

Е.И. Касьянов, Г.А. Титов, Д.А. Зимин

ПОЛЕ ЯРКОСТИ ОТРАЖЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В УСЛОВИЯХ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ. Ч. II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Рассматривается перенос солнечной радиации в трехслойной облачно-аэрозольной атмосфере, расположенной над отражающей по закону Ламберта подстилающей поверхностью. Исследована зависимость математического ожидания и дисперсии интенсивности отраженной солнечной радиации, модулируемой разорванной облачностью, от оптических параметров облаков, типа облачности, зенитного угла Солнца и альbedo подстилающей поверхности. Показано, что эффекты, связанные со случайной геометрией облачного поля, могут приводить не только к значительным количественным, но и качественным отличиям математического ожидания и дисперсии интенсивности в кучевых и слоистых облаках.

В [1] разработаны алгоритмы метода Монте-Карло для расчета среднего значения и корреляционной функции интенсивности отраженной солнечной радиации в трехслойной облачно-аэрозольной атмосфере, расположенной над отражающей по закону Ламберта подстилающей поверхностью (ПП). В данной статье с помощью разработанных алгоритмов [1] исследуется зависимость математического ожидания и дисперсии интенсивности отраженной солнечной радиации от типа облачности, оптических параметров облаков, зенитного угла Солнца и альbedo ПП.

Предполагалось, что верхняя граница атмосферы находится на высоте 20 км и совпадает с высотой расположения приемника. Выше высоты 20 км коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния очень малы и ими можно пренебречь. Оптические толщины ($\tau_{a,1}$, $\tau_{a,2}$) и вероятности выживания кванта ($\lambda_{a,1}$, $\lambda_{a,2}$) подоблачного (Λ_1) и надоблачного (Λ_2) аэрозольных слоев соответствовали фоновой модели континентального аэрозоля [2] и составляли $\tau_{a,1} = 0,1$; $\tau_{a,2} = 0,02$ и $\lambda_{a,1} = \lambda_{a,2} = 0,879$. Результаты расчетов выполнены для длины волны 0,69 мкм. Индикатриса рассеяния аэрозольных слоев соответствовала дымке L [3], а облачная индикатриса рассеяния – облаку C_1 [3].

Расчеты выполнялись для единичного параллельного потока солнечной радиации, поступающего на верхнюю границу атмосферы. Направление падающих солнечных лучей определялось зенитным ξ_{\oplus} и азимутальным $\varphi_{\oplus} = 0^\circ$ углами. Приемник имел угол поля зрения $\alpha = 10^{-3}$ рад, и его оптическая ось определялась в пространстве зенитным θ и азимутальным φ углами. Абсолютные значения можно получить, если умножить результаты расчетов на $S_{\lambda} \cos \xi_{\oplus}$, где S_{λ} – спектральная солнечная постоянная. В видимой области спектра оптические характеристики облаков слабо зависят от длины волны, поэтому численные результаты могут быть использованы для оценки статистики отраженного солнечного излучения в пределах достаточно широкого спектрального интервала.

Статистические характеристики видимой солнечной радиации рассчитывались одновременно для набора зенитных $\theta = 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80^\circ$ и азимутальных $\varphi = 0; 30; 60; 90; 120; 150; 180^\circ$ углов, а также для значений альbedo поверхности $A_s = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,9$. Альbedo всех земных поверхностей (от океана до свежеснежного снега) содержится в этом диапазоне значений. Поскольку радиационное поле симметрично относительно плоскости солнечного вертикала, можно ограничиться значениями $0 \leq \varphi \leq 180^\circ$. Ошибка вычислений большинства результатов расчетов составляла 1 – 5%.

