

В нашей стране начало работ по изучению атмосферного электричества было положено М. В. Ломоносовым.

Атмосферное электричество привлекает внимание не только метеорологов и геофизиков, но также геологов, работников связи, авиации, инженеров-высоковольтников, врачей и многих других.

П. Н. Тверской (1949 г.)

Раздел VI

Оптические и электрические явления в атмосфере

Глава 22. Оптика атмосферы

Яркость, поляризация и форма небесного свода. Освещенность земной поверхности. Видимость в атмосфере. Оптические явления в облаках и осадках. Рефракция света в атмосфере. Оптические характеристики облаков, туманов и осадков. Загрязнение атмосферы, видимость, дымки, смоги и туманы в больших городах

Глава 23. Атмосферное электричество

Ионизация атмосферы. Электрическое поле тропосферы. Механизм образования электрических зарядов в грозовых облаках. Электрическое поле и условия возникновения молний в грозовых облаках. Статистические характеристики гроз. Структура грозового облака. Рост града. Электрическое поле верхних слоев атмосферы Земли

Глава 22 Оптика атмосферы¹

Многообразные оптические явления возникают при распространении в атмосфере электромагнитных волн оптического диапазона (0,39—0,76 мкм). Особенностью световых волн является их воздействие на глаз человека, воспринимаемое как ощущение света.

На световоспринимающей оболочке глаза человека (сетчатке) имеются два типа мельчайших светочувствительных элементов: колбочки (их число около 7 млн.) и палочки (их число около 130 млн.). Колбочки расположены в центре сетчатки; они способны различать цвета и работают при достаточном уровне освещения — днем. Поэтому дневное зрение называют центральным и хроматическим. Палочки располагаются в основном по периферии сетчатки и не различают цветов. Они способны реагировать на слабые световые потоки и работают в основном ночью. Ночное зрение называют поэтому периферическим и ахроматическим. В сумерки происходит переключение с одного зрительного аппарата на другой.

В оптике атмосферы используются величины, хотя и близкие по содержанию, однако несколько отличающиеся от введенных в главах 6—8 энергетических характеристик лучистой энергии. Так, световой поток по содержанию аналогичен потоку лучистой энергии. Но если последний характеризует излучение и перенос лучистой энергии безотносительно к производимым ею воздействиям (в частности, на глаз человека), то *световой поток* определяется только той частью потока радиации, которая вызывает световые ощущения, более точно — оказывает действие на приемник света с известной *относительной спектральной световой эффективностью излучения* $V(\lambda)$.

Световой поток Φ_c связан со спектральной плотностью F_λ потока радиации соотношением

$$\Phi_c = K_m \int_0^{\infty} F_\lambda V(\lambda) d\lambda,$$

где $K_m \approx 683$ лм/Вт — максимальное значение $V(\lambda)$, наблюдаемое при $\lambda = 0,555$ мкм. Единица светового потока — люмен (лм).

¹ Параграфы 1, 2, 4 и 5 этой главы написаны канд. геогр. наук

С. В. Зверевой, п. 3 — ею совместно с автором.

Под яркостью в данном направлении понимают световой поток, испускаемый единичной поверхностью, перпендикулярной этому направлению, в единичный телесный угол. Единица яркости — лм/(м²·ср).

Между яркостью (B) и спектральной плотностью энергетической яркости (J_λ) существует такая же связь, как и между Φ_λ и F_λ :

$$B = K_m \int_0^\infty J_\lambda V(\lambda) d\lambda.$$

1 Яркость, поляризация и форма небесного свода

1.1. Яркость небесного свода. Яркость небесного свода, так же как и его цвет, определяется условиями рассеяния солнечного света в атмосфере. К таким условиям относятся: прозрачность атмосферы, вид индикатрисы рассеяния, положение Солнца на небесном своде, а также отражательные свойства подстилающей поверхности.

Отметим основные особенности распределения яркости по небосводу на основании данных непосредственных измерений яркости неба, которые находятся в качественном согласии и с результатами теории.

Основной максимум яркости, связанный с сильной вытянутостью индикатрисы аэрозольного рассеяния, всегда наблюдается около Солнца в виде *околосолнечного ореола*. Ореол представляет собой яркое кольцо вокруг солнечного диска с угловым радиусом 10—12°, наблюдаемое на безоблачном небе. Чем крупнее частицы аэрозоля в атмосфере и чем больше их концентрация, тем ярче околосолнечный ореол.

