

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

УДК 551.521:551.576

Г. А. Титов, Т. Б. Журавлева

СПЕКТРАЛЬНОЕ И ИНТЕГРАЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Исследуется среднее спектральное и интегральное поглощение солнечной радиации в разорванной облачности. Показано, что эффекты, обусловленные случайной геометрией облачного поля, оказывают сильное влияние на спектральное поглощение в облаках. Воздействие этих эффектов на интегральное поглощение не столь значительно, однако оно усиливается по мере возрастания коэффициента ослабления облаков, альбедо подстилающей поверхности, а также при средних значениях балла облачности. Это необходимо учитывать при разработке радиационных блоков моделей общей циркуляции атмосферы.

Известно, что плоскопараллельная модель неудовлетворительно описывает перенос излучения через разорванную облачность, поэтому радиационные блоки моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) должны быть улучшены. Однако, прежде чем вносить те или иные изменения в эти блоки МОЦА, необходимо исследовать зависимость радиационных характеристик от эффектов, обусловленных стохастической геометрией облачного поля. Такие исследования, относящиеся к средним потокам нисходящей и восходящей солнечной радиации в видимой и ближней ИК-области спектра, выполнены в [1–4].

В данной статье исследуется среднее спектральное и интегральное поглощение солнечной радиации разорванной облачностью (в дальнейшем для удобства термин «среднее» употреблять не будем). Для того чтобы оценить потенциальный эффект стохастической геометрии, сравним поглощение кучевыми ($0,5 \leq \gamma \leq 2$) и эквивалентными слоистыми ($\gamma \ll 1$) облаками. Здесь параметр $\gamma = H/D$; H – толщина облачного слоя; D – характерный горизонтальный размер облаков. Эквивалентные слоистые облака отличаются от кучевых *только* параметром γ , а все остальные параметры у них одинаковы. При вычислении спектрального поглощения $A(\lambda)$ слоистых облаков, частично покрывающих небосвод, можно использовать формулу

$$A(\lambda) = N A_{lay}(\lambda) + (1 - N) A_{cle}(\lambda),$$

где N – балл облачности; $A_{cle}(\lambda)$ и $A_{lay}(\lambda)$ – спектральное поглощение для случаев ясного неба и плоскопараллельного облака соответственно. Очевидно, что интегральное поглощение рассчитывается по аналогичной формуле.

Модель атмосферы и методы расчета спектральных потоков в ближней ИК-области спектра детально описаны в [1–5]. Напомним, что мы рассматриваем атмосферу в интервале высот 0–16 км, облака расположены в слое 1–1,5 км; учитывается поглощение водяным паром и углекислым газом. Предполагается, что на верхнюю границу атмосферы в направлении $\overline{\omega}_{\oplus} = (\xi_{\oplus}, \varphi_{\oplus})$ падает единичный поток солнечного излучения ($\xi_{\oplus}, \varphi_{\oplus}$ – зенитный и азимутальный углы Солнца). При переходе к абсолютным единицам значения спектрального поглощения необходимо умножить на $\pi S_{\lambda} \cos \xi_{\oplus}$, где πS_{λ} – спектральная солнечная постоянная.

Оптическая толщина атмосферного аэрозоля значительно меньше оптической толщины облаков, поэтому различие между поглощением кучевыми и слоистыми облаками будет определяться главным образом эффектами многократного рассеяния в облаках, в связи с чем ограничимся обсуждением поглощения облачным слоем. Из-за малой оптической толщины можно пренебречь рассеянием в надоблачной атмосфере и, следовательно, зависимостью солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу облачного слоя, от типа облаков.

Спектральное поглощение

Известно, что поглощение облачными частицами (каплями воды) увеличивается при возрастании доли диффузной радиации и средней кратности рассеяния, а также при уменьшении альбеда однократного рассеяния w_λ . Из приведенного выше определения эквивалентных слоистых облаков следует, что только первые два фактора зависят от типа облаков. При фиксированных давлении, температуре и концентрации поглощение атмосферными газами определяется средней длиной пробега фотонов в облаках. Обсудим результаты расчетов для случая, когда альбеда подстилающей поверхности (ПП) A_s равно нулю, что приблизительно соответствует альбеда океана.