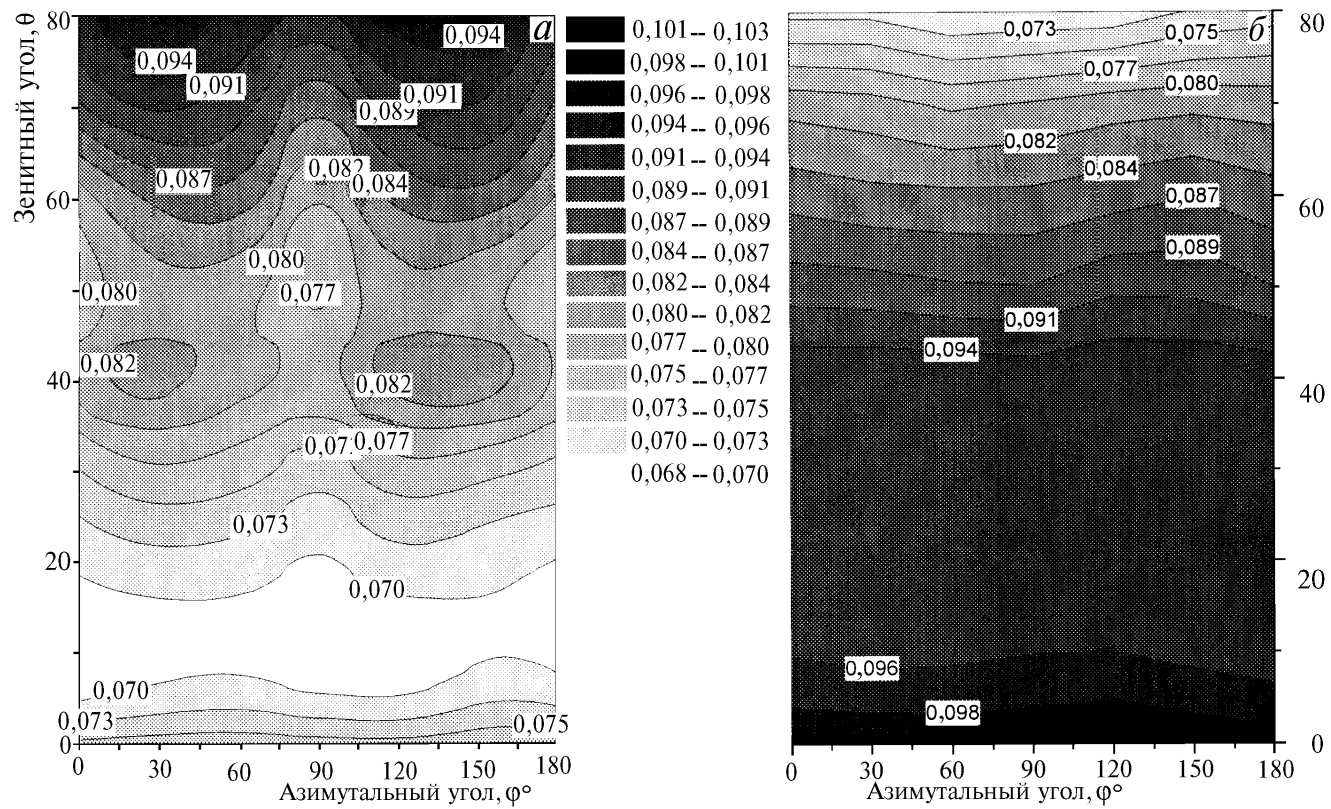


Рис. 1. Среднее поле яркости отраженной солнечной радиации при $\xi_{\oplus} = 0^\circ$; $N = 0,5$; $\sigma = 30 \text{ км}^{-1}$; $H = 0,5 \text{ км}$, $A_s = 0$; a – кучевые облака ($\gamma = 1$), b – слоистые облака ($\gamma = 0$)

