

Для посадки в наиболее сложных условиях установлены метеоминимумы трех категорий: I — $z_{\text{пр}} = 60$ м, $S_{\text{ВПП}} = 800$ м; II — $30 \text{ м} \leq z_{\text{пр}} \leq 60$ м, $400 \text{ м} \leq S_{\text{ВПП}} < 800$ м; III — $z_{\text{пр}} < 30$ м, $S_{\text{ВПП}} < 400$ м.

В целом проблема метеорологического обеспечения полетов и особенно посадки самолетов и других летательных аппаратов (в том числе ракет, космических кораблей), равно как морского и речного флота и наземных видов транспорта остается одной из наиболее актуальных проблем, которые стоят перед метеорологической наукой и повседневно решаются метеорологической службой. В комплексе метеовеличин и явлений, оказывающих влияние на работу всех видов транспорта, видимости отводится одно из первых мест.

4 Оптические явления в облаках и осадках

В облаках, туманах и осадках при определенных условиях возникают разнообразные оптические явления: венцы, глории, радуги и гало. К настоящему времени установлено, что объяснение всех этих оптических явлений содержится в общей теории рассеяния. При рассмотрении рассеяния радиации в атмосфере указывалось (см. п. 2 главы 6), что характер явлений, возникающих при рассеянии, определяется отношением радиуса (r) рассеивающих частиц к длине волны (λ) падающего света, т. е. значением параметра $\mu = 2\pi r/\lambda$. При аэрозольном рассеянии угловое распределение рассеянного света (форма индикатрисы рассеяния) и, в частности, положение максимумов рассеянного света зависит от μ . Известную роль при этом играет и показатель преломления рассеивающих частиц. Когда μ достигает значений, соответствующих мелким каплям или кристаллам облаков и туманов, на индикатрисах рассеяния появляются дифракционные максимумы, угловые размеры которых определяют размеры венцов. При укрупнении капель облаков и осадков (радиус капель, как правило, больше 10 мкм) на индикатрисах рассеяния возникают дифракционные максимумы («лепестки») с угловыми размерами, соответствующими положению радуг различных порядков.

Рассеяние света на кристаллах льда размером более 10—20 мкм порождает дифракционные максимумы (пики), известные под названием гало. Возникновение и яркость оптических явлений, помимо μ , зависит от оптической толщины облака, тумана или завесы дождя. Яркие венцы, глории, радуги и гало могут наблюдаться только в тонких облаках, оптическая толщина которых не превышает единицу. При таких оптических толщинах многократное рассеяние света не играет заметной роли и не размывает

дифракционных максимумов и минимумов, возникших при однократном рассеянии (дифракции). По этой же причине яркие радуги возникают при умеренных или слабых дождях, а не при сильных, образующих плотную завесу. Яркие и многочисленные радуги наблюдаются также в фонтанах и струях поливальных машин, поскольку капли крупные, оптическая толщина завесы из капель небольшая, а фон неба темный. То же самое можно сказать и о возникновении ярких гало.

При дальнейшем увеличении размеров капель и кристаллов (теоретически при $\mu \rightarrow \infty$) закономерности и соотношения теории рассеяния переходят в законы, установленные на основе представленной геометрической оптики.

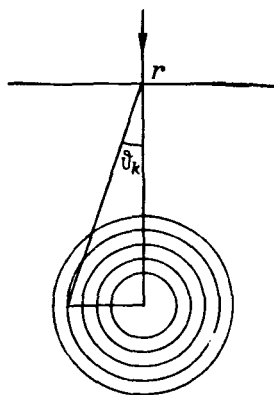


Рис. 22.8. Дифракция света на каплях облака и образование венцов.

4.1. Венцы. *Венцами* называются малые радужные круги вокруг Луны или Солнца, если последние просвечивают сквозь тонкие капельно-жидкие или кристаллические облака, например As, Ac, Cs. Непосредственно к светилу примыкает кольцо, угловой размер которого в зависимости от радиуса капель облака может изменяться в широких пределах — от долей градуса до 13° . Это *ореол* (или *венец*) первого порядка. Наблюдения показали, что ореол разноцветен: к светилу примыкает синеватая кайма, переходящая в желтоватую в середине и коричневатую-красную на внешнем крае. За ореолом следуют концентрические с ним венцы второго, третьего и следующих по-

рядков, в которых синий цвет внутри сменяется зеленым, а затем красным. Чаще всего виден только ореол, но иногда и три-четыре кольца. Размеры венцов переменные: от долей градуса до $4-5^\circ$.

