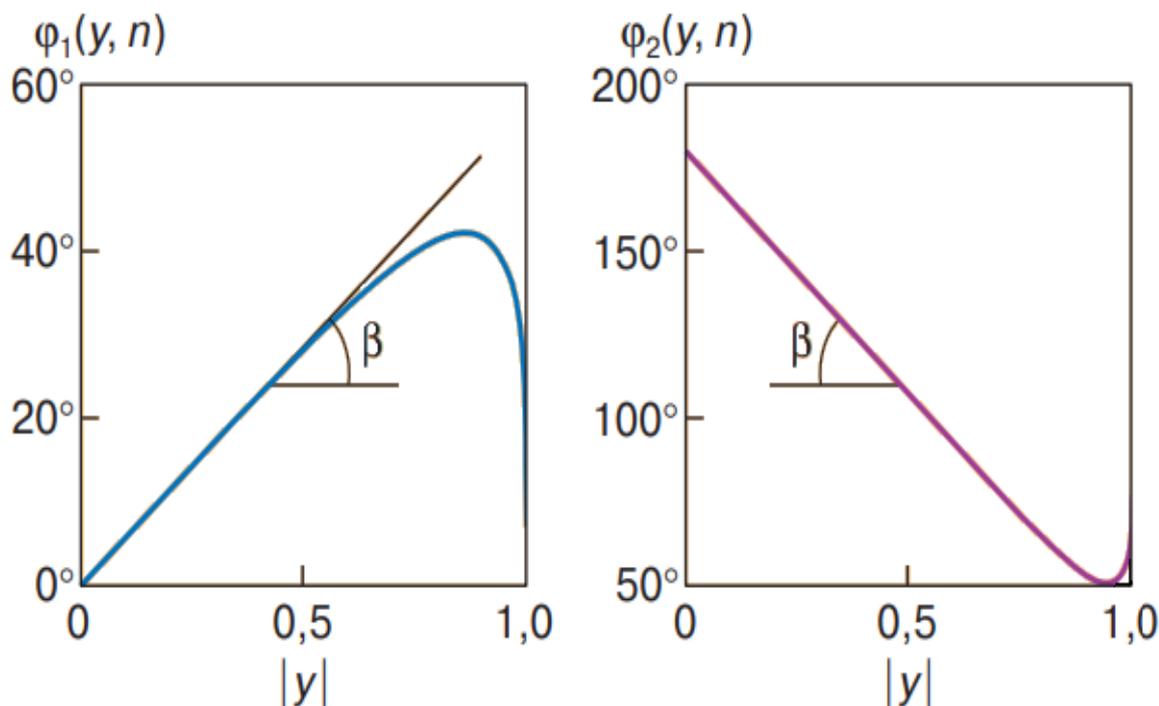


Рис.2.1.2 Зависимость угла отражения луча, падающего на каплю, от прицельного параметра.

$$\Delta\varphi = \Delta y \cdot \operatorname{tg}\beta$$

$\beta$  - это угол касательной к графику в данной точке, который образуется с осью абсцисс.

Величина  $\Delta y$  пропорциональна интенсивности света  $\Delta I$ , прицельный параметр которого падает на каплю в этом интервале. Та же интенсивность света (пропорциональная ей величина) рассеивается каплей в угловом интервале  $\Delta\varphi$ .

$$\Delta I \cdot \Delta y = \Delta\varphi \operatorname{ctg}\beta$$

Это значит, что интенсивность рассеянного каплей света, которая приходится на единицу угла рассеяния, можно выразить:

$$I(\varphi) = \frac{\Delta I}{\Delta\varphi} = \operatorname{ctg}\beta \quad (5)$$

Поскольку в экстремальных точках  $\operatorname{ctg}\beta = \infty$ , то величина переходит в бесконечность. Положения таких экстремальных точек для разных цветов отличается. Это и позволяет наблюдать радуго.

Угловое распределение интенсивности рассеянного света можно получить, если построить график зависимостей  $ctg\beta$  от угла  $\varphi$ . Используя производную, можно привести уравнение (5) к формуле:

$$I(\varphi) = \left(\frac{d\varphi}{dy}\right)^{-1} \quad (6)$$

Таким образом, эффект радуги определен тем, что под определенными углами образуются максимумы интенсивности рассеянного света и для разных цветов положения этих максимумов не перекрываются.

Во время каждого отражения внутри капли луч поворачивает на  $\pi - 2\alpha_2$ , а при выходе из капли его угол поворота будет определяться выражением  $\alpha_1 - \alpha_2$ . Это значит, что если луч отразится в капле  $k$  количество раз, тогда угол  $D$ , на который он отклонится от своего изначального направления, можно выразить формулой:

$$D = 2(\alpha_1 - \alpha_2) + k(\pi - 2\alpha_2) \quad (7)$$

Теперь необходимо определить условия, при которых  $D$  имеет минимальное значение. Для этого необходимо взять производную из уравнения (7).

$$\frac{dD}{d\alpha_1} = 2\left[1 - (k + 1)\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1}\right] \quad (8)$$

Так как  $\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = n$ , то преобразовав уравнение (8) получим:

$$\frac{dD}{d\alpha_1} = 2\left[1 - (k + 1)\frac{\cos\alpha_1}{n\cos\alpha_2}\right] \quad (9)$$

Приравняв производную к нулю получаем

$$(k + 1)\cos\alpha_1 = n\cos\alpha_2 \quad (10)$$

Из этого выражения определим, что

$$\cos\alpha_1 = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{(k + 1)^2 - 1}} \quad (11)$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{k + 1}{n} \cos\alpha_1 \quad (12)$$

Теперь, если преобразовать формулу (7) получим выражение, вида:

$$D_k = k\pi + 2[\alpha_1 - (k + 1)\alpha_2] \quad (13)$$

На этом расстоянии и наблюдаются максимумы интенсивности, определяющие картину радуги.

