

Глава 6 Ослабление солнечной радиации

1 Поглощение солнечной радиации в атмосфере Земли

Солнечная радиация, поступившая на верхнюю границу атмосферы Земли, прежде чем дойти до земной поверхности, претерпевает ряд существенных изменений. Часть ее рассеивается молекулами воздуха и содержащимися в атмосфере твердыми и жидкими примесями; частично солнечная радиация поглощается. Рассмотрим процесс поглощения солнечной радиации.

К основным газам, поглощающим солнечную радиацию, относятся водяной пар, озон, углекислый газ, а также кислород и ряд малых газовых примесей.

Солнечная радиация в результате поглощения преобразуется в другие виды энергии (главным образом в тепловую; в верхних слоях в процессе ионизации также в электрическую). Процесс поглощения солнечной радиации в атмосфере носит селективный характер. Коротко рассмотрим спектры поглощения основных газов.

Озон (O_3). Как показывают наблюдения, солнечная радиация, достигающая земной поверхности, резко обрывается на длине волны около 0,3 мкм. Однако Солнце, будучи близким по своим свойствам к абсолютно черному телу с эффективной температурой излучения около 6000 К, излучает радиацию и более коротких длин волн. Такое резкое ослабление потока солнечной радиации в области ультрафиолетового участка спектра объясняется поглощением радиации озоном.

Озон имеет большое количество полос поглощения по всему спектру. Наиболее сильная полоса (полоса Хартлея) приходится на интервал 0,22—0,29 мкм, в котором коэффициенты поглощения имеют весьма большие значения (максимум достигается при $\lambda = 0,2553$ мкм, где десятичный объемный коэффициент поглощения $k'_\lambda = 126,5$ см⁻¹). В другой полосе (0,31—0,36 мкм) поглощение озона значительно слабее: значения k'_λ не превышают 0,79 см⁻¹. В видимом участке спектра имеется достаточно широкая полоса поглощения озона (0,44—0,75 мкм), в максимуме которой значе-

ние $k'_\lambda = 0,0594 \text{ см}^{-1}$. Во всех трех полосах k'_λ увеличивается с ростом температуры.

В инфракрасной области на спектрограммах выделяются сильные полосы поглощения озона с центрами при 4,75, 9,6 и 14,1 мкм, из которых полоса 9,6 мкм самая сильная. Средние (для всей полосы) коэффициенты поглощения и инфракрасной области зависят от приведенной толщины слоя озона и атмосферного давления, в то время как в ультрафиолетовой и видимой областях такая зависимость не наблюдается.

Основные полосы поглощения молекулярного кислорода приходятся на далекую ультрафиолетовую область спектра (0,13—0,24 мкм).

Водяной пар (H_2O) и углекислый газ (CO_2). Эти газы имеют очень сложный спектр, полосы поглощения которого расположены как в видимой, так и в инфракрасной области. Основные полосы поглощения водяного пара приходятся на длины волн (центр полосы) 0,72, 0,84, 0,94, 1,14, 1,38, 1,87, 2,70 и 3,20 мкм а углекислого газа — на длины волн 1,44, 1,60, 2,02, 2,70 и 4,31 мкм.

К настоящему времени функция пропускания для водяного пара и углекислого газа достаточно детально изучена экспериментальным путем. В табл. 6.1 приведены опытные значения функции пропускания $P_\lambda(Q_\Pi)$ для некоторых полос поглощения при различных значениях содержания (массы) водяного пара Q_Π в столбе воздуха, через который проходят солнечные лучи. Видно, что наиболее сильно солнечная радиация поглощается в полосах, относящихся к близкой инфракрасной области. При обычно наблюдаемых значениях Q_Π (чаще всего от 1 до 20 кг/м²) при прохождении через всю атмосферу поток солнечной радиации ослабляется за счет поглощения на 5—10 %.

Таблица 6.1. Функция пропускания (%) водяным паром спектральных потоков радиации

Q_Π кг/м ²	Полоса поглощения, мкм							
	0,71—0,76	0,81—0,86	0,89—1,00	1,08—1,21	1,28—1,54	1,66—2,08	2,25—3,00	3,00—3,60
0,01	99,8	99,8	99,4	98,6	95,5	94,5	86,4	97,4
0,1	99,3	99,4	98,0	95,8	87,2	88,2	71,4	92,2
0,5	98,5	98,8	95,6	91,1	76,2	78,5	61,4	83,8
1,0	97,4	98,3	93,9	87,8	70,1	73,4	57,7	78,3
10	93,4	94,6	82,9	68,7	48,0	57,8	47,2	51,9
20	90,3	92,0	76,5	59,8	41,0	53,6	44,1	42,3
40	87,4	89,5	70,7	51,7	35,2	50,1	41,5	34,7
100	81,1	84,1	60,6	40,2	27,9	44,8	38,0	25,5

Ослабление общего (интегрального) потока солнечной радиации находится путем суммирования ослабления спектральных потоков в полосах поглощения. Анализ опытных данных показал,

что с удовлетворительной точностью (погрешность менее 1%) функция пропускания водяным паром интегрального потока солнечной радиации может быть аппроксимирована следующим экспоненциальным выражением:

$$P(Q_n) = \sum_{i=1}^3 b_i \exp(-\beta_i Q_n),$$

где $b_1 = 0,077$, $b_2 = 0,145$ и $b_3 = 0,778$; $\beta_1 = 5,83$, $\beta_2 = 0,145$ и $\beta_3 = 0,002$ (если Q_n — в кг/м^2). Нетрудно видеть, что наибольший вклад вносит третье слагаемое (поскольку велико b_3 и мало β_3).

