

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 ( $\rho$ ):

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

где  $\rho_0$ ,  $p_0$ ,  $T_0$  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  $\lambda$ ) выражается эмпирической формулой, справедливой для электромагнитных волн из оптического диапазона с длиной от 0,20 до 20 мкм:

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

где  $p$  — в гектопаскалях,  $T$  — в кельвинах,  $\lambda$  — в микрометрах. Таким образом, чем короче длина волны, тем больше  $(n - 1)$  и тем более сильное преломление испытывает волна. В дальнейшем для краткости будем употреблять термин световые лучи, поскольку преломление именно их обуславливает многочисленные оптические явления, возникающие в результате рефракции света. Тем не менее многие выводы и формулы, которые будут получены, приме-

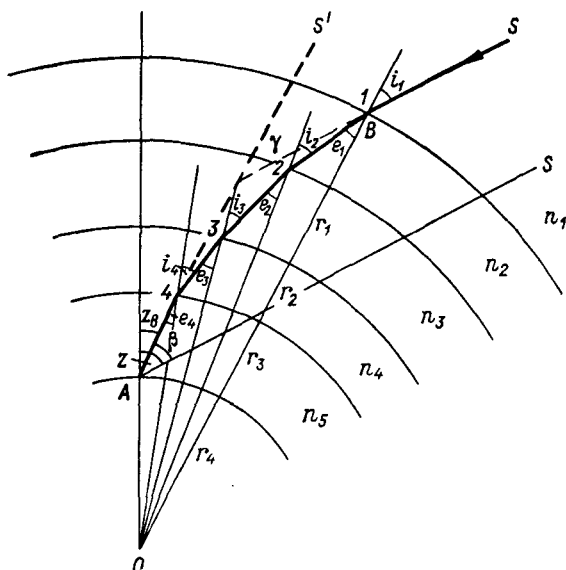


Рис. 22.11. К выводу уравнения рефракции света в атмосфере.

нимы не только к световым, но и другим электромагнитным и даже звуковым волнам.

Пусть световой луч  $S$  поступает на границу атмосферы от источника, находящегося за ее пределами (рис. 22.11). Разобьем атмосферу на несколько concentрических слоев достаточно тонких, чтобы внутри каждого из них показатель преломления  $n$  можно было считать постоянным. Обозначим соответствующие этим слоям показатели преломления  $n_1, n_2, n_3$  и т. д. Плотность воздуха с высотой убывает, поэтому:  $n_1 < n_2 < n_3 < \dots$

Углы падения ( $i$ ) и преломления ( $e$ ) на границе двух соседних слоев связаны соотношениями (закон Снелля):

$$\frac{\sin i_1}{\sin e_1} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{\sin i_2}{\sin e_2} = \frac{n_3}{n_2}; \quad \frac{\sin i_3}{\sin e_3} = \frac{n_4}{n_3}. \quad (5.1.3)$$

Из косоугольных треугольников 102, 203, 304 и т. д. следует:

$$\frac{\sin e_1}{\sin i_2} = \frac{r_2}{r_1}, \quad \frac{\sin e_2}{\sin i_3} = \frac{r_3}{r_2}, \quad \frac{\sin e_3}{\sin i_4} = \frac{r_4}{r_3}, \quad (5.1.4)$$

где  $r_1, r_2, r_3$  — расстояния точек 1, 2, 3 от точки  $O$  (центра Земли)

Перемножив левые и правые части равенств (5.1.3) и (5.1.4), получим:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2 r_2}{n_1 r_1}, \quad \frac{\sin i_2}{\sin i_3} = \frac{n_3 r_3}{n_2 r_2}, \quad \frac{\sin i_3}{\sin i_4} = \frac{n_4 r_4}{n_3 r_3}, \quad (5.1.5)$$

отсюда

$$n_1 r_1 \sin i_1 = n_2 r_2 \sin i_2 = n_3 r_3 \sin i_3 = \dots = \text{const.} \quad (5.1.6)$$

Таким образом, в любой точке траектории луча выполняется условие:

$$nr \sin i = \text{const.} \quad (5.1.7)$$

Это и есть *уравнение траектории светового луча в атмосфере*. При нормальном распределении показателя преломления и плотности воздуха в атмосфере (их убывании с высотой), траектория световых лучей обращена к земной поверхности своей вогнутой стороной (см. рис. 22.11).

## 5.2. Явления, обусловленные астрономической рефракцией.

Наблюдатель находится в точке  $A$  и визирует точку  $B$  (рис. 22.11). Если точка  $B$  находится за пределами атмосферы, рефракция называется *астрономической*. Если точка  $B$  находится в пределах земной атмосферы, рефракция называется *земной*.

