

В табл. 6.7 приведены значения отношений осредненных за год потоков прямой солнечной радиации на наклонную и горизонтальную поверхности при различной крутизне склонов ( $\alpha$ ) и различной их ориентации. Эти данные относятся к средним широтам (54—62° с. ш.).

Таблица 6.7. Значения отношений потоков прямой солнечной радиации на наклонную и горизонтальную поверхности

$\alpha^\circ$	Ориентация склонов							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
10	0,83	0,89	1,00	1,11	1,50	1,09	0,98	0,87
20	0,66	0,77	0,99	1,19	1,25	1,17	0,95	0,74
30	0,49	0,65	0,97	1,24	1,32	1,20	0,93	0,61
45	0,27	0,50	0,93	1,27	1,38	1,22	0,86	0,46
60	0,14	0,42	0,86	1,23	1,32	1,17	0,79	0,37

Для осредненных за год радиационных балансов значения таких отношений в случае северной ориентации склонов составляют 0,92—0,95 при  $\alpha = 10^\circ$  и 0,85—0,88 при  $\alpha = 20^\circ$ ; в случае южной ориентации склонов составляют 1,02—1,04 при  $\alpha = 10^\circ$  и 1,05—1,10 при  $\alpha = 20^\circ$ .

## 5 Рассеянная радиация

*Рассеянная радиация* представляет собой солнечную радиацию, претерпевшую рассеяние в атмосфере. Количество рассеянной радиации, поступающей на единичную горизонтальную поверхность в единицу времени, носит название *потока рассеянной радиации*; поток рассеянной радиации будем обозначать через  $i$ . Поскольку первоисточником рассеянной радиации служит прямая солнечная радиация, поток  $i$  должен зависеть от факторов, которые определяют  $I$ , а именно: а) высоты Солнца  $h_\odot$  (чем больше  $h_\odot$ , тем больше  $i$ ); б) прозрачности атмосферы (чем больше  $p$ , тем меньше  $i$ ); в) облачности.

Как следует из табл. 6.8, составленной Н. Н. Калитиным по наблюдениям в Ленинграде, под влиянием облачности поток рассеянной радиации по сравнению с безоблачным небом, как правило, довольно значительно увеличивается. Исключение составляют облака нижнего яруса (St, Sc) при малых высотах Солнца ( $h_\odot < 10-15^\circ$ ). Наибольших значений поток  $i$  достигает при облаках среднего (Ac) и верхнего (Cs) ярусов, когда он в 2—3 раза больше, чем при безоблачных условиях.

Связать поток рассеянной радиации с потоком прямой позволяют следующие рассуждения. Если к земной поверхности посту-

Таблица 6.8. Поток рассеянной радиации ( $\kappa\text{Вт}/\text{м}^2$ ) при безоблачном небе и сплошной облачности различных форм

Форма облаков	$h_{\odot}^{\circ}$									
	0	2,5	5	10	15	20	25	30	40	50
Безоблачно	0,00	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08
Сi	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20
Сs	0,01	0,03	0,04	0,08	0,10	0,13	0,16	0,19	0,24	0,28
Ac	0,01	0,03	0,04	0,06	0,11	0,15	0,18	0,22	0,27	0,31
As	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	0,14	0,17	0,21	0,24
Sc	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,09	0,12	0,14	0,19	0,23
St	0,00	0,01	0,14	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13
Ns	—	—	0,01	0,02	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08	0,10
Cb	—	—	—	0,04	0,05	0,07	0,08	0,01	0,12	0,14

пает поток  $I$ , то потеря прямой солнечной радиации в атмосфере равна разности  $I_0 - I$ . В идеальной атмосфере вся эта радиация переходит в рассеянную. При симметричной форме индикатрисы молекулярного рассеяния к земной поверхности направляется половина всего количества рассеянной радиации. Таким образом, поток рассеянной радиации на горизонтальную поверхность

$$i = b(I_0 - I) \sin h_{\odot}.$$

Множитель  $b$ , в идеальной атмосфере равный  $1/2$ , в реальных условиях, когда часть потока  $I_0$  поглощается, как следует из сравнения с опытными данными, близок к  $1/3$ .

Если воспользоваться формулой В. Г. Кастрова (3.17) и соотношением  $\sin h_{\odot} = 1/m$ , то последняя формула примет вид

$$i = bcI \text{ или } i = bc \frac{I'}{\sin h_{\odot}}. \quad (5.1)$$

На основании формул (5.1) можно сделать следующие выводы.

1. При заданной прозрачности атмосферы ( $c = \text{const}$ ) поток  $i$  пропорционален  $I$ , т. е. увеличение высоты Солнца (уменьшение  $m$ ) сопровождается увеличением потока рассеянной радиации.

2. Отношение  $i/I$  зависит только от прозрачности атмосферы, и по опытным данным для высот Солнца от 10 до 75° оно близко к 0,22; 0,17; 0,12; 0,09 и 0,04 соответственно при низкой ( $c = 0,67$ ), пониженной ( $c = 0,54$ ), нормальной ( $c = 0,43$ ), повышенной ( $c = 0,34$ ) прозрачности и в идеальной атмосфере ( $c = 0,13$ ).

3. Отношение  $i/I'$  растет с уменьшением высоты Солнца и прозрачности атмосферы.

