

## РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 531.521

Т.Б. Журавлева

**ВЛИЯНИЕ ОБЛАКОВ НА ПОГЛОЩЕНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ В АТМОСФЕРЕ.  
ЧАСТЬ 1. ПОГЛОЩЕНИЕ В УСЛОВИЯХ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ**

Исследуется влияние эффектов, обусловленных случайной геометрией облаков, на среднее поглощение коротковолновой радиации в облачном слое и в атмосфере в целом. Показано, что спектральное поглощение в разорванной облачности существенно зависит как от типа облаков (кучевые или слоистые), так и от положения облачного слоя в пространстве. Интегральное поглощение в оптически плотных кучевых облаках является немонотонной функцией зенитного угла Солнца  $\xi_{\odot}$ , тогда как поглощение в слоистых облаках убывает с увеличением  $\xi_{\odot}$ . Максимальные отличия между поглощением в кучевой и слоистой облачности имеют место при  $\xi_{\odot} \geq 60^{\circ}$  и в оптически плотных облаках достигают  $\approx 4\%$ . Интегральное поглощение в атмосфере  $A_{atm}$  зависит от положения верхней границы облаков и слабо связано с геометрической толщиной облачного слоя. Вариации поглощения  $A_{atm}$ , обусловленные типом облачности, не превышают, как правило, 1% и увеличиваются до 2–3% при средних баллах облачности для оптически плотных облаков нижнего яруса ( $\xi_{\odot} \approx 60^{\circ}$ ) и оптически тонких облаков среднего яруса ( $\xi_{\odot} \geq 75^{\circ}$ ).

**1. Введение**

Коротковолновая радиация, поглощенная в атмосфере и преобразованная в другие виды энергии, является одним из основных факторов, определяющих динамические процессы в системе «атмосфера – подстилающая поверхность». Поскольку эта величина сравнительно невелика (так, в тропиках она составляет в среднем  $\approx 50\text{--}60 \text{ Вт/м}^2$ , т.е.  $\approx 20\%$  всей коротковолновой радиации, поглощенной климатической системой [1]), то даже небольшие ее вариации могут привести к существенным изменениям в механизме циркуляции атмосферы и океана. Поэтому для улучшения параметризаций физических процессов, разрабатываемых для моделей ОЦА, поглощение солнечной радиации должно быть определено как можно точнее.

Поглощение в слое  $(z_1, z_2)$ ,  $z_1 \leq z_2$ , равно

$$A(z_1, z_2) = F(z_2) - F(z_1),$$

где  $F(z)$  – полный поток на высоте  $z$ ,

$$F(z) = F^{\downarrow}(z) - F^{\uparrow}(z),$$

а  $F^{\downarrow}$  и  $F^{\uparrow}$  – потоки нисходящей и восходящей радиации. Проблема состоит в том, что при наличии облаков экспериментально определенные значения поглощения часто превышают результаты модельных расчетов («аномальное поглощение в облаках») [1].

Сегодняшний уровень наших представлений о фундаментальных законах взаимодействия облачности и радиации, к сожалению, не позволяет нам дать ответ на вопрос: действительно ли в атмосфере существует реальный неизвестный поглотитель или проблема состоит в ошибках, допускаемых при ра-

диационных измерениях, и (или) погрешностях в определении входных параметров радиационных моделей, равно как и в несовершенстве последних? Тем не менее некоторые из возможных причин «аномального поглощения в облаках» сформулированы и исследованы: их список (далеко не полный) мы приводим ниже; здесь же приведены ссылки на работы, в которых обсуждается данный аспект проблемы (заметим, что выводы, сделанные разными группами исследователей при анализе одной и той же причины, могут сильно отличаться).

Возможные причины «аномального поглощения в облаках»:

- ошибки радиационных измерений [2];
- эффект больших размеров облачных частиц [3, 4];
- недостаточный учет в модельных расчетах информации об атмосферном аэрозоле [2, 4];
- влияние поглощающего аэрозоля в облаках [1, 5];
- несовершенство параметризаций водяного пара, используемых в радиационных моделях [1, 6];
- неучет в радиационных блоках МОЦА горизонтальной неоднородности реальных облачных полей, обусловленной как флуктуациями водности, спектра размера частиц, фазового состава и т.д., так и стохастической геометрией облаков.

В 1981 г. авторы [7] предложили усовершенствовать методику обработки экспериментальных данных, которая позволила получить достаточно хорошее соответствие между данными экспериментов и результатами расчетов [8, 9]. Улучшение оценки поглощения стало возможным за счет учета горизонтального переноса радиации, обусловленного флуктуациями оптических параметров облачности. Влия-

ние горизонтального переноса на точность восстановления поглощения для неоднородных слоисто-кучевых облаков на основе математического моделирования исследовано в [10, 11].

Цель данной работы заключается в оценке влияния эффектов, обусловленных случайной геометрией облаков, на среднее поглощение коротковолновой радиации в атмосфере. Для этого сравним расчеты в кучевых и эквивалентных слоистых облаках, которые отличаются значением единственного параметра  $\gamma = H/D$ , где  $H$  – высота, а  $D$  – средний горизонтальный размер облаков: для кучевой облачности характерно значение  $0,5 \leq \gamma \leq 2$ , тогда как в слоистых облаках  $\gamma \ll 1$ . Для вычисления поглощения в слоистых облаках  $A_{Sl}$  использована формула

$$A_{Sl} = N A_{pp} + (1 - N) A_{clr},$$

где  $N$  – балл облачности;  $A_{pp}$  и  $A_{clr}$  – поглощение в условиях сплошной облачности и ясного неба соответственно.