Поскольку понятие о бесконечно узком пучке является абстракцией, то если свет падает на круглое отверстие диаметра  $a$ , то из-за волновой природы, прошедший пучок света будет расширяться и его угловой параметр может быть охарактеризован дифракционным углом  $\lambda/a$ (рад).

Где  $\lambda$ - это длина волны рассматриваемого излучения.

Так как свет отражается от капли, то поэтому оценка дифракционного уширения, принимая диаметр капли в 1 мм, а длину волны  $5 \cdot 10^{-5}$ (см) будет иметь значение  $5 \cdot 10^{-4}$ (рад) или  $0,03^\circ$ .

Теперь мы можем сделать вывод, что активными областями поверхности капли являются те участки меньшего размера, которые соответствуют экстремальным минимальным или максимальным значениям угла рассеяния  $\varphi$ .

Для того, чтобы получить более точную оценку дифракционного уширения, необходимо аппроксимировать (приблизненно заменить) кривую  $\varphi(y)$  в окрестности экстремальной точки параболой

$$\varphi(y) = \varphi_0 + f \cdot (y - y_0)^2, \quad (14)$$

Где  $\varphi_0$ - экстремальное значение угла рассеяния,

$y_0$ - значение прицельного рассеяния, при котором достигается экстремальное значение угла  $\varphi$ ,

$f$ - подгоночный параметр.

Преобразуя уравнение (14), получаем:

$$|y - y_0| = \sqrt{\frac{\varphi - \varphi_0}{f}} \quad (15)$$

Интервал  $|y - y_0|$  определяет интенсивность падающего на него света и равен интервалу значений прицельного параметра, из которого выходит свет, поэтому он определяет дифракционный угол. Определим интервал угла рассеяния  $\varphi - \varphi_0$ , который соответствует интервалу прицельного параметра  $y - y_0$ , так чтобы он оказался равным дифракционному углу. Для этого поставим условие:

$$\frac{\lambda}{2R_0|y-y_0|} = |\varphi - \varphi_0| = \Delta\varphi,$$

Где  $R_0$ - это радиус капли

Преобразуя уравнение (15), получаем формулу, имеющую вид:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\lambda}{2R_0}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot f^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Если продифференцировать уравнение (14) в точке экстремума, то параметр  $f$  будет иметь вид:

$$f = 2 \frac{d^2\varphi}{dy^2}$$

Для того, чтобы решить уравнение, необходимо продифференцировать не функцию, находящуюся в правой части уравнения (14), а общие выражения для угла  $\varphi$ , которые представлены в начальных формулах (1) и (2).

$f = -4,126$  в первом случае и  $f = 24,313$  во втором. Используя эти значения, можно рассчитать дифракционное уширение пучка луча света в зависимости от радиуса капли используя уравнение (16).

Вид радуги напрямую определяется формой капель. При падении в воздухе крупные капли сплюсциваются и при этом теряют свою сферичность. Вертикальное сечение этих капель приближается к эллипсу.

2.2 Влияние расположения и формы кристаллов в облаке на образующиеся формы гало.

Поскольку радуго наблюдатель видит под максимальными значениями отклонения луча для каждого цвета, а вторичную радуго под наименьшими, то малое гало, как и большое, образуется в результате двукратного преломления лучей в кристаллических призмах. Значит, гало наблюдается человеком под наименьшими углами отклонения луча.

Для того, чтобы объяснить окрашенные формы гало, необходимо рассмотреть ход луча в ледяной призме, упавшего на нее и выходит только через грани, который образует с внешней стороной призмы угол не больше  $99^\circ 32'$ . Луч, который падает на грань  $ab$  под углом падения  $i$ . Преломляясь под углом  $e$ , луч выходит через другую грань  $cd$ , образовав угол падения  $e'$  и угол выхода  $i'$ .

Поскольку показатель преломления льда равен

$$n = \frac{\sin i'}{\sin e} = 1,31, \text{ то для предельного случая, если } i' = 90^\circ \text{ (следовательно, луч}$$

при таких значениях уже не может выйти из призмы), можем определить, что  $e' = 49^\circ 46'$ , а  $e + e' = A$ ,

Где  $A$ -преломляющий угол призмы.

Так как  $e$  и  $e'$  не превышают значение  $49^\circ 46'$ , тогда и  $A$  не может превышать  $99^\circ 32'$ . Это значит, что могут иметь значение только те грани, которые образуют между собой углы меньшие по значению  $99^\circ 32'$ .

Необходимо определить угол  $D$ , на который луч отклоняется от своего первоначального направления (Рис.2.2.1).

