

Г.А. Титов, Т.Б. Журавлева

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СРЕДНИХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ДВУХСЛОЙНОЙ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ (ВИДИМЫЙ ДИАПАЗОН)

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 30.12.98 г.

Принята к печати 5.01.99 г.

Необходимость исследования проблемы переноса излучения в двухслойной разорванной облачности неоднократно обсуждалась нами еще при жизни Г.А. Титова. Я считаю своим долгом выполнить задуманное в знак моего глубокого уважения и признательности Георгию Александровичу – моему Учителю, Коллеге и Другу.

Татьяна Журавлева

Средние потоки солнечной радиации на различных атмосферных уровнях рассчитываются двумя различными методами: приближенным (в предположении о случайном перекрытии облачных слоев) и методом замкнутых уравнений, основанном на решении методом Монте-Карло системы уравнений для средней интенсивности в двухслойной разорванной облачности. Расчеты выполнены для параметров облаков, которые являются характерными для типичных облачных систем (St) – (As), (St) – (Cl), (Cl) – (As), (Cl) – (Cl) в умеренных широтах Северного полушария. Показано, что в зависимости от оптико-геометрических параметров облаков относительные различия потоков восходящего и нисходящего излучения, рассчитанных различными методами, могут достигать десятков процентов.

1. Введение

Облачные слои могут присутствовать в атмосфере одновременно на различных уровнях: появление двух и более облачных слоев обычно связано с атмосферными фронтами или распадом мощных кучевых или кучево-дождевых облаков. Расслоенность фронтальных облаков в пределах всей тропосферы над европейской частью бывшего СССР исследовал А.М. Баранов [1]: среднее за год количество облачных слоев (эта величина в теплое и холодное полугодия примерно одинакова) приведено в табл. 1.

Сведения о расслоенности облаков над различными районами бывшего СССР представлены Л.С. Дубровиной [2]. Недостатком этих данных является отсутствие информации об облаках верхнего яруса; что касается облаков нижнего и среднего ярусов, то согласно [2] в 30–50% случаев облачность является однослойной, примерно в 30% – двухслойной и в 30% летом и 20% случаев зимой – трех- или четырехслойной.

В настоящее время существуют хорошо разработанные методы расчета радиационных эффектов *горизонтально однородной* многослойной облачности (см.,

например, [3]). Если же облака в пределах хотя бы одного слоя являются разорванными, то для расчета радиационных характеристик используются приближенные методы, разработанные в рамках детерминистской теории переноса излучения. Последнее обстоятельство делает их особенно привлекательными для практического использования, например для расчета притоков коротковолнового излучения в радиационных кодах моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) [4–8]. Существенным недостатком данного подхода является отсутствие каких-либо оценок точности этих методов.

В пуассоновской модели разорванной облачности нами получены уравнения для средней интенсивности и разработан алгоритм метода Монте-Карло для расчета средних потоков солнечной радиации в двухслойных облаках. Цель данной работы состоит в том, чтобы на основе предложенного алгоритма оценить точность приближенного метода расчета средних потоков в двухслойной разорванной облачности. Это позволит выявить границы применимости горизонтально однородной модели облаков для класса задач, связанного с расчетом энергетических характеристик двухслойной облачности.

Таблица 1

Повторяемость (%) числа облачных слоев над европейской частью бывшего СССР [1]

Фронт	Число слоев				
	1	2	3	4	5 и более
Теплый	42,5	37,1	15,3	4,7	0,4
Холодный	53	32	12	более 4 слоев – 3	–
Окклюзии	40,1	40,2	15	4	0,7

2. Трехмерное распределение облачности

Для моделирования пространственной структуры многослойной облачности необходимы сведения о трех-

мерном распределении облаков, которые включают, как минимум, следующую информацию:

– балл облачности в целом и количество облаков на разных уровнях;

– повторяемость различных форм облаков и их сочетаний;

– вертикальная структура облачных систем (количество облачных слоев, высота облачных границ).

Состояние исследований по климатологии облачного покрова подробно представлено в [9–14]. Ценность этих работ состоит в том, что в них обобщены результаты наблюдений за облачностью, полученные многочисленными группами исследователей на основе наземной сети станций, самолетного зондирования и метеорологических спутников.

Детальные представления о *средней общей облачности*, ее изменчивости и повторяемости над земным шаром в зависимости от сезона и широты дают сведения, представленные в [2, 9, 15–18]. Данные морских и наземных наблюдений о *повторяемости облаков различных форм* и их сочетаний обобщены группой американских ученых из Морского океанографического центра и Национального центра атмосферных исследований США в виде специальных атласов. Эти сведения, составленные для 6 групп облаков ($Ci - Cs - Cc (Ci), As - Ac (As), St - Sc (St), Ns, Cu, Cb$), позволили выделить наиболее характерные облачные системы: $(Cu) - (As), (Cu) - (Ci), (Sb) - (As), (Ns) - (Cb), (St) - (Ci), (St) - (As), (Ns) - (St), (Ns) - (As), (As) - (Ci)$.

Упомянутые выше результаты дают достаточно полное представление о статистических характеристиках глобального облачного поля и подробно цитируются в [19]. Здесь же приведены систематические данные о высоте облачных границ и толщине облаков, полученные преимущественно по результатам самолетного зондирования.

Что же касается данных наблюдений о *количестве облаков на разных уровнях*, то они крайне скудны и имеются лишь для отдельных районов Северного полушария. В МОЦА вертикальное распределение количества облаков рассчитывается с помощью достаточно простых эмпирических соотношений, которые связывают балл облачности с относительной влажностью таким образом, чтобы вычисленное среднезональное распределение облаков согласовывалось с аналогичным фактическим распределением. В [20] предложен метод расчета количества облаков на трех атмосферных уровнях, исходя из климатических данных по общей облачности, уходящему с верхней границы атмосферы излучению, температуре и влажности. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с накопленными эмпирическими данными о вертикальном распределении балла облачности и основными крупномасштабными особенностями ОЦА и могут быть использованы при расчете радиационных характеристик многослойных облаков.