Второй максимум яркости неба — пригоризонтный — возникает за счет увеличения массы атмосферы, участвующей в рассеянии, при приближении луча зрения к горизонту. Минимум яркости неба находится в вертикале Солнца, в так называемом солнечном зените, т. е. в точке, отстоящей от Солнца на угол 90° при положении Солнца на горизонте и на несколько меньший угол при увеличении высоты Солнца. На рис. 22.1 изображено распределение яркости неба в солнечном вертикале. Здесь в точке O находится наблюдатель, а длина отрезков между O и точкой на кривой пропорциональна яркости небесного свода в заданном направлении. Яркость той части неба, где находится Солнце (оно изображено звездочкой), в целом значительно больше яркости противоположной части небосвода.

При высокой прозрачности атмосферы и малом альбедо подстилающей поверхности основную роль в создании яркости неба

играет рассеяние первого порядка. При увеличении мутности атмосферы существенно возрастает роль многократного рассеяния света. Например, при большой прозрачности атмосферы ($P \geq 0,85$) вклад вторичного рассеяния в яркость неба, особенно в длинноволновой области спектра и вдали от горизонта, составляет всего несколько процентов. При коэффициенте прозрачности 0,6—0,7 этот вклад превышает 50 %. В ультрафиолетовой области спектра, где $P \approx 0,2$ и меньше, даже при хорошей прозрачности атмосферы многократное рассеяние вносит определяющий вклад в яркость и ее распределение по небосводу.

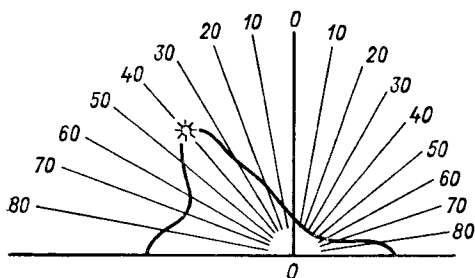


Рис. 22.1. Распределение яркости по небосводу в вертикале Солнца.

Заметную роль в увеличении яркости неба играет свет, отраженный от земной поверхности, если ее альбедо велико, например, при наличии снежного покрова. Над открытыми водными поверхностями в полярных районах небо заметно темнее, чем над снежными или ледяными. По измерениям около Шпицбергена средняя яркость «водяного» неба при облаках слоистых форм составляет 40—44 % яркости «снежного» неба, а яркость безоблачного «водяного» неба при высоте Солнца 30° составляет только 20 % яркости «снежного» неба.

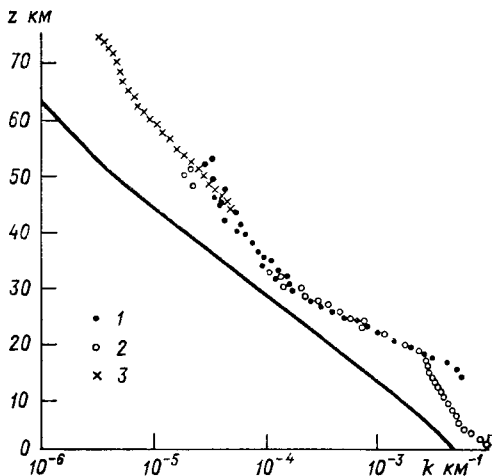
Яркость рассеянного света измеряется с помощью фотометров не только на поверхности Земли, но и на различных высотах с помощью приборов, устанавливаемых на летательных аппаратах (самолетах, аэростатах, ракетах, космических кораблях). Кроме прямых методов измерений, привлекаются так называемые косвенные методы оптического зондирования атмосферы. Сущность их сводится к тому, что измеряется или яркость рассеянного света, поступающего с различных высот от искусственно созданных потоков света (прожекторное, лазерное зондирование), или яркость небесного свода по мере погружения Солнца под горизонт в период сумерек (сумеречное зондирование), или по данным измерений яркости с летательных аппаратов (космических кораблей, самолетов). В результате удается определить различные оптические характеристики атмосферы и их распределение по высоте.

На рис. 22.2 приведен вертикальный профиль объемного показателя рассеяния k , построенный по данным прожекторного и сумеречного методов зондирования атмосферы и по измерениям летчика-космонавта Г. Т. Берегового с космического корабля «Союз-3». С увеличением высоты, поскольку k пропорционален плотности воздуха ($k = \alpha\rho$), объемный показатель по всем дан-

ным убывает; однако значения k , полученные разными методами, на некоторых уровнях различаются в 2—3 раза и более. Такое расхождение в значительной степени объясняется большой пространственной и временной изменчивостью аэрозоля, вклад которого в рассеяние, как показывает рис. 22.2, на всех высотах превосходит молекулярное рассеяние (обратим внимание на то, что масштаб оси k — логарифмический). Известную роль играют ошибки измерения, равно как и неточность методов решения обратных задач.

Рис. 22.2. Вертикальные профили объемного показателя рассеяния атмосферы, полученные различными методами.