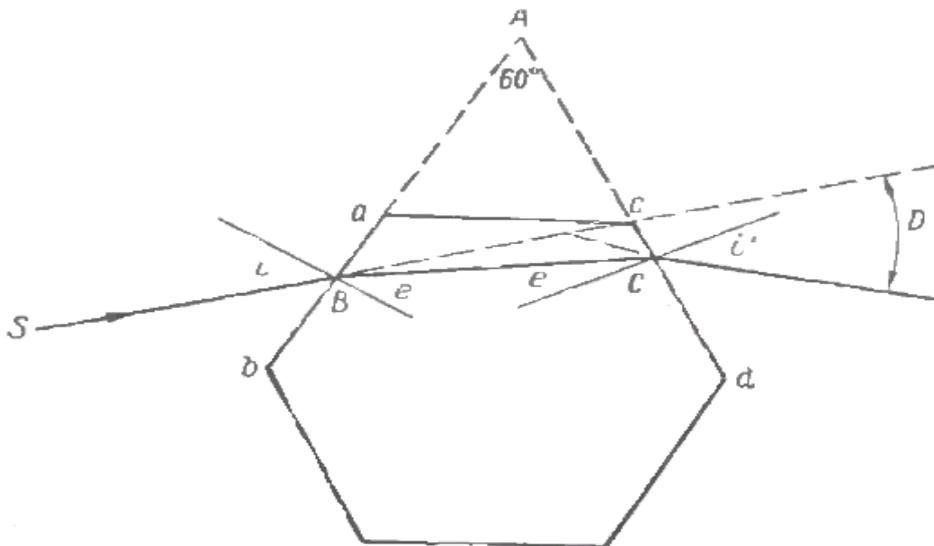


Рис.2.2.1 Ход луча в ледяной призме.

$$D = i - e + i' - e' = i + i' - A \quad (1)$$

Определим минимальное значение  $D = D_{min}$ . Для этого необходимо взять производную по  $i$  от  $D$ , а дальше приравняем ее к нулю.

$$\frac{dD}{di} = 1 + \frac{di'}{di} = 0 \quad (2)$$

Продифференцировав равенство  $e + e' = A$  по  $e$ , можем определить:

$$\frac{dA}{de} = 1 + \frac{de'}{de} \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) преобразовав, получаем

$$\frac{di'}{di} = \frac{de'}{de}, \text{ а значит:}$$

$$i=i' \quad (4)$$

и

$$e=e' = \frac{A}{2} \quad (5)$$

Как условия минимума  $D_{min}$ .

Из уравнений (2) и (3) определим, что

$$D_{min}=2i - A \text{ или } i = \frac{D_{min}+A}{2}, \quad (6)$$

А из уравнений (3) и (5)

$$\sin \frac{D_{min}+A}{2} = n \sin \frac{A}{2}$$

Уравнение (6) примет сложный вид в общем случае, если рассматривается луч, падающий под некоторым углом  $h$  к плоскости призмы; принимая, что  $k$ -это угол наклона преломленного луча к нормальной плоскости, то

$$\sin \frac{D_{min}+A}{2} = n \frac{\cos k}{\cosh} \sin \frac{A}{2} \quad (7)$$

Значения угла наименьшего отклонения меняются.

Из уравнения (1) видно, что величина угла отклонения  $D$  при различных значениях угла падения  $i$  будет иметь различные значения. Если угол  $i$  уменьшается, то угол  $i'$  увеличивается и наоборот. Значит, сильнее всего луч отклонится тогда, когда разность  $i - i'$  достигнет малого значения. Это достигается при значении в  $i = 90^\circ$  или при  $i' = 90^\circ$ . То есть:

$$D_{\max} = 90 + i - A \quad (8)$$

Преобразуя получим:

$$i = D_{\max} + A - 90$$

Если применить выведенные формулы к различным случаям расположения кристаллов в атмосфере и их форм, то можно объяснить разнообразие форм гало.

### 2.3 Влияние водяных капель и ледяных кристаллов на характеристики венцов.

Расположение цветов и сам характер явлений говорит о том, что мы имеем дело с дифракцией света, а теория венцов определяется рассмотрением дифракции света, которая происходит во время прохождения светового луча

сквозь небольшие отверстия или узкие щели. Роль отверстий выполняют ледяные иглы.

Если рассмотреть случаи прохождения монохроматического света через водяные капли и заменить частицу отверстием, то можно определить, что распределение освещенности  $I$  в дифракционном изображении выражается рядом:

$$I = \pi^2 r^4 \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{m^2}{1} + \frac{1}{3} \frac{m^4}{(1 \cdot 2)^2} - \frac{1}{4} \frac{m^6}{(1 \cdot 2 \cdot 3)^3} + \dots \right] \quad (1)$$

При этом

$$m = \frac{\pi r}{\lambda} \sin \theta$$

$\theta$ - угол, образованный рассматриваемыми лучами с их первоначальными направлениями

$r$ - радиус капли

Если знать значение угла  $\theta_{min}$ , которое соответствует минимумам яркости, тогда можно найти соотношение этих значений.

$$\sin \theta_{min} = \frac{\lambda}{r} \left( \frac{m}{\pi} \right)_{min} \quad (2)$$

Разность между соседними значениями  $\frac{m}{\pi}$ , которые соответствуют минимумам, остается фактически постоянной и равна 0,50. Следовательно:

$$\sin \theta_{min} = (n + 0,22) \frac{\lambda}{2r} \quad (3)$$

Где  $n$ - порядковый номер минимума

Из формулы (3) видно, что при малом значении угла  $\theta$  первый минимум ( $n=1$ ) будет обладать угловым радиусом, определенным по формуле:

$$\theta_1 = 0,61 \frac{\lambda}{r} \quad (4)$$

При этих значениях будет располагаться первое темное кольцо.

У второго темного кольца угловой радиус составит  $\theta_2 = 1,116 \frac{\lambda}{r}$ . Все следующие минимумы будут отстоять друг от друга на расстояние, которое равно:

$$\theta_n - \theta_{n-1} = 0,50 \frac{\lambda}{r} \quad (5)$$

Яркость ореола (первого максимума) намного больше, чем яркость дополнительных колец. Если есть не одно, а целое множество одинаковых отверстий, то тогда такое явление, как венец, сохранит свой характер и только его интенсивность станет возрастать пропорционально числу отверстий.