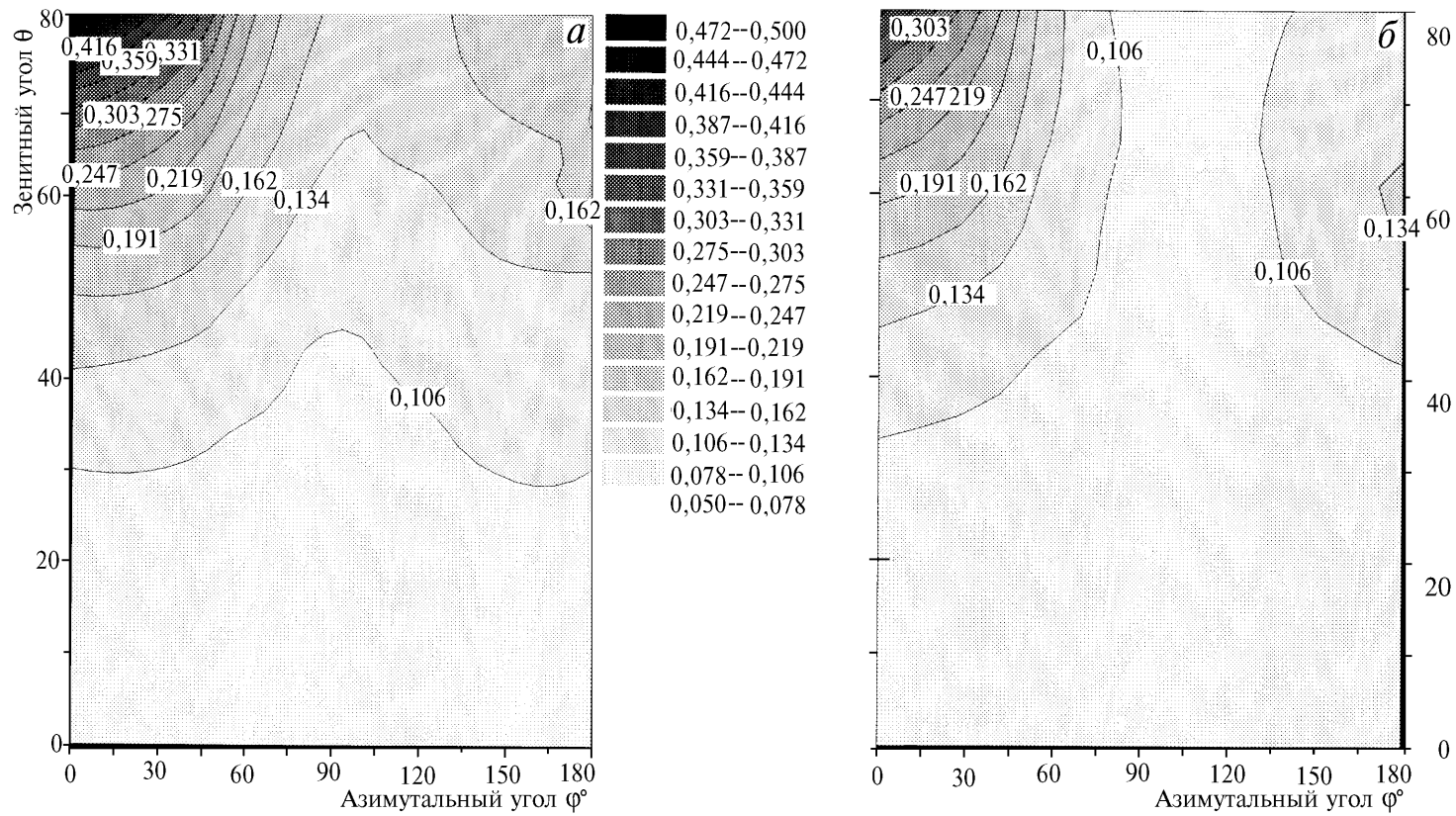


Рис. 2. Среднее поле яркости отраженной солнечной радиации при $\xi_{\oplus} = 60^\circ$; $N = 0,5$; $\sigma = 30 \text{ км}^{-1}$; $H = 0,5 \text{ км}$, $A_s = 0$; *a* – кучевые облака ($\gamma = 1$), *б* – слоистые облака ($\gamma = 0$)

Средняя интенсивность отраженной солнечной радиации, модулируемой кучевой $\langle I_{Cu} \rangle$ и эквивалентной слоистой $\langle I_{St} \rangle$ облачностью, представлена на рис. 1. Здесь и далее под эквивалентностью понимается следующее: поля кучевых и слоистых облаков имеют одинаковые оптические и геометрические характеристики и отличаются единственным параметром $\gamma = H/D$, значение которого для кучевых облаков порядка 1, а для слоистых не превышает $10^{-2} - 10^{-3}$ [4], где H – толщина облачного слоя. В расчетах используется модель облачного поля, генерируемого пуассоновским потоком точек на прямых. Такое облачное поле является статистически однородным и неизотропным, а основанием облака является в среднем квадрат. Последнее означает, что в плоскости XOY оптические характеристики облаков обладают в среднем зеркальной симметрией относительно прямой, проходящей через произвольную точку в направлении с азимутальным углом $\varphi = 0, \pm 45, 90^\circ$. Очевидно, что при $\xi_\oplus = 0$ этой же симметрией должно обладать и среднее радиационное поле. Справедливость этого утверждения подтверждается результатами, представленными на рис. 1, а. При $\xi_\oplus = 0$ $\langle I_{St} \rangle$ в горизонтально однородной слоистой облачности не зависит от азимутального угла визирования φ (рис. 1, б); незначительные отличия обусловлены погрешностью вычислений. Обратим внимание на то, что $\langle I_{St} \rangle$ имеет максимальные значения при зенитном угле наблюдения $\theta \sim 0^\circ$ и убывает с увеличением θ , тогда как для кучевых облаков справедливо обратное. Это означает, что $\langle I_{St} \rangle$ и $\langle I_{Cu} \rangle$ могут иметь различные качественные зависимости от θ .

При малых зенитных углах Солнца средние потоки прямой радиации практически не зависят от типа облаков. Из-за сильной вытянутости вперед индикатрисы рассеяния излучение, выходящее через боковые стороны кучевых облаков, дает основной вклад в пропускание, поэтому для отраженной радиации неравенство $\langle I_{Cu} \rangle < \langle I_{St} \rangle$ выполняется для большинства зенитных углов наблюдения θ (при заданных параметрах задачи для $\theta < 60^\circ$) (рис. 1). При больших ξ_\oplus падающая солнечная радиация ослабляется боковыми сторонами кучевых облаков, поэтому средний поток нерассеянной радиации в кучевых облаках может быть значительно меньше, чем в эквивалентных слоистых, а для диффузных потоков справедливо обратное. По этой причине для $\xi_\oplus = 60^\circ$ может выполняться неравенство $\langle I_{Cu} \rangle > \langle I_{St} \rangle$ (рис. 2).

Известно, что средняя интенсивность $\langle I_{St} \rangle$ линейно зависит от балла облачности N , т. е. при вариациях N значения $\langle I_{St} \rangle$ отличаются на величину, которая не зависит от θ (рис. 3, а, б). В случае же кучевых облаков $\langle I_{Cu} \rangle$ нелинейно зависит от N и эта нелинейность весьма чувствительна к θ . Средняя интенсивность $\langle I_{Cu} \rangle$ наиболее чувствительна к вариациям N при малых значениях N и больших θ , где частная производная $\partial \langle I_{Cu} \rangle / \partial N$ достигает максимальных значений. Для слоистых облаков дисперсия D_{St} симметрична относительно $N = 0,5$, а величина максимума сильно зависит от угла наблюдения (рис. 3, в, г). Дисперсия интенсивности в кучевых облаках D_{Cu} значительно меньше, чем D_{St} в слоистых. Это объясняется тем, что в любой выборочной реализации поля кучевых облаков приемник с конечной угловой апертурой регистрирует излучение, приходящее не только от вершины, но и от боковой поверхности отдельных облаков, поэтому флуктуации радиационного поля в среднем уменьшаются. Для малых θ максимум D_{Cu} находится в области $N \sim 0,5$ и при увеличении θ этот максимум смещается в сторону меньших значений балла облачности. Такое смещение положения максимума D_{Cu} связано с тем, что влияние боковых сторон кучевых облаков на перенос радиации также зависит от угла наблюдения.