*Углом астрономической рефракции*  $\beta$  называется угол между направлениями на действительное ( $S$ ) и видимое ( $S'$ ) положения светила (рис. 22.11). Для видимых высот светил  $h_B > 30^\circ$  угол  $\beta$  с точностью до  $1''$  определяется по формуле:

$$\beta = 16,09 (p/T) \text{ ctg } h_B. \quad (5.2.1)$$

Здесь  $\beta$  — в угловых секундах,  $T$  — в кельвинах,  $p$  — в гектопаскалях. Полагая  $p = 1013$  гПа и  $T = 283$  К, получим приближенную формулу:

$$\beta = 57 \text{ ctg } h_B. \quad (5.2.2)$$

При высотах светил меньше  $30^\circ$  расчет  $\beta$  выполняется по другим соотношениям, получаемым на основе решения уравнения (5.1.7). Значения  $\beta$  (минуты дуги) для различных видимых высот светил  $h_B$  при  $T = 10^\circ\text{C}$  и  $p = 1013$  гПа следующие:

$h_B^0$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$\beta$	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Угол  $\beta$  зависит от высоты светила. Максимальных значений  $\beta$  достигает в моменты восхода или захода светил и при небольших

отрицательных высотах, когда луч проходит через большую толщу атмосферы. При средних условиях у земной поверхности  $\beta \approx 35'$ . Однако при низких температурах и высоком давлении у земной поверхности  $\beta$  может быть значительно больше (до  $2-3^\circ$ ).

Вследствие астрономической рефракции все светила на небосводе кажутся приподнятыми на угол  $\beta$ . Таким образом, истинная высота светила  $h$  меньше его видимой высоты  $h_v$  также на угол  $\beta$ :

$$h = h_v - \beta \quad (5.2.3)$$

Рефракция увеличивает высоту всех светил, в том числе и Солнца. При заходе Солнца, когда оно уже опустилось под горизонт, рефракция делает его видимым, тем самым отодвигая момент захода. То же самое наблюдается утром при восходе.

*Увеличение продолжительности дня за счет рефракции* зависит от широты места и времени года. На широте Ленинграда оно невелико, изменяется от 8 мин в дни равноденствий до 12 мин в дни солнцестояний. В высоких широтах увеличение дня достигает нескольких часов и даже дней. На полюсе полярный день длиннее полярной ночи на 14 суток.

Необычайно сильной рефракцией можно объяснить такое явление, когда во время полярной ночи Солнце неожиданно показывалось над горизонтом на несколько минут и даже на полчаса, (как, например, 20 января 1974 г. в пос. Черский в Якутии; истинный восход Солнца произошел только через несколько суток). На Новой Земле неоднократно наблюдали Солнце над горизонтом на 10—14 дней раньше окончания полярной ночи, когда глубина погружения Солнца под горизонт составляла еще  $4-5^\circ$ . Это явление получило название «эффект Новой Земли».

При восходе и заходе Солнца (или Луны), когда их нижний край касается горизонта, за счет рефракции нижний край приподнимается на  $35'$ , тогда как верхний край диска, находящийся на высоте  $32'$ , — только на  $28'$ , в результате чего диск Солнца (или Луны) кажется сплюснутым в вертикальном направлении на  $7'$ . При сильной рефракции, например, в сибирских антициклонах зимой или в полярных районах, сплющивание диска Солнца может быть более значительным. Наблюдаются и другие искажения (вплоть до раздвоения) формы солнечного диска у горизонта при наличии мощных инверсий температуры у земной поверхности или на некоторой высоте над нею.

При опускании Солнца под горизонт, когда над горизонтом остается только небольшой его край, наблюдается быстрая смена цветов этого края. Красный цвет быстро переходит в оранжевый, желтый и *последний луч заходящего Солнца оказывается зеленым*. Иногда можно видеть зеленый край диска Солнца, зеленый сегмент или просто зеленую вспышку. Изменения цвета Солнца при его восходе протекают в обратном порядке. Наиболее благоприятные условия для наблюдения *зеленого луча* создаются при высо-

кой прозрачности атмосферы и свободной от облаков западной части горизонта, например, на берегу спокойного моря. Продолжительность зеленого луча колеблется от 1 до нескольких секунд (в экстремальных случаях — до нескольких минут).

Зеленый луч возникает вследствие различной рефракции лучей разного цвета. Фиолетовые лучи испытывают самую сильную рефракцию и приподняты над горизонтом больше остальных. Среднее расхождение крайних цветных лучей (фиолетового и красного) составляет около  $38''$ . При опускании Солнца под горизонт первым исчезнет красный луч, последним — фиолетовый. Учитывая большое рассеяние в атмосфере фиолетовых, синих и голубых лучей, а также малую чувствительность глаза к этим лучам, последним лучом удается увидеть зеленый и очень редко голубой. Колебаниями показателя преломления, обусловленными флуктуациями плотности воздуха, объясняется мерцание звезд (затрудняющее их наблюдение).