Венцы возникают при однократном рассеянии за счет дифракции лунного или солнечного света на каплях или кристаллах облаков.

При рассеянии естественного солнечного или лунного света образуются радужные кольца, разделенные темными промежутками (рис. 22.8).

На практике часто пользуются формулами, описывающими положение темных колец (минимумов яркости):

для капельно-жидких облаков

$$\sin \vartheta_k = (k + 0,22) \lambda / 2r,$$

для кристаллических облаков

$$\sin \vartheta_k = k\lambda / d,$$

где k — номер кольца ($k = 1, 2, 3, \dots$), θ_k — угловой радиус кольца k , d — толщина кристалла.

Приведенные формулы используют в лабораторных экспериментах и при наблюдениях в естественных условиях для определения среднего радиуса капель облака или тумана. С этой целью измеряют угловой радиус θ_k красного края венца, считая, что сразу за ним располагается минимум яркости некоторого условного «белого» цвета с длиной волны 0,57 мкм, равной среднему арифметическому из длин волн красного (0,70 мкм) и синего (0,45 мкм) цветов. Наблюдая за венцами, можно судить о том, что происходит с каплями и кристаллами в облаке: при увеличении угловых размеров венцов размеры капель уменьшаются.

Перечислим ряд других явлений, родственных венцам и имеющих одинаковое с ними происхождение.

Глориями называются радужные венцы, состоящие из одного или нескольких ярких концентрических колец вокруг тени самолета, отбрасываемой на нижележащее облако. *Нимб* — это венец или сияние (корона) вокруг тени головы человека, идущего по покрытому росой лугу рано утром, когда только что взошло Солнце. *Брокенский призрак* — это радужные кольца, образующиеся при низком Солнце вокруг тени человека, на боковой стороне тумана, находящегося на некотором расстоянии от человека. Такие условия часто создаются в горах рано утром. Явление впервые наблюдалось на г. Брокен в ФРГ.

Согласно теории дифракции, перечисленные явления можно объяснить аналогично венцам, но в этих случаях подвергаются дифракции и солнечные лучи, отраженные от капель облаков, росы или тумана (дифракция назад). Глорию иногда называют антивенцом.

Иризация облаков — радужные пятна на краях облаков Sc или As, а также в конденсационных следах за самолетами. Иризация, в отличие от венцов, возникает при наличии более мелких элементов облаков и при резко выраженных различиях в размерах мелких капель.

Кольцо Бишопа — венец коричнево-красного (на внешнем крае) цвета радиусом около 22° и шириной около 10° . Образуется вокруг Солнца после интенсивных извержений вулканов. О том, что это венец, а не гало, свидетельствует расположение цветов. Большой размер венца объясняется малыми размерами частиц (меньше 2 мкм), образовавшихся в верхних слоях атмосферы из газов вулканических извержений.

4.2. Радуги. *Радуга* — цветная дуга с угловым радиусом около 42° с центром в антисолярной точке и видимая на фоне завесы дождя (или полос падения, часто не достигающих Земли), в стороне противоположной Солнцу, обязательно при Солнце, не закрытом облаками. Внешний край радуги красный, за ним идут оранжевая, желтая, зеленая, сине-голубая и фиолетовая дуги.

Иногда видна вторая радуга, концентрическая с первой, с угловым радиусом около 50° и обратным расположением цветов. Около водопадов и фонтанов иногда наблюдаются, кроме описанных радуг, еще слабые дополнительные дуги около фиолетовых краев радуг с неполным набором цветов спектра, а также одна или две радуги вокруг Солнца.