Излучение, отраженное от поверхности, может рассеиваться облаками, и значительная его часть отражается назад к поверхности. Некоторая часть этого излучения распространяется в просветах (<дырах>) между облаками и из-за малой оптической толщины аэрозольной атмосферы может давать заметный вклад в поле яркости солнечной радиации, отраженной системой <атмосфера – поверхность>. Из простых геометрических представлений следует, что этот вклад будет наиболее существенным в области углов наблюдения вблизи зенита. Размеры области будут увеличиваться с уменьшением балла облачности и увеличением горизонтальных размеров облаков, поскольку при этом возрастает в среднем телесный угол, под которым виден с поверхности просвет (<дыра>) между облаками. Результаты, представленные на рис. 4, подтверждают вышесказанное. Действительно, при $\varphi = 0^\circ$ увеличение A_s от 0 до 0,9 обуславливает

возрастание средней интенсивности в направлении $\theta = 30^\circ$ приблизительно в 2 раза, тогда как при $\theta = 80^\circ$ увеличение средней интенсивности составляет лишь $\sim 10\%$. Излучение, отраженное от поверхности, несколько сглаживает контраст яркости между облаками и просветами (<дырами>), поэтому дисперсия уменьшается с увеличением A_s . Очевидно, что вклад излучения, n раз отраженного от поверхности, будет пропорционален величине

$$A_s^n \bar{Q} \bar{A}_d^{n-1}, \quad (1)$$

где \bar{Q} – среднее пропускание суммарной солнечной радиации на уровне поверхности (до отражения); \bar{A}_d – альbedo атмосферы при условии, что на ее нижнюю границу падает поток диффузной радиации, отраженной от поверхности. Поскольку \bar{Q}_n и \bar{A}_d зависят от типа облачности, то влияние ПП на формирование поля яркости может быть различным для систем, содержащих кучевую и эквивалентную слоистую облачности. Например, для $\varphi = 180^\circ$ и всех значений θ ($\langle I_{St} \rangle$) имеет более сильную зависимость от A_s по сравнению с ($\langle I_{Cu} \rangle$) (рис. 4, б). Согласно (1) вклад излучения, отраженного от ПП, будет резко уменьшаться с увеличением порядка отражения n и зависимость статистических характеристик излучения от альbedo поверхности будет близка к линейной (рис. 4). По этой причине качественная картина радиационного поля не будет сильно зависеть от альbedo поверхности и в дальнейшем мы ограничимся случаем $A_s = 0$. Излучение, отраженное от поверхности, несколько сглаживает контраст яркости между облаками и просветами (<дырами>), поэтому дисперсия уменьшается с увеличением A_s .

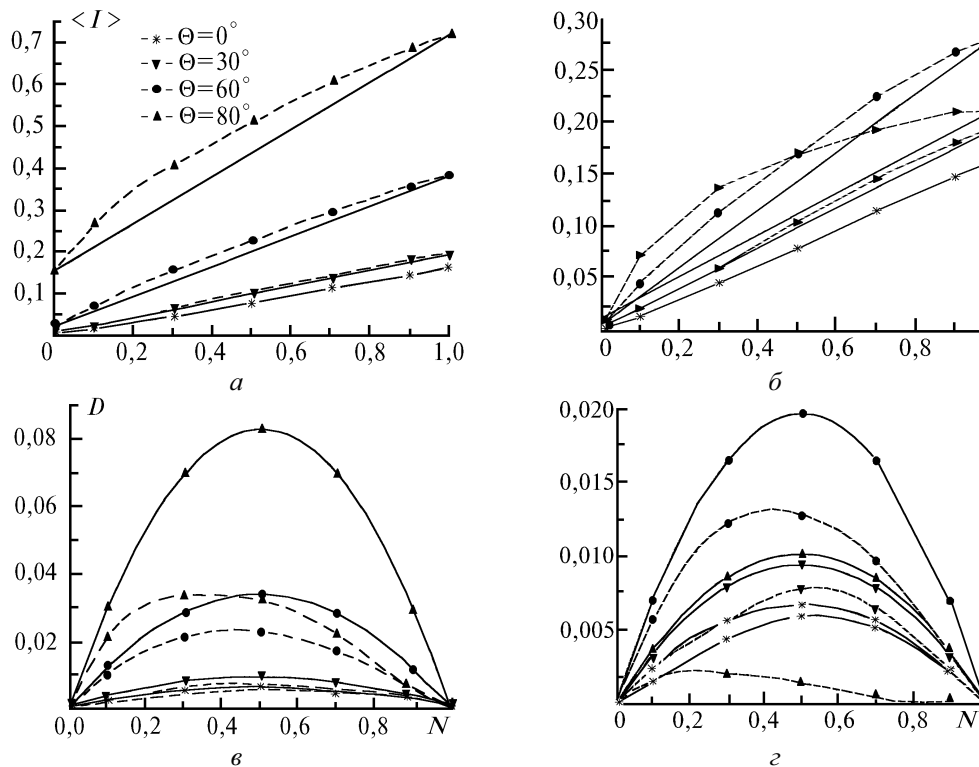


Рис. 3. Зависимость среднего значения ($a, б$) и дисперсии ($в, з$) интенсивности отраженной солнечной радиации от балла облачности N при $\sigma = 30 \text{ км}^{-1}$, $H = 0,5 \text{ км}$, $D = 0,5 \text{ км}$, $A_s = 0$ и различных зенитных θ и азимутальных φ углах наблюдения; a и $б$ – $\varphi = 0^\circ$; $в$ и $з$ – $\varphi = 180^\circ$. Здесь и на рис. 4 – $7 \xi_{\oplus} = 60^\circ$, сплошные линии соответствуют слоистым, а штриховые линии – кучевым облакам