**5.3. Явления, обусловленные земной рефракцией.** Лучи, распространяющиеся от наземных предметов, также распространяются по криволинейной траектории. Углом земной рефракции  $\alpha$  называется угол между направлениями на видимое и действительное положение наблюдаемого предмета. Значения  $\alpha$  зависят от расстояния до наблюдаемого предмета и термической стратификации приземного слоя воздуха. Остановимся на некоторых явлениях, обусловленных земной рефракцией.

В зависимости от характера температурной стратификации приземного слоя атмосферы, происходит *поднятие и расширение или опускание и сужение видимого горизонта*. Следствием этого эффекта является увеличение (при расширении) или уменьшение (при сужении) геометрической дальности видимости предметов.

Будем считать атмосферу горизонтально однородной, т. е.  $\rho$  и  $T$  изменяются только с высотой  $z$ . Продифференцировав (5.1.1) по  $z$ , получаем:

$$\frac{\partial n}{\partial z} = (n_0 - 1) \frac{\rho}{\rho_0 T} (\gamma - \gamma_A), \quad (5.3.1)$$

где  $\gamma = -\partial T/\partial z$  — вертикальный градиент температуры,  $\gamma_A = 3,42 \text{ K}/100 \text{ м}$  (см. главу 3).

Проанализируем (5.3.1) при разных условиях стратификации приземного слоя атмосферы.

1. Градиент температуры  $\gamma$  положительный, но меньше  $\gamma_A$  ( $\gamma < 3,42 \text{ K}/100 \text{ м}$ ). При этих условиях  $\partial n/\partial z < 0$  — показатель преломления убывает с высотой, траектория светового луча обращена к земной поверхности *вогнутой стороной* (выпуклостью вверх). Горизонт приподнят (по сравнению с геодезическим) на угол  $d = -\Delta$  (см. рис. 22.7). Такую рефракцию называют *положительной*. При средних метеорологических условиях расширение горизонта

(по сравнению с геодезическим) составляет 6—7 %, радиус кривизны светового луча примерно в 6 раз больше радиуса Земли.

В случае сильной инверсии температуры показатель преломления и плотность воздуха могут убывать с высотой настолько быстро, что радиус кривизны луча становится равным радиусу Земли ( $\Delta=0$ ). Видимый горизонт как бы поднялся до математического, а Земля «распрямилась» и стала плоской.

В случае еще более мощной приземной инверсии температуры, кривизна луча становится меньше кривизны Земли. Видимый горизонт поднимается выше математического. Наблюдателю кажется, что он находится на дне огромной котловины. Из-за горизонта поднимаются и становятся видимыми предметы, находящиеся далеко за геодезическим горизонтом (с канадского берега через пролив Смита иногда виден берег Гренландии со всеми строениями. Расстояние до гренландского берега около 70 км, в то время как геометрическая дальность видимости с учетом высоты строений на берегу не превышает 20 км.) При инверсионной стратификации, создаются условия для *возникновения верхних миражей*.

2.  $\gamma=3,42$  К/100 м,  $dn/dz=0$ . Рефракция отсутствует ( $d=\Delta$ ).

3.  $\gamma > 3,42$  К/100 м,  $dn/dz > 0$ . Траектория светового луча обращена к земной поверхности *выпуклой стороной*. Такая рефракция называется *отрицательной*. Предметы на земной поверхности, обычно находящиеся в поле зрения, оказываются ниже геодезического горизонта. Такое распределение температуры наблюдается наиболее часто в степях и пустынях в дневные часы летом при перегреве земной поверхности солнечной радиацией. В умеренных широтах в дневные часы летом такие температурные градиенты наблюдаются в нижнем слое до высоты в несколько метров над песчаным пляжем, обнаженной почвой, асфальтом. При таких условиях возникают *нижние миражи*.

Миражом называется такое явление, когда могут быть видны предмет и его изображение. Иногда сам предмет невидим, так как находится за горизонтом, а его изображение увеличенное, часто искаженное и высоко поднятое в воздух можно видеть с очень больших расстояний. В зависимости от того, где располагается изображение по отношению к предмету, различают несколько видов миражей. *Миражи верхние*, если изображение предмета (т. е. мираж) находится над предметом. *Миражи нижние* — изображение располагается под предметом. *Миражи боковые* — изображение рядом с предметом. *Сложные миражи* — одновременно наблюдаются миражи разных типов. Такие миражи называют *фата-моргана*.