3. Модель и методы расчета

3.1. Модель атмосферы. Модель облачно-аэрозольной атмосферы задается в интервале высот $0 \leq z \leq H_{\text{atm}}^t$ в виде K слоев (рис. 1). На верхнюю границу атмосферы $z = H_{\text{atm}}^t$ в направлении $\omega_{\odot} = (\xi_{\odot}, \varphi_{\odot})$, где ξ_{\odot} – зенитный, $\varphi_{\odot} = 0$ – азимутальный углы, падает единичный поток солнечной радиации.

Облачная модель. Облака выделены в виде двух отдельных слоев Λ_i , $i = 1, 2$, индекс $i = 1$ соответствует нижнему, а $i = 2$ – верхнему облачному слою. Каждый из облачных слоев характеризуется высотой нижней $H_{\text{cl}}^{b,i}$ и верхней $H_{\text{cl}}^{t,i}$ границ: $H_{\text{cl}}^{b,i} \leq z \leq H_{\text{cl}}^{t,i}$, $i = 1, 2$; $H_{\text{cl}}^{t,1} \leq H_{\text{cl}}^{b,2}$.

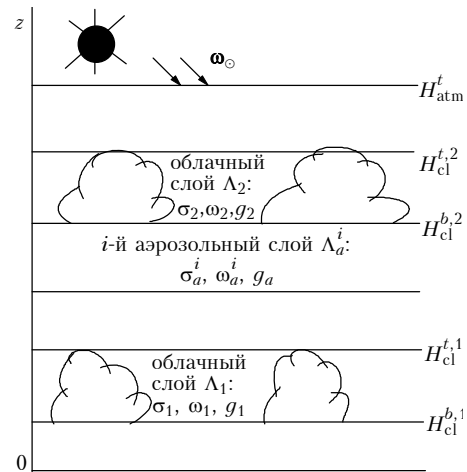


Рис. 1. Схема облачно-аэрозольной атмосферы, содержащей два слоя разорванной облачности

Оптическая модель в пределах Λ_i задается в виде случайных скалярных полей коэффициента ослабления $\sigma_{\lambda,i}(\mathbf{r}) \chi_i(\mathbf{r})$, альbedo однократного рассеяния $\omega_{\lambda,i}(\mathbf{r}) \chi_i(\mathbf{r})$ и индикатрисы рассеяния облаков $g_{\lambda,i}(\omega, \omega', \mathbf{r}) \chi_i(\mathbf{r})$, $i = 1, 2$; индекс « λ » означает длину волны. Случайные поля $\chi_1(\mathbf{r})$ и $\chi_2(\mathbf{r})$ предполагаются независимыми; математическая модель $\chi_i(\mathbf{r})$, $i = 1, 2$, строится на основе пуассоновского потока точек на прямых и подробно описана в [21, 22]; внутри отдельного облака оптические характеристики постоянны: $\sigma_{\lambda,i}(\mathbf{r}) = \sigma_{\lambda,i}$, $\omega_{\lambda,i}(\mathbf{r}) = \omega_{\lambda,i}$, $g_{\lambda,i}(\omega, \omega', \mathbf{r}) = g_{\lambda,i}(\omega, \omega')$, $i = 1, 2$.

Аэрозольная модель. Каждый i -й аэрозольный слой Λ_a^i предполагается горизонтально однородным и определяется коэффициентом ослабления $\sigma_{1,i}^a$, альbedo однократного рассеяния $\omega_{1,i}^a$ и индикатрисой рассеяния $g_{1,i}^a(\omega, \omega', z)$, $i = 1, 2, \dots, K$. Вертикальная стратификация $\sigma_{1,i}^a$ и $\omega_{1,i}^a$, $i = 1, 2, \dots, K$, соответствует среднециклической модели аэрозоля [23]; спектральная изменчивость и высотный профиль $g_{1,i}^a(\omega, \omega', z)$ не учитываются. Индикатриса рассеяния рассчитана по теории Ми для дымки L и $\lambda = 0,69$ мкм [24].

Подстилающая поверхность отражает падающее излучение по закону Ламберта с альbedo A_g .

3.2. Метод замкнутых уравнений. Ранее в пуассоновской модели *однослойной* разорванной облачности для статистически однородных облачных полей была получена система замкнутых уравнений для средней интенсивности и разработан алгоритм ее решения методом Монте-Карло (МЗУ) [25]. Мы обобщили этот результат на случай *двухслойной* разорванной облачности в предположении, что случайные поля $\chi_i(\mathbf{r})$, $i = 1, 2$, независимы и статистически однородны.

Вопрос о точности и границах применимости МЗУ для случая двухслойных облаков, который можно решить путем сравнения с соответствующими результатами расчетов, выполненных с помощью численного моделирования, выходит за рамки данной статьи. Однако можно предположить, что результаты, полученные для однослойной разорванной облачности [26], и использование гипотезы о независимости случайных полей $\chi_i(\mathbf{r})$, $i = 1, 2$, обеспечивают приемлемую точность МЗУ и в этом случае.

3.3. Приближенный метод расчета. Приближенный метод расчета радиационной характеристики F (например,

потока или интенсивности излучения в заданном направлении) в условиях двухслойной разорванной облачности определяется соотношением

$$F = K_{clr=1, clr=2} F_{clr=1, clr=2} + K_{pp=1, clr=2} F_{pp=1, clr=2} + K_{clr=1, pp=2} F_{clr=1, pp=2} + K_{pp=1, pp=2} F_{pp=1, pp=2}. \quad (1)$$

Здесь $F_{clr=1, clr=2}$, $F_{pp=1, clr=2}$, $F_{clr=1, pp=2}$, $F_{pp=1, pp=2}$ соответствуют значениям F в условиях ясного неба (clr), сплошной (pp) одно- и двухслойной облачности и рассчитываются на основе детерминированного уравнения переноса излучения. Веса, с которыми они комбинируются, определяются той или иной гипотезой перекрытия облаков. Из трех известных гипотез – минимального, максимального и случайного перекрытия (см., например, [27]) – в МОЦА используются, как правило, две последних или их комбинация. Комбинированная схема предполагает использование гипотезы максимального перекрытия для прилегающих облачных слоев (например, для облачных слоев в пределах одного яруса) и гипотезы случайного перекрытия для пересекającychся облачных слоев (для облаков различных ярусов). Эти гипотезы не имеют теоретического или эмпирического обоснования и подбираются для каждой модели из соображений наилучшего соответствия результатов моделирования данным спутниковых и наземных наблюдений [28].