В связи с тем что излучение может выходить через боковые стороны кучевых облаков, средняя кратность рассеяния и средняя длина пробега фотонов в кучевых облаках меньше, чем в слоистых. Если Солнце находится в зените, то доля диффузной радиации одинакова, поэтому поглощение в слоистых облаках $A_{Sl}(\lambda)$ превосходит поглощение в кучевых $A_{Cu}(\lambda)$ (рис. 1).

Доля диффузной радиации в слоистых облаках очень слабо зависит от ξ_\oplus , исключая $\xi_\oplus > 80^\circ$, тогда как в кучевых облаках она существенно возрастает при увеличении ξ_\oplus . Этот эффект обуславливает возрастание поглощения в кучевых облаках и может компенсировать эффект, связанный с уменьшением средней кратности рассеяния и средней длины пробега фотонов. Таким образом, имеется два противоположных эффекта, и знак их суммарного воздействия можно приблизительно оценить, если представить спектральное поглощение в виде ряда по кратностям рассеяния.

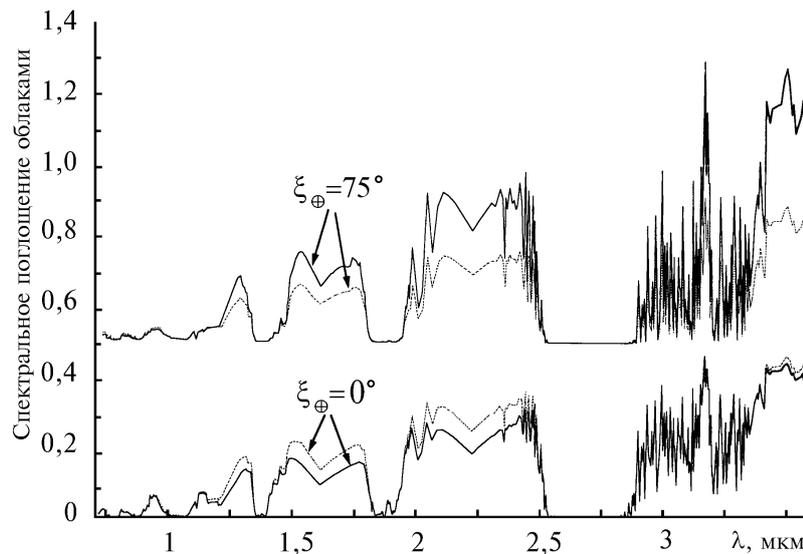


Рис. 1. Зависимость спектрального поглощения в кучевых (сплошные линии) и слоистых (точечные линии) облаках от зенитного угла Солнца при $N = 0,5$, $\sigma_{0,71 \text{ мкм}} = 30 \text{ км}^{-1}$, $D = 0,25 \text{ км}$, $A_s = 0,0$. Для получения значений поглощения в облаках при $\xi_\oplus = 75^\circ$ необходимо вычесть 0,5 из приведенных на графике значений

Очевидно, что n -й член ряда пропорционален $w_1^{n-1}(1 - w_\lambda)$. Если альбеда однократного рассеяния близко к единице, то высокие кратности рассеяния будут давать заметный вклад в спектральное поглощение. В кучевых облаках вклад в поглощение низких кратностей рассеяния выше, чем в слоистых, для высоких кратностей рассеяния справедливо обратное. В спектральной области $\lambda \leq 1,2 \text{ мкм}$ капли воды слабо поглощают ($w_\lambda \geq 0,999$). При таких значениях w_λ возрастание доли диффузной радиации может не компенсировать эффект уменьшения средней кратности рассеяния и средней длины пробега фотонов, поэтому даже при больших зенитных углах Солнца спектральное поглощение в кучевых облаках меньше, чем в слоистых (рис. 1). Обратное справедливо при $\lambda \geq 1,2 \text{ мкм}$, когда капли воды сильно поглощают ($0,485 \leq w_\lambda \leq 0,999$).