Модель атмосферы детально описана в работах [12, 13]. Напомним, что верхняя граница атмосферы в этой модели принята равной  $H_{am}^f = 16$  км; учитывается поглощение водяным паром и углекислым газом. Методы расчета спектральных потоков в ближней ИК-области спектра представлены в [12].

В наших более ранних работах [14, 15] исследовано среднее спектральное и интегральное поглощение солнечной радиации для облаков нижнего яруса (нижняя граница облаков  $H_{cl}^b = 1$  км, верхняя граница  $H_{cl}^f = 1,5$  км), однако эти результаты были получены на основе достаточно ограниченного набора входных параметров задачи. В настоящее время мы располагаем результатами расчетов средних спектральных и интегральных потоков восходящего и нисходящего излучения для 12 атмосферных уровней и 280 различных наборов значений входных параметров задачи. Последние варьировались в следующих пределах:

- оптическая толщина облаков  $5 \leq \tau \leq 60$ ;
- балл облачности  $0 \leq N \leq 1$ ;
- параметр  $0 \leq \gamma \leq 2$ ;
- зенитный угол Солнца  $0^\circ \leq \xi_\odot \leq 75^\circ$ ;
- альbedo подстилающей поверхности изменялось от  $A_s = 0,0$  (океан) до  $A_s = 0,8$  (свежевыпавший снег).

Анализ этого – более широкого – множества результатов позволяет подробнее описать особенности формирования поглощения коротковолновой радиации в условиях разорванной облачности.

Аналогичные расчеты спектральных и интегральных потоков излучения выполнены также для облаков среднего яруса:  $H_{cl}^b = 5,5$  км,  $H_{cl}^f = 7$  км (выбранное нами значение верхней границы облачности  $H_{cl}^f = 7$  км является максимальным для высококучевых и высокослоистых облаков [16]). Совместное рассмотрение облаков нижнего и среднего ярусов позволит оценить пределы изменчивости поглоще-

ния, обусловленной вариациями такого важного параметра, как положение облачного слоя в атмосфере.

Предположим, что на верхнюю границу атмосферы в направлении  $\omega_\odot = (\xi_\odot, \varphi_\odot)$  падает единичный поток солнечного излучения:  $Q_{atm}^f(\lambda) = 1$  ( $\xi_\odot$  – зенитный,  $\varphi_\odot$  – азимутальный углы Солнца,  $\lambda$  – длина волны). Под интегральным поглощением солнечной радиации будем понимать величину

$$A = 100 \% \frac{\int_{0,4 \text{ мкм}}^{3,6 \text{ мкм}} \pi S_\lambda \cos \xi_\odot A(\lambda) d\lambda}{\int_{0,4 \text{ мкм}} \pi S_\lambda \cos \xi_\odot d\lambda},$$

где  $\pi S_\lambda$  – спектральная солнечная постоянная;  $A(\lambda)$  – спектральное поглощение в относительных единицах.

## 2. Поглощение в облаках

При исследовании поглощения в пределах облачного слоя (положение которого в пространстве фиксировано) будем иметь в виду следующее. Поскольку оптическая толщина внеоблачного аэрозоля, как правило, много меньше оптической толщины облаков, то

– можно пренебречь рассеянием в надоблачной атмосфере и считать, что приходящая на верхнюю границу слоя солнечная радиация не зависит от типа облачности;

– различие между поглощением в кучевой ( $A_{Cu}$ ) и слоистой ( $A_{Sl}$ ) облачности определяется эффектами многократного рассеяния света в облаках [15].

**Спектральное поглощение.** Рассмотрим зависимость спектрального поглощения  $A(\lambda)$  от зенитного угла Солнца  $\xi_\odot$  для различных типов облаков нижнего и среднего ярусов.

С возрастанием  $\xi_\odot$  на величину поглощения в кучевых облаках влияют два противоположных фактора: во-первых, увеличивается доля диффузной радиации и, во-вторых, приходящее на верхнюю границу облачного слоя солнечное излучение уменьшается (за счет ослабления надоблачным аэрозолем и поглощения атмосферными газами), а альbedo облаков увеличивается [15].

Пусть  $A_s = 0$ . В слабых полосах поглощения водяного пара (0,71–0,76, 0,81 мкм) и спектральных интервалах между полосами поглощения  $H_2O$  при увеличении  $\xi_\odot$  от 0 до  $\approx 60^\circ$  влияние первого фактора является более значимым и независимо от положения облаков в пространстве  $A_{Cu}(\lambda)$  увеличивается (рис. 1,а). Дальнейший рост  $\xi_\odot$  усиливает воздействие второго фактора, и  $A_{Cu}(\lambda)$  уменьшается.

При умеренном и сильном поглощении водяным паром влияние второго фактора на зависимость  $A(\lambda)$  от  $\xi_\odot$  в значительной степени определяется высотой верхней границы облачного слоя. Для облаков ниж-

него яруса в таких полосах поглощения  $H_2O$ , как 1,38; 1,87; 2,7–3,2 мкм,  $A_{Cu}^{low}(\lambda)$  близко к 0 независимо от величины зенитного угла Солнца. Излучение, приходящее на верхнюю границу облаков среднего яруса, ослаблено в меньшей степени, чем для облаков нижнего яруса, и поэтому не только в полосах слабого, но и полосах умеренного поглощения  $H_2O$  – 0,94; 1,1; 1,38; 1,87 мкм, – рост диффузной радиации приводит к увеличению  $A_{Cu}^{mid}(\lambda)$  при возрастании  $\xi_{\odot}$  от 0 до  $\approx 60^\circ$ . При  $\xi_{\odot} \geq 60^\circ$  влияние на облачное поглощение второго фактора усиливается, в силу чего  $A_{Cu}^{mid}(\lambda)$  убывает. В полосе поглощения водяного пара 2,7–3,2 мкм  $A_{Cu}^{mid}(\lambda)$  является монотонно убывающей функцией  $\xi_{\odot}$ .