Пусть N_1 и N_2 – баллы облачности в нижнем и верхнем облачных слоях соответственно. Тогда потоки восходящего (нисходящего) солнечного излучения $F^{\uparrow(\downarrow)}$ на уровне z рассчитываются по формулам:

для гипотезы случайного перекрытия

$$F_{\text{rand}}^{\uparrow(\downarrow)}(z) = (1 - N_1)(1 - N_2)F_{clr=1, clr=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + N_1(1 - N_2)F_{pp=1, clr=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + N_2(1 - N_1)F_{clr=1, pp=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + N_1N_2F_{pp=1, pp=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z); \quad (2)$$

для гипотезы максимального перекрытия

$$F_{\text{max}}^{\uparrow(\downarrow)}(z) = (1 - \max(N_1, N_2))F_{clr=1, clr=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + \max(0, N_1 - N_2)F_{pp=1, clr=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + \max(0, N_2 - N_1)F_{clr=1, pp=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + \min(N_1, N_2)F_{pp=1, pp=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z). \quad (3)$$

4. Результаты расчетов

Средние потоки в двухслойной разорванной облачности рассчитываются методом замкнутых уравнений $F_{\text{МЗУ}}^{\uparrow(\downarrow)}$ и приближенным методом в соответствии с гипотезой о случайном перекрытии облачных слоев $F_{\text{rand}}^{\uparrow(\downarrow)}$. Выбор этой гипотезы обусловлен тем, что она используется в радиационных кодах МОЦА для расчета потоков излучения в присутствии облаков различных ярусов. Рассмотрением именно этих облачных ситуаций ограничимся на данном этапе исследования. Относительное различие между потоками излучения $F_{\text{МЗУ}}^{\uparrow(\downarrow)}$ и $F_{\text{rand}}^{\uparrow(\downarrow)}$ будем характеризовать с помощью величины

$$\delta F^{\uparrow(\downarrow)}(z) = 100\% \times (F_{\text{rand}}^{\uparrow(\downarrow)}(z) - F_{\text{МЗУ}}^{\uparrow(\downarrow)}(z)) / F_{\text{МЗУ}}^{\uparrow(\downarrow)}(z).$$

4.1. Параметры облаков. Расчеты потоков солнечной радиации выполнены для параметров облаков, которые являются характерными для типичных облачных систем (St) –

(As), (St) – (Ci), (Cu) – (As), (Cu) – (Ci) в умеренных широтах Северного полушария [11, 19, 29, 30]:

– оптическая толщина нижнего слоя (облака нижнего яруса) изменяется в пределах $10 \leq \tau_1 \leq 40$, верхнего слоя (облака среднего или верхнего яруса) – $1 \leq \tau_1 \leq 25$;

– индикатриса рассеяния жидкокапельных облаков рассчитана согласно теории Ми [24] и соответствует «широкому» распределению капель по размерам [29] ($\lambda = 0,69$ мкм); для расчета потоков в кристаллических облаках использована индикатриса рассеяния для гексагональных случайно и горизонтально ориентированных ледяных частиц [31] ($\lambda = 0,55$ мкм);

– альbedo однократного рассеяния $\omega_i = 1$, $i = 1, 2$;

– параметр $\gamma_i = H_i/D_i$ (H_i – толщина, D_i – характерный горизонтальный размер облачных элементов i -го облачного слоя) варьируется в большинстве расчетов в интервале $0 \leq \gamma_i \leq 2$, $i = 1, 2$. Значение параметра $\gamma \ll 1$ соответствует случаям, когда горизонтальная протяженность облачных образований существенно (как минимум, на порядок) превосходит их вертикальные размеры. Значения параметра $0,5 \leq \gamma \leq 2$ являются типичными значениями для облаков вертикального развития. Величина $\gamma = 2$, возможно, является несколько завышенной для облаков среднего (типа Ac) и верхнего (типа Cc) ярусов, но используется в расчетах для того, чтобы показать пределы различий, которые могут быть достигнуты при расчете средних потоков излучения двумя различными методами;

– верхняя граница атмосферы $H_{\text{атм}}^1 = 16$ км;

– альbedo подстилающей поверхности $A_s = 0$ (что примерно соответствует альbedo океана).

4.2. Сравнение результатов расчетов. Для того чтобы лучше понять закономерности переноса излучения в двухслойной облачности, рассмотрим два предельных случая, когда один из облачных слоев занят сплошными, а второй – разорванными облаками.

Случай 1. Пусть $N_1 = 1$, $N_2 < 1$ (слой разорванной облачности Λ_2 находится над горизонтально однородной отражающей поверхностью Λ_1). Приближенный метод расчета потоков солнечной радиации, согласно формуле (2), сводится к соотношению

$$F_{\text{rand}}^{\uparrow(\downarrow)}(z) = (1 - N_2)F_{pp=1, clr=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z) + N_2F_{pp=1, pp=2}^{\uparrow(\downarrow)}(z). \quad (4)$$

Если бы отражение от Λ_1 описывалось законом Ламберта, то при решении задачи можно было бы воспользоваться полученными ранее результатами (см., например, [32]). Однако нижележащий облачный слой не является ламбертовским отражателем.