Обсудим зависимость спектрального поглощения от зенитного угла Солнца для каждого типа облаков. Для этого результаты, приведенные на рис. 1, представим в другом виде (рис. 2).

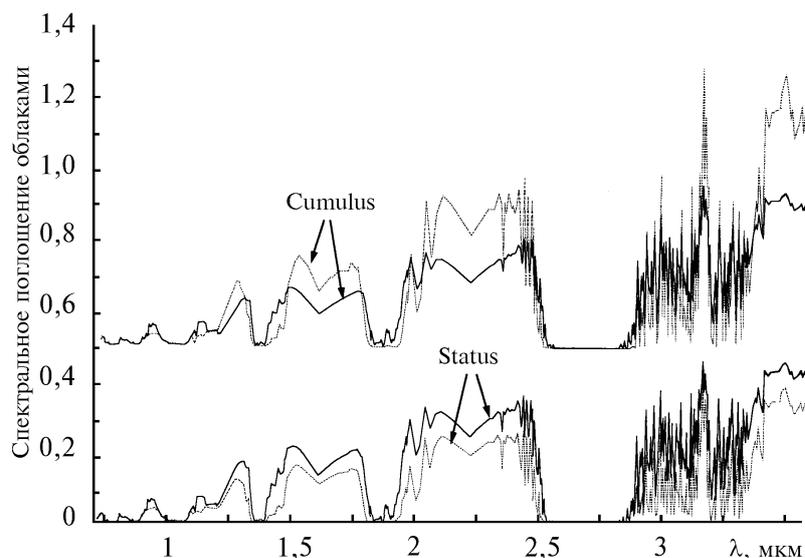


Рис. 2. Спектральное поглощение облаками при тех же параметрах, что и на рис. 1: сплошные линии – $\xi_{\odot} = 0^\circ$, точечные линии – $\xi_{\odot} = 75^\circ$. Для получения значений поглощения в кучевых облаках необходимо вычесть 0,5 из приведенных на графике значений

За счет поглощения атмосферными газами и ослабления аэрозолем приходящая на верхнюю границу облаков солнечная радиация убывает при увеличении ξ_{\odot} . Кроме того, альbedo облаков возрастает, а средняя кратность рассеяния и средняя длина пробега фотонов отраженной радиации уменьшаются. По этим причинам поглощение слоистыми облаками убывает при возрастании ξ_{\odot} .

Более сложная картина наблюдается для кучевых облаков. При умеренном поглощении атмосферными газами увеличение доли диффузной радиации доминирует над перечисленными выше эффектами и поглощение кучевыми облаками увеличивается. Противоположная зависимость имеет место при сильном поглощении.

Предположим, что ПП отражает по закону Ламберта и имеет альbedo $A_s > 0$. Эту поверхность можно рассматривать как диффузный источник, мощность которого пропорциональна $A_s Q(\lambda)$, где $Q(\lambda)$ – спектральное пропускание на уровне ПП. Очевидно, что заметное влияние отраженной от ПП радиации на спектральное поглощение облаками будет наблюдаться лишь при слабом и умеренном поглощении каплями воды и атмосферными газами, а также при тех параметрах задачи, при которых величина $A_s Q(\lambda)$ достаточно велика. Отраженная от ПП радиация может взаимодействовать с боковыми сторонами большого числа кучевых облаков, т.е. может рассеиваться и поглощаться. Это означает, что в кучевых облаках доля радиации, прошедшей в просветах (дырах) между облаками, будет значительно меньше, чем в слоистых. Поэтому кучевые облака поглощают больше радиации, отраженной от ПП, чем слоистые.

Сказанное выше подтверждают результаты расчетов спектрального поглощения, приведенные на рис. 3. Если Солнце находится в зените и $A_s = 0,8$ (альbedo снежного покрова), то в спектральном интервале $\lambda \geq 1,2$ мкм поглощение в кучевых облаках больше, чем в слоистых, в отличие от ситуации при $A_s = 0,0$ (см. рис. 1). Помимо упомянутой выше причины, приращение поглощения кучевыми облаками достаточно велико еще и потому, что пропускание $Q(\lambda)$ кучевыми облаками больше, чем слоистыми.