Не имея возможности привести полную теорию радуг, ограничимся простейшим ее объяснением, которое можно сделать на основании законов преломления и отражения солнечного света в рамках геометрической оптики. Впервые такое объяснение радуги было дано еще Декартом в 1637 г. (для белых лучей) и дополнено

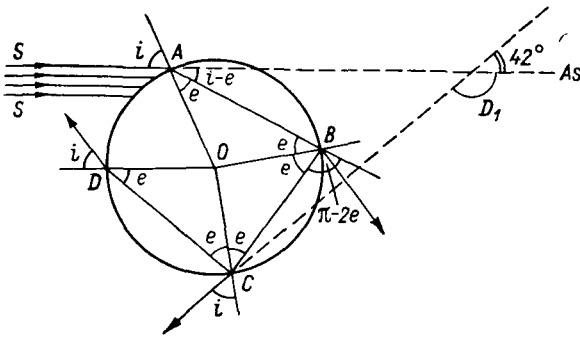


Рис. 22.9. Ход солнечного луча в капле дождя при образовании первой и второй радуг.

Ньютоном применительно к цветным лучам. Несмотря на то, что на основе законов геометрической оптики нельзя воспроизвести точную индикатрису в направлении радуг и в области малых углов (вокруг направлений вперед и назад), тем не менее для случая достаточно больших капель дождя они дают хорошее приближение к действительности.

Пусть пучок параллельных солнечных лучей падает на каплю (рис. 22.9). Поверхность капли шарообразная, поэтому углы падения лучей изменяются от 0 до 90° . Проследим за лучом, упавшим на каплю в точке A . Преломившись, луч входит в каплю и, дойдя до точки B , может частично выйти из капли, часть энергии этого луча, испытав внутреннее отражение в точке B , доходит до точки C . Здесь снова часть энергии луча выходит из капли, а часть после второго внутреннего отражения доходит до точки D и т. д. В принципе луч может испытать любое число k внутренних отражений. Угол отклонения D_k луча от первоначального направления после выхода из капли можно записать в виде:

$$D_k = 2(i - e) + k(\pi - 2e) = k\pi + 2[i - (k + 1)e], \quad (4.2.1)$$

где k — число внутренних отражений луча; первое слагаемое — поворот луча в точках входа (A) и выхода (D). Угол падения луча

на каплю i и угол преломления e связаны известным соотношением:

$$\sin i = n \sin e \quad (4.2.2)$$

или после дифференцирования

$$\cos i \cdot di = n \cos e \cdot de, \quad (4.2.3)$$

где n — показатель преломления луча в капле (по отношению к воздуху).

Параллельный пучок лучей, входящих в каплю, по выходе из капли оказывается расходящимся. Наибольшую энергию несут лучи, лежащие вблизи луча, испытавшего минимальное отклонение. Эти лучи и образуют радугу.

Найдем угол падения луча i , который после прохождения капли будет иметь минимальный угол отклонения. Продифференцируем (4.2.1) по углу падения i и приравняем нулю:

$$\frac{dD_k}{di} = 1 - (k+1) \frac{de}{di} = 1 - (k+1) \frac{\cos i}{n \cos e} = 0. \quad (4.2.4)$$

В (4.2.4) вместо de/di подставлено выражение из (4.2.3). Равенство нулю (4.2.4) соответствует как условию максимума, так и минимума. Можно показать, что $d^2D_k/di^2 > 0$, поэтому (4.2.4) соответствует минимуму D_k . Интересующий нас угол падения i найдем с помощью следующих последовательных преобразований (4.2.4):

$$n \cos e = (k+1) \cos i, \quad n^2 (1 - \sin^2 e) = (k+1)^2 \cos^2 i,$$

$$n^2 \left(1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}\right) = (k+1)^2 \cos^2 i,$$

$$n^2 \left(1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}\right) = (k+1)^2 (1 - \sin^2 i),$$

откуда

$$\sin^2 i = \frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}. \quad (4.2.5)$$

Угол e , соответствующий найденному i , можно вычислить по (4.2.2)