В связи с тем что оптическая толщина внеоблачного аэрозоля невелика (в условиях ясного неба $\tau_a \approx 0,15$), рассеяние в аэрозольных слоях пренебрежимо мало по сравнению с облачными. Поэтому потоки солнечной радиации, трансформированные двухслойной облачностью, в основном определяются нерассеянным излучением, прошедшим в просветах между облаками верхнего слоя Λ_2 до верхней границы облаков нижнего слоя $\Lambda_1 - z = H_{cl}^1(A)$, и излучением, падающим на верхние и боковые грани облаков, принадлежащих слою Λ_2 (B).

При расчете средних потоков восходящей радиации на уровне $z = H_{cl}^2$ по формуле (4) вклад доли нерассеянного излучения, прошедшего в просветах между облаками до уровня $z = H_{cl}^1(A)$, описывается первым слагаемым. При этом (в отличие от МЗУ) не учитывается, что радиация,

отраженная нижним облачным слоем, с одной стороны, ослабляется облаками, принадлежащими верхнему слою Λ_2 , а с другой – является дополнительным источником энергии, усиливающей радиационное взаимодействие облачных слоев. Возможности метода замкнутых уравнений позволяют также более точно учесть вклад, определяемый излучением типа (В) в формирование $F^\uparrow(H_{cl}^{t,2})$. Часть лучистой энергии после одного или нескольких отражений от нижнего облачного слоя может достигнуть уровня $z = H_{cl}^{t,2}$ в просветах между облаками и поэтому превысить второе слагаемое формулы (4), которое описывает излучение, «запертое» между двумя слоями сплошных облаков. Чтобы понять, какой из совокупности вышеупомянутых факторов определяет различие между $F_{rand}^\uparrow(H_{cl}^{t,2})$ и $F_{МЗУ}^\uparrow(H_{cl}^{t,2})$, необходимы дополнительные исследования (в частности, угловых распределений пропущенной на уровне $z = H_{cl}^{t,2}$ и отраженной на уровне $z = H_{cl}^{t,1}$ солнечной радиации). На данном этапе ограничимся количественной оценкой величины $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$.

Рассмотрим облачные ситуации, соответствующие средним значениям балла облачности N_2 , поскольку именно в этих случаях радиационное взаимодействие между Λ_1 и Λ_2 может внести существенные коррективы в формирование потоков излучения [32]. Расчеты показывают, что при $\xi_{\odot} \leq 30^\circ$ и $10 \leq \tau_1 \leq 40$, $1 \leq \tau_2 \leq 25$ ($\tau = 1$ – кристаллические, $\tau \geq 4$ – жидкокапельные облака) величина $|\delta F^{\uparrow(\downarrow)}|$ на границах облачных слоев не превышает 5% при $\gamma_2 \ll 1$. С возрастанием γ_2 значения $|\delta F^{\uparrow(\downarrow)}|$ и $|\delta F^{\downarrow(\downarrow)}|$ остаются в тех же пределах, тогда как относительное различие потоков на уровнях $z = H_{cl}^{t,1}$ и $z = H_{cl}^{b,2}$ несколько увеличивается с ростом τ_2 и достигает $\approx -15\%$ при $\gamma_2 = 2$, $\tau_2 = 25$ и $N_2 = 0,5$.

С увеличением ξ_{\odot} до 75° $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$ не превышает 5–8% при $0 \leq \gamma_2 \leq 2$ (рис. 2,а). Различия $F_{МЗУ}$ и F_{rand} на нижней границе слоя Λ_2 возрастает с увеличением γ_2 : например, при $\tau_1 = 40$ и $\tau_2 = 25$ $\delta F^{\downarrow}(H_{cl}^{b,2})$ изменяется от $\approx -15\%$ при $\gamma_2 \ll 1$ до $\approx 30\%$ при $\gamma_2 = 2$. Последний факт обусловлен тем, что в облаках, имеющих признаки вертикального развития, доля нерассеянного излучения S и, следовательно, пропущенное излучение в целом значительно уменьшаются с возрастанием ξ_{\odot} , тогда как в облаках, для которых параметр $\gamma_2 \ll 1$, величина S изменяется незначительно (вплоть до $\xi_{\odot} \approx 80^\circ$) [33]. Большие значения $\delta F^{\downarrow}(H_{cl}^{b,2})$ влекут за собой существенные различия $F_{МЗУ}^\uparrow$ и F_{rand}^\uparrow на уровне верхней границы слоя Λ_1 : если при $\gamma_2 \ll 1$ и $\tau_2 = 25$ значение $\delta F^{\uparrow}(H_{cl}^{t,1}) \approx -15\%$, то при $\gamma_2 = 2$ оно достигает 40–60% в зависимости от τ_1 (рис. 2,б). Если рассматривать совокупность облачных слоев как единое облачное образование, то следствием отличий средних потоков восходящего излучения $F_{МЗУ}^\uparrow$ и F_{rand}^\uparrow на уровне $z = H_{cl}^{t,2}$ является разница между $F_{МЗУ}$ и F_{rand} на уровне нижней границы слоя Λ_1 , которая может достигать $\approx -20\%$.

Типичной формой облаков среднего и верхнего ярусов являются полосы, для которых характерны горизонтальные размеры облаков (вдоль осей $OX - D_x$ и $OY - D_y$) существенно отличаются. Расчеты, выполненные для полос, вытянутых вдоль оси OY ($\gamma_{x,2} = H_2/D_{x,2} = 0,5$, $\gamma_{y,2} = H_2/D_{y,2} \ll 1$), показывают, что во всем диапазоне оптических толщин облаков на границах обоих облачных слоев $|\delta F^{\uparrow(\downarrow)}| \leq 10\%$ (см. рис. 2).

