

или, с учетом (1.22) и (1.23)

$$d\Phi_\lambda = \left[ \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} G_\lambda(\vartheta, \psi) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \right] d\lambda dS. \quad (1.24)$$

Сопоставляя соотношения (1.2) и (1.24) получаем формулу, связывающую спектральную плотность потока  $F_\lambda$  (монохроматический поток) с энергетической яркостью  $G_\lambda$ :

$$F_\lambda = \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} G_\lambda(\vartheta, \psi) \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta. \quad (1.25)$$

Если  $G_\lambda$  не зависит от направления, то поле излучения называется *изотропным*. В этом случае  $G_\lambda = G_\lambda(x, y, z, t)$  — функция лишь координат точки  $x, y, z$  и времени  $t$ , а между  $F_\lambda$  и  $G_\lambda$  существует наиболее простая связь

$$F_\lambda = \pi G_\lambda, \quad (1.26)$$

поскольку

$$\int_0^{\pi/2} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \sin^2 \vartheta / 2 \Big|_0^{\pi/2} = 1/2.$$

## 2 Солнце и солнечная постоянная

Солнце можно разделить на *внутреннюю часть* и *атмосферу*.

Внутренняя часть имеет температуру свыше 5 млн. кельвинов. Здесь возникают термоядерные реакции перехода водорода в гелий. Энергия этих реакций распространяется из недр Солнца путем поглощения и переизлучения световых квантов вышележащими слоями. В верхнем слое (толщиной около 100 000 км) этой части, называемом конвективной зоной, перенос энергии осуществляется также путем конвекции (скорость подъема горячих масс газа и опускания холодных масс — 1—2 км/с).

Атмосфера Солнца состоит из трех слоев. Самый нижний слой толщиной 100—300 км носит название *фотосферы*. Она представляет собой сильно ионизованный газ с температурой 5000—6000 К и давлением на верхней границе около 100 гПа. Фотосфера излучает практически всю энергию, поступающую на Землю от Солнца. Выше фотосферы расположена *хромосфера*, простирающаяся до высоты 10 000—15 000 км, и *солнечная корона*, представляющая собой почти полностью ионизованный газ — плазму (с числом частиц в 1 см<sup>3</sup> около  $3 \cdot 10^7$  у основания короны и около 200 вблизи орбиты Земли).

Температура Солнца падает с увеличением расстояния от центра его лишь до верхней границы фотосферы. В хромосфере температура возрастает с увеличением высоты, сначала медленно (до десятков тысяч кельвинов), а затем быстро, и достигает миллиона кельвинов на границе между хромосферой и солнечной короной.

Рост температуры в хромосфере и короне принято объяснять рассеянием энергии звуковых и других волн, которые возникают в конвективной зоне.

Скорость истечения плазмы вблизи Солнца относительно мала (порядка десятков километров в секунду), а затем она растет и вблизи орбиты Земли достигает нескольких сотен километров в секунду. Поток заряженных частиц — *корпускул*, летящих от Солнца во всех направлениях, получил название *солнечного ветра*.

Солнечная атмосфера, и в частности фотосфера, весьма неоднородна и неспокойна. В ней наблюдаются *факелы*, *флоккулы*, *хромосферные вспышки* и другие процессы, являющиеся источниками корпускулярных потоков, более сильных, чем солнечный ветер. Особенно резко возрастает корпускулярное и электромагнитное излучение Солнца при хромосферных вспышках продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов. Плотность вещества в местах вспышки значительно превышает плотность в окружающих областях хромосферы, а скорость движения корпускул достигает 1000 км/с. При определенной ориентации такой поток корпускул через 1—2 сут приходит к Земле и вызывает магнитные бури, полярные сияния и другие геофизические явления. Во время вспышки сильно возрастает интенсивность рентгеновского и радиоволнового излучения, а также в некоторых участках ультрафиолетовой и видимой областей спектра.

В фотосфере возникают относительно холодные образования (с температурой около 4600 К) неправильной формы с очень сильными магнитными полями, получившими название *солнечных пятен*. Они обычно появляются группами в широтных зонах 35—5° по обе стороны от солнечного экватора и существуют от нескольких часов до нескольких месяцев.

Весь комплекс кратко описанных нестационарных явлений в солнечной атмосфере называют *солнечной активностью*. Для ее количественной характеристики используются различные индексы. Наиболее распространенный среди них — число Вольфа  $W$ , пропорциональное сумме общего числа пятен  $f$  и удесятеренного числа их групп  $g$ :

$$W = k(f + 10g),$$

где  $k$  — эмпирический коэффициент.