Оценим угловые радиусы цветных дуг первой радуги ($k=1$), образованных крайними лучами видимого спектра: красным и фиолетовым, для которых показатели преломления воды соответственно равны 1,33 и 1,34. По (4.2.5), (4.2.2) и (4.2.1) находим значения углов отклонения от направления солнечных лучей для красного цвета $D_1=137^\circ 30'$ и фиолетового $D_1=139^\circ 20'$. Углы отклонения лучей красного и фиолетового цвета от прямой, соединяющей антисолярную точку с наблюдателем, соответственно составляют $180^\circ - 137^\circ 30' = 42^\circ 30'$ и $180^\circ - 139^\circ 20' = 40^\circ 40'$. Таким образом,

в первой радуге наружная дуга красная, а внутренняя фиолетовая. Угловая ширина первой радуги

$$\Delta_1 = 42^\circ 30' - 40^\circ 40' + 32' = 2^\circ 22',$$

где $32'$ — угловая ширина Солнца.

Аналогичные вычисления для второй радуги ($k=2$) приводят к следующим значениям углов отклонения лучей от прямой, идущей от антисолярной точки: $50^\circ 34'$ — для красного, $53^\circ 56'$ — для фиолетового цветов; ширина радуги $\Delta_2 = 53^\circ 56' - 50^\circ 34' + 32' = 3^\circ 54'$. Расположение цветов во второй радуге обратное первой. Вторая радуга бледнее первой, так как она образована лучами значительно меньшей энергии, а площадь второй радуги почти в 2 раза больше первой.

Расчеты для радуг порядков $k=3, 4, 5, 6, 7, 8$ и т. д. показали, что 3-я и 4-я радуги располагаются вокруг Солнца, 5-я и 6-я — вокруг антисолярной точки, 7-я и 8-я — снова вокруг Солнца и т. д. Согласно расчетам, из энергии луча, упавшего на каплю в точке A , 6,6 % отражается, 88,5 % проходит сквозь каплю и только 4,9 % испытывает первое внутреннее отражение в точке B и идет к точке C . Здесь снова происходит аналогичное разделение энергии между лучами, выходящим из капли и второй раз отраженным от внутренней поверхности капли. Поэтому на радугу всех порядков расходуется менее 5 % энергии из падающего пучка, при этом около 4 % идет на образование первой радуги. Обычно видна только первая радуга и изредка вторая. На остальные радуги остается слишком мало энергии.

По теории Декарта—Ньютона вид радуги должен быть всегда одинаковым. В действительности же иногда радуга имеет яркие насыщенные цвета, а иногда она блеклая, почти белая, например лунная радуга. Радуга бывает широкая и узкая. Вблизи фиолетовых краев основных радуг появляются дополнительные дуги чаще одна, иногда 2—3, в которых наиболее различимы розовый и зеленый цвета. Расчеты на основании формул теории дифракции показали, что если капли крупные, то радуга получается узкая и яркая с насыщенным красным краем. Дополнительные дуги также имеют более насыщенные тона и располагаются ближе к фиолетовым краям радуг. Если капли мелкие, то радуга получается широкая и почти белая, со слегка красноватым или оранжевым краем. Дополнительные дуги также блеклые и далеко отстоят от фиолетовых краев радуг.

С Земли в лучшем случае видна половина круга радуги, если Солнце на горизонте. С самолета можно увидеть целый круг радуги. При высотах Солнца более 42° первая радуга оказывается под горизонтом, а при высотах более 50° и вторая радуга опускается под горизонт.

Свет радуги характеризуется необычайно высокой степенью поляризации, которая достигает 90 % и более в первой радуге и

около 80 % во второй. В этом легко убедиться, если посмотреть на радугу через николеву призму. При небольшом угле поворота призмы радуга пропадает полностью.

4.3. Гало. Гало возникает при прохождении солнечных лучей через тонкие перисто-слоистые облака или конденсационные следы за самолетом, состоящие из ледяных кристаллов. Явления гало многообразны. Наиболее часто вокруг Солнца появляется круг с угловым радиусом 22° , реже концентрический с ним круг с угловым радиусом 46° и совсем редко круг с угловым радиусом 90° . Иногда виден белый горизонтальный круг, проходящий через Солнце. На пересечении этого круга с кругами гало 22 и 46° появляются яркие радужные пятна — ложные (побочные) Солнца, а также ложные (побочные) Луны. Довольно часто наблюдаются касательные дуги к кругам 22 и 46° , чаще горизонтальные дуги (верхняя и нижняя) и реже боковые. Над Солнцем и под ним в моменты, близкие к восходу или заходу, появляются световые столбы. На белом горизонтальном круге диаметрально противоположно Солнцу или Луне иногда появляются противосолнце и противолуна. Светлое пятно в солнечном вертикале, расположенное под горизонтом на глубине, равной высоте Солнца над горизонтом, называется нижним Солнцем.