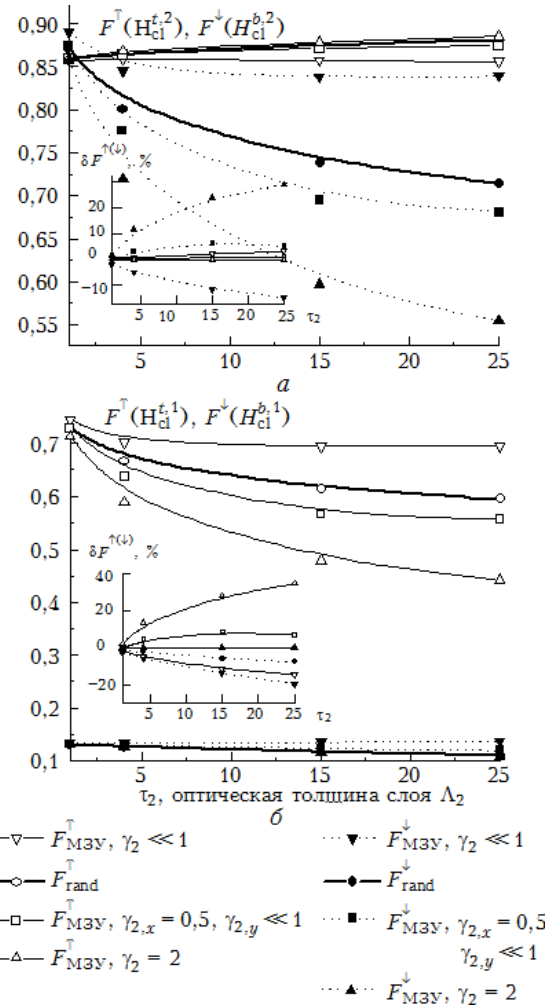


Рис. 2. Средние потоки восходящей и нисходящей радиации и относительное различие $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$ (%) на границах верхнего Λ_2 (а) и нижнего Λ_1 (б) облачных слоев при $N_1 = 1$, $\tau_1 = 40$, $N_2 = 0,5$, $\xi_{\odot} = 75^\circ$, $A_s = 0$ и различных значениях параметра γ_2

Случай 2. Пусть $N_1 < 1$, $N_2 = 1$ (появление сплошного облачного слоя Λ_2 над слоем разорванной облачности Λ_1 равносильно изменению граничных условий для нижележащего слоя облаков и соответствует переходу от мононаправленного источника излучения к диффузному).

Если оптическая толщина верхнего слоя Λ_2 мала, то можно ожидать, что вопрос о соответствии двух методов расчета средних потоков может быть частично решен на основании результатов, полученных ранее в [33]. Рассмотрим две типичные облачные системы (St) – (Ci) и (Cu) – (Ci). Сплошная перистая облачность встречается достаточно часто: значение балла облачности $N \geq 0,8$ характерно для облаков типа Cs в 68% случаев зимой и 44% случаев летом; для облаков типа Cc и Ci – в 20% случаев [30].

При $\gamma_1 \ll 1$ практически во всем диапазоне входных параметров задачи ($10 \leq \tau_1 \leq 40$ и $\xi_{\odot} \leq 75^\circ$) значения $|\delta F^{\uparrow(\downarrow)}| \leq 5\%$, исключая $F^\uparrow(H_{cl}^{t,1})$. Если нижний слой занимают кучевые облака, то различия восходящих потоков на верхней Λ_2 и нижней Λ_1 границах слоя при малых

и средних баллах облачности более существенны: при $\gamma_1 = 2$ $\delta F^\uparrow(H_{cl}^{i,2}) \approx -(10 \div 15\%)$ и $\delta F^\downarrow(H_{cl}^{b,1}) \approx 10 \div 30\%$. При увеличении γ_1 относительное различие средних

потоков восходящей радиации на уровне $z = H_{cl}^{i,1}$ изменяется от $\approx 10 \div 20$ до $\approx -25 - 50\%$ при $N_1 \leq 0,5$ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Потоки излучения $F_{rand}^{\uparrow(\downarrow)}$ и $F_{МЗУ}^{\uparrow(\downarrow)}$ и их относительное различие $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$ (приведено в скобках, %) в двухслойных облачных системах $(St) - (Ci)$ ($\gamma_1 \ll 1$) и $(Cu) - (Ci)$ ($\gamma_1 = 2$) при $N_2 = 1$, $\tau_2 = 1$, $\tau_1 = 40$, $\xi_\odot = 75^\circ$

z	$F^{\uparrow(\downarrow)}$	$N_1 = 0,1$	$N_1 = 0,3$	$N_1 = 0,5$
$z = H_{cl}^{i,2}$	F_{rand}^\uparrow	0,439	0,533	0,627
	$F_{МЗУ}^\uparrow, (St) - (Ci)$	0,427 (2,8)	0,513 (3,9)	0,605 (3,6)
	$F_{МЗУ}^\uparrow, (Cu) - (Ci)$	0,495 (-11)	0,621 (-14)	0,711 (-11)
$z = H_{cl}^{b,1}$	F_{rand}^\downarrow	0,569	0,472	0,374
	$F_{МЗУ}^\downarrow, (St) - (Ci)$	0,584 (-2,5)	0,494 (-4,4)	0,399 (-6,2)
	$F_{МЗУ}^\downarrow, (Cu) - (Ci)$	0,509 (11,8)	0,378 (24,9)	0,285 (31,2)
$z = H_{cl}^{i,1}$	F_{rand}^\uparrow	0,0833	0,201	0,319
	$F_{МЗУ}^\uparrow, (St) - (Ci)$	0,0685 (21,6)	0,174 (15,5)	0,287 (11,1)
	$F_{МЗУ}^\uparrow, (Cu) - (Ci)$	0,158 (-47)	0,313 (-36)	0,425 (-25)
$z = H_{cl}^{b,2}$	F_{rand}^\downarrow	0,649	0,672	0,694
	$F_{МЗУ}^\downarrow, (St) - (Ci)$	0,646 (0,1)	0,665 (1)	0,686 (1,1)
	$F_{МЗУ}^\downarrow, (Cu) - (Ci)$	0,666 (-2,6)	0,697 (-3,6)	0,716 (-3,1)

