

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).

Таблица 22.1. Световой эквивалент (клк·м²/кВт) прямой и суммарной радиации

h_{\odot}°	Радиация	
	прямая	суммарная
10—20	75	92
21—30	85	96
31—40	92	98
41—50	96	100
51—75	100	102

Поскольку в рассеянной радиации доля более коротких длин волн больше, чем в прямой, и они воздействуют на глаз сильнее, чем более длинные волны, то и световой эквивалент для рассеянной радиации больше, чем для прямой.

2.1. Сумерки. После захода Солнца освещенность Земли уменьшается сначала очень быстро, затем медленнее и постепенно переходит в ночную темноту. В связи с наличием атмосферы и ее способностью рассеивать свет переход от дня к ночи совершается не мгновенно, а растягивается на некоторый промежуток времени, называемый сумерками. Различают несколько видов сумерек в зависимости от глубины погружения Солнца под горизонт и соответствующей освещенности земной поверхности.

Сумерки гражданские начинаются с момента захода Солнца и заканчиваются при глубине погружения Солнца на 6—8°. В конце этих сумерек в помещениях надо включать искусственное освещение. На открытом воздухе в конце гражданских сумерек трудно читать даже крупный шрифт. На небе появляются звезды первой величины.

Сумерки морские, или *навигационные*, начинаются с конца гражданских сумерек и заканчиваются при глубине погружения Солнца около 12°. В конце этих сумерек штурманы кораблей не могут ориентироваться по неосвещенным предметам на берегу, должны включаться все опознавательные и сигнальные огни на берегу или на воде (маяки, бакены и т. п.).

Сумерки астрономические начинаются с конца навигационных и заканчиваются при глубине погружения Солнца около 18°, когда сумерки переходят в ночь. Исчезают последние следы зари, на небе видны все звезды.

В табл. 22.2 приведены средние значения освещенности земной поверхности при разных углах погружения Солнца под горизонт.

В период сумерек освещенность земной поверхности изменяется почти в миллиард раз: от 10³—10⁴ лк в начале сумерек до 10⁻⁴—10⁻⁵ лк ночью. Переход к ночи совершается обычно при глубине

Таблица 22.2. Освещенность земной поверхности в сумерки

Время суток	Погружение Солнца под горизонт, °	Освещенность при ясной погоде, лк
День	—	>1000
Сумерки:		
гражданские	0—6	1000—2,5
навигационные	6—12	2,5—0,006
астрономические	12—18	0,006—0,0006
Ночь	>18	<0,0006

погружения Солнца около 18° , но при значительном замутнении атмосферы конец астрономических сумерек затягивается до углов погружения $22\text{--}23^\circ$.

Продолжительность сумерек зависит от географической широты и времени года. С увеличением широты длительность сумерек увеличивается и на некоторых широтах вечерние и утренние сумерки сливаются — наступают *белые ночи*. Самые длинные сумерки наб-

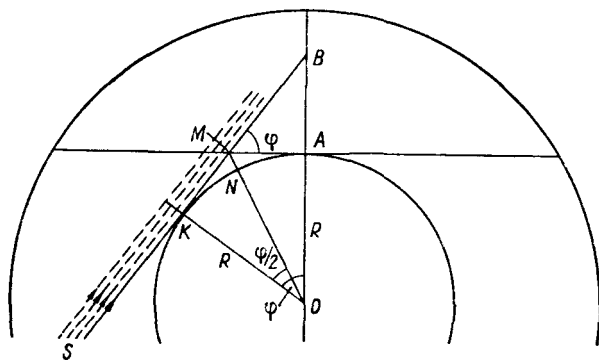


Рис. 22.6. К объяснению сумерек.

людаятся в дни летнего и зимнего солнцестояний, а самые короткие — в дни равноденствий. Облака уменьшают освещенность во время сумерек и, чем они плотнее, тем заметнее это уменьшение. При плотных облаках нижнего яруса освещенность снижается примерно на порядок, однако характер ее уменьшения с глубиной погружения Солнца почти не изменяется.

Снежный покров увеличивает освещенность только в начале гражданских сумерек (максимально на 11 %), а дальше его влияние практически не сказывается.

Схема освещения земной поверхности в сумерки приведена на рис. 22.6. Поток солнечных лучей *S* касается земной поверхности

в точке K , где происходит заход Солнца. Линия SKB — *терминатор*, т. е. граница света и тени. Часть атмосферы, лежащая выше терминатора, освещена прямыми солнечными лучами и посылает рассеянный свет во все стороны, в том числе создает освещенность в точке A , где находится наблюдатель. Часть атмосферы, лежащая ниже терминатора, находится в тени Земли и в рассеянии света в сумерки не участвует. Центральный угол KOA (обозначенный через φ) равен углу погружения Солнца под горизонт наблюдателя. По мере погружения Солнца под горизонт терминатор поднимается над наблюдателем все выше, а часть атмосферы, освещенная солнечными лучами, становится всё меньше, вследствие чего освещенность в точке A постепенно снижается.