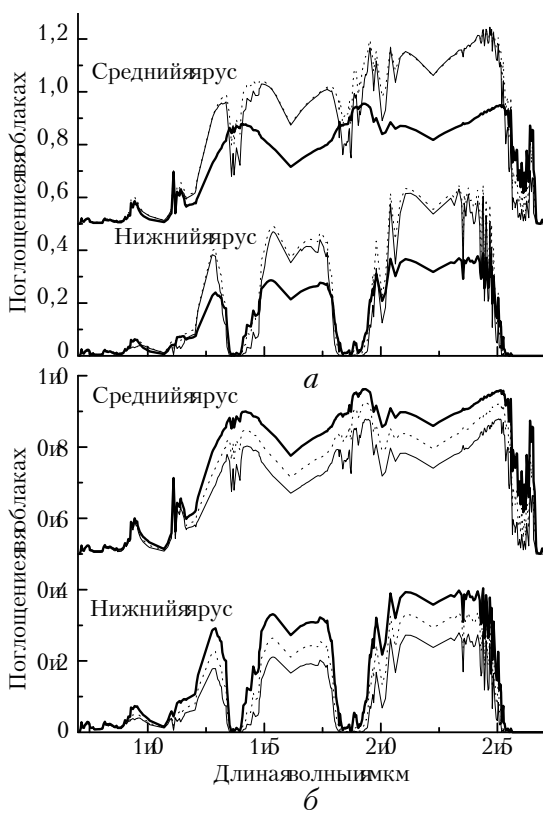


Рис. 1. Спектральное поглощение в кучевых (а) и слоистых (б) облаках от зенитного угла Солнца при  $N=0,5$ ,  $\gamma=2$ ,  $\tau_{0,71 \text{ мкм}}=60$ ,  $A_s=0,0$ : —  $\xi_{\odot}=0^\circ$ ; - - -  $\xi_{\odot}=60^\circ$ ; — · —  $\xi_{\odot}=75^\circ$ . Для получения значений поглощения в облаках среднего яруса необходимо вычесть 0,5 из приведенных на графике значений

В отличие от кучевой облачности, доля диффузной радиации в слоистых облаках с возрастанием  $\xi_{\odot}$  изменяется незначительно, исключая область больших значений зенитного угла Солнца  $\xi_{\odot} > 80^\circ$ . Поэтому  $A_{St}(\lambda)$  уменьшается с возрастанием  $\xi_{\odot}$  независимо от положения облаков в пространстве (рис. 1, б). В полосах поглощения  $H_2O$  в области  $\lambda > 1$  мкм  $A_{St}^{mid}(\lambda)$  существенно превышает  $A_{St}^{low}(\lambda)$ , как и в кучевых облаках.

**Интегральное поглощение.** Из результатов предыдущего раздела следует, что спектральное поглощение в облаках зависит от типа облаков и положения последних в атмосфере. Насколько сильно эти факторы влияют на интегральное поглощение облаками?

Поскольку основным газовым поглотителем в коротковолновой области спектра является водяной пар, то поглощение существенно зависит от количественного содержания последнего в атмосфере. В нашей модели атмосферы (лето умеренных широт [17]) влагосодержание отдельных слоев атмосферы

$$W(H_1, H_2) = \int_{H_1}^{H_2} \rho(h) dh,$$

где  $\rho(h)$  – концентрация водяного пара, распределено следующим образом.

Таблица 1

Влагосодержание отдельных слоев атмосферы (лето умеренных широт)

Положение облаков в атмосфере	Надоблачная атмосфера $W(H_{cl}^b, H_{atm}^t)$ я	Облачный слой $W(H_{cl}^b, H_{cl}^t)$ я	Подоблачная атмосфера $W(0, H_{cl}^b)$ я
Нижний ярус: $H_{cl}^b = 1$ км, $H_{cl}^t = 1,5$ км	1,39 г/см <sup>2</sup> я	0,339 г/см <sup>2</sup> я	0,864 г/см <sup>2</sup> я
Средний ярус: $H_{cl}^b = 5,5$ км, $H_{cl}^t = 7$ км	0,036 г/см <sup>2</sup> я	0,087 г/см <sup>2</sup> я	2,47 г/см <sup>2</sup> я

Пусть  $A_s = 0$ . Можно предположить, что при фиксированных оптических и геометрических параметрах облачного слоя и зенитном угле Солнца поглощение в облаках ( $A_{cl}$ ) увеличивается, когда влагосодержание уменьшается в надоблачной атмосфере (фактор 1) и возрастает в облачном слое (фактор 2). Из табл. 1 следует, что при переходе от облаков нижнего яруса к облакам среднего яруса (при указанных выше значениях верхней и нижней границы облачного слоя) уменьшается влагосодержание как надоблачной атмосферы, так и облачного слоя. Это означает, что факторы 1 и 2 оказывают противоположное действие на формирование  $A_{cl}$  и соотношение между поглощением в облаках нижнего ( $A_{cl}^{low}$ ) и среднего ( $A_{cl}^{mid}$ ) ярусов зависит от того, какой из этих факторов оказывается доминирующим.

