

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 σT_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:

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

откуда

$$I_0 = \frac{I_0^*}{(r/r_0)^2}. \quad (3.1)$$

Установим связь между потоками солнечной радиации, поступающими к площадке, перпендикулярной солнечным лучам (I_0), и на горизонтальную поверхность (I_0'). Поток солнечной радиации на горизонтальную поверхность называют *инсоляцией*. Если обозначить через h_\odot высоту Солнца над горизонтом в произвольный момент времени, то непосредственно из рис. 5.4 следует, что на площадки AB и AC поступает одно и то же количество солнечной радиации

$$I_0 AB = I_0' AC.$$

Так как $AB = AC \sin h_\odot$, то получаем соотношение

$$I_0' = I_0 \sin h_\odot, \quad (3.2)$$

Рис. 5.4. К установлению связи между потоками солнечной радиации на перпендикулярную (I_0) и горизонтальную (I_0') поверхности.

которое справедливо для любого потока радиации.

Из астрономии известно, что

$$\sin h_\odot = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \frac{2\pi}{\Pi} t, \quad (3.3)$$

где φ — географическая широта места наблюдения; δ — склонение Солнца; $\Pi = 86400$ с — длина солнечных суток; $\frac{2\pi}{\Pi} t$ — часовой угол; t — время, отсчитываемое от полудня.

Определим количество солнечной радиации Q , получаемой 1 м² горизонтальной поверхности в течение суток при отсутствии атмосферы, т. е. *суточную инсоляцию*. Очевидно,

$$Q = \int_{-t_0}^{+t_0} I_0' dt, \quad (3.4)$$

где $\pm t_0$ — моменты восхода и захода Солнца, определяемые из условия $\sin h_\odot = 0$. Согласно (3.3),

$$\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \frac{2\pi}{\Pi} t_0 = 0,$$

откуда

$$\cos \frac{2\pi}{\Pi} t_0 = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta, \quad (3.5)$$

т. е. t_0 зависит только от широты места и склонения Солнца (времени года). Заменяя в (3.4) I'_0 на I_0^* по (3.1) и (3.2) и $\sin h_{\odot}$ по (3.3), найдем

$$Q = I_0^* \int_{-t_0}^{+t_0} \left(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \frac{2\pi}{\Pi} t \right) \frac{dt}{(r/r_0)^2}.$$

Поскольку в течение суток δ и r/r_0 изменяются незначительно, то, считая их постоянными, из последнего соотношения получаем

$$Q = \frac{2I_0^*}{(r/r_0)^2} \left(t_0 \sin \varphi \sin \delta + \frac{\Pi}{2\pi} \right) \cos \varphi \cos \delta \sin \left(\frac{2\pi}{\Pi} t_0 \right). \quad (3.6)$$

Формула (3.6) показывает, что Q зависит только от широты места φ и склонения Солнца δ (времени года).

Результаты расчета суточной инсоляции Q приведены в табл. 5.2. Согласно этим данным, в день летнего солнцестояния ($\delta = 23,5^\circ$) суточная инсоляция достигает максимума над Северным полюсом. Второй, более слабый максимум Q наблюдается на широте $43,5^\circ$, где влияние меньшей продолжительности дня перекрывается большей высотой Солнца в околополуденные часы. В день зимнего солнцестояния ($\delta = -23,5^\circ$) суточная инсоляция равна нулю на всех широтах, расположенных севернее полярного круга ($\varphi > > 66,5^\circ$). С приближением к экватору (в северном полушарии) инсоляция при $\delta = -23,5^\circ$ монотонно растет. На Южном полюсе суточная инсоляция в этот день достигает максимума, равного $48,76$ МДж/м², вторичный же максимум на $43,5^\circ$ ю. ш. составляет $45,01$ МДж/м². Эти значения Q в середине лета южного полушария больше соответствующих значений для северного полушария (где они равны $45,67$ и $42,09$). Это объясняется тем, что Земля во время лета северного полушария находится вблизи афелия своей орбиты (удаленного от Солнца на расстояние около $1,52 \cdot 10^8$ км), а летом

Таблица 5.2. Суточная инсоляция (МДж/м²) при $I_0^* = 1,37$ кВт/м²

Солнцестояние	φ°									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Северное полушарие										
Летнее (22 июня)	33	37	40	41	42	42	42	43	45	46
Зимнее (22 декабря)	36	31	26	20	7	7	2	0	0	0
Южное полушарие										
Зимнее (22 июня)	33	29	24	18	12	7	2	0	0	0
Летнее (22 декабря)	36	40	42	44	45	45	44	46	48	49

южного полушария — вблизи перигелия орбиты (находящегося на расстоянии около $1,47 \cdot 10^8$ км).

Приведем еще выражения для потоков солнечной радиации на горизонтальную поверхность, поступающих за летнее (от весеннего, 21 марта, до осеннего, 23 сентября, равноденствия) и зимнее (от осеннего до весеннего равноденствия) астрономические полугодия, т. е. выражения для *летней* (Q_s) и *зимней* (Q_w) инсоляции.