Фазы сумерек можно характеризовать как глубиной погружения Солнца под горизонт, т. е. углами φ , так и высотами $H=AB$ и $h=MN$, на которых находится терминатор над точками A и N . Высоты H и h характеризуют слои атмосферы, выключаемые из процесса рассеяния в направлении на зенит и на горизонт наблюдателя.

Из рис. 22.6 следует:

$$H = R (\sec \varphi - 1), \quad (22.1)$$

$$h = R (\sec \varphi/2 - 1), \quad (22.2)$$

где R — радиус Земли.

Численные значения H и h , рассчитанные по этим формулам для конца всех видов сумерек, следующие:

Сумерки	H км	h км
Гражданские	56	12,7
Навигационные	140	38
Астрономические	325	76

Даже после окончания астрономических сумерек слои атмосферы выше 325 км в зените и выше 76 км на горизонте еще освещаются прямыми солнечными лучами и участвуют в освещении земной поверхности ночью.

В связи с необычайно быстрым изменением освещенности сумерки богаты разнообразными, яркими и быстро протекающими оптическими явлениями. Опускаясь к горизонту, Солнце становится менее ярким и начинает изменять свой цвет: от золотистого, желтого, оранжевого до темно-красного. Одновременно окрашивается и небо. Около Солнца оно желтое, а дальше оранжевое. Вдоль горизонта в стороне зашедшего Солнца появляется яркая полоска зари, окраска которой, красная или темно-красная снизу, переходит в желто-оранжевую и зеленовато-голубую наверху. В противоположной Солнцу части неба из-за горизонта поднимается свинцово-серая *тень Земли*, окаймленная розовым поясом. По мере опускания Солнца окраска зари делается насыщеннее и над зарею на высоте $20-25^\circ$ появляется розовое пятно. Это так

называемый пурпурный свет, наибольшая яркость которого наблюдается при глубине погружения Солнца $4-5^\circ$. Вершины снежных гор и облака окрашиваются в пурпурные и алые тона, а если за горизонтом есть высокие горы или облака типа Сб, то тени от них простираются по ярко окрашенному небу в виде радиальных темных полос (*лучи Будды*). К концу гражданских сумерек тень Земли закрывает значительную часть неба, розовый пояс и пурпурный свет бледнеют и пропадают. Облака, попав в тень Земли, гаснут, становятся серыми. Сохраняется только узкая цветная полоска у горизонта в азимуте зашедшего Солнца — сегмент зари, но и она бледнеет и гаснет к концу астрономических сумерек.

Быстрое изменение освещенности во время сумерек и возможность в любой момент сумерек и в любом направлении точно указать, на какой высоте проходит тень Земли, т. е. какие слои в этот момент выключаются из освещения солнечным светом, делает сумеречные наблюдения ценными для исследования вертикальной оптической структуры атмосферы. Хотя освещена солнечным светом вся атмосфера, лежащая выше терминатора, практически почти весь рассеянный свет поступает от сравнительно тонкого слоя, середина которого располагается на высоте 19—20 км над местом захода Солнца. Этот эффективно рассеивающий слой атмосферы и пучок солнечных лучей, пронизывающий его, называют сумеречными.

С космических кораблей во время сумерек можно наблюдать необыкновенно яркие и красочные оптические явления. Когда корабль находится в области тени Земли и приближается к терминатору, сумеречный горизонт оказывается окруженным необычайно ярким цветным ореолом. Вблизи земной поверхности тона ореола насыщенные: красно-оранжевые цвета плавно переходят в оранжево-желтые и желтые. Затем идет узкая полоска темно-синего цвета пониженной яркости, над нею голубые тона переходят в светло-голубые с белесоватым оттенком, далее черно-фиолетовые переходят в черный цвет космического пространства. Угловая высота ореола около 4° при высоте космического корабля 230—240 км. При наличии облаков картина ореола сохраняется, лишь тона, прилегающие к земной поверхности, становятся пурпурно-красными; в такой же цвет окрашиваются и просветы в облаках.

При углах погружения Солнца под горизонт более $10-11^\circ$ (для наблюдателя на Земле) сумеречное излучение верхней атмосферы, наблюдаемое над ночным свечящимся ореолом, приобретает характерный вид «усов», как бы нависающих симметрично по обе стороны ночного ореола. Это свечение сумеречной атмосферы получило название *эффекта усов*. При пересечении космическим кораблем терминатора эффект усов пропадает.