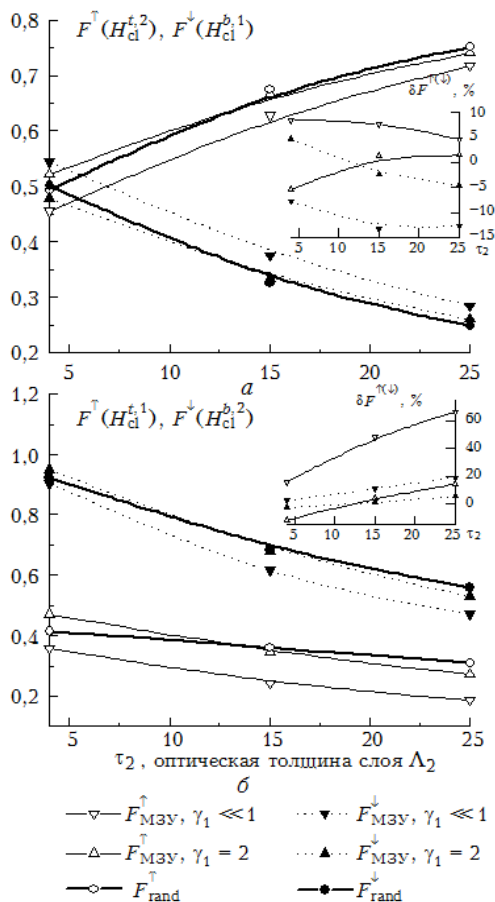


Рис. 3. Средние потоки солнечной радиации и относительное различие $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$ (%) на внешних (а) и внутренних (б) границах двухслойной облачности при $N_1 = 0,5$, $\tau_1 = 40$, $N_2 = 1$, $\xi_\odot = 30^\circ$, $A_s = 0$ и различных значениях параметра γ_1

Пусть оптическая толщина верхнего облачного слоя велика: $\tau_2 = 25$ (облака среднего яруса типа A_s). Восходящий

поток на уровне верхней границы двухслойной облачности $z = H_{cl}^{i,2}$ формируется как за счет излучения, рассеянного только в пределах Λ_2 , так и за счет излучения, которое участвует в радиационном обмене между облачными слоями. Расчеты показывают, что «собственный» вклад слоя Λ_2 в $F^\uparrow(H_{cl}^{i,2})$ велик: так, для параметров, указанных в подписи к рис. 3, он превышает 90%. Следствием этого является хорошее соответствие расчетов $F^\uparrow(H_{cl}^{i,2})$, выполненных разными методами практически во всем диапазоне входных параметров задачи: $|\delta F^\uparrow(H_{cl}^{i,2})| \leq 5\%$ (рис. 3,а). Для промежуточных значений оптической толщины $1 < \tau_2 < 25$ границы изменчивости $|\delta F^\uparrow(H_{cl}^{i,2})|$ увеличиваются до 10%. Отличие нисходящих потоков на нижней границе слоя Λ_1 также находится в разумных пределах: максимальное значение $\delta F^\downarrow(H_{cl}^{b,1})$ составляет $\approx -(10 \div 15)\%$.

Относительные различия потоков на внутренних границах двухслойных облаков $z = H_{cl}^{b,1}$ и $z = H_{cl}^{b,2}$ возрастают до десятков процентов (рис. 3,б), а при малых значениях балла облачности нижнего слоя Λ_1 и оптически плотных облаках в слое Λ_2 достигают 100%.

Пусть верхний и нижний слои занимает частичная облачность: $N_1 < 1$, $N_2 < 1$. Выберем для расчета такие значения N_i , $i = 1, 2$, которые соответствуют характерным значениям балла облачности нижнего, среднего и верхнего ярусов для лета умеренных широт Северного полушария [20]: нижний ярус $0,3 \div 0,5$, средний и верхний ярусы $0,2 \div 0,3$.

Известно, что площадь облаков верхнего яруса почти в 30% случаев превышает площадь 4×10^6 км² и облачность далеко не всегда является сплошной [19]. Поэтому представляет интерес вопрос о соответствии различных методов расчета потоков солнечной радиации в облачных системах, содержащих перистую облачность: $(St) - (Ci)$ и $(Cu) - (Ci)$.

Рассмотрим $F^\uparrow(H_{cl}^{i,2})$ и $F^\downarrow(H_{cl}^{b,1})$ в предположении, что $0 \leq \gamma_1 \leq 4$, а $\gamma_2 \ll 1$ (рис. 4). Для облачной системы $(St) - (Ci)$, параметры которой варьируются в пределах $10 \leq \tau_1 \leq 40$, $30^\circ \leq \xi_\odot \leq 75^\circ$, относительное различие $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$ не превышает 10%. Увеличение параметра γ_1 , т.е. переход

к системе $(Cu)-(Ci)$, по-разному влияет на $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$: если при небольших оптических толщинах кучевых облаков ($\tau_1 = 10$) и малых зенитных углах Солнца ($\xi_{\odot} = 30^\circ$) $\delta F^{\uparrow(\downarrow)} \leq 10\%$, то при $\tau_1 = 40$ и $\xi_{\odot} = 75^\circ$ значения $\delta F^{\uparrow(\downarrow)}$ достигают десятков процентов. Так, при $\gamma_1 = 2$, $N_1 = 0,5$ и $N_2 = 0,3$ значение $F_{\text{rand}}^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ существенно занижено по сравнению с $F_{\text{МЗУ}}^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ [$\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2}) \approx -25\%$], тогда как $F_{\text{rand}}^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ существенно превышает $F_{\text{МЗУ}}^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ [$\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1}) \approx 60\%$].