По характеру окраски гало делят на две группы: окрашенные в радужные цвета (цветные гало) и неокрашенные (белые гало). К окрашенным гало относятся: все круги вокруг Солнца, ложные Солнца, касательные дуги. Характер окраски у всех гало одинаков. Часть гало, обращенная к Солнцу (дуга, край или бок), окрашена в красный цвет, противоположная — в синевато-сиреневый. К белым гало относятся: горизонтальный круг и световые столбы. Окрашенные гало возникают под влиянием преломления солнечных или лунных лучей в кристаллах, белые — вследствие отражения от кристаллов.

Ледяные кристаллы являются гексагональными. Правильные их формы бывают двух основных типов: 1) кристаллы с хорошо развитой главной осью — шестигранные ледяные столбики или ледяные иглы; 2) кристаллы с плохо развитой главной осью — шестиугольные пластинки. К последним относятся все формы снежинок.

При падении в атмосфере кристаллы ориентируются таким образом, чтобы сопротивление воздуха их падению было максимальным. Поэтому столбики падают при *горизонтальном* положении их главных осей, а пластинки и снежинки — при *вертикальном*. Кристаллы неправильной формы падают при *хаотическом* положении их главных осей.

Как и в случае радуг, ограничимся изложением простейшей теории гало, основанной на законах геометрической оптики.

Пусть луч падает на боковую грань кристалла под углом i (рис. 22.10) и, преломившись, проходит через кристалл и выходит

через другую грань. Средний показатель преломления льда для световых лучей $n=1,31$. В предельном случае либо i , либо i' равен 90° . Пусть $i' = 90^\circ$. Тогда из соотношения:

$$n = \sin i / \sin e = \sin i' / \sin e' \quad (4.3.1)$$

находим, что $e' = 49^\circ 46'$. Если $i = 90^\circ$, то $e = 49^\circ 46'$. Преломляющий угол A призмы, как показывает рис. 22.10, равен $e + e'$ и не должен превосходить максимального значения этой суммы, т. е. $99^\circ 32'$. Таким образом, световые лучи, пройдя сквозь кристалл, могут выйти из него только в том случае, если двугранный угол между боковыми гранями этого кристалла будет меньше $99^\circ 32'$. В гексагональных шестигранных кристаллах — призмах есть два угла, удовлетворяющие этому условию. Это — двугранный угол между боковыми гранями, взятыми через одну ($A = 60^\circ$) (эти призмы работают по существу, как трехгранные), и двугранный угол между боковыми гранями и основаниями ($A = 90^\circ$).

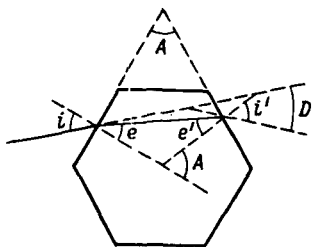


Рис. 22.10. Преломление световых лучей в ледяном кристалле.

Вернемся к рис. 22.10. Найдем угол отклонения луча D от его первоначального направления после прохождения через кристалл:

$$D = i - e + i' - e' = i + i' - A. \quad (4.3.2)$$

Угол отклонения D будет минимальным при $i = i'$, при этом $e = e' = A/2$. Поэтому

$$D_{\text{мин}} = 2i - A. \quad (4.3.3)$$

Из (4.3.3) определим i и запишем формулу (4.3.1) для луча, испытавшего минимальное отклонение:

$$\sin \frac{D_{\text{мин}} + A}{2} = n \sin \frac{A}{2}. \quad (4.3.4)$$

Угол отклонения D будет максимальным ($D_{\text{макс}}$), если i или i' равен 90° . Пусть $i' = 90^\circ$, тогда из (4.3.2) следует: $D_{\text{макс}} = i + 90^\circ - A$. Условие (4.3.1) преломления луча, испытавшего максимальное отклонение в результате прохождения призмы, запишется так:

$$\left. \begin{aligned} \sin(D_{\text{макс}} + A - 90^\circ) &= n \sin(A - e'), \\ n \sin e' &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.3.5)$$