Для больших зенитных углов Солнца ($\xi_{\odot} = 75^\circ$) неравенство $A_{Cu}(\lambda) \geq A_{Sl}(\lambda)$, которое наблюдалось при $A_s = 0,0$ (см. рис. 1), сохраняется и при $A_s = 0,8$. С возрастанием альbedo ПП величина поглощения в кучевых облаках увеличивается незначительно. Это обусловлено тем, что доля нерассеянного излучения и, следовательно, пропускание $Q(\lambda)$ с возрастанием ξ_{\odot} уменьшаются. В связи с этим уменьшается мощность диффузного источника, которым явля-

ется ПП, и в отличие от случая $\xi_{\oplus} = 0^{\circ}$ приращение поглощения кучевыми облаками не столь велико. При наличии слоистой облачности, частично покрывающей небосвод, излучение, отраженное от ПП, распространяется в просветах между облаками и не вносит существенных изменений в спектральное поглощение $A_S(\lambda)$ при вариациях A_S .

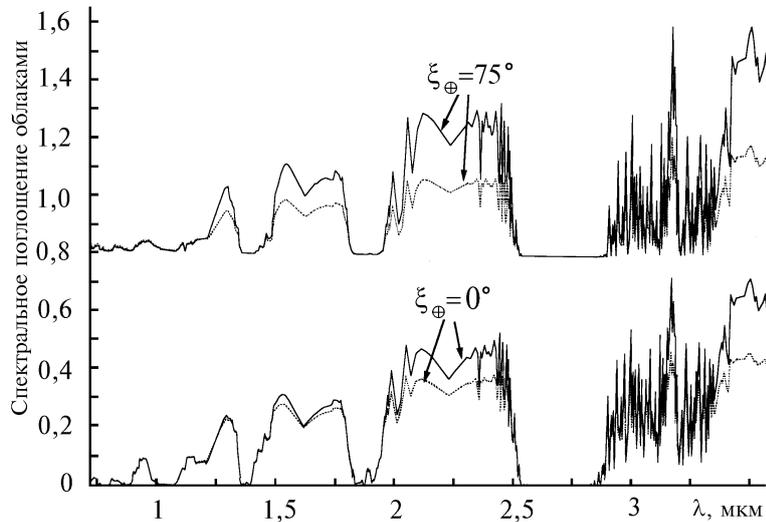


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но при $A_S = 0,8$. Для получения значений поглощения в облаках при $\xi_{\oplus} = 75^{\circ}$ необходимо вычесть 0,8 из приведенных на графике значений

При моделировании образования и динамики облачных систем необходимо учитывать особенности термического режима в пределах облачного слоя. Одной из наиболее часто используемых характеристик термического режима в облаках является скорость радиационного изменения температуры $\frac{\partial T}{\partial t}$ за счет поглощения коротковолновой радиации. С этой точки зрения представляют интерес особенности распределения поглощенной солнечной радиации по вертикали внутри облачного слоя.

Разобьем облачный слой на M слоев плоскостями $z_i = \text{const}$, $i = 1, \dots, M, M + 1$, где z_1, z_{M+1} совпадают с нижней и верхней границей облачного слоя. Пусть $A(\lambda, z_i, z_{i+1})$ обозначает среднее поглощение в слое (z_i, z_{i+1}) . Тогда среднее поглощение $A(\lambda, z_1, z_{M+1})$ облачным слоем определяется выражением

$$A(\lambda, z_1, z_{M+1}) = \sum_{i=1}^M A(\lambda, z_i, z_{i+1}).$$

Для описания вертикального распределения поглощенного излучения в пределах облачного слоя используются различные характеристики (см., например, [6–8]). Рассмотрим подробно плотность вероятности распределения поглощения внутри слоя $p_i(\lambda, z)$, которая рассчитывается по формуле

$$p_i(\lambda, z) = A(\lambda, z_i, z_{i+1}) / [A(\lambda, z_1, z_{M+1}) (z_{i+1} - z_i)],$$

и величину $P_i(\lambda, z)$, которая характеризует вклад i -го слоя в поглощение всем облаком и определяется выражением

$$P_i(\lambda, z) = 100\% \cdot A(\lambda, z_i, z_{i+1}) / [A(\lambda, z_1, z_{M+1})].$$

Аналогичные характеристики рассматриваются, например, в [6].