1 — наблюдения с ПКК «Союз-3», 2 — прожекторное зондирование, 3 — сумеречный метод. Сплошная кривая — значения показателя молекулярного рассеяния.



Следует обратить внимание на увеличение показателя рассеяния вблизи уровня 19 км. Здесь расположен слой с повышенной концентрацией аэрозоля. Анализ проб показал, что аэрозоль состоит преимущественно из соединений серы. Этот слой вносит наибольший вклад в рассеяние света в период сумерек (см. п. 2), и поэтому его нередко называют *сумеречным слоем*.

1.2. Поляризация света, рассеянного атмосферой. Наблюдения в атмосфере показали, что вывод Рэля о распределении степени поляризации рассеянного света, вытекающий из формулы (2.5) гл. 6 полностью не оправдывается. Во всех случаях максимумы поляризации рассеянного света наблюдаются в направлениях, перпендикулярных падающему свету, однако степень поляризации никогда не достигала 100%. За многолетний период наблюдений максимальная степень поляризации составила в Павловске 82%, на Урале 84%, в Крыму (Ай-Петри) 85% и т. д. Причинами такого снижения поляризации являются так называемые *деполяризующие факторы*, постоянно действующие в атмосфере и не учитываемые теорией Рэля: многократное и аэрозольное рассеяние света, анизотропия строения молекул и др.

Степень поляризации небосвода согласно формуле (2.5) гл. 6 равна нулю в направлении на Солнце ($\vartheta = 0^\circ$) и на антисолярную точку ($\vartheta = 180^\circ$), максимум поляризации наблюдается в солнечном зените ($\vartheta = 90^\circ$).

В действительности картина распределения поляризации на небесном своде значительно сложнее. На небе имеются не две, а четыре точки, в которых степень поляризации равна нулю. Эти нейтральные точки носят название точек Араго (A), Баине (Ba), Брюстера (Br) и точки IV . Все нейтральные точки располагаются вблизи плоскости солнечного вертикала: Ba и Br над и под Солнцем, A и IV над и под антисолярной точкой (рис. 22.3).

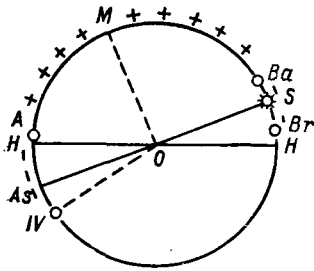


Рис. 22.3. Положение нейтральных точек.

Расстояние нейтральных точек от Солнца и антисолярной точки изменяется от 12 до 30° в зависимости от высоты Солнца, прозрачности атмосферы, альbedo подстилающей поверхности и длины волны света. При увеличении замутненности атмосферы или альbedo подстилающей поверхности, а также при приближении Солнца к горизонту, нейтральные точки удаляются от Солнца и антисолярной точки. В окрестностях Солнца и антисолярной точки (между соответствующими нейтральными точками) электрический вектор располагается в плоскости рассеяния, т. е. под углом 90° к предсказываемому теорией Рэлея — это так называемая отрицательная поляризация. В остальных точках вертикала Солнца поляризация положительная (электрический вектор лежит в плоскости, перпендикулярной рассеянию).

1.3. Форма небесного свода. Если находиться на открытой местности, например в поле или в море, то легко обнаружить, что небесный свод не является полусферой. Скорее он имеет вид опрокинутой чаши, т. е. небосвод как бы приплюснут в вертикальном направлении.

За меру сплюснутости небосвода принимают высоту над горизонтом точки, которая делит пополам дугу небосвода от зенита до горизонта. На рис. 22.4 наблюдатель находится в точке O . Пробегая взглядом по небу от зенита (Z) до горизонта (H), он отыскивает на глаз точку M , расположенную так, чтобы отрезки дуги ZM и MH были равны. Затем измеряется угловая высота точки M ,

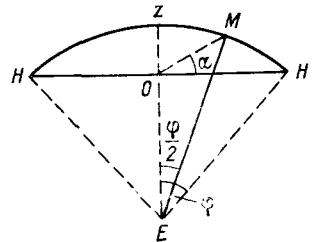


Рис. 22.4. Сплюснутость небесного свода.

т. е. угол α . Следует подчеркнуть, что на глаз пополам делить надо именно дугу ZH , а не угол ZOH .

Если бы небо было полусферой, то угол α равнялся 45° . В действительности α значительно меньше ($18-30^\circ$).

Сплюснутость небосвода зависит от освещенности атмосферы и земной поверхности. Среднее значение α равно 22° днем, примерно 27° в лунную ночь и увеличивается до 30° в безлунную ночь. При сплошной облачности α больше, чем при ясном небе.