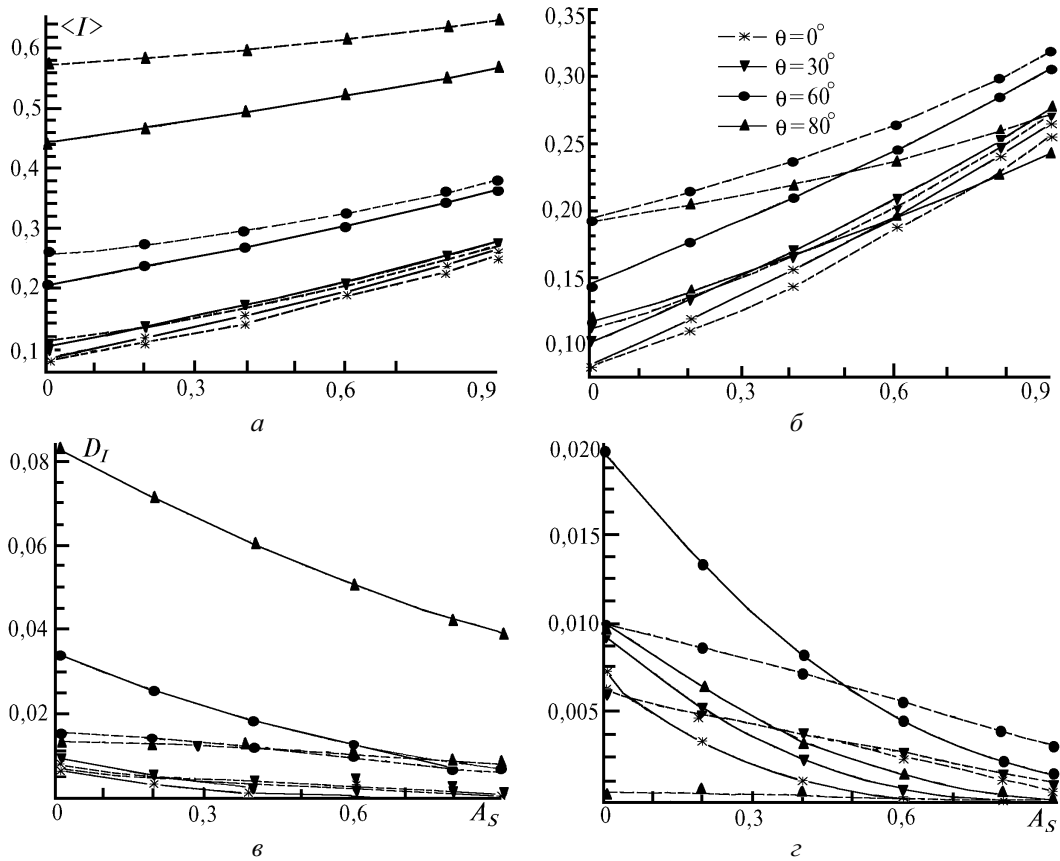


Рис. 4. Влияние альbedo подстилающей поверхности A_s на среднее (a , b) и дисперсию (v , z) интенсивности отраженной солнечной радиации при $N=0,5$; $\sigma=30 \text{ км}^{-1}$; $H=0,5 \text{ км}$, $D=0,25 \text{ км}$ и различных зенитных θ и азимутальных φ углах наблюдения; a и $v - \varphi = 0^\circ$; b и $z - \varphi = 180^\circ$