Для венцов в облаках, которые состоят из ледяных кристаллов, теория сведется к рассмотрению дифракции во время прохождения света сквозь узкие щели.

Обозначив ширину щели через  $a$ , получаем выражения вида:

$$I = a^2 \frac{\sin^2 u}{u^2} \quad (6)$$

$$u = \frac{\pi a \sin \theta'}{\lambda} \quad (7)$$

При этом положение минимумов определяется условием:

$$\sin \theta'_n = n \frac{\lambda}{a} \quad (8)$$

Где  $n = 1, 2, 3, \dots$ , а места максимумов условием

$$u = tgu \quad (9)$$

Размер венца определяется средним значением размеров капель или кристаллов в облаке. В капельно-жидких облаках эта связь наглядно выражена эмпирической формулой:

$$\sin \theta_k = (k + 0,22) \frac{\lambda}{2r} \quad (10)$$

Для облаков, состоящих из кристаллов льда (согласно теории дифракции) формула (10) приобретает аналогичный вид:

$$\sin \theta_k = \frac{k\lambda}{d} \quad (11)$$

Где  $k$ -номер кольца ( $k = 1, 2, 3 \dots$ )

$\theta_k$ -угловой радиус кольца номер  $k$

$d$ -толщина кристалла

$\lambda$ -длина волны

$r$ -радиус капель облака

Если рассчитать размер венца, то можно определить средний размер капель или кристаллов в облаке. Наблюдая за изменением размеров венца можно

судить о происходящих изменениях в облаке (укрупняются они или испаряются).

### 3. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ОТ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ.

3.1 Определение микрофизических характеристик облака в зависимости от формы и вида радуги.

Эффект радуги определяется тем, что под определенными углами образуются максимумы интенсивности рассеянного спектра и для различных цветов положения этих максимумов не перекрывается.

$$D_k = k\pi + 2[\alpha_1 - (k + 1)\alpha_2] \quad (1)$$

Применив формулу (1) можно рассчитать максимумы интенсивности для всего спектра радуги. Результаты вычисления для  $D_k$ , при значениях  $k = 1, 2$  представлены в Таблице 1 для нескольких длин волн. На этом расстоянии и будут наблюдаться максимумы яркости, характеризующие картину радуги.

Таблица 3.1.1. Максимумы интенсивности для всего спектра радуги

Цвет	Показатель преломления	Угол	Первичная радуга $k=1$	Вторичная радуга $k=2$
Фиолетовый ( $\lambda=0,40$ мкм)	1,344	$\alpha_1$ $\alpha_2$ $180^\circ - D_k$	58°48' 39°33' 40°36'	71°30' 43°54' 53°36'
Синий ( $\lambda=0,44$ мкм)	1,341	$\alpha_1$ $\alpha_2$ $180^\circ - D_k$	59°02' 39°48' 41°13'	71°36' 44°11' 52°46'
Голубой ( $\lambda=0,48$ мкм)	1,337	$\alpha_1$ $\alpha_2$ $180^\circ - D_k$	59°09' 39°56' 41°32'	71°42' 44°56' 52°12'
Зеленый ( $\lambda=0,55$ мкм)	1,335	$\alpha_1$ $\alpha_2$ $180^\circ - D_k$	59°17' 40°05' 41°46'	71°46' 45°19' 51°38'
Желтый ( $\lambda=0,58$ мкм)	1,334	$\alpha_1$ $\alpha_2$ $180^\circ - D_k$	59°21' 40°10' 41°58'	71°48' 45°23' 51°18'
Оранжевый ( $\lambda=0,63$ мкм)	1,333	$\alpha_1$ $\alpha_2$ $180^\circ - D_k$	59°25' 40°13' 42°05'	71°50' 45°27' 47°56'

Красный ( $\lambda=0,66$ мкм)	1,332	$\alpha_1$	59°29'	71°53'
		$\alpha_2$	40°19'	45°31'
		$180^\circ - D_k$	42°18'	50°40'

Параллельные лучи, которые падают на каплю, при выходе из нее оказываются расходящимися. Из таблицы 1 можно сделать вывод, что, к примеру, красный луч, падающий под углами, близкими по значению к 59°29', отклоняется и расходится меньше всего. Они идут пуском, отклоняясь от своего начального направления на угол  $D_k=137^\circ42'$ , дают наибольшую интенсивность на расстоянии 42°18' от антисолярной точки. В те точки, которые расположены от антисолярной точки на расстоянии меньше 42°18', красный луч не попадает. Все лучи меньшей длины волны, соответственно большей преломляемости, дают для угла наименьшего отклонения большие значения.

Если бы Солнце представлялось точно, то ширина радуги составляла бы 42°18' - 40°36' = 1°42'. Но так как диаметр Солнца равен 32', тогда ширина радуги равна 1°42' + 32' = 2°14' и все цвета спектра будут чистыми, за исключением красного цвета. Аналогично, в случае двукратного отражения луча в капле, ширина радуги составляет 56°36' - 50°40' + 32' = 3°34', а расположение цветов в ней будет обратным.

При трехкратном отражении могла бы образовываться радуга, расположенная в стороне от Солнца (на расстоянии 44° от него), но из-за небольшой интенсивности ее на ярко освещенном небе она никогда не наблюдается, так как не может быть воспринята человеческим глазом.