В приведенных расчетах использовалось разбиение облаков на слои переменной толщины: 0,05 км для интервала высот 1,0–1,2 км и 0,02 км для 1,2–1,5 км.

На рис. 4 показаны плотности вероятности распределения поглощенного солнечного излучения для двух длин волн: $\lambda = 1,426$ мкм, для которой характерно умеренное поглощение

облачными каплями ($w_\lambda = 0,967$) и атмосферными газами (рис. 4,а), и $\lambda = 2,224$ мкм, которая характеризуется умеренным поглощением облачными частицами ($w_\lambda = 0,973$) и слабым поглощением атмосферными газами (рис. 4,б). При $A_s = 0,0$ качественный характер изменения $p_i(\lambda, z)$ по высоте слабо зависит от длины волны и имеет следующие особенности: 1) в верхней части облачного слоя ($z \approx z_1 + 0,9H$) наблюдается максимум плотности распределения поглощения; 2) вблизи верхней границы облаков ($z_1 + 0,8H \leq z \leq z_1 + H$) процесс поглощения более интенсивно идет в кучевых облаках, чем в слоистых: $p_{i,Cu}(\lambda, z) \geq p_{i,St}(\lambda, z)$.

При возрастании альбедо ПП и слабом поглощении атмосферными газами ($\lambda = 2,224$ мкм) вертикальные профили $p_i(\lambda, z)$ в кучевых и слоистых облаках качественно отличаются. Так, при $\xi_\oplus = 0^\circ$ пропускание на уровне ПП достаточно велико, поэтому отраженная радиация может давать существенный вклад в поглощение облаками. Это является причиной появления второго максимума $p_i(\lambda, z)$ вблизи нижней границы кучевой облачности. С увеличением поглощения атмосферными газами ($\lambda = 1,426$ мкм) значение $Q(\lambda)$ резко уменьшается, и, следовательно, значительного приращения поглощения за счет отраженного от ПП излучения не происходит. При умеренном и сильном поглощении газами плотность вероятности распределения поглощения солнечной радиации как в слоистых, так и в кучевых облаках изменяется незначительно по сравнению со случаем $A_s = 0,0$.

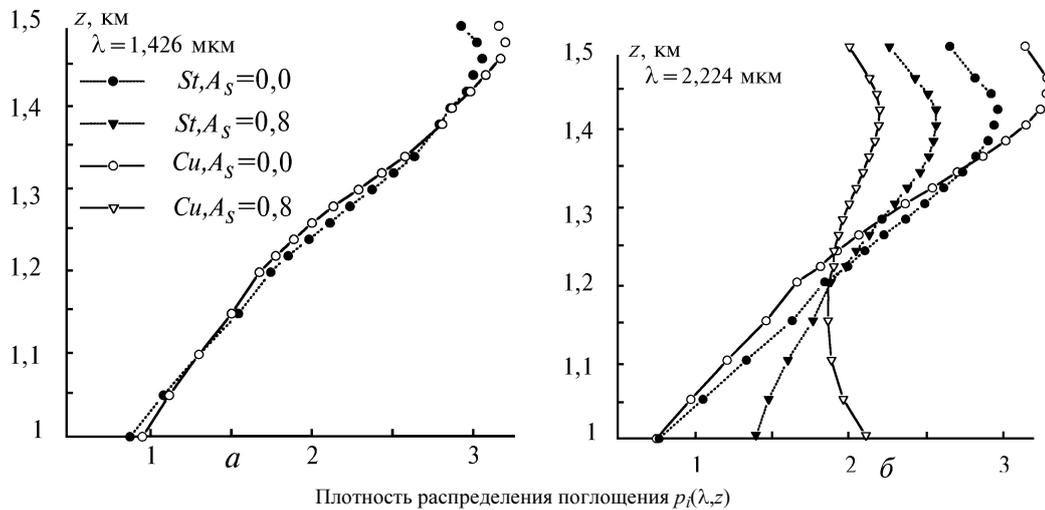


Рис. 4. Плотность распределения поглощенной солнечной радиации по высоте $p_i(\lambda, z)$ внутри облачного слоя для длин волн $\lambda = 1,426$ мкм (а) и $\lambda = 2,224$ мкм (б) и $N = 0,5$, $\sigma_{0,71 \text{ мкм}} = 30 \text{ км}^{-1}$, $D = 0,25 \text{ км}$, $\xi_\oplus = 0^\circ$