Числа Вольфа обнаруживают колебания во времени со средним периодом около 11 лет (при изменении отдельных периодов от 7

до 17 лет). Такие колебания свойственны и другим проявлениям солнечной активности и обусловленным ею геофизическим явлениям. Числа Вольфа во время минимума солнечной активности изменяются от 0 до 11, а во время максимума — от 40 до 240. В течение 11 летнего цикла меняется не только число солнечных пятен, но и положение зоны их образования. Кроме колебания с периодом около 11 лет, наблюдения позволили выявить ряд колебаний солнечной активности с другими периодами (27 сут, 22 года, 80—90 лет).

Важнейшее значение имеет проблема выяснения связи солнечной активности с процессами и явлениями земной атмосферы — так называемая проблема солнечно-земных связей. По этой проблеме за последние десятилетия выполнено много исследований. Однако в целом она удовлетворительно еще не решена. В частности, остается неясным механизм связи с солнечной активностью погодообразующих процессов, наблюдаемых в тропосфере и стратосфере.

Весь спектр излучения Солнца принято делить на ряд областей (в скобках указаны граничные длины волн  $\lambda$ ):

- 1) гамма-лучи ( $\lambda < 10^{-5}$  мкм);
- 2) рентгеновское излучение ( $10^{-5}$  мкм  $< \lambda < 10^{-2}$  мкм);
- 3) ультрафиолетовая радиация ( $0,01$  мкм  $< \lambda < 0,39$  мкм);
- 4) видимое излучение спектра или видимый свет ( $0,39$  мкм  $< \lambda < 0,76$  мкм), который в свою очередь подразделяется на семь цветов:

Цвет	Длины волн, мкм	Цвет	Длины волн, мкм
Фиолетовый	0,390—0,455	Желтый	0,575—0,585
Синий	0,455—0,485	Оранжевый	0,585—0,620
Голубой	0,485—0,505	Красный	0,620—0,760
Зеленый	0,505—0,575		

5) инфракрасная радиация ( $0,76$  мкм  $< \lambda < 3000$  мкм);

6) радиоволновое излучение ( $\lambda > 0,3$  см).

Выделяют также близкий ультрафиолетовый ( $0,29—0,39$  мкм) и близкий инфракрасный ( $0,76—2,4$  мкм) участки спектра.

Большая часть (свыше 95 %) излучения Солнца приходится на область так называемого оптического окна ( $0,29—2,4$  мкм), включающего видимый, близкие ультрафиолетовый и инфракрасный участки спектра. Эта область носит название оптического окна по той причине, что именно здесь земная атмосфера наиболее прозрачна для солнечного излучения (пропускает около 80 %), в то время как излучение в дальних коротковолновой и инфракрасной областях (на которые приходится соответственно около 1 и 3,6 %) полностью или почти полностью поглощается атмосферой. Отметим попутно, что, помимо оптического окна, атмосфера прозрачна также для радиоволнового излучения в интервале длин волн 1—20 см.

Излучательная способность Солнца близка к излучательной способности абсолютно черного тела с температурой около 5800 К. В табл. 5.1 и на рис. 5.3 приведено распределение по длинам волн солнечной радиации на верхней границе земной атмосферы. Однако излучение Солнца близко к излучению абсолютно черного тела только в видимой и близких инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. В интервале 0,29—0,21 мкм излучение Солнца убывает с длиной волны быстрее, чем у черного тела. Однако далее оно падает медленнее, и уже вблизи  $\lambda \approx 0,1$  мкм Солнце излучает в 2—3 раза больше энергии, чем черное тело.

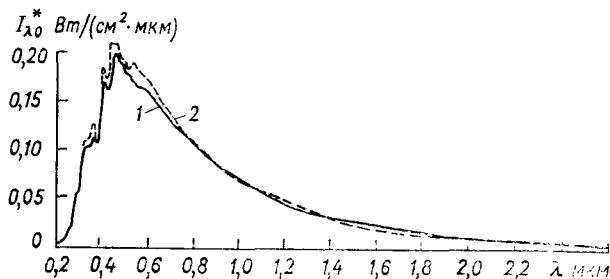


Рис. 5.3. Спектральная плотность  $I_{\lambda 0}^*$  потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы.

1 — по данным Такаэкари и Драммонда (1970 г.); 2 — по данным Джонсона (1954 г.).

При  $\lambda < 0,05$  мкм излучение Солнца резко отличается от излучения черного тела. Это объясняется тем, что в области  $\lambda < 0,2$  мкм излучение фотосферы падает до минимума и основным источником излучения служит горячая плазма верхней хромосферы и нижней короны Солнца.

Интенсивность излучения Солнца в области очень коротких волн (особенно интенсивность рентгеновского излучения) подвержена резким колебаниям во времени — в десятки и сотни раз в 11-летнем цикле солнечной активности. Эти колебания, несмотря на малую энергию, оказывают определенное влияние на процессы, протекающие в самых верхних слоях земной атмосферы. Однако вклад рентгеновского, равно как и радиоволнового, излучения, которое подвержено еще более значительным колебаниям, в общий поток солнечной радиации ничтожно мал. По этой причине даже резкие колебания этих излучений практически не сказываются на интегральном потоке солнечной радиации, для которого характерно большое постоянство во времени.