Согласно нашим расчетам,  $A_{cl}^{mid} > A_{cl}^{low}$  (рис. 2). Это говорит о том, что уменьшение влагосодержания в надоблачной атмосфере  $W(H_{cl}^b, H_{atm}^t)$  оказывает на  $A_{cl}$  более сильное воздействие, чем увеличение влагосодержания в облачном слое  $W(H_{cl}^b, H_{cl}^t)$ , и соответствует расчетам [18]. Возможной причиной того, что увеличение  $W(H_{cl}^b, H_{cl}^t)$  менее значимо по сравнению с уменьшением  $W(H_{cl}^b, H_{atm}^t)$ , состоит в том, что в пределах облачного слоя относительный вклад в поглощение капель воды доминирует над

поглощением водяным паром [18]. В то же время наши расчеты (так же, как и результаты ряда авторов, которые обсуждаются в [18]) отличаются от результатов [19], согласно которым относительный

вклад капель воды и водяного пара в облачное поглощение примерно одинаков и величина  $A_{cl}$  слабо зависит от высоты верхней границы облаков.

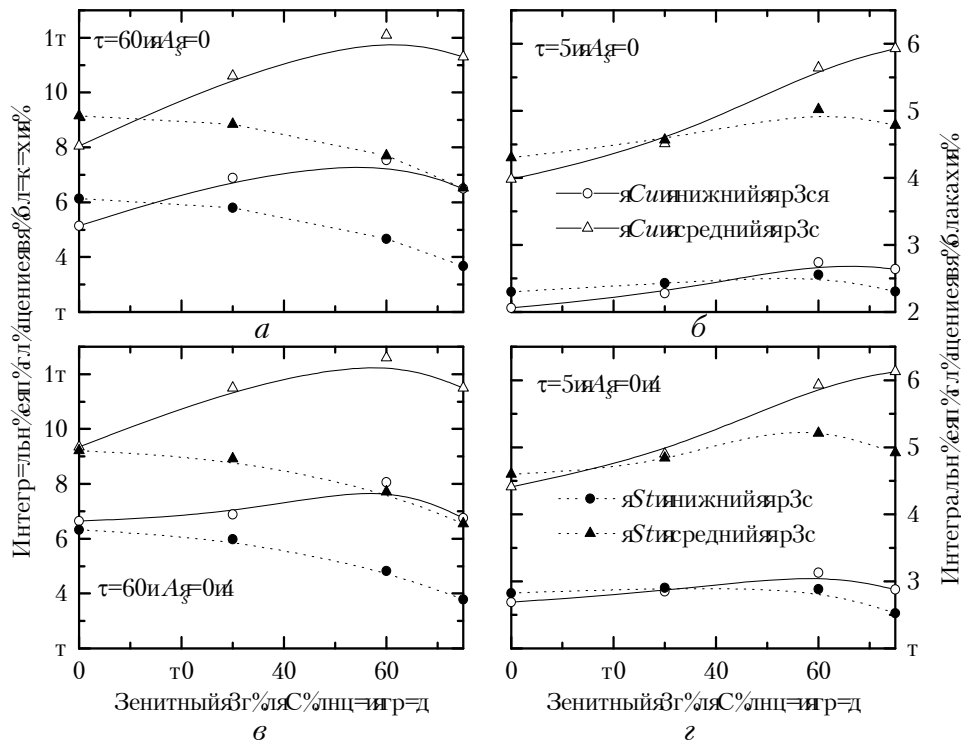


Рис. 2. Влияние зенитного угла Солнца на интегральное поглощение в облаках нижнего и среднего ярусов при  $N = 0,5$ ,  $\gamma = 2$  и различных значениях альbedo подстилающей поверхности  $A_s$  и оптической толщины облаков  $\tau$

Обсудим зависимость поглощения в облаках от зенитного угла Солнца. Вариации интегрального поглощения в облаках полностью определяются зависимостью спектрального поглощения от входных параметров задачи, поэтому в ряде очевидных случаев мы не будем давать подробных пояснений.

Пусть  $A_s = 0$ . С увеличением зенитного угла Солнца от  $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$  до  $\xi_{\odot} = 75^{\circ}$  для оптически плотных слоистых облаков ( $\tau = 60$ )  $A_{Si}$  убывает примерно в 1,5 раза. Для оптически тонких облаков ( $\tau = 5$ ) вариации  $A_{Si}$  незначительны, и при изменении  $0 \leq \xi_{\odot} \leq 75^{\circ}$  не превышают 1% для облаков как нижнего, так и среднего ярусов (см. рис. 2).

В отличие от слоистых, поглощение в оптически плотных кучевых облаках не является монотонной функцией  $\xi_{\odot}$ : при увеличении  $\xi_{\odot}$  до  $\xi_{\odot} \approx 60^{\circ}$   $A_{Cu}$  возрастает, а по мере дальнейшего роста зенитного угла Солнца уменьшается ввиду увеличения альbedo облачного слоя. Поскольку альbedo оптически тонких облаков невелико, то его увеличение при изменении  $\xi_{\odot}$  в интервале  $0 \leq \xi_{\odot} \leq 75^{\circ}$  будет сказываться на величине поглощения в облаках в меньшей степени. Действительно, при  $\tau = 5$   $A_{Cu}^{mid}$  является возрастающей

функцией  $\xi_{\odot}$ , а  $A_{Cu}^{low}$  изменяется в пределах 1% (рис. 2, а, б).