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\lambda}{2R_0}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot f^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

При

$$f = 2 \frac{d^2\varphi}{dy^2} \quad (3)$$

Тогда  $f = -4,126$  в первом случае и  $f = 24,313$  во втором случае.

Используя данные таблицы 3.1 и формулу (2) мы можем рассчитать значения дифракционного уширения при различных значениях радиуса капли. Результаты измерений представлены в таблицах 3.1.2-3.1.8.

Таблица 3.1.2 дифракционное уширение для красного луча для первичной и вторичной радуги соответственно.

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град.	$\Delta\varphi_2$ рад.	$\Delta\varphi_2$ град.
0,1	0,046	2,11	0,051	2,91
0,2	0,029	1,36	0,032	1,83
0,3	0,022	1,12	0,024	1,39
0,4	0,018	1,04	0,020	1,15
0,5	0,016	0,89	0,017	0,99
0,6	0,011	0,79	0,015	0,88
0,7	0,010	0,71	0,014	0,79
0,8	0,009	0,66	0,013	0,73
0,9	0,0085	0,61	0,012	0,67
1	0,0079	0,57	0,011	0,63

При радиусе капли в 1 мм, дифракционное уширение порядка половины градуса для первой радуги и около одного градуса для второй. Угловая ширина первой радуги равна  $1,72^\circ$ , а второй  $3,11^\circ$ .

Таблица 3.1.3 Дифракционное уширение для оранжевого луча.

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град	$\Delta\varphi_2$ рад	$\Delta\varphi_2$ град
0,1	0,042	2,43	0,047	2,70
0,2	0,027	1,53	0,029	1,70

0,3	0,020	1,17	0,023	1,29
0,4	0,017	0,97	0,019	1,07
0,5	0,015	0,83	0,016	0,92
0,6	0,013	0,74	0,014	0,82
0,7	0,011	0,66	0,013	0,74
0,8	0,010	0,61	0,012	0,68
0,9	0,0098	0,56	0,011	0,62
1	0,0091	0,52	0,010	0,58

Таблица 3.1.4 Дифракционное уширение для желтого луча

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град	$\Delta\varphi_2$ рад	$\Delta\varphi_2$ град
0,1	0,039	2,26	0,044	2,52
0,2	0,025	1,43	0,028	1,59
0,3	0,019	1,09	0,021	1,21
0,4	0,016	0,89	0,017	1,00
0,5	0,014	0,77	0,015	0,86
0,6	0,012	0,69	0,013	0,76
0,7	0,011	0,62	0,012	0,69
0,8	0,0097	0,57	0,011	0,63
0,9	0,0091	0,52	0,010	0,58
1	0,008	0,49	0,009	0,54

Таблица 3.1.5 Дифракционное уширение для зеленого луча.

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град	$\Delta\varphi_2$ рад	$\Delta\varphi_2$ град
0,1	0,038	2,17	0,042	2,42

0,2	0,024	1,37	0,027	1,52
0,3	0,018	1,05	0,020	1,16
0,4	0,015	0,86	0,017	0,96
0,5	0,013	0,74	0,014	0,83
0,6	0,011	0,66	0,013	0,73
0,7	0,010	0,59	0,012	0,66
0,8	0,0094	0,54	0,011	0,60
0,9	0,0090	0,50	0,0098	0,56
1	0,008	0,47	0,0090	0,52

Таблица 3.1.6 Дифракционное уширение для голубого луча

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град	$\Delta\varphi_2$ рад	$\Delta\varphi_2$ град
0,1	0,035	1,98	0,039	2,27
0,2	0,022	1,25	0,025	1,43
0,3	0,017	0,95	0,019	1,09
0,4	0,014	0,79	0,016	0,90
0,5	0,012	0,68	0,014	0,78
0,6	0,010	0,59	0,012	0,69
0,7	0,009	0,54	0,011	0,62
0,8	0,008	0,49	0,0099	0,57
0,9	0,0078	0,46	0,0092	0,53
1	0,0074	0,43	0,008	0,49

Таблица 3.1.7 Дифракционное уширение для синего луча.

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град	$\Delta\varphi_2$ рад	$\Delta\varphi_2$ град
0,1	0,033	1,86	0,037	2,15
0,2	0,020	1,17	0,024	1,35
0,3	0,016	0,89	0,018	1,03
0,4	0,013	0,74	0,015	0,85
0,5	0,011	0,64	0,013	0,73
0,6	0,009	0,56	0,011	0,65
0,7	0,0089	0,51	0,010	0,59
0,8	0,0081	0,47	0,009	0,54
0,9	0,0075	0,43	0,0086	0,49
1	0,0070	0,40	0,0080	0,46

Таблица 3.1.8 Дифракционное уширение для фиолетового луча

R,мм	$\Delta\varphi_1$ рад.	$\Delta\varphi_1$ град	$\Delta\varphi_2$ рад	$\Delta\varphi_2$ град
0,1	0,030	1,75	0,035	2,00
0,2	0,019	1,10	0,022	1,26
0,3	0,015	0,84	0,017	0,96
0,4	0,012	0,69	0,014	0,79
0,5	0,010	0,59	0,012	0,69
0,6	0,009	0,53	0,010	0,61
0,7	0,008	0,48	0,009	0,55
0,8	0,0076	0,44	0,0087	0,50
0,9	0,0070	0,40	0,0080	0,46
1	0,006	0,38	0,007	0,43

На основании таблиц 3.1.2-3.1.8 построим диаграмму значений дифракционного уширения всего спектра радуги.