Используя полученные формулы (4.3.4) и (4.3.5), дадим объяснение возникновению ложных Солнц, их хвостов и кругов вокруг Солнца. Преломляющий угол призмы $A=60^\circ$. Солнце находится вблизи горизонта. Рассмотрим три случая ориентации главных осей кристаллов.

1. Кристаллы в виде шестигранных столбиков ориентированы так, что их главные оси *вертикальны*. Солнечные лучи входят в боковые грани и выходят через боковые грани, взятые через одну, образуя радужные пятна ложных Солнц *слева и справа* от Солнца. В данном случае все солнечные лучи падают в плоскости сечений призм, перпендикулярных главным осям кристаллов, однако разные лучи встречают боковые грани кристаллов под самыми различными углами. Наибольшей энергией, достаточной для образования гало, обладают только минимально отклоненные лучи (как и в радугах). Эти лучи и образуют радужные пятна — ложные Солнца, обращенные к Солнцу своими красными краями. Лучи, падающие на грани под другими углами, претерпевают большее отклонение от $D_{\text{мин}}$ до $D_{\text{макс}}$ и образуют светлые (белые) хвосты ложных Солнц, направленные в сторону, противоположную Солнцу.

Для красных и фиолетовых лучей, для которых показатели преломления льда равны 1,307 и 1,317, из (4.3.4) для $D_{\text{мин}}$ получаем соответственно $21^\circ 34'$ и $22^\circ 22'$. Ширина ложных Солнц равна $22^\circ 22' - 21^\circ 34' + 32' = 1^\circ 20'$. Внутренние края (бока) ложных Солнц красные.

2. Главные оси кристаллов ориентированы *горизонтально*. Совершенно аналогично предыдущему объясняется появление ложных Солнц над и под Солнцем.

3. Ориентация главных осей кристаллов *хаотическая*. При этом вокруг Солнца возникает круг с угловым радиусом 22° . Из-за того что хаотическое положение главных осей кристаллов является наиболее вероятным, чаще всего и наблюдается круг и значительно реже ложные Солнца.

В том случае, когда $A=90^\circ$, лучи входят в боковые грани, а выходят через основания или наоборот. В первых двух случаях возникают ложные Солнца соответственно над и под Солнцем и слева и справа от него. Расчеты по (4.3.4) дают $D_{\text{мин}}$, равное $45^\circ 44'$ для красного и $48^\circ 08'$ для фиолетового цветов. Ширина ложных Солнц в этом случае значительно больше: $48^\circ 0' - 45^\circ 44' + 32' = 2^\circ 56'$. При хаотическом положении кристаллов возникает круг с угловым радиусом красного края около 46° .

Формулы (4.3.4) и (4.3.5) справедливы только для лучей, падающих в плоскости, перпендикулярной к главным осям кристаллов. Если луч падает под углом h к главной оси их (при вертикальном положении главных осей h совпадает с высотой Солнца),

а угол преломления e , то формулы (4.3.4) и (4.3.5) принимают вид:

$$\sin\left(\frac{D_{\text{мин}} + A}{2}\right) = n \frac{\cos e}{\cos h} \sin \frac{A}{2}; \quad (4.3.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin(D_{\text{макс}} + A - 90^\circ) &= n \frac{\cos e}{\cos h} \sin(A - e'), \\ n \sin e' &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4.3.7)$$

Расчеты углов отклонения $D_{\text{мин}}$ и $D_{\text{макс}}$ по (4.3.6) и (4.3.7) показывают, что при увеличении высоты Солнца от 0 до 30° (т. е. угла h) круг в 22° растягивается до 28° , а хвосты ложных Солнц немного «укорачиваются». При более высоком положении Солнца гало практически не наблюдается.