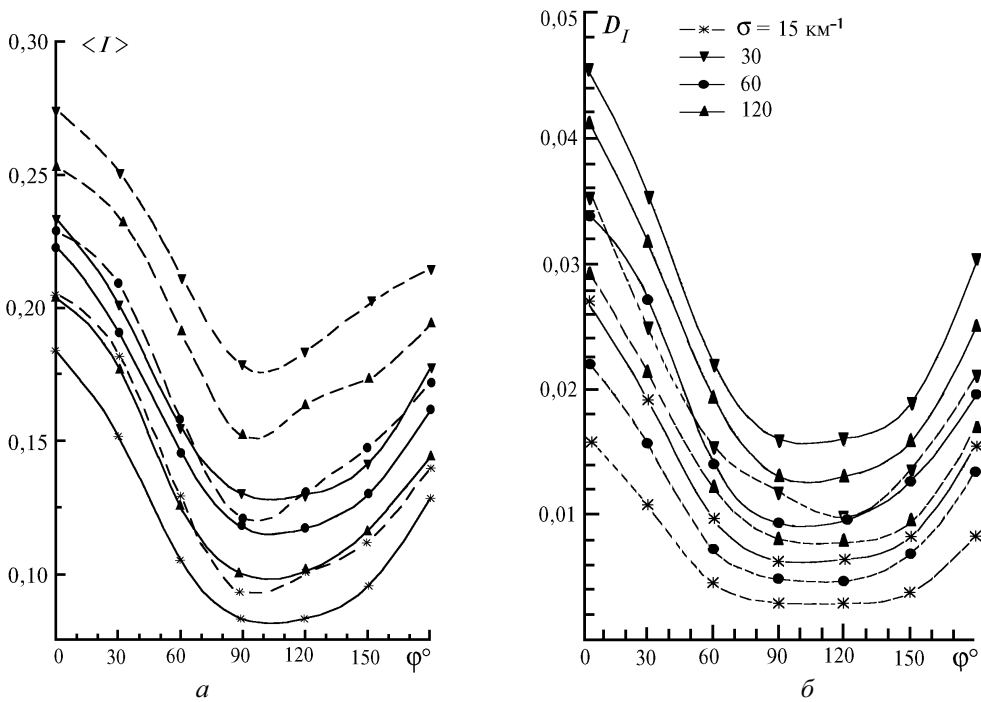


Рис. 5. Зависимость среднего значения (a) и дисперсии (b) интенсивности отраженной солнечной радиации от азимутального угла наблюдения φ при $N = 0,5$; $H = 0,5 \text{ км}$; $D = 0,5 \text{ км}$; $A_s = 0$; $\theta = 60^\circ$ и различных значениях коэффициента ослабления σ

При возрастании коэффициента ослабления σ от 15 до 120 км⁻¹ средние интенсивности $\langle I_{Cu} \rangle$ и $\langle I_{Sl} \rangle$ увеличиваются приблизительно в 1,5 – 2 раза (рис. 5), что имеет достаточно простое и известное объяснение. Подобное увеличение средних интенсивностей можно получить при возрастании балла облачности на ~0,1 – 0,2 (рис. 3). Следовательно, средние интенсивности гораздо более чувствительны к вариациям балла облачности, чем коэффициента ослабления. С возрастанием коэффициента ослабления увеличивается разность между интенсивностями отраженной солнечной радиации, приходящей от облаков и просветов между облаками, поэтому дисперсия интенсивности увеличивается как для кучевых, так и для слоистых облаков.

В настоящее время накоплено большое количество статистической информации о микроструктуре облаков и существует ряд облачных моделей, различающихся не только параметрами, но и формой функции распределения облачных капель по размерам. В связи с этим возникает вопрос: насколько сильно выбор облачной модели влияет на радиационные характеристики кучевых и слоистых облаков?

В нашей статье рассматриваются три облачные модели, различающиеся параметрами модифицированного распределения $n(r)$. Параметры моделей представлены в таблице, где r_{eq} и r_{mean} являются эквивалентным и средним радиусами, N_0 и w – среднее значение концентрации капель и водность соответственно. Облачные модели C_1 и C_3 взяты из [3], в то время как модель C_6 – из [5].

В видимой области спектра коэффициент ослабления σ и r_{eq} связаны соотношением [6]

$$\sigma = 3 w / 2 \rho r_{eq}, \quad (2)$$

где ρ – плотность воды, г/м³ и

$$r_{eq} = \int_0^{\infty} n(r) r^3 dr / \int_0^{\infty} n(r) r^2 dr. \quad (3)$$

Облачная модель	a	α	γ	r_m , МКМ	r_{eq} , МКМ	r_{mean} , МКМ	N_0 , см ⁻³	w , г/м ³
C_1	2,373	6	1	4	6,0	4,7	100	0,0625
C_3	5,5556	8	3	2	2,2	2	100	0,00377
C_6	0,0005	2	1	20	49,4	29,1	1	0,251

Из (2) и таблицы следует, что при фиксированной водности коэффициенты ослабления, соответствующие различным облачным моделям, могут отличаться более чем в двадцать раз. Индикатрисы рассеяния, вычисленные для длины волны 0,69 мкм по теории Ми, могут также иметь значительные различия. Например, для нулевого угла рассеяния значения индикатрисы рассеяния могут различаться более чем на два порядка.

Оценим прежде всего влияние индикатрисы рассеяния (коэффициент ослабления и, следовательно, оптическая толщина фиксированы) на поле яркости отраженной солнечной радиации. С увеличением вытянутости вперед индикатрисы рассеяния средняя интенсивность возрастает для больших значений углов наблюдения θ и уменьшается для направлений визирования θ , близких к надиру (рис. 6). При заданных параметрах задачи многократное рассеяние не способно полностью сгладить индикатрисные эффекты, поэтому среднее и дисперсия интенсивности как при кучевых, так и при слоистых облаках достаточно чувствительны к вариациям индикатрисы рассеяния.

При фиксированной водности изменения в среднем значении и дисперсии интенсивности определяются вариациями как индикатрисы рассеяния, так и коэффициента ослабления (оптической толщины). Существенное уменьшение (более чем в 20 раз) оптической толщины облаков, вызванное ростом r_{eq} , приводит к значительному уменьшению средней интенсивности отраженной солнечной радиации (рис. 7). Видно, что учет микрофизических свойств облаков может приводить к существенным изменениям статистических характеристик интенсивности отраженной солнечной радиации, что необходимо учитывать, например, при интерпретации спутниковых данных о радиационном бюджете облачных полей. Поскольку потоки излучения являются функционалами от средней интенсивности, то при параметризации радиационных свойств облаков в моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА) в качестве основных параметров необходимо использовать не только балл облачности и водность, но и характер

ный размер облачных капель. Отметим, что присутствие в облаках очень крупных капель (с радиусом больше 40 – 50 мкм), способно значительно уменьшить количество отраженной солнечной радиации не только в видимой, но и в ближней ИК-области спектра [7].