Считая Солнце по своим свойствам близким к абсолютно черному телу, можно оценить температуру Солнца. При этом разные методы дают несколько различные результаты. Максимум излучательной способности Солнца приходится на видимый участок

Таблица 5.1. Спектральная плотность потока  $I_{\lambda 0}^*$  солнечной радиации на верхней границе атмосферы (при  $I_0^* = 1,353$  кВт/м<sup>2</sup>) и доля ( $D_{\lambda}$ ) потока солнечной радиации во всем интервале длин волн короче  $\lambda$

$\lambda$ мкм	$I_{\lambda 0}^*$ Вт/(см <sup>2</sup> ·мкм)	$D_{\lambda}$ %	$\lambda$ мкм	$I_{\lambda 0}^*$ Вт/(см <sup>2</sup> ·мкм)	$D_{\lambda}$ %
0,18	0,0001	0,00	0,64	0,1544	40,42
0,20	0,0011	0,01	0,66	0,1486	42,16
0,22	0,0057	0,05	0,68	0,1427	44,81
0,24	0,0063	0,14	0,70	0,1369	46,88
0,26	0,0130	0,27	0,72	0,1314	48,86
0,28	0,0222	0,56	0,75	0,1235	51,69
0,30	0,0514	1,21	0,80	0,1107	56,02
0,32	0,0830	2,22	1,00	0,0746	69,46
0,34	0,1074	3,72	1,20	0,0484	78,39
0,36	0,1068	5,32	1,40	0,0336	84,34
0,38	0,1120	7,00	1,60	0,0244	88,61
0,40	0,1429	8,73	1,80	0,0159	91,59
0,42	0,1747	11,22	2,00	0,0103	93,49
0,44	0,1810	13,73	3,00	0,0031	97,83
0,46	0,2066	16,65	4,00	0,0009	99,06
0,48	0,2074	19,68	5,00	0,0004	99,51
0,50	0,1942	22,60	6,00	0,0002	99,72
0,52	0,1833	25,38	7,00	0,0001	99,82
0,54	0,1783	28,08	8,00	0,0001	99,88
0,56	0,1695	30,65	10,00	0,0000	99,44
0,58	0,1715	33,18	15,00	0,0000	99,98
0,60	0,1666	35,68	20,00	0,0000	99,99
0,62	0,1602	38,10			

спектра, на длину волны  $\lambda_m = 0,4738$  мкм. На основании закона Вина получаем так называемую цветовую температуру Солнца:  $T_c = 6116$  К.

Второй метод определения температуры Солнца основан на формуле (1.17) для потока излучения и на понятии солнечной постоянной. Количество солнечной радиации, поступающее на верхней границе земной атмосферы в единицу времени на единичную поверхность, перпендикулярную солнечным лучам, при *среднем расстоянии* Земли от Солнца, называется *солнечной постоянной*. Обозначим солнечную постоянную через  $I_0^*$ . Другими словами,  $I_0^*$  — поток солнечной радиации на верхней границе земной атмосферы через площадку, перпендикулярную солнечным лучам, при среднем расстоянии Земли от Солнца. Точное значение солнечной постоянной вследствие тех больших трудностей, которые возникают при ее определении, не установлено до настоящего времени.

Огромное число наблюдений за солнечной радиацией и расчетов солнечной постоянной выполнено Ч. Г. Абботом и другими со-

трудниками Смитсоновского института (США). В последующем уточнении  $I_0^*$  занимались Н. Н. Калитин, В. Г. Фесенков, М. Николе, Ф. Джонсон, К. Я. Кондратьев и др.

Широкие возможности для определения  $I_0^*$  появились в последние десятилетия на основе наблюдений потока солнечной радиации с помощью ИСЗ. Согласно новейшим данным актинометрических измерений на спутниках, наиболее вероятное значение солнечной постоянной заключено в интервале 1,368—1,377 кВт/м<sup>2</sup> (максимальный разброс составляет 1,322—1,428 кВт/м<sup>2</sup> при отсутствии какой-либо регулярности изменения во времени — отсюда и термин «солнечная постоянная»).