Все бесцветные (белые) гало возникают при отражении солнечных лучей от кристаллов. Если значительная часть кристаллов ориентирована так, что отражающие части кристаллов, которые играют роль *зеркал*, расположены *горизонтально* и при этом совершают небольшие колебания, то при отражении от них солнечных лучей появляются *световые столбы над и под Солнцем*. Возникновение светового столба совершенно аналогично возникновению лунной дорожки на воде.

При отражении солнечных лучей от *вертикально* расположенных частей кристаллов, причем угол падения лучей на отражающие части кристалла может быть любым (от 0 до 90°), возникает *белый горизонтальный круг*.

Из разнообразных касательных дуг чаще всего наблюдаются *горизонтальные касательные дуги* (верхняя и нижняя) к кругу в 22° , возникающие под влиянием колебаний главных осей кристаллов столбчатой формы в горизонтальной плоскости: ложные Солнца при этом размываются в касательные дуги.

Боковые касательные дуги к кругу в 22° должны были бы образовываться кристаллами, падающими при вертикальном положении главной оси, т. е. пластинками и снежинками. Однако такие кристаллы содержат много полостей, наполненных воздухом, и других неоднородностей, хаотически рассеивающих свет во всех направлениях.

В облаках, помимо рассмотренных форм кристаллов, встречаются и более редкие их виды, например столбики с полными или усеченными пирамидками на концах, двойные пирамидальные пластинки и др. Различными комбинациями внешнего отражения от кристаллов, преломления, а также возможных одного или нескольких внутренних отражений в кристаллах при разных высотах Солнца и объясняются редкие формы гало, такие, как противосолнце и связанные с ними световые столбы, круги необычных радиусов ($9, 19, 23, 34^\circ$), касательные дуги к ним и др.

Появление гало может служить местным признаком изменения погоды. Поскольку гало наблюдаются при наличии Cs, а они, обычно, входят в систему облаков теплого фронта, то появление гало говорит о приближении теплого фронта и изменении погоды, обусловленной его прохождением.

Несмотря на то что с помощью законов геометрической оптики успешно объясняется возникновение многих наблюдаемых форм гало, тем не менее далеко не все явления гало находят объяснение не только на основе законов геометрической оптики, но и на основе более общей теории распространения и преобразования электромагнитных излучений. Это замечание справедливо и в отношении других оптических явлений (например, радуг).

5 Рефракция света в атмосфере

5.1. Уравнение траектории луча. Скорость распространения (c) в атмосфере (равно как и в любой другой среде) электромагнитных волн связана с абсолютным показателем преломления (n) соотношением: $n = c_0/c$, где $c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость электромагнитных волн (света) в пустоте. Показатель преломления атмосферного воздуха очень близок к единице, например, для красных лучей $n = 1,000275$, для фиолетовых $n = 1,000283$. Поэтому удобнее пользоваться величиной $(n - 1)$, называемой *индексом рефракции*.

Индекс рефракции пропорционален плотности воздуха (ρ):

$$\frac{n - 1}{n_0 - 1} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{pT_0}{p_0T},$$

где ρ_0 , p_0 , T_0 и n_0 — плотность, давление, температура воздуха и показатель преломления на исходном уровне (например, на уровне моря или земной поверхности). Подчеркнем, что здесь и далее под T следует понимать виртуальную температуру (T_v). Поэтому, если электромагнитная волна (луч) проходит в атмосфере некоторый путь, вдоль которого изменяются p и T , волна (луч) будет преломляться.

Рефракцией света называется *преломление* электромагнитных волн в атмосфере под влиянием изменения плотности воздуха как в горизонтальном, так и особенно сильно в вертикальном направлениях. Траектории электромагнитных волн в атмосфере представляют собой достаточно сложного вида кривые.

Помимо плотности воздуха, индекс рефракции зависит от длины волны. Зависимость $(n - 1)$ от трех параметров (p , T и λ) выражается эмпирической формулой, справедливой для электромагнитных волн из оптического диапазона с длиной от 0,20 до 20 мкм:

$$n - 1 = 10^{-6} \left(\frac{77,6p}{T} + \frac{0,584p}{T\lambda^2} \right), \quad (5.1.2)$$