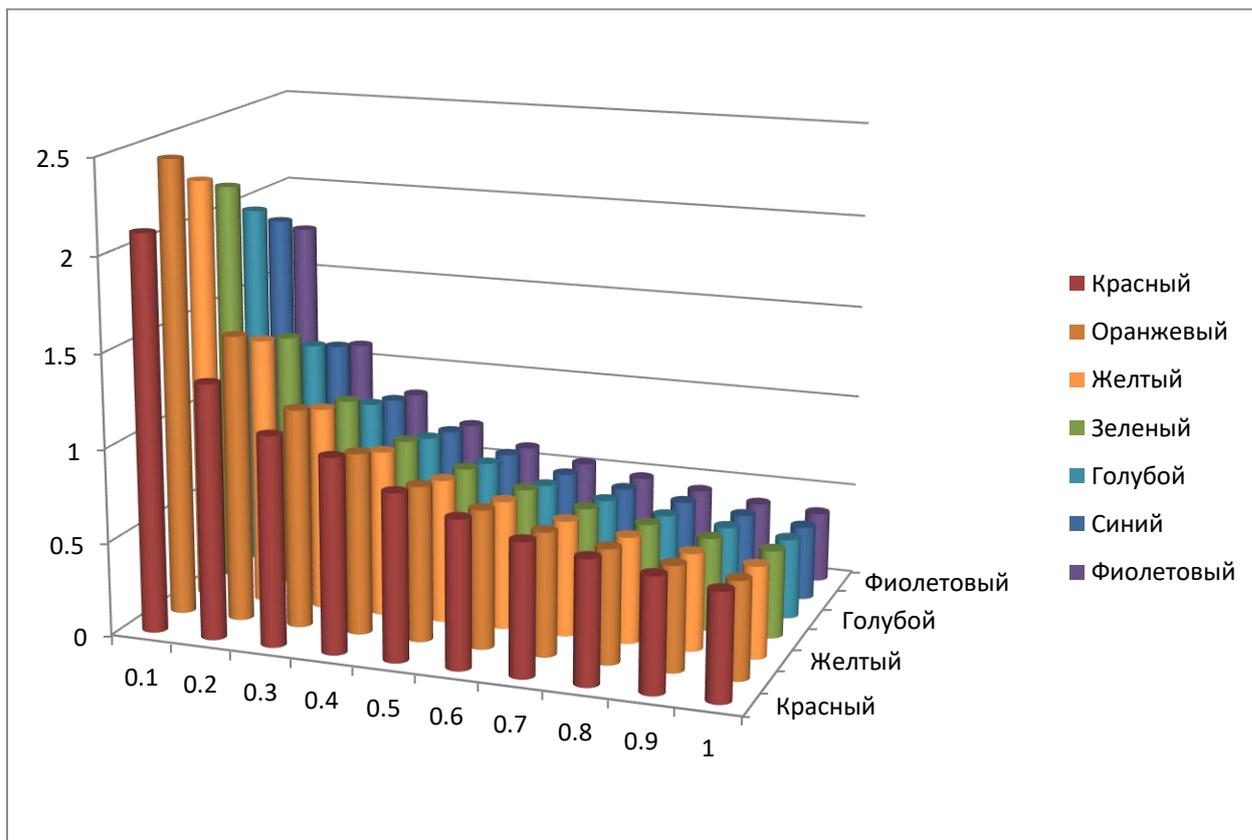


Диаграмма 1. Дифракционное уширение всего спектра радуги.

При уменьшении радиуса капли происходит дифракционное уширение пучков лучей цветов и их перекрывание.

Используя данные таблиц 3.2-3.8 и проанализировав диаграмму 1 можно сделать вывод, что:

Если радиус капель составляет 0,5-1 мм, тогда внешний край основной радуги яркий, темно-красный. Далее идет светло-красный спектр и далее чередуются все цвета радуги. Особенно яркими становятся фиолетовый и зеленый цвета. Образуется много дополнительных дуг (до пяти), в них чередуются фиолетово-розовые тона с зелеными. Дополнительные дуги примыкают к основным радугам.

При радиусе капель в 0,25 мм, красный край радуги становится слабее. Остальные цвета видны по-прежнему хорошо. Несколько дополнительных фиолетово-розовых дуг сменяются зелеными.

Если радиус капле составляет 0,10-1,15 мм, то красного цвета в основной дуге не останется совсем. Наружный край радуги станет оранжевым. В остальном радуга хорошо развита. Дополнительные дуги приобретают желтый оттенок. Между дополнительными дугами и основной радугой образуются дополнительные просветы. Согласно этой зависимости построена диаграмма 2.