Международная комиссия по радиации рекомендовала принять в качестве стандартного значения солнечной постоянной (по Международной пиргелиометрической шкале 1956 г.)

$$I_0^* = 1,37 \text{ кВт/м}^2.$$

К. Я. Кондратьев и Г. А. Никольский на основе данных измерений на аэростатах, поднимавшихся до высоты около 30 км, получили (путем экстраполяции аэростатных данных за пределы атмосферы) для  $I_0^*$  значение 1,36 кВт/м<sup>2</sup>. Не исключено, что солнечная постоянная испытывает некоторые изменения во времени под влиянием колебаний активности Солнца, в частности чисел Вольфа. По К. Я. Кондратьеву и Г. А. Никольскому, наибольшее значение  $I_0^*$  наблюдается при  $W$  в интервале 80—100. При числах

Вольфа вне этого интервала солнечная постоянная уменьшается, при этом максимальное отклонение достигает 2%. Для окончательного решения вопроса о солнечной постоянной необходимы, как подчеркивает К. Я. Кондратьев, длительные прямые (с помощью спутников) измерения спектрального распределения солнечной радиации вне земной атмосферы.

Наряду с понятием солнечной постоянной, включающей энергию всех длин волн (ее называют также *астрономической солнечной постоянной*), некоторые авторы (Дж. Джордж, С. И. Сивков) предложили ввести понятие *метеорологической солнечной постоянной*. Последняя представляет собой поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы в спектральном интервале 0,346—2,4 мкм. Из спектра солнечной радиации исключается, таким образом, та часть излучения, которая никогда не достигает тропосферы и не оказывает влияния на ее тепловой режим. Метеорологическая солнечная постоянная равна по Джорджу 1,26 кВт/м<sup>2</sup>, по Сивкову 1,25 кВт/м<sup>2</sup>.

Наряду с понятием солнечной постоянной, включающей энергию всех длин волн (ее называют также *астрономической солнечной постоянной*), некоторые авторы (Дж. Джордж, С. И. Сивков) предложили ввести понятие *метеорологической солнечной постоянной*. Последняя представляет собой поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы в спектральном интервале 0,346—2,4 мкм. Из спектра солнечной радиации исключается, таким образом, та часть излучения, которая никогда не достигает тропосферы и не оказывает влияния на ее тепловой режим. Метеорологическая солнечная постоянная равна по Джорджу 1,26 кВт/м<sup>2</sup>, по Сивкову 1,25 кВт/м<sup>2</sup>.

Если известно значение солнечной постоянной, то можно подсчитать поток излучения Солнца  $B_c$ . Обозначим через  $r_0$  среднее расстояние Земли от Солнца, через  $a$  радиус Солнца;  $r_0 = 149,5$  млн. км,  $a = 696,6$  тыс. км.

Каждый квадратный метр сферы радиусом  $r_0$  получает в 1 с энергию  $I_0^*$ ; количество энергии, получаемое всей сферой радиусом  $r_0$ , равно количеству энергии, излучаемой Солнцем:

$$4\pi a^2 B_C = 4\pi r_0^2 I_0^*.$$

Отсюда

$$B_C = (r_0/a)^2 I_0^*.$$

Зная поток  $B_C$  и приравнявая его  $\sigma T_C^4$ , находим температуру фотосферы Солнца:  $T_C = 5805$  К. Температура Солнца, определенная по значениям  $I_0^*$  и  $B_C$ , носит название *эффективной* или *радиационной температуры*. При практических расчетах температуру Солнца полагают равной 6000 К.

Количество энергии, излучаемое Солнцем, распределяется между различными участками спектра следующим образом: ультрафиолетовая область ( $\lambda < 0,39$  мкм) — около 9 %, видимый участок спектра ( $0,39 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,76$  мкм) — 47 %, инфракрасная область ( $\lambda \geq 0,76$  мкм) — 44 %.

Из изложенного выше следует, что Солнце излучает энергию в широком диапазоне длин волн. Однако свыше 99 % этой энергии приходится на участок спектра, заключенный между 0,10 и 4 мкм. Солнечную радиацию по этой причине часто называют *коротковолновой*, в отличие от инфракрасной (*длинноволновой*) радиации Земли и атмосферы, свыше 99 % которой приходится на интервал длин волн от 3—4 до 80—120 мкм.

### 3 Распределение солнечной радиации по земному шару при отсутствии атмосферы

Распределение солнечной радиации по земному шару при отсутствии атмосферы или, что практически одно и то же, на верхней границе атмосферы и изменение ее во времени определяются чисто астрономическими факторами: вращением Земли вокруг Солнца, наклоном оси вращения Земли по отношению к плоскости орбиты Земли (эклиптике), суточным вращением Земли. Теорию распределения солнечной радиации по земному шару при отсутствии атмосферы (так называемую астрономическую теорию климата) разработал югославский ученый М. Миланкович.

Пусть  $r_0$  — среднее, а  $r$  — произвольное расстояние Земли от Солнца. Определим поток солнечной радиации  $I_0$  через единичную площадку, перпендикулярную солнечным лучам, при расстоянии  $r$ . Очевидно, между  $I^*$  и  $I_0$  существует связь:

$$4\pi r_0^2 I_0^* = 4\pi r^2 I_0,$$