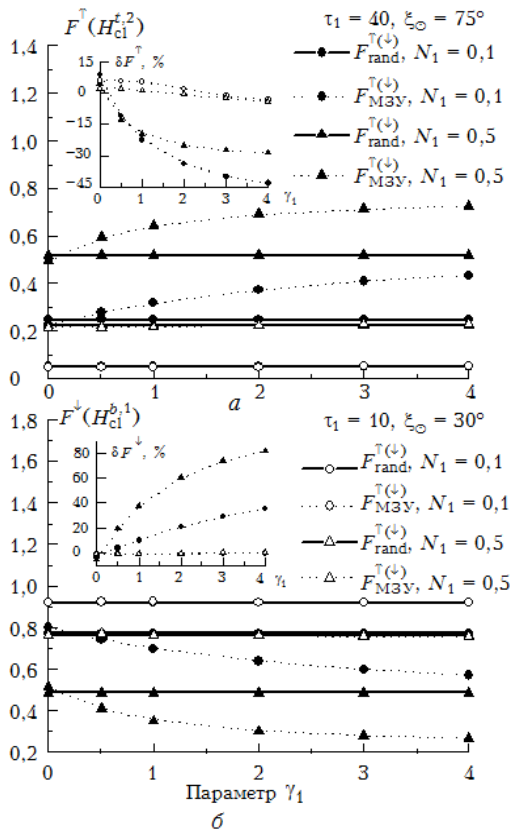


Рис. 4. Зависимость средних потоков $F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ (а) и $F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ (б) в облачной системе $(Cu)-(Ci)$ от параметра γ_1 при $\tau_2 = 1$, $N_2 = 0,3$, $\gamma_2 \ll 1$, $A_s = 0$ и различных параметрах нижнего облачного слоя и условиях освещенности

Расчеты показывают, что вариации параметра γ_2 , т.е. моделирование облаков верхнего яруса в виде полос или параллелепипедов при условии, что $\gamma_2 \leq 2$, не приводят к существенным изменениям $\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ и $\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$, как в системе $(St)-(Ci)$, так и в системе $(Cu)-(Ci)$.

Сравним $F_{\text{МЗУ}}^{\uparrow(\downarrow)}$ и $F_{\text{rand}}^{\uparrow(\downarrow)}$ в облачных системах $(St)-(As)$ и $(Cu)-(As)$. Будем считать, что верхний слой занимают облака типа As , которые являются, как правило, менее оптически плотными по сравнению с облаками типа As . Наш выбор обусловлен тем, что высококучевые облака появляются при разнообразных макроскопических процессах в атмосфере и поэтому встречаются достаточно часто.

Если облака нижнего яруса (St или Cu) имеют сравнительно небольшую оптическую толщину ($\tau_1 = 10$), то при зенитных углах Солнца $\xi_{\odot} \leq 30^\circ$ независимо от значения γ_2 $\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ и $\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ не превышают 5% (рис. 5). С увеличением τ_1 и ξ_{\odot} зависимость $\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ и $\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ от структуры

облачных полей верхнего слоя, определяемой параметром γ_2 , становится сильнее. Так, в системе $(St)-(As)$ увеличение γ_2 от 0 до 2 приводит к изменению $\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ от ≈ 10 до $\approx -10\%$, а $\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ соответственно от ≈ -10 до $\approx 20\%$. Если слой Λ_1 занят кучевыми облаками, то чувствительность $\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ и $\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ к структуре верхнего облачного слоя уменьшается. Относительное различие между средними потоками, рассчитанными приближенным методом и МЗУ, растет: при $\gamma_1 = 2$ $\delta F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ достигает $\approx -20\%$, а $\delta F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1}) \approx 40-50\%$.

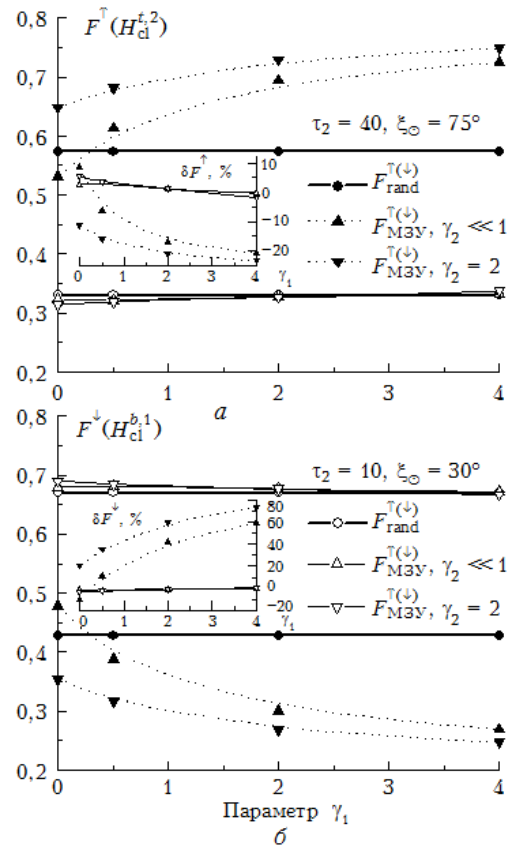


Рис. 5. Зависимость средних потоков $F^{\uparrow}(H_{\text{cl}}^{f,2})$ (а) и $F^{\downarrow}(H_{\text{cl}}^{b,1})$ (б) в облачной системе $(Cu)-(Ac)$ от параметра γ_1 при $\tau_2 = 15$, $N_2 = 0,3$, $N_1 = 0,5$, $A_s = 0$ и различных параметрах нижнего облачного слоя и условиях освещенности

5. Заключение

Для расчета средних потоков солнечной радиации в двухслойной разорванной облачности использованы два метода: приближенный (в предположении о случайном перекрытии облачных слоев) и метод замкнутых уравнений, основанный на решении методом Монте-Карло системы уравнений для средней интенсивности. МЗУ позволяет учесть не только стохастическую структуру облаков, но и более точно (по сравнению с приближенным) описать радиационное взаимодействие между слоями разорванной облачности.