Вертикальное распределение $P_i(\lambda, z)$ (%) при $\sigma_{\lambda=0,71 \text{ мкм}} = 30 \text{ км}^{-1}$, $N = 0,5$, $D = 0,25 \text{ км}$, $\xi_\oplus = 0^\circ$

Слой, км	$\lambda = 1,426 \text{ мкм}$				$\lambda = 2,224 \text{ мкм}$			
	$A_s = 0,0$		$A_s = 0,8$		$A_s = 0,0$		$A_s = 0,8$	
	<i>Cu</i>	<i>St</i>	<i>Cu</i>	<i>St</i>	<i>Cu</i>	<i>St</i>	<i>Cu</i>	<i>St</i>
1,48–1,5	6,29	5,85	5,67	5,63	6,25	5,26	3,99	4,51
1,46–1,48	6,36	6,03	5,77	5,8	6,52	5,61	4,24	4,83
1,44–1,46	6,3	6,11	5,73	5,87	6,52	5,79	4,35	5,01
1,42–1,44	6,13	5,97	5,6	5,79	6,41	5,87	4,38	5,11
1,4–1,42	5,96	5,89	5,47	5,72	6,25	5,85	4,35	5,12
1,4–1,5	31,04	29,85	28,24	28,81	31,96	28,38	21,31	24,58
1,3–1,4	25,73	26,19	24,13	25,6	26,83	27,04	20,8	24,29
1,2–1,3	18,96	19,87	18,86	19,82	19,25	20,99	19,04	20,4
1,1–1,2	13,97	14,19	15,29	14,78	13,21	14,72	18,62	16,72
1,0–1,1	10,3	9,9	13,48	10,99	8,87	8,99	20,23	14,01

В таблице приведено распределение по вертикали величины $P_i(\lambda, z)$. Если $A_s = 0,0$, то и при слабом, и при умеренном поглощении атмосферными газами вклад в поглощение различных (по высоте) участков облачности $P_i(\lambda, z)$ слабо зависит от типа облаков: в верхней части облачного слоя поглощается ~ 30 , а в нижней $\sim 10\%$ солнечной радиации. С возрастанием

альбедо ПП в случае умеренного поглощения атмосферными газами значения $P_i(\lambda, z)$ меняются достаточно слабо, тогда как при слабом поглощении вертикальный профиль $P_i(\lambda, z)$ существенно зависит от типа облаков. Так, в кучевой облачности вклад в поглощение верхней и нижней части облачного слоя уравнивается и составляет $\approx 20\%$. В слоистых облаках наибольший вклад в поглощение дает по-прежнему верхняя часть облачного слоя, однако разница значений $P_i(\lambda, z)$ вблизи верхней и нижней границы уменьшается до 10% .

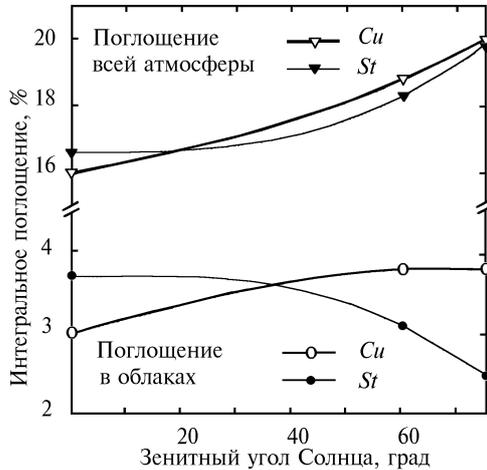


Рис. 5. Влияние зенитного угла Солнца на интегральное поглощение при $N = 0,5$, $\sigma_{0,71 \text{ мкм}} = 30 \text{ км}^{-1}$, $D = 0,25 \text{ км}$, $A_s = 0,0$