Зависимость поглощения от типа облачности при изменении  $\xi_{\odot}$  мы рассматривать не будем, поскольку эта проблема подробно обсуждается в [15]. Отметим лишь, что максимальные отличия  $A_{Cu}$  и  $A_{Si}$  имеют место для оптически плотных облаков при  $\xi_{\odot} \geq 60^{\circ}$ , а именно:  $\approx 4\%$  для облаков среднего и  $\approx 2\%$  для облаков нижнего яруса. Для оптически тонких облаков разница между  $A_{Cu}$  и  $A_{Si}$  уменьшается до  $\approx 1-1,5\%$ .

При возрастании  $A_s$  поглощение в слоистых облаках изменяется незначительно – в пределах 1% (рис. 2, в, г). В оптически плотных кучевых облаках увеличение  $A_s$  приводит к приращению  $A_{Cu}$  при  $\xi_{\odot} = 0$  [15], причем для облаков нижнего яруса увеличение  $A_{Cu}^{low}$  может быть более значительным, чем для облаков среднего яруса. Это обусловлено тем, что по мере увеличения высоты нижней границы облачного слоя излучение, отраженное от подстилающей поверхности и достигшее облачного слоя, ослабляется сильнее и доля поглощенной облаками радиации соответственно уменьшается.

### 3. Поглощение в облачной атмосфере

Изменения, которые вносит в поглощение в атмосфере ( $A_{atm}$ ) появление сплошной облачности, в зависимости от оптической толщины, зенитного угла Солнца и положения облаков в пространстве, подробно обсуждаются в работе [20]. Мы исследу-

ем эти закономерности в случае разорванных облаков. Имеющийся в нашем распоряжении массив расчетов восходящих и нисходящих потоков излучения позволяет оценить, насколько сильно поглощение в атмосфере зависит от типа облаков (кучевых  $A_{atm}^{Cu}$  и слоистых  $A_{atm}^{St}$ ) и при каких входных параметрах задачи эти отличия максимальны.

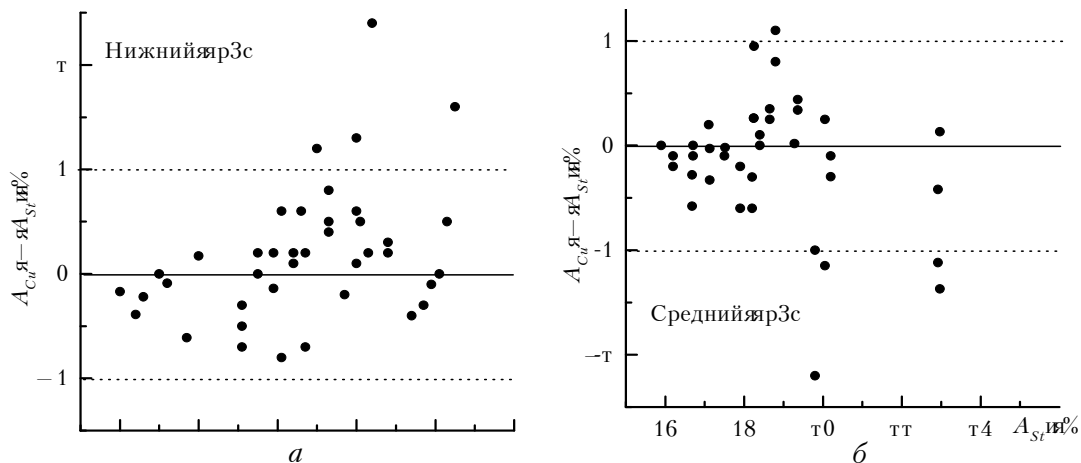


Рис. 3. Различие атмосферного поглощения в присутствии кучевой и слоистой облачности ( $A_{Cu} - A_{St}$ ) как функция  $A_{St}$  при  $A_s = 0,0$

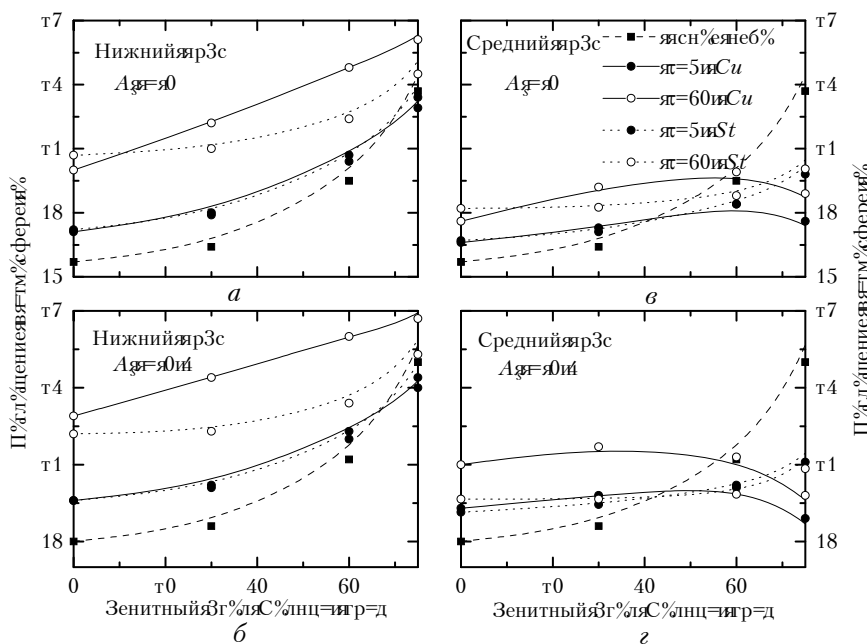


Рис. 4. Интегральное поглощение в атмосфере при ясном небе и наличии кучевых ( $\gamma = 2$ ) и слоистых облаков нижнего и среднего ярусов при  $N = 0,5$  и различных значениях альbedo подстилающей поверхности  $A_s$  и оптической толщины облаков  $\tau$