Указанные выводы иллюстрирует табл. 6.9, построенная по результатам наблюдений в Ленинграде, Москве, Саратове и Франкфурте-на-Майне (обобщение и анализ данных выполнены М. С. Аверкиевым и С. И. Сивковым). Из таблицы следует, что

Таблица 6.9. Поток рассеянной  $i$  радиации ( $\text{кВт/м}^2$ ) при различной прозрачности безоблачной атмосферы

$c$	$h_{\odot}^{\circ}$									
	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
0,67	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18
0,54	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15
0,43	0,05	0,06	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,12	0,13	0,13
0,34	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10
0,13	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

при заданной прозрачности ( $c = \text{const}$ ) поток  $i$  растет с увеличением высоты Солнца, а при фиксированной высоте Солнца — с понижением прозрачности.

Рассеянная радиация, так же как и прямая, имеет хорошо выраженный суточный ход. При этом максимум достигается в момент наибольшей высоты Солнца, т. е. в местный полдень. Значение максимума существенно зависит от состояния атмосферы.

При безоблачном небе поток рассеянной радиации составляет около 10 % инсоляции. Роль рассеянной радиации увеличивается при наличии облаков. В высоких широтах, где преобладает значительная облачность и малые высоты  $h_{\odot}$ , значение  $i$  может достигать примерно  $0,7 \text{ кВт/м}^2$ . Кроме облачности, большое влияние на рассеянную радиацию оказывает снежный покров. При наличии снежного покрова увеличивается отражение прямой солнечной радиации, повторное рассеяние которой в атмосфере приводит к увеличению  $i$ .

На рис. 6.7 приведена (по К. С. Шифрину) зависимость потока рассеянной радиации (в относительных единицах) от высоты Солнца и альбедо земной поверхности. Согласно рисунку, значение  $i$  летом значительно меньше, чем зимой. Основная доля рассеянной радиации приходится на видимую область спектра. В инфракрасной области около 96 % рассеянной радиации заключено в интервале  $0,7\text{--}1,7 \text{ мкм}$ , а на радиацию с  $\lambda > 2,27 \text{ мкм}$  приходится менее 1 %.

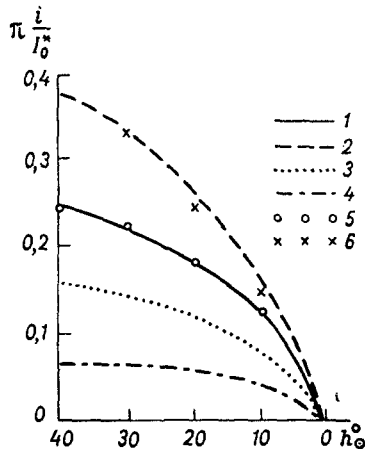


Рис. 6.7. Поток рассеянной радиации.

1 и 2 — по наблюдениям в Тарту летом и зимой соответственно; 3 —  $\lambda < 0,7 \text{ мкм}$ ; 4 —  $\lambda > 0,7 \text{ мкм}$ ; 5 и 6 — расчет при  $\tau_{0,55} = 0,3$ ,  $Q_{\text{п}} = 21 \text{ кг/м}^2$  и альбедо, равном соответственно 0,1 и 0,8.

С увеличением высоты над уровнем моря поток рассеянной радиации уменьшается. Распределение энергии в спектре рассеянной радиации отличается от распределения энергии в спектре прямой радиации. Максимум энергии в спектре рассеянной радиации приходится на более короткие волны, примерно на 0,425—0,450 мкм. Колебания спектрального состава рассеянной радиации весьма значительны. Эти колебания вызваны изменением прозрачности атмосферы.

## 6 Суммарная радиация

Потоком суммарной радиации  $Q$  называется сумма потоков прямой ( $I'$ ) и рассеянной ( $i$ ) солнечной радиации, поступающих на горизонтальную поверхность. Путем решения приближенных уравнений переноса радиации К. Я. Кондратьев и др. получили следующую формулу для потока суммарной радиации при безоблачных условиях:

$$Q_0 = \frac{I_0 \sin h_{\odot}}{1 + \epsilon \tau \operatorname{cosec} h_{\odot}} \quad (6.1)$$

Здесь  $\tau$  — оптическая толщина для интегрального потока, которую, как показано О. А. Авасте, можно полагать равной  $\tau_{0,55}$  — оптической толщине для монохроматического потока с  $\lambda = 0,55$  мкм;  $\epsilon$  — множитель, принимающий при разных высотах Солнца следующие значения:

$h_{\odot}^{\circ}$ . . . . .	60	30	15
$\epsilon$ . . . . .	0,14	0,20	0,24

Погрешность расчета  $Q_0$  по формуле (6.1) при  $0,2 < \tau < 0,6$  меньше 5% (при сравнении с данными, полученными путем численного решения уравнений переноса).

Суммарная радиация, в отличие от прямой и рассеянной, очень слабо зависит от оптической толщины  $\tau$ : с увеличением  $\tau$  суммарная радиация медленно уменьшается.

Таблица 6.10. Поток суммарной радиации (кВт/м<sup>2</sup>) при безоблачном небе

c	$h_{\odot}^{\circ}$										
	7	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
0,91	0,05	0,08	0,15	0,23	0,31	0,38	0,53	0,69	0,80	0,90	0,95
0,67	0,06	0,10	0,18	0,26	0,34	0,41	0,58	0,73	0,84	0,95	0,98
0,54	0,07	0,12	0,20	0,28	0,36	0,44	0,60	0,75	0,87	0,98	1,03
0,43	0,08	0,13	0,22	0,30	0,38	0,48	0,65	0,79	0,91	1,02	1,07
0,34	0,08	0,14	0,22	0,31	0,41	0,50	0,68	0,82	0,96	1,06	1,11
0,27	0,10	0,15	0,24	0,34	0,44	0,54	0,70	0,86	0,98	1,10	1,14