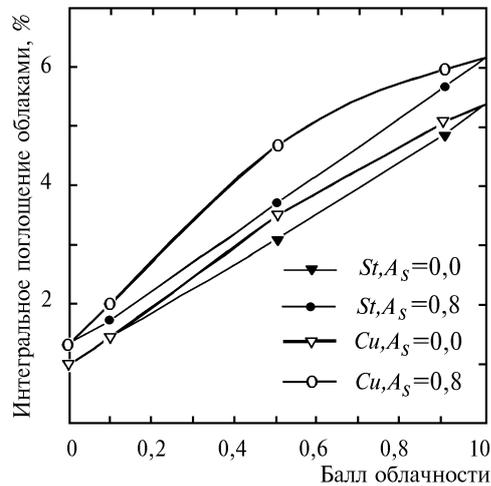


Рис. 6. Зависимость интегрального поглощения в облаках от балла облачности при $\sigma_{0,71 \text{ мкм}} = 30 \text{ км}^{-1}$, $D = 1,0 \text{ км}$, $\xi_{\oplus} = 60^\circ$

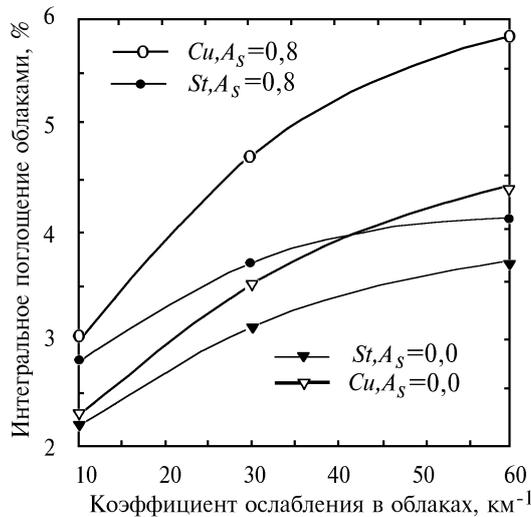


Рис. 7. Интегральное поглощение в облаках при $N = 0,5$; $D = 1,0 \text{ км}$, $\xi_{\oplus} = 60^\circ$ и различных значениях коэффициента ослабления в облаках

Интегральное поглощение

Под интегральным поглощением будем понимать величину

$$A = 100\% \cdot \int_{0,7 \text{ мкм}}^{3,6 \text{ мкм}} \pi S_{\lambda} A(\lambda) \cos \xi_{\oplus} d\lambda / (\pi S \cos \xi_{\oplus}),$$

где $\pi S = 1353 \text{ Вт/м}^2$ — интегральная солнечная постоянная. Очевидно, что наиболее существенный вклад в интегральное поглощение дают те спектральные интервалы, где $A(\lambda)$ и πS_{λ} доста-

точно велики. Зависимость спектрального поглощения от параметров задачи полностью определяет вариации интегрального поглощения, поэтому в некоторых очевидных случаях мы не будем давать пояснения. Напомним, что на спектральный интервал 0,7–1,2 мкм приходится $\approx 30\%$ потока солнечной радиации, падающей на верхнюю границу атмосферы; доля интервалов 1,2–2 и 2–4 мкм составляет ≈ 15 и 5% соответственно [9].

С увеличением зенитного угла Солнца интегральное поглощение облаками A_{cloud} уменьшается в слоистых и слабо возрастает в кучевых облаках (рис. 5). Последнее обусловлено тем, что спектральное поглощение кучевыми облаками $A_{Cu}(\lambda)$ может как возрастать, так и убывать с ростом ξ_{\oplus} (см. рис. 2). Это означает, что A_{cloud} является суммой двух слагаемых, зависимость которых от ξ_{\oplus} противоположна.