Такая форма небосвода является причиной возникновения ряда оптических обманов. Прежде всего зрительно переоцениваются угловые высоты над горизонтом всех объектов и явлений, наблюдаемых на небосводе: Солнца, Луны, звезд, полярных сияний, облаков, высот загорания метеоритов и др. Например, облако находится над горизонтом на высоте 5, 10 и 30° , а кажется, что его высота соответственно равна примерно 13, 25 и 55° . На широте Ленинграда летом в полдень максимальная высота Солнца не бывает более 54° , а кажется, что Солнце находится в полдень почти в зените. Кроме того, увеличенными кажутся угловые размеры предметов, находящихся у горизонта, и уменьшенными — предметов, находящихся выше 35° . Солнце у горизонта кажется в 2,7 раза, Луна в 2,2 раза, созвездия примерно в 2 раза больше своих истинных угловых размеров. В то же время, когда эти светила находятся вблизи зенита, они кажутся вдвое меньше, чем есть в действительности.

При визуальных наблюдениях за облаками их количество переоценивается, если они находятся преимущественно у горизонта и, наоборот, недооценивается, если они находятся в околозенитной части небосвода. Переоценка в среднем составляет 26%, если количество облаков изменяется от 38 до 75%, и может достигать 60% при дальнейшем увеличении количества облаков.

Кажущееся увеличение размеров и высот объектов, наблюдаемых у горизонта, отчасти можно объяснить тем, что они проектируются на небосвод, как на экран, по разному удаленный от нас в связи со сплюснутостью неба. Угловые размеры Солнца, Луны и других объектов, естественно, остаются одними и теми же при любом их положении на небосводе. На рис. 22.5 изображена Луна при разных высотах над горизонтом. Угловой диаметр Луны ($32'$) всюду один и тот же, однако проекция Луны на далекий экран (у горизонта) больше, чем ее проекция на близкий экран — в зените. В действительности как форма небесного свода, так и кажущееся увеличение предметов у горизонта объясняется психо-

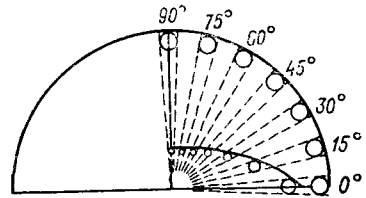


Рис. 22.5. К объяснению кажущегося увеличения Луны у горизонта.

физиологическими особенностями нашего зрения. Если смотреть вверх, не поднимая головы, то все предметы кажутся нам уменьшенными по сравнению с тем, какими они кажутся нам на таком же горизонтальном расстоянии.

2 Освещенность земной поверхности

Под естественной *освещенностью* земной поверхности (равно как и любых других предметов) понимают падающий на единицу этой поверхности световой поток, создаваемый прямой и рассеянной солнечной радиацией днем или другими источниками освещения земной поверхности ночью. Единица освещенности — люкс (лк)¹.

Освещенность прямым солнечным светом изменяется в широких пределах: от 0 в моменты восхода или захода Солнца до нескольких десятков килолюксов в околополуденное время летом (обычно не более 120 клк). Диапазон изменения освещенности рассеянным светом значительно меньше. Она составляет около 0,5 клк в моменты восхода или захода Солнца и возрастает до 13—15 клк в околополуденные часы.

Рассмотренное в гл. 6 влияние высоты Солнца, прозрачности атмосферы и других факторов на прямую, рассеянную и суммарную радиацию, а также формы облаков и альbedo подстилающей поверхности на рассеянную и суммарную радиацию справедливо и по отношению к прямой, рассеянной и суммарной освещенности. Суммы освещенности прямым и рассеянным светом, а также суммарной освещенности, составленные за различные интервалы времени (час, день, декаду, месяц, вегетационный период, год), характеризуют *световой климат* данного района.

Освещенность земной поверхности пропорциональна падающему на нее потоку солнечной радиации. Отношение освещенности к одновременно измеренному потоку солнечной радиации называют *световым эквивалентом радиации*. В табл. 22.1 приведены значения этого эквивалента отдельно для прямой и суммарной радиации. Для рассеянной радиации световой эквивалент для всех высот Солнца равен 117 клк·м²/кВт при облачности 0—6 баллов и 103 клк·м²/кВт при облачности 7—10 баллов. Для приближенных оценок (с погрешностью около 10 %) можно пользоваться одним значением светового эквивалента при любых облаках и всех высотах Солнца больше 10°: 93 — для прямой, 100 — суммарной и 107 клк·м²/кВт — рассеянной радиации.

¹ 1 лк равен освещенности поверхности 1 м² при падающем на нее световом потоке в 1 люмен (лм).