В случае верхнего миража (при инверсионной стратификации) наблюдатель может видеть сам предмет (если он не за горизонтом) и над ним одно или несколько его изображений — прямых,

перевернутых, часто искаженных, увеличенных. Изображение получается перевернутым, если лучи, идущие от крайних (верхней и нижней) точек предмета, пересекутся (рис. 22.12). Такие миражи наблюдаются часто над холодными морями, выхожденной поверхностью суши, в полярных районах.

Верхними миражами следует объяснить, хотя бы часть так называемых призрачных земель, которые десятилетиями искали в Арктике и не нашли. Это земли Андреева, Оскара, Джиллиса, Санникова и др. Наиболее долго и упорно искали о. Санникова, «увиденный» им впервые в 1811 г. Этот остров «видел» Толь и даже зарисовал его гористый контур. Все последующие поиски острова не дали результатов. Рейс ледокола «Седов» показал, что в этой

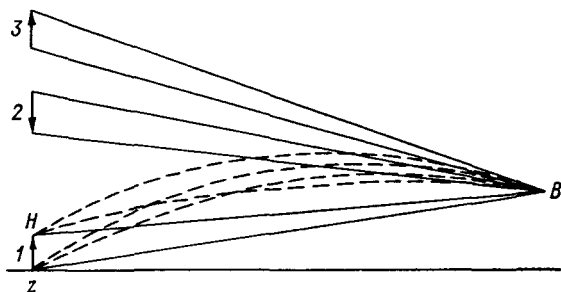


Рис. 22.12. Схема верхнего миража.

части океана такого острова нет. Возможно, что это был мираж, который в определенное время года появляется в одном и том же месте. Это могло быть изображение одного из островов Де Лонга, расположенных в этом же направлении, но значительно дальше в океане.

Появление известной легенды о «Летучем Голландце», призрачном корабле необычных размеров и формы, также следует отнести к наблюдениям верхних миражей самых обыкновенных кораблей, которые плывут далеко за горизонтом. Изображение корабля, увеличенное и искаженное, высоко поднятое в воздух, и принималось за «Летучего Голландца».

*Нижние миражи* возникают при очень больших температурных градиентах в нижнем слое атмосферы, когда плотность воздуха увеличивается с высотой. Кажется, будто под предметом располагается водная поверхность и все предметы отражаются в ней (рис. 22.13). В СССР миражи в виде «озер» или «водной поверхности» часто появляются в Поволжье, на Украине, в Средней Азии. Даже в северных широтах, например в Ленинградской области, такие миражи можно нередко наблюдать в виде небольших кажущихся «луж» на совершенно сухом асфальте или над ровным песчаным пляжем в солнечные летние дни. Кажущаяся водная по-

верхность в нижнем мираже есть изображение участка неба, создающее полную иллюзию блестящей на Солнце водной глади. Стратификация при нижнем мираже крайне неустойчива, нижний слой воздуха непрерывно пронизывается поднимающимися горячими струями воздуха и мираж на глазах изменяется.

Однородная снежная подстилающая поверхность в Антарктиде, температура которой летом выше температуры прилегающего слоя воздуха, также благоприятствует возникновению здесь нижних ми-

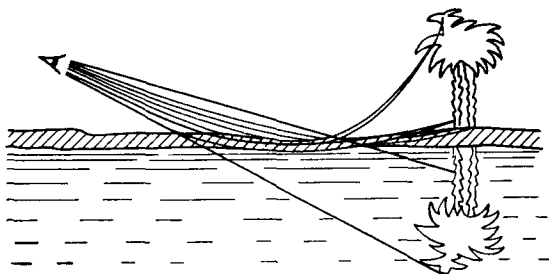


Рис. 22.13. Схема нижнего миража.

ражей. Такие миражи часто наблюдаются на станциях Восток, Комсомольская и др.

*Боковые миражи* возникают, когда поверхности одинаковой плотности воздуха располагаются в атмосфере не горизонтально, как обычно, а наклонно или даже вертикально. Это может иметь место летом, утром, вскоре после восхода Солнца у скалистого берега, нагретого лучами Солнца, когда поверхность озера или моря еще холодная. Боковые миражи часто наблюдаются, например, на Женевском озере.

В заключение отметим, что под влиянием атмосферных условий изменяются траектории и дальность распространения не только световых, но и звуковых волн, а также радиоволн (в частности, миллиметрового и сантиметрового диапазона, используемого в радиолокационных станциях).

## 6 Оптические характеристики облаков, туманов и осадков

С облаками, туманами и осадками (в дальнейшем будем называть лишь первое из этих явлений) связано наиболее сильное оптическое помутнение атмосферы: показатели ослабления света в облаках больше показателей молекулярного рассеяния  $k_{\text{лм}}$  примерно на три порядка, аэрозольного ослабления  $k_{\text{ла}}$  — на один-два порядка (в облаках  $k_{\text{л}}$  — порядка нескольких десятков  $\text{км}^{-1}$ ,