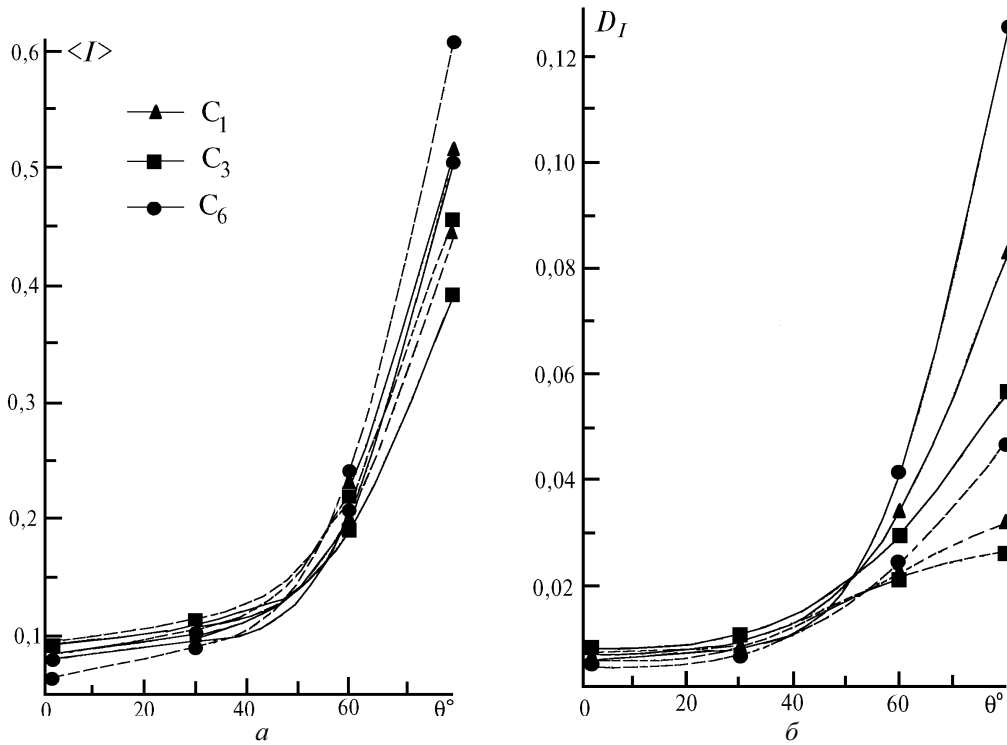


Рис. 6. Зависимость среднего значения (а) и дисперсии (б) интенсивности отраженной солнечной радиации от зенитного угла наблюдения θ и индикатрисы рассеяния, соответствующей облачным моделям C_1 , C_3 и C_6 при $N = 0,5$; $\sigma = 30 \text{ км}^{-1}$; $H = 0,5 \text{ км}$; $D = 0,5 \text{ км}$; $A_s = 0$; $\varphi = 0^\circ$

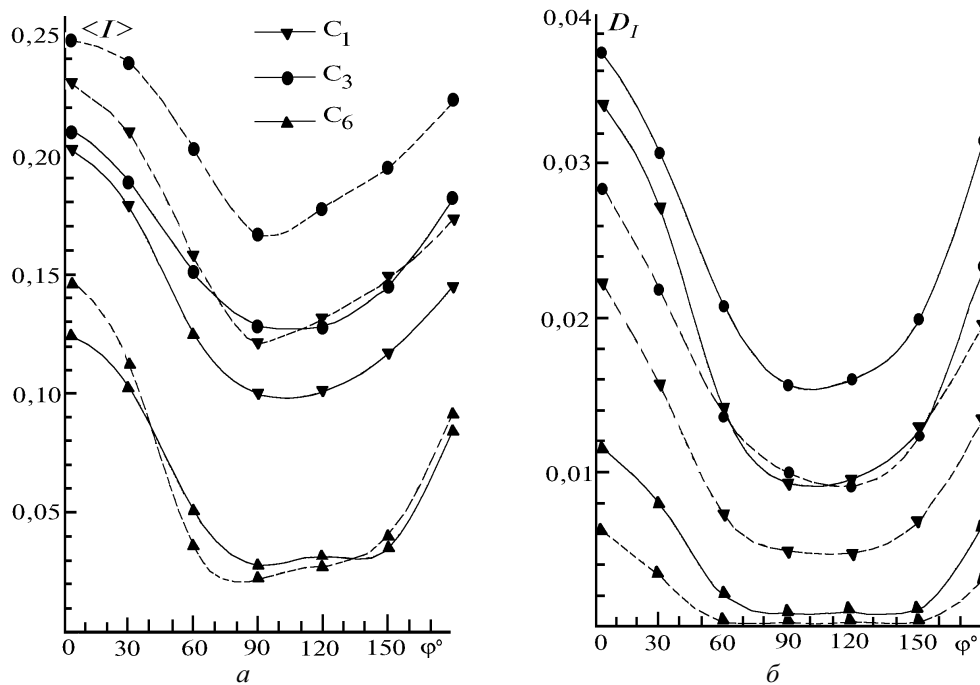


Рис. 7. Зависимость среднего значения (а) и дисперсии (б) интенсивности отраженной солнечной радиации от азимутального угла наблюдения φ при фиксированной водности $w = 0,12 \text{ г/м}^3$; $N = 0,5$; $H = 0,5 \text{ км}$; $D = 0,5 \text{ км}$; $A_s = 0$; $\theta = 60^\circ$ и различных параметрах модифицированного гамма-распределения