На рис. 3 представлена разность ( $A_{atm}^{Cu} - A_{atm}^{St}$ ) как функция  $A_{atm}^{St}$  для облаков нижнего и среднего ярусов при  $A_s = 0$ . Из приведенных результатов следует, что независимо от положения облачного слоя в пространстве тип облачности оказывает незначительное влияние на поглощение в атмосфере: в достаточно широком диапазоне изменения параметров облаков и условий освещенности различие

$|A_{atm}^{Cu} - A_{atm}^{St}|$  не превышает 1% (это совпадает с результатами, полученными ранее в [15] для облаков нижнего яруса). Наибольшие отличия между  $A_{atm}^{Cu}$  и  $A_{atm}^{St}$  ( $\approx 2-3\%$ ) имеют место при средних баллах облачности, максимальных (из рассчитанных) значениях параметра  $\gamma = 2$  для

- оптически плотных облаков ( $\tau \geq 30$ ) нижнего яруса для  $\xi_{\odot} \approx 60^\circ$ ;

– оптически тонких облаков ( $\tau=5$ ) среднего яруса при больших значениях  $\xi_{\odot} \geq 75^{\circ}$ . Увеличение альбедо подстилающей поверхности до  $A_s=0,4$  оказывает незначительное влияние на соотношение между  $A_{atm}^{Cu}$  и  $A_{atm}^{St}$ .

Обсудим вопрос о том, как меняется поглощение в безоблачной атмосфере  $A_{atm}^{clr}$  при появлении различных типов облаков нижнего ( $A_{atm}^{low}$ ) и среднего ( $A_{atm}^{mid}$ ) ярусов (рис. 4).

При наличии облаков нижнего яруса  $A_{atm}^{low}$  определяется в значительной степени поглощением в надоблачной атмосфере, относительный вклад которой в  $A_{atm}^{low}$  в зависимости от входных параметров задачи составляет  $\approx 60-90\%$ . Поскольку поглощение в надоблачной атмосфере возрастает с увеличением  $\xi_{\odot}$ , то  $A_{atm}^{low}$  также является возрастающей функцией  $\xi_{\odot}$  независимо от типа облачности.

При  $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$  справедливо неравенство  $A_{atm}^{low} > A_{atm}^{clr}$ . С увеличением  $\xi_{\odot}$  поглощение в оптически тонких облаках остается практически неизменным (см. рис. 2), поэтому различие между  $A_{atm}^{low}$  и  $A_{atm}^{clr}$  уменьшается и возможно, что при  $\xi_{\odot} \geq \tilde{\xi}_{\odot}$  знак неравенства изменится:  $A_{atm}^{low} \leq A_{atm}^{clr}$ . Во всем интервале изменения  $\xi_{\odot}$  и  $0 \leq A_s \leq 0,4$  разница между  $A_{atm}^{low}$  и  $A_{atm}^{clr}$  не превышает 2%. Появление оптически плотных облаков ( $\tau = 60$ ) увеличивает поглощение в атмосфере для всех значений  $0 \leq \xi_{\odot} \leq 75^{\circ}$ . Максимальные отличия между  $A_{atm}^{low}$  и  $A_{atm}^{clr}$  имеют место при  $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$  и при  $N = 0,5$  составляют  $\approx 5\%$ , возрастая до  $\approx 9-10\%$  при  $N = 1$ .

Поглощение в атмосфере, в которой присутствуют облака среднего яруса, отличается от ситуации, описанной выше. Это обусловлено тем, что доля поглощения в надоблачной атмосфере в  $A_{atm}^{mid}$  уменьшается до  $\approx 20-30\%$ , тогда как доли поглощения в облаках и подоблачной атмосфере соответственно увеличиваются и, стало быть, их вариации могут более существенно повлиять на поглощение в атмосфере в целом по сравнению с облаками нижнего яруса.

При наличии слоистых облаков  $A_{atm}^{mid}$ , как и  $A_{atm}^{low}$ , увеличивается с ростом зенитного угла Солнца, но в меньшей степени, чем это было для слоистых облаков нижнего яруса. В кучевых облаках поток нисходящей радиации на нижней границе облачности существенно уменьшается с увеличением  $\xi_{\odot}$  (и, следовательно, уменьшается поглощение в подоблачной атмосфере) и поглощение в пределах облачного слоя немонотонно зависит от  $\xi_{\odot}$ . Эти факторы в совокупности компенсируют возрастание поглощения в надоблачной атмосфере, и в целом  $A_{atm}^{mid}$  изменяется незначительно. Поэтому неравенство  $A_{atm}^{mid} > A_{atm}^{clr}$ , справедливое при  $\xi_{\odot} < \tilde{\xi}_{\odot}$ , меняет знак на противоположный при  $\xi_{\odot} > \tilde{\xi}_{\odot}$  (величина  $40^{\circ} \leq \tilde{\xi}_{\odot} \leq 60^{\circ}$  зависит от типа облачности и входных

параметров задачи). Наиболее сильные отклонения  $A_{atm}^{mid}$  от  $A_{atm}^{clr}$  наблюдаются при  $\xi_{\odot} = 75^{\circ}$  и составляют  $\approx 4\%$  для слоистой и  $\approx 6\%$  для кучевой облачности при средних значениях  $N$ . В условиях сплошной облачности эти отличия увеличиваются до 7–8%.