Слагаемое, которое уменьшается при возрастании зенитного угла Солнца, формируется в пределах спектральных интервалов, сосредоточенных в основном на участке $\lambda \leq 2,25$ мкм, где πS_{λ} принимает сравнительно большие значения. Поэтому величина рассматриваемого слагаемого достаточно велика, и, следовательно, при возрастании зенитного угла Солнца увеличение A_{cloud} мало. В то же время увеличение зенитного угла Солнца обуславливает значительное возрастание интегрального поглощения надоблачной атмосферой и интегральное поглощение всей атмосферы возрастает как при кучевых, так и при слоистых облаках (рис. 5).

Эффекты, связанные с конечными горизонтальными размерами кучевых облаков, являются причиной нелинейной (в отличие от слоистых) зависимости интегрального поглощения балла облачности N (рис. 6). Максимальное различие между интегральным поглощением в кучевых и слоистых облаках наблюдается при средних баллах облачности и увеличивается с ростом альбедо ПП.

С увеличением оптической толщины облаков относительная роль боковых сторон и радиационного взаимодействия облаков усиливается. Это приводит к тому, что по мере возрастания коэффициента ослабления облаков σ (при фиксированной геометрической толщине облачного слоя) различие между поглощением в кучевых и поглощением в слоистых облаках увеличивается (рис. 7).

Заключение

Приведенные выше результаты исследований свидетельствуют о том, что эффекты, обусловленные случайной геометрией облачных полей, существенно влияют на спектральное поглощение солнечной радиации в облаках. Воздействие этих эффектов на интегральное поглощение не так значительно, однако оно усиливается с увеличением коэффициента ослабления облаков, альбедо ПП, а также при средних значениях балла облачности. Из этого следует, что в радиационные блоки МОЦА должны быть внесены соответствующие изменения.

В настоящее время имеется достаточно большой массив результатов расчетов спектральных и интегральных потоков восходящей и нисходящей солнечной радиации, а также поглощения. Эти данные можно рассматривать как некоторую численную радиационную модель разорванной облачности. Однако такого рода модель не может быть непосредственно включена в ныне существующие радиационные блоки МОЦА в связи с очень большими затратами компьютерного времени, необходимого для расчета радиационных характеристик облаков, которые являются функцией многих параметров.

Для улучшения радиационных блоков МОЦА необходимо разработать простые методы расчета лучистых потоков в разорванной облачности, которые должны быть достаточно эффективными с точки зрения затрат компьютерного времени и адекватно учитывать влияние эффектов, обусловленных стохастической геометрией облачных полей. Точность и границы применимости этих методов можно оценить, используя созданную численную радиационную модель разорванной облачности.

Данная работа частично финансирована DOE's ARM Program по контракту No. 350114-A-Q1 и Российским фондом фундаментальных исследований (грант N 95-05-14161).

1. Titov G. A. // J. Atm. Sci. 1990. V. 47. N 1. P. 24–38.
2. Zuev V. E., Titov G. A., Zhuravleva T. B., and Popov S. Yu. // Proceedings of the Fourth ARM Science Team Meeting, Charleston, South Carolina. 1994. P. 383–385.

3. Zuev V.E., Titov G.A., Zhuravleva T.B., and Popov S.Yu. // Proceedings of the Fourth ARM Science Team Meeting, Charleston, South Carolina. 1994. P. 386—393.
4. Zuev V.E., Titov G.A. // J.Atm.Sci. 1995. V 51. N 2. P. 176–190.
5. Titov G.A., Zhuravleva T.B., and Zuev V.E. // Submitted to JGR. 1995.
6. Радиация в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
7. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
8. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 512 с.
9. Прецизионные радиационные измерения в метеорологии / Под ред. К.Я. Кондратьева, Л.Б. Красильщикова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 271 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
18 апреля 1995 г.

G. A. Titov, T. B. Zhuravleva. Spectral and Integrated Absorption of Solar Radiation by Broken Cloudiness.

In the paper we investigate the mean spectral and integrated absorption of solar radiation by broken cloudiness. It is shown that the effects caused by the random geometry of cloud field have strong influence on the spectral absorption in clouds. The effects are less important for integrated absorption, while becoming stronger with increasing cloud extinction coefficient, underlying surface albedo, and also at intermediate cloud fractions. This must be kept in mind in developing radiation codes of general circulation models.