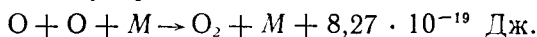
2.2 Освещенность ночью. Луна является главным источником освещения земной поверхности ночью. Освещенность, которую создает полная Луна на перпендикулярной к лучам площадке, рас-

положенной на верхней границе земной атмосферы, составляет около 0,34 лк. Максимальная освещенность земной поверхности, которую может создать полная Луна, находящаяся в зените, на горизонтальной площадке при средней прозрачности атмосферы составляет всего около 0,25 лк. В первой и последней четвертях освещенность, создаваемая Луной, около 0,03—0,04 лк.

Общий свет, поступающий на земную поверхность от ночного неба (в отсутствии Луны), называют *свечением ночного неба*. Свечение ночного неба включает: 1) собственное свечение атмосферных газов, называемое *ночным свечением атмосферы*, излучение полярных сияний, а также солнечного света, рассеянного верхними слоями атмосферы; 2) свет звезд; 3) свет, рассеянный межпланетной (зодиакальный свет) и межзвездной (галактический свет) пылью.

Ночное свечение атмосферы — это свечение газов, входящих в состав воздуха на высотах от 80—100 до 250—300 км. Спектр свечения состоит из большого числа линий и полос в видимой и близкой инфракрасной областях спектра, а также слабого непрерывного спектра в области 0,595—0,630 мкм. Наиболее яркими в видимой части спектра являются линии атомного кислорода (зеленая с $\lambda = 0,558$ мкм и две более слабые красные с λ , равными 0,630 и 0,636 мкм) и линия натрия ($\lambda = 0,595$ мкм). Имеются линии и полосы следующих газов: N, N₂, O₂, NO, NO₂ и других, а также ионов этих атомов и молекул.

Ночное свечение атмосферы вызывается фотохимическими процессами, происходящими на указанных высотах. Днем под действием ультрафиолетовой радиации Солнца ($\lambda < 0,175$ мкм) происходит диссоциация молекул кислорода на атомы: O₂ → O + O. В сумерки и ночью диссоциация кислорода прекращается и начинает преобладать процесс соединения атомов в молекулы с выделением квантов энергии. Эта выделяющаяся энергия и расходуется на возбуждение свечения атомов и молекул воздуха, имеющих на этих высотах. Более вероятной считается реакция, происходящая при тройных соударениях:



Третья частица M (ею может быть любой атом или молекула, линии и полосы излучения которых имеются в спектре свечения атмосферы) принимает на себя квант энергии и, возбуждаясь, создает свечение. Процесс диссоциации кислорода на атомы и последующего соединения атомов в молекулы происходит в основном на высотах 80—100 км. Возможны и многие другие реакции с участием других атомов и молекул, а также их ионов (O⁺, O₂⁺, NO⁺ и др.). Реакции с участием ионов происходят на высотах 250—300 км.

Общая освещенность земной поверхности в безлунные ночи при безоблачной погоде изменяется от 0,0005 до 0,001 лк. В пасмурную

дождливую погоду освещенность уменьшается в 10 раз и более. В больших городах за счет искусственных источников света, рассеянного облачным покровом, освещенность земной поверхности может достигать 1 лк.

Вклад основных составляющих свечения ночного неба в освещение земной поверхности в среднем за ночь приблизительно следующий: ночное свечение атмосферы 45 %, свет звезд 30 %, зодиакальный и галактический свет около 25 %.

3 Видимость в атмосфере

3.1. Общие сведения о видимости в атмосфере. Учение о видимости представляет собой комплексное исследование закономерностей зрительного восприятия различных объектов на местности и сигнальных огней.

Задача определения дальности видимости разнообразных предметов и огней имеет большое прикладное значение. В решении этой задачи заинтересованы работники всех видов транспорта и в первую очередь авиации. Для наземного транспорта важно знать видимость на шоссе на дорогах, на улицах больших городов, оптимальные условия освещения для обеспечения видимости дорожных знаков и сигнальных огней. Для морского и речного транспорта необходимы сведения о видимости различных объектов на берегу, а также сигнальных огней. Наибольшие требования к надежному определению дальности видимости предъявляет авиация, поскольку взлет самолетов и особенно их посадка осуществляются в основном с помощью визуального наблюдения взлетно-посадочной полосы или сигнальных огней на ней.

Большое значение приобретает задача определения наклонной дальности видимости наземных объектов с космических кораблей и спутников.

Дальность видимости даже очень больших и высоких предметов на земной поверхности всегда ограничена. В самых идеальных условиях наблюдения при увеличении расстояния предметы перестают быть видимыми, поскольку скрываются за горизонтом в силу шарообразности Земли.

Дальность видимости, обусловленная только геометрическими параметрами (радиусом кривизны Земли, высотой предмета и наблюдателя) называется *геометрической (геодезической) дальностью видимости*.

На рис. 22.7 наблюдатель находится в точке A на высоте z_n и определяет геометрическую дальность видимости предмета, находящегося: 1) в точке B на земной поверхности и 2) в точке C на некоторой высоте z_{np} над земной поверхностью. Геометрическая дальность видимости (D_0) данного предмета в первом случае