Выше мы рассматривали поглощение коротковолновой радиации в облаках и в атмосфере в целом для двух фиксированных положений облачного слоя. Возникает вопрос: какой из факторов является определяющим для поглощения – положение облачного слоя в пространстве, т.е. взаимное расположение верхней и нижней границ облаков, или высота верхней границы? Для того чтобы прояснить этот аспект проблемы, были выполнены дополнительные расчеты радиационных характеристик для облачного слоя с фиксированной верхней границей и переменной геометрической толщиной.

Полученные результаты, частично приведенные в табл. 2, показывают, что поглощение в атмосфере слабо зависит от геометрической толщины облаков и определяется высотой верхней границы: вариации  $A_{atm}$ , обусловленные изменчивостью нижней границы облаков, не превосходят, как правило, 1% и несколько увеличиваются для больших геометрических толщин облаков (4 км) при  $\xi_{\odot} \geq 75^{\circ}$ . Поглощение в облаках существенно зависит не только от высоты верхней, но и нижней границы облачности. Так, для облаков среднего яруса увеличение геометрической толщины от 0,5 до 4 км может привести к возрастанию  $A_{cl}$  в  $\approx 1,5-2$  раза, что, по всей вероятности, связано с увеличением вклада водяного пара в поглощение облачным слоем. Заметим, что качественная зависимость  $A_{cl}$  от оптической толщины облаков и зенитного угла Солнца при вариациях геометрической толщины облаков остается без изменений.

Таблица 2

**Зависимость поглощения коротковолновой радиации от положения кучевых облаков в пространстве при  $N = 0,5$ ,  $\gamma = 2$  и  $A_s = 0$ . Значение над чертой соответствует поглощению в атмосфере в целом, под чертой – поглощению в облаках (%)**

Входные параметры	$H_{cl}^i = 1,5$ км		$H_{cl}^i = 7$ км		
	$H_{cl}^b$ , км				
	0,5я	1я	3я	5,5я	6,5я
$\tau = 5$ , $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$ я	$\frac{16,8}{2,8^{\text{я}}}$	$\frac{17,1}{2,1^{\text{я}}}$	$\frac{16,8}{8,0^{\text{я}}}$	$\frac{16,6}{4,0^{\text{я}}}$	$\frac{16,5}{2,8^{\text{я}}}$
$\tau = 5$ , $\xi_{\odot} = 60^{\circ}$ я	$\frac{20,4}{3,6^{\text{я}}}$	$\frac{20,7}{2,7^{\text{я}}}$	$\frac{19,2}{9,8^{\text{я}}}$	$\frac{18,4}{5,6^{\text{я}}}$	$\frac{18,1}{4,4^{\text{я}}}$
$\tau = 5$ , $\xi_{\odot} = 75^{\circ}$ я	$\frac{22,8}{3,3^{\text{я}}}$	$\frac{22,9}{2,6^{\text{я}}}$	$\frac{19,0}{9,8^{\text{я}}}$	$\frac{17,6}{5,9^{\text{я}}}$	$\frac{17,3}{4,9^{\text{я}}}$
$\tau = 60$ , $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$ я	$\frac{20,0}{5,9^{\text{я}}}$	$\frac{20,0}{5,1^{\text{я}}}$	$\frac{18,2}{11,2^{\text{я}}}$	$\frac{17,6}{8,1^{\text{я}}}$	$\frac{17,5}{7,2^{\text{я}}}$
$\tau = 60$ , $\xi_{\odot} = 60^{\circ}$ я	$\frac{24,8}{8,0^{\text{я}}}$	$\frac{24,8}{7,5^{\text{я}}}$	$\frac{20,9}{14,5^{\text{я}}}$	$\frac{19,9}{12,1^{\text{я}}}$	$\frac{19,7}{11,5^{\text{я}}}$
$\tau = 60$ , $\xi_{\odot} = 75^{\circ}$ я	$\frac{26,2}{6,9^{\text{я}}}$	$\frac{26,1}{6,5^{\text{я}}}$	$\frac{20,1}{13,3^{\text{я}}}$	$\frac{18,9}{11,3^{\text{я}}}$	$\frac{18,7}{10,9}$

#### 4. Заключение

В данной статье рассматривается поглощение в разорванной облачности и атмосфере в целом для облаков нижнего и среднего ярусов. Показано:

– спектральное поглощение в облаках зависит как от типа облаков, так и положения облачного слоя в пространстве;

– интегральное поглощение в оптически плотных кучевых облаках нижнего и среднего ярусов является немонотонной функцией зенитного угла Солнца в отличие от поглощения в слоистой облачности, которое убывает с увеличением  $\xi_{\odot}$ . Вариации  $\xi_{\odot}$  незначительно влияют на поглощение в оптически тонких облаках нижнего яруса и слоистых облаках среднего яруса, тогда как поглощение в кучевых облаках среднего яруса является слабо возрастающей функцией  $\xi_{\odot}$  в диапазоне  $0 \leq \xi_{\odot} \leq 75^{\circ}$ ;

– максимальные отличия между поглощением в кучевых и слоистых облаках имеют место при  $\xi_{\odot} \geq 60^{\circ}$  и для оптически плотных облаков могут достигать  $\approx 4\%$ .