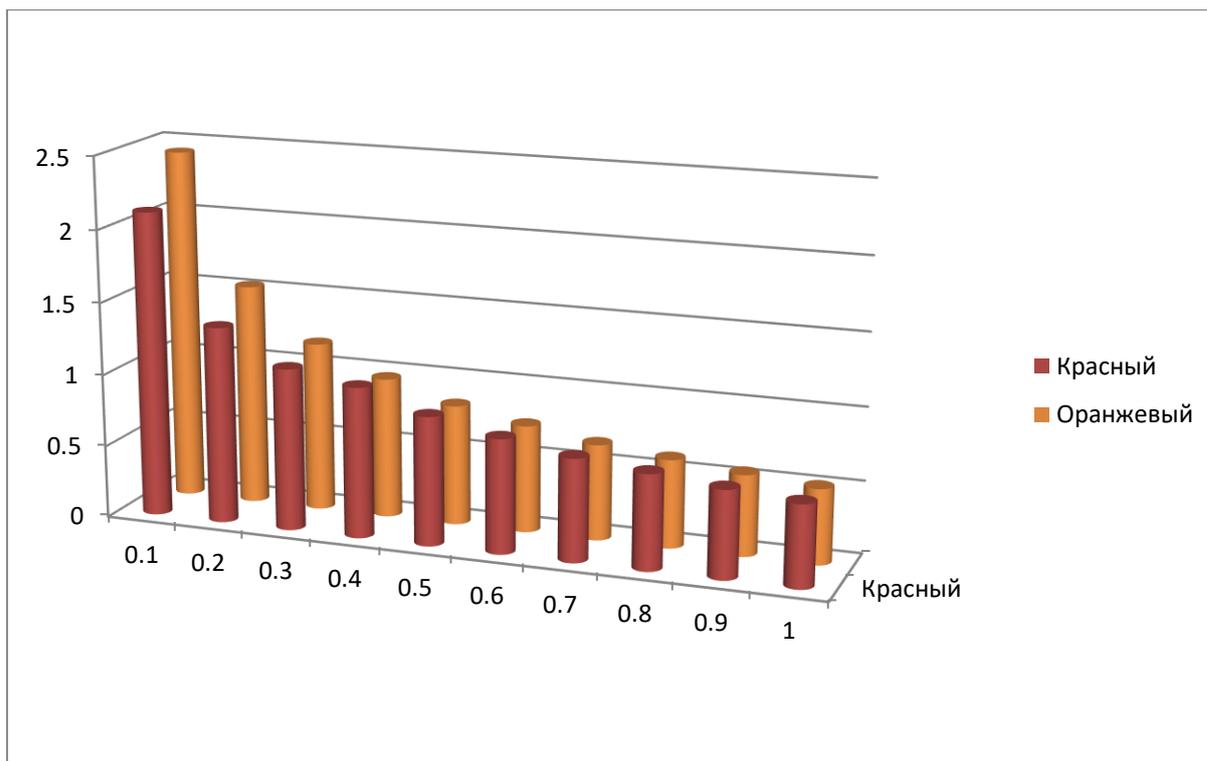


Диаграмма 2. Сравнение красного и желтого спектра при различных значениях радиуса капли.

При радиусе капле в 0,04- 0,05 мм, радуга становится заметно шире и бледнее. Наружный край становится бледно-желтым. Самым ярким становится фиолетовый цвет. Первая дополнительная дуга отделяется от основной радуги широким промежутком, цвет становится бледно- зеленым и светло- фиолетовым.

При радиусе капле 0,03 мм, основная радуга становится еще шире с очень слабо окрашенным желтым краем и содержит в себе отдельные белые полосы.

Если радиус капле уменьшается до 0,025 мм и менее, то радуга станет совершенно белой и примерно в два раза шире обычной радуги. Такая радуга будет иметь вид блестящей белой полосы. Внутри нее могут прослеживаться окрашенные дуги, сначала бледно-голубые, или бледно-зеленые, затем бледно-красные.

### 3.2 Определение микрофизических характеристик облака в зависимости от видов гало.

Для того, чтобы объяснить окрашенные формы гало, необходимо рассмотреть ход луча в ледяной призме, который падает на нее и выходит из нее только через грани, образующие с первой угол не больше  $99^{\circ}32'$ .

Малое гало, как и большое, образуется в результате двукратного преломления лучей в кристаллических призмах. Значит, наблюдатель видит гало под наименьшими углами отклонения луча.

Для определения угла отклонения воспользуемся формулой (3.2.1)

$$D_{min} = 2i - A \text{ или } i = \frac{D_{min} + A}{2} \quad (3.2.1)$$

Результаты измерений представлены в таблице 3.2.1

Таблица 3.2.1. Значения наименьших углов отклонения

Цвет	$n$	$A = 60^{\circ}$	$A = 90^{\circ}$
Фиолетовый	1,317	$22^{\circ}22'$	$47^{\circ}16'$
Желтый	1,310	$21^{\circ}50'$	$45^{\circ}44'$
Красный	1,307	$21^{\circ}34'$	$45^{\circ}06'$

Величина угла отклонения  $D$  при разных значениях угла падения  $i$  будет разной. При уменьшении угла  $i$ , увеличивается угол  $i'$ , и наоборот. Следовательно, больше всего луч отклонится тогда, когда разность  $i - i'$  достигнет наибольшего значения; это будет при  $i = 90^{\circ}$  или при  $i' = 90^{\circ}$ .

### 3.3 Определение микрофизических характеристик облака в зависимости от формы и вида и способа образования венцов.

Рассматривая случай прохождения монохроматического света через водяные капли и заменив частицу отверстием, можно определить, что распределение освещенности  $I$  в дифракционном изображении выражается рядом:

$$I = \pi^2 r^4 \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{m^2}{1} + \frac{1}{3} \frac{m^4}{(1 \cdot 2)^2} - \frac{1}{4} \frac{m^6}{(1 \cdot 2 \cdot 3)^3} + \dots \right] \quad (1)$$

Где

$$m = \frac{\pi r}{\lambda} \sin \theta$$

$\theta$ - угол, образованный рассматриваемыми лучами с их первоначальными направлениями

$r$ - радиус капли

Ряд (1) сходится при любых значениях  $m$ , и его суммирование при значениях  $m \geq 0$  дает полное распределение освещенности в дифракционном изображении. Вычисление показывает, что в случае монохроматического света, изображение состоит из ряда колец, которые отделены одно от другого темными промежутками. Максимумы яркости и их относительные значения, а также минимумы, равные нулю, приведены для разных значений  $\frac{m}{\pi}$  в таблице

#### 3.3.1.

Таблица 3.3.1. Относительные значения минимумов и максимумов яркости для венцов, образующихся в облаке, состоящем из водяных капель.