Поскольку масса водяного пара больше, чем других поглощающих газов (CO_2 , O_3), на его долю приходится основная часть поглощенной радиации (во всем атмосферном столбе).

Т. В. Кириллова по измерениям на оз. Севан получила следующие значения функции пропускания солнечной радиации для слоев жидкой воды различной толщины h за май (P_V), июль (P_{VII}) и сентябрь (P_{IX}):

h	0,5	1	2	3	5	8	10	15	20
P_V	0,49	0,38	0,27	0,22	0,12	0,06	0,04	0,01	0,00
P_{VII}	0,48	0,43	0,34	0,28	0,19	0,12	0,09	0,05	0,03
P_{IX}	0,41	0,36	0,27	0,23	0,15	0,10	0,07	0,04	0,01

Из приведенных данных видно, что уже слой воды толщиной 0,5 м поглощает поток солнечной радиации более чем наполовину, а слой толщиной 10 м — на 90—95%.

Сведения о пропускании и поглощении солнечной радиации облаками приведены в п. 7. Отметим, что солнечную, равно как и длинноволновую (земную) радиацию совершенно не поглощает основной (по массе) газ атмосферы — азот.

Солнечную радиацию поглощают атмосферные примеси (пыль). На основе спектральных измерений (в диапазоне длин волн 0,4—2,4 мкм), выполненных К. Я. Кондратьевым и его сотрудниками над пустыней, установлено, что в слое атмосферы 0,3—8,4 км водяной пар и углекислый газ поглощают $0,052 \text{ кВт/м}^2$ (3,8% солнечной постоянной), атмосферные примеси (аэрозоль) — $0,066 \text{ кВт/м}^2$ (4,8% солнечной постоянной). По данным актинометрических измерений (в интервале длин волн 0,3—3,0 мкм), в том же слое общее поглощение солнечной радиации составляет $(0,150 \pm 0,014) \text{ кВт/м}^2$.

При сильном замутнении атмосферы (особенно в городах) поглощение солнечной радиации твердыми примесями может быть значительным. Так, согласно измерениям, выполненным на самолете, в нижнем слое (до 3—5 км) общее поглощение солнечной радиации чаще всего в 1,5—2 раза превышает теоретически определенное значение поглощения водяным паром. В отдельных

случаях в нижнем километровом слое коэффициенты поглощения увеличивались (в безоблачной атмосфере) в 15 раз. Такое резкое увеличение замутненности атмосферы чаще всего связано с лесными и торфяными пожарами.

2 Рассеяние солнечной радиации в атмосфере

Атмосфера по отношению к потокам солнечной радиации представляет собой мутную среду. Понятие мутности связано с наличием прежде всего в атмосфере различного рода примесей — взвешенных в воздухе твердых или жидких частиц самых различных размеров. Примеси частично поглощают проходящую через атмосферу солнечную радиацию, а также вследствие дифракции частично рассеивают ее. Однако и при отсутствии примесей атмосфера является мутной средой, рассеивающей радиацию. При этом в качестве элементов мутности выступают молекулярные комплексы, изменение числа молекул и расстояний между ними в которых приводит к колебаниям плотности.

Рассеяние на молекулярных комплексах называют обычно *молекулярным*, или рэлеевским, по имени ученого, впервые установившего законы этого явления. Рассеяние на частицах примесей называют *аэрозольным*. Сущность рассеяния заключается в особой форме взаимодействия переменного поля падающей электромагнитной волны с частицей, находящейся в некоторой среде. Благодаря такому взаимодействию частица становится источником новых электромагнитных волн — *рассеянной радиации*.

Задача о рассеянии радиации в общем виде сводится к решению системы уравнений Максвелла с заданными граничными условиями. Из анализа уравнений Максвелла следует, что падающий поток радиации определенной длины волны создает поток рассеянной радиации с той же длиной волны.

Большое влияние на вид решения оказывают геометрическая структура мутной среды и ее физические свойства.

Геометрическая структура среды может быть охарактеризована в основном безразмерными параметрами r/λ и l/λ , где r — радиус частицы, l — расстояние между частицами и λ — длина волны падающей радиации. Законы рассеяния оказываются существенно различными для случаев, когда $r \ll \lambda$, и для частицы, размер которой соизмерим или значительно больше длины волны падающей радиации ($r \geq \lambda$).

Если $l/\lambda \gg 1$, то частицы можно рассматривать как независимые излучатели. Поскольку расположение частиц обычно хаотично, то явления интерференции наблюдаться не будет и складываться будут не поля отдельных частиц, а лишь интенсивности рассеянного излучения. Это упрощает решение задачи так назы-