Расчеты выполнены для оптико-геометрических параметров облачных систем $(St)-(Ci)$, $(St)-(As)$, $(Cu)-(Ci)$, $(Cu)-(As)$ и вертикального распределения балла облачности [19, 20], характерных для умеренных широт Северного полушария. Показано, что относительные различия

восходящих потоков на верхней Λ_2 и нисходящих на нижней границе слоя Λ_1 в облачной системе $(St) - (Ci)$ не превосходят, как правило, 5–10%. Если верхний слой Λ_2 занимают жидкокапельные облака средней оптической толщины $((St) - (As), 4 \leq \tau_2 \leq 25)$, то при увеличении параметров τ_1 от $\tau_1 = 10$ до $\tau_1 = 40$ и ξ_{\odot} от $\xi_{\odot} = 30^\circ$ до $\xi_{\odot} = 75^\circ$ значения $|\delta F^\uparrow(H_{cl}^{t,2})|$ и $|\delta F^\downarrow(H_{cl}^{b,1})|$ могут возрасти до $\approx 20\%$. В облачных системах $(Cu) - (Ci)$, $(Cu) - (As)$ средние потоки $F^\uparrow(H_{cl}^{t,2})$ и $F^\downarrow(H_{cl}^{b,1})$ достаточно слабо зависят от методов расчета, когда оптическая толщина облачного слоя Λ_1 сравнительно невелика ($\tau_1 = 10$) и $\xi_{\odot} \leq 30^\circ$: $|\delta F^\uparrow(H_{cl}^{t,2})|$ и $|\delta F^\downarrow(H_{cl}^{b,1})|$ не выходят за пределы 5% (редко 10%). Возрастание оптической толщины облачных слоев и зенитного угла Солнца увеличивает разницу средних потоков. Так, использование приближенного метода может привести к занижению $F^\uparrow(H_{cl}^{t,2})$ и завышению $F^\downarrow(H_{cl}^{b,1})$ по сравнению с методом замкнутых уравнений на 25–30 и 50–60% соответственно. Относительные различия потоков излучения на уровнях $z = H_{cl}^{t,1}$ и $z = H_{cl}^{b,2}$ в зависимости от параметров облаков могут достигать десятков (и даже сотен) процентов во всех рассмотренных нами системах двухслойной облачности.

1. Баранов А.М. Облака и безопасность полетов. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 231 с.
2. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 213 с.
3. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих средах. Стандартные методы расчета / Под ред. Ж. Ленобль. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 263 с.
4. Tiedtke M., Geleyn J.-F., Hollingsworth A.J., Louis J.F. ECMWF model parameterization of subgrid scale processes // ECMWF Techn. Rep. 1979. N 10. 46 p.
5. Дегтярев А.И., Катаев В.В., Круглова Е.Н., Погребенко Л.Д., Тросников И.В. Особенности исследовательского варианта базовой спектральной модели Гидрометцентра СССР // Тр. ГМЦ. 1990. Вып. 304. С. 45–57.
6. Курбаткин Г.П. и др. Модель среднесрочного прогноза погоды // Докл. АН СССР. 1987. Т. 294. Вып. 2. С. 321–324.
7. Мелешко В.П. и др. Модель атмосферы и верхнего слоя океана для исследования климата и долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 1991. N 5. С. 5–14.
8. Галин В.Я. Схема учета разорванной облачности в атмосферной модели ИВМ РАН // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 3. С. 246–250.

9. Глобальное поле облачности / Под ред. Л.Т. Матвеева. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 279 с.
10. Воробьев В.И., Фадеев В.С. Характеристики облачного покрова Северного полушария по данным метеорологических спутников. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 172 с.
11. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 240 с.
12. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 512 с.
13. Берлянд Т.Г., Строкина Л.А. Режим облачности на земном шаре. Физическая климатология // Труды ГГО. 1974. Вып. 388.
14. Hughes N.A. Global cloud climatologies: A historical review // J. Climate Appl. Meteorol. 1984. V. 23. P. 724–751.
15. Берлянд Т.Г., Строкина Л.А., Грешиникова Л.Е. Зональное распределение количества облаков на земном шаре // Метеорология и гидрология. 1980. N 3. С. 15–23.
16. Берлянд Т.Г., Строкина Л.А. Глобальное распределение общего количества облачности. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 71 с.
17. Авасте О.А., Кярнер О.Ю., Кэваллик С.Х. О количестве облаков в зоне 45° с.ш. – 45° ю.ш. над земным шаром // Метеорология и гидрология. 1981. N 7. С. 54–60.
18. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 311 с.
19. Облака и облачная атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.
20. Мелешко В.П. // Метеорология и гидрология. 1980. N 9. С. 12–23.
21. Титов Г.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1985. Т. 29. N 9. С. 940–948.
22. Titov G.A. // J. Atm. Sci. 1990. V. 47. P. 24–38.
23. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.
24. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 298 с.
25. Скоринов В.Н., Титов Г.А. // Методы и алгоритмы статистического моделирования. Новосибирск: ВЦ СОАН СССР, 1983. С. 91–99.
26. Скоринов В.Н., Титов Г.А. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1983. Т. 26. N 8. С. 971–980.
27. Morcrette J.-J., Fouquart Y. // JAS. 1986. V. 43. N 4. P. 321–328.
28. Мохов И.И., Скроцкая О.П., Остапенко И.Г. // Изв. АН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 4. С. 558–563.
29. Радиация в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 280 с.
30. Радиационные свойства перистых облаков / Под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. 224 с.
31. Takano Y., Kuo-Nan Liou // JAS. 1989. V. 1989. N 1. P. 3–19.
32. Титов Г.А., Касьянов Е.И. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 10. С. 1108–1114.
33. Скоринов В. Н., Титов Г.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. N 3. С. 263–270.

G.A. Titov, T.B. Zhuravleva. Comparison of Two Methods for Calculating Solar Radiative Fluxes in Two-layer Broken Clouds (Visible Range).

Mean fluxes of solar radiation at different atmospheric levels are calculated by two different methods: (1) approximate method (under assumption of random cloud overlap) and (2) method of closed equations based on the Monte-Carlo solution of equations for mean intensity in two-layer broken clouds. Calculations are made for characteristic parameters of typical cloud systems $(St) - (As)$, $(St) - (Ci)$, $(Cu) - (As)$, $(Cu) - (Ci)$ at midlatitudes of the Northern Hemisphere. It is shown that, depending on the geometrical cloud parameters, the relative difference in upward and downward radiative fluxes between calculation techniques may reach tens of a percent.