Номер колец	$\frac{m}{\pi_{\max}}$	Разность	$f_{\max}$	$\frac{m}{\pi_{\min}}$	Разность	$f_{\min}$
1	0	-0,819	1	0,610	-0,506	0
2	0,819	-0,527	0,0174	1,116	-0,503	0
3	1,346	-0,512	0,0042	1,619	-0,502	0
4	1,856	-0,504	0,0016	2,121	-0,501	0

Яркость ореола (первого максимума) намного больше, чем яркость дополнительных колец. Когда есть не одно, а целое множество одинаковых отверстий, тогда такое явление как венец сохраняет свой характер и только его интенсивность увеличивается пропорционально числу отверстий.

Для венцов в облаках, состоящих из ледяных кристаллов, теория сводится к рассмотрению дифракции во время прохождения света сквозь узкую щель.

Обозначив ширину щели  $a$ , имеем:

$$= a^2 \frac{\sin^2 u}{u^2} \quad (6)$$

$$u = \frac{\pi a \sin \theta'}{\lambda} \quad (7)$$

В этом случае положения минимума определяются условием

$$\sin \theta'_n = n \frac{\lambda}{a} \quad (8)$$

Где  $n=1,2,3,\dots$ , а места максимумов условием

$$u = tgu \quad (9)$$

Результаты вычислений представлены в Таблице 3.3.2

Таблица 3.3.2 Относительные значения минимумов и максимумов яркости для венцов, образующихся в облаке, состоящем из кристаллов льда.

Номер кольца	$\frac{a}{\pi} - \frac{a \sin \theta'}{\lambda}_{\text{макс}}$	разность	$I_{\text{макс}}$	$\frac{a}{\pi} - \frac{a \sin \theta'}{\lambda}_{\text{мин}}$	разность	$I_{\text{мин}}$
1	0	-1,430	1	1	-1	0
2	1,430	-1,029	0,0472	2	-1	0
3	2,459	-1,012	0,0165	3	-1	0
4	3,471	-1,006	0,0083	4	-1	0

Если сравнивать результаты, приведенные в таблице 1 и в таблице 2, можно сделать вывод, что в случае кристаллических облаков все минимумы расположены один от другого на равных расстояниях и что при одинаковой

освещенности в ореоле дополнительные венцы при ледяных кристаллах будут ярче. Но если сравнить между собой размеры ореола для капли и для ледяного кристалла, можно заметить, что ореол при каплях шире, чем при кристалле.

## Заключение

В ходе работы над дипломным проектом была выполнена поставленная задача.

Были рассмотрены теоретические основы оптических явлений в облаках и осадках на примере радуги.

Для приведения анализа были привлечены методы геометрической оптики и дифракции света. Проведенный анализ позволил получить следующие выводы:

1. Оптические явления могут быть индикатором микрофизической структуры облаков и осадков.

2. Были проведены расчеты для анализа особенностей характеристики радуги в зависимости от размеров капель, из которых состоит облако.

Анализ показал, что по виду радуги можно приближенно оценить размеры капель дождя, образовавших эту радугу.

Чем крупнее капли дождя, тем радуга получается уже и ярче, характерной особенностью для крупных капель является наличие насыщенного красного спектра в первичной радуге. Многочисленные дополнительные дуги тоже имеют яркие тона и без промежутков прилегают к основным радугам. Чем меньше радиус капель, тем радуга становится шире и бледнее с оранжевым или желтым краем. Дополнительные дуги дальше отстоят друг от друга и от основных радуг.

Появление гало говорит о приближении теплого фронта, поскольку оно всегда наблюдается в перисто-слоистых облаках, которые обычно входят в систему облаков теплого фронта. Ввиду того, что венцы образуются на более мелких элементах облака (каплях или кристаллах), чем гало, то можно сделать несколько заключений. Если сначала наблюдались венцы, затем они пропали и через некоторое время появились гало, то это говорит об укрупнении кристаллов облака и об увеличении вероятности выпадения осадков. И наоборот, если сначала наблюдалось гало, а затем появились венцы, то это означает, что элементы облака испаряются, уменьшаются в размерах, а значит, уменьшается вероятность выпадения осадков.

Размер венцов определяется средними значениями размеров капель или кристаллов, из которых состоит облако. Зная размер венца, можно определить средний размер капель или кристаллов. Наблюдая за изменениями размеров венцов (увеличиваются или уменьшаются их размеры) можно судить о том, что происходит с элементами облака: испаряются они или укрупняются.

#### Список литературы

1. Тверской П.Н. Курс метеорологии (физика атмосферы). Ленинград,: Гидрометеоиздат, 1962.-700с.
2. Зверева С.В. В мире солнечного света. Ленинград,: Гидрометеоиздат, 1988.-160с.
3. Нуссецвейг Х. Теория радуги. Успехи физических наук. 1978.-Т.125.-527-547с.
4. Миннарт М. Свет и цвет в природе. Москва,: Наука, 1969.-344с.
5. Тарасов Л.В. Физика в природе. Москва,: Просвещение, 1988.-352с.

6. Арнольд В.И. Математическое понимание природы. Москва,:МЦНМО, 2010.-144с.
7. Андреев Н.Н., Коновалов С.П., Панюнин Н.М. Радуга. Математическая составляющая. Москва,: Математические этюды. 2019.-338с.