Выполнив в формуле (3.6) интегрирование по δ с учетом изменения r/r_0 , придем к следующим формулам:

$$Q_s = \frac{Q_0}{2} + \frac{I_0^* \Pi_0}{2\pi \sqrt{1-e^2}} \sin \varphi \sin \varepsilon, \quad (3.7)$$

$$Q_w = \frac{Q_0}{2} - \frac{I_0^* \Pi_0}{2\pi \sqrt{1-e^2}} \sin \varphi \sin \varepsilon, \quad (3.8)$$

где $\Pi_0 = 365,2422$ солн. сут — длина тропического года, $\varepsilon = 23,4457^\circ$ — угол наклона экватора к эклиптике, e — эксцентриситет орбиты Земли, Q_0 — годовое количество солнечной радиации (инсоляция).

Для различных широт получены следующие значения количества солнечной радиации (ГДж/м^2), поступающей на горизонтальную поверхность Земли при $I_0^* = 1,37 \text{ кВт/м}^2$:

φ°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Q_s	6,60	6,99	7,18	7,20	6,99	6,62	6,13	5,70	5,53	5,47
Q_w	6,60	6,05	5,31	4,44	3,45	2,43	1,38	0,55	0,12	0
Q_0	13,20	13,04	12,49	11,64	11,45	9,05	7,51	6,25	5,65	5,47

Согласно приведенным данным, годовая инсоляция на полюсе в 2,5 раза меньше, чем на экваторе.

Анализ формул для Q_s и Q_w показывает, что полугодовые значения инсоляции в северном и южном полушариях на соответствующих широтах одинаковы. Однако продолжительность астрономических полугодий в полушариях различна. Используя известное из астрономии уравнение земной орбиты (уравнение кеплерова эллипса), найдем выражения для продолжительности летнего (Π_s) и зимнего (Π_w) полугодий в северном полушарии:

$$\Pi_s = \frac{\Pi_0}{2} \left(1 + \frac{4}{\pi} e \sin \lambda_{\pi} \right), \quad (3.9)$$

$$\Pi_w = \frac{\Pi_0}{2} \left(1 - \frac{4}{\pi} e \sin \lambda_{\pi} \right), \quad (3.10)$$

где λ_{π} — долгота перигелия земной орбиты (по современным данным произведение $e \sin \lambda_{\pi} = 0,016454$).

По указанной выше причине средние значения суточной инсоляции Q_s/Π_s и Q_w/Π_w в северном полушарии отличаются от аналогичных значений в южном полушарии, где средняя суточная инсоляция летом равна Q_s/Π_w , зимой Q_w/Π_s . Значения Q_s , Q_w , Π_s и Π_w определяются по формулам (3.7) — (3.10).

Результаты расчета средних значений суточной инсоляции в северном и южном полушариях приведены в табл. 5.3. Согласно данным этой таблицы, в южном полушарии на верхнюю границу атмосферы поступает летом солнечной радиации больше, чем в северном; зимой же имеет место обратное соотношение. Таким образом, разность между средними значениями инсоляции за летнее и зимнее полугодия (годовая амплитуда инсоляции) в северном полушарии меньше, чем в южном. Так, годовая амплитуда суточной инсоляции на широте 30° составляет $13,74$ МДж/м² в северном полушарии и $16,46$ МДж/м² в южном, на широте 60° — соответственно $25,18$ и $26,87$ МДж/м².

Таблица 5.3. Средние значения суточной инсоляции (МДж/м²) при $I_0^* = 1,37$ кВт/м²

Полушарие	φ°								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Летнее полугодие									
Северное	37,5	38,5	38,6	37,5	35,6	32,9	30,6	29,7	29,3
Южное	39,1	40,2	40,3	39,1	37,1	34,3	31,9	30,9	30,6
Зимнее полугодие									
Северное	33,8	29,7	24,8	19,3	13,6	7,7	3,1	0,7	0,0
Южное	32,4	28,5	23,8	18,5	13,0	7,4	3,0	0,7	0,0

При решении ряда задач, в частности, в теории климата, удобно иметь дело с полугодиями одинаковой продолжительности, равной $\Pi_0/2$. В связи с этим вводится понятие летнего и зимнего калорического полугодий, определяемых как такие полугодия равной продолжительности $\Pi_0/2$, для которых суточная инсоляция на широте в любой день летнего полугодия больше, чем в любой день зимнего полугодия. Из теории, развитой Миланковичем и другими учеными, следует, что инсоляция в калорические полугодия зависит от широты и изменяется под влиянием колебаний элементов орбиты Земли, а также наклона оси вращения Земли к плоскости эклиптики (плоскость вращения Земли вокруг Солнца). Выполнен расчет инсоляции за калорические полугодия на различных широтах северного и южного полушарий для различных моментов времени (охватывающих период от -1 млн. лет до $+50$ тыс. лет).