С уменьшением средней оптической толщины и увеличением вытянутости вперед индикатрисы рассеяния (переход от модели C_3 к модели C_6) возрастает пропускание облачного слоя и, следовательно, усиливается влияние подоблачного оптически наиболее плотного аэрозоля и ПП на формирование поля яркости отраженной солнечной радиации. Поскольку для заданных параметров задачи вклад подоблачного аэрозольного слоя в среднюю интенсивность отраженного света соизмерим с соответствующим вкладом слоистых и кучевых облаков в модели C_6 , то дисперсии интенсивности близки к нулю.

Заключение. Исследована зависимость математического ожидания и дисперсии интенсивности отраженной солнечной радиации, модулируемой кучевой и эквивалентной слоистой облачностью, от оптических параметров облаков, зенитного угла Солнца и альbedo подстилающей поверхности. Эквивалентность понимается в том смысле, что указанные выше типы облачности имеют одинаковые оптические и геометрические характеристики и отличаются лишь средним горизонтальным размером облаков. Показано, что эффекты, связанные со случайной геометрией облачного поля, могут приводить не только к значительным количественным, но и качественным отличиям математического ожидания и дисперсии интенсивности в кучевых и слоистых облаках.

К основным параметрам, определяющим перенос солнечной радиации, следует отнести балл облачности и средний (характерный) горизонтальный размер облаков. Средняя интенсивности изменяется в 1,5 – 2 раза при вариациях балла облачности на величину 0,1 – 0,2 или изменении коэффициента ослабления (оптической толщины) приблизительно в восемь раз. Это означает, что частная производная средней интенсивности по баллу облачности $\partial \langle I \rangle / \partial N$ приблизительно на 2 – 3 порядка больше, чем $\partial \langle I \rangle / \partial \sigma$. Отметим, что $\partial \langle I \rangle / \partial D$ совпадает по порядку величины с $\partial \langle I \rangle / \partial N$ [8].

При малых значениях альbedo подстилающей поверхности средняя интенсивность кучевых облаков остается чувствительной к особенностям индикатрисы рассеяния даже при достаточно больших значениях коэффициента ослабления (оптической толщины). Поэтому угловые распределения солнечной радиации, отраженной полем кучевых облаков, существенно анизотропны и, вообще говоря, не описываются какой-либо простой зависимостью. С увеличением альbedo подстилающей поверхности уменьшается зависимость среднего значения и дисперсии интенсивности от оптических параметров облаков, зенитного угла Солнца и типа облачности.

Среднее значение и дисперсия интенсивности кучевых облаков весьма чувствительны к изменениям микрофизических параметров облаков (облачной модели). При фиксированной водности математическое ожидание и дисперсия интенсивности могут уменьшиться приблизительно на порядок (более чем в восемь раз) при увеличении эквивалентного радиуса облачных капель от 2,2 мкм до 49,4 мкм. Это обстоятельство необходимо учитывать, например, при интерпретации данных дистанционного оптического зондирования облачной атмосферы.

Эта работа частично субсидирована DOE's ARM Program, контракт N 350114 – A – Q1.

1. К а с ь я н о в Е.И., Т и т о в Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 9. С. 1165–1174.
2. А т м о с ф е р а : Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
3. Д е й р м е н д ж а н Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 290 с.
4. О б л а к а и облачная атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
5. Welch R.M., Cox S.K., Davis J.M. // AMS Met. Monogr. 1980. V. 17. N. 39. 96 p.
6. К о н д р а т ь е в К.Я., Б и н е н к о В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
7. Wiscombe W.J., Welch R.M., Hall W.D. // J. Atmos. Sci. 1984. V. 41. N 8. P. 1336 – 1355.
8. Ж у р а в л е в а Т.Б., Т и т о в Г.А. // Исследование Земли из космоса. 1989. N 5. С. 81 – 87.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
25 апреля 1994 г.

E.I. Kas'yanov, G.A. Titov, D.A. Zimin Field of the Reflected Solar Radiation Radiance under Conditions of Broken Cloudiness. Results of Computations.

In this paper we consider the problem on solar radiation transfer in a three-layer cloudy and aerosol atmosphere over a lambertian underlying surface. We studied the dependence of mathematical expectation and variance of the intensity of reflected solar radiation modulated by broken clouds on the optical properties of clouds, type of clouds, zenith angle of the Sun, and on the albedo of the underlying surface. As a result we have shown that the effects of random geometry of cloud fields can cause not only the quantitative but also qualitative differences in mathematical expectations and variances of the intensity between the cumulus and stratus.