Поглощение в атмосфере зависит от положения верхней границы облачного слоя и слабо связано с изменением геометрической толщины облаков. При этом

– облака *нижнего яруса*, как правило, увеличивают поглощение безоблачной атмосферы; исключения составляют оптически тонкие облака, для которых при  $\xi_{\odot} \geq 70^{\circ}$  может выполняться соотношение  $A_{atm}^{low} \leq A_{atm}^{clr}$ ;

– при  $\xi_{\odot} = 0^{\circ}$  появление облаков *среднего яруса* увеличивает поглощение безоблачной атмосферы

$A_{atm}^{mid} \geq A_{atm}^{clr}$ , тогда как при  $\xi_{\odot} \geq \tilde{\xi}_{\odot}$  неравенство меняет знак:  $A_{atm}^{mid} \leq A_{atm}^{clr}$ .

Случайная геометрия облаков не оказывает существенного влияния на поглощение в атмосфере: различия  $A_{atm}$ , обусловленные типом облаков – кучевые или слоистые, не превышают, как правило, 1%. Эта разница несколько увеличивается (до 2–3%) при средних баллах облачности и  $\gamma = 2$  для оптически плотных облаков нижнего яруса ( $\xi_{\odot} \approx 60^{\circ}$ ) и оптиче-

ски тонких облаков среднего яруса ( $\xi_{\odot} \geq 75^{\circ}$ ). Поскольку оптически плотные кучевые облака нижнего яруса и оптически тонкие высококучевые облака являются достаточно типичными для умеренных широт, пренебрежение случайной геометрией облаков может привести к занижению или, соответственно, к завышению поглощения в атмосфере на 2–3%. Последнее, в свою очередь, влияет на точность расчета термического режима атмосферы и, как следствие, на моделирование образования и динамики облачных систем в моделях облакообразования, общей циркуляции атмосферы и климата.

1. Stephens G.L. and Tsay S.-C. // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1990. V. 116. P. 671–704.
2. Li Z., Barker H.W. and Moreau L. // Nature. 1995. V. 376. P. 486–490.
3. Wiscombe W.J., Welch R.M., and Hall W.D. // J. Atmos. Sci. 1984. V. 34. P. 642–650.
4. Lubin D., Chen J.-P., Pilewskie P., Ramanathan V., and Valero F. // JGR. 1996. V. 101. N D12. P. 16961–16972.
5. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Мельникова И.Н. // Метеорология и гидрология. 1996. N 2. С. 14–23.
6. Arking A. // Science. 1996. V. 273. P. 779–792.
7. Ackerman S.A., and Cox S.K. // J. Appl. Meteorol. 1981. V. 20. P. 1510–1515.
8. Rawlins F. // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1989. V. 115. P. 365–382.
9. Hayasaka T., Kikuchi N., and Tanaka M. // J. Appl. Meteorol. 1995. V.34. N 5. P 1047–1055.
10. Тумов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1295–1307.
11. Тумов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1308–1318.
12. Titov G.A., Zhuravleva T.B. and Zuev V.E. // JGR. 1997. V. 102. N D2. P. 1819–1832.
13. Тумов Г.А., Журавлева Т.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 7. С. 707–721.
14. Titov G.A., Zhuravleva T.B. and Zuev V.E. // Proceedings of the Fifth ARM Science Team Meeting. Sun Diego, California, USA. 19–23 March, 1995. P. 397–400.
15. Тумов Г.А., Журавлева Т.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 10. С. 1419–1427.
16. Облака и облачная атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.
17. Зув В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
18. Davies R., Ridgway W.L. and Kim K.-E. // J. Atmos. Sci. 1984. V. 41. N 13. P. 2126–2137.
19. Stephens G.L. // J. Atmos. Sci. 1978. V. 35. P. 2111–2122.
20. Schmetz J. // J. Atmos. Sci. 1993. V. 50. N 8. P. 1122–1132.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
1 апреля 1998 г.

#### *T.B. Zhuravleva. Influence of Clouds on Shortwave Absorption in the Atmosphere. Part 1. Absorption under Broken Cloud Conditions.*

The influence of the effects of random cloud geometry on the mean shortwave absorption in the cloudy layer and the entire atmosphere are studied. It is shown that the spectral absorption by broken clouds depends strongly both on the cloud type (cumulus or stratus) and on the cloud position in space. In the optically dense cumulus clouds, the integrated absorption is a nonmonotonic function of solar zenith angle  $\xi_{\odot}$ ; whereas in the stratus clouds, it decreases with increasing  $\xi_{\odot}$ . The difference in absorption between the cumulus and stratus clouds is maximum at  $\xi_{\odot} \geq 60^{\circ}$ ; and for the optically dense clouds, it amounts to  $\approx 4\%$ . The integrated absorption in the atmosphere,  $A_{atm}$ , depends on the position of the cloud top boundary, while being a weak function of the cloud layer geometrical thickness. Variations of absorption  $A_{atm}$  among cloud types generally do not exceed 1%, while increasing to 2–3% at intermediate cloud fractions for optically dense low-level clouds ( $\xi_{\odot} = 60^{\circ}$ ) and optically thin middle-level clouds ( $\xi_{\odot} \geq 75^{\circ}$ ).