

Угловые характеристики отраженной солнечной радиации в присутствии кристаллических облаков с преимущественно горизонтальной ориентацией частиц: результаты численных экспериментов

Т.Б. Журавлева, Д.Н. Тимофеев, В.А. Шишко, А.В. Коношонкин

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия; ztb@iao.ru

Моделирование радиационных характеристик кристаллической облачности основывается на решении задачи, связанной с расчетом оптических характеристик несферических ледяных частиц с учетом их формы, размеров и пространственной ориентации. В отличие от задач, использующих предположение о хаотической ориентации частиц, расчет оптических и радиационных характеристик кристаллов преимущественной (в основном, горизонтальной) ориентации является гораздо более сложной задачей.

В докладе представлены алгоритмы метода Монте-Карло для расчета спектральных потоков и полей яркости солнечного излучения в присутствии однородных кристаллических облаков **с учетом оптической анизотропии**. В качестве оптической модели выбрана полученная в приближении геометрической оптики модель кристаллического облака, состоящего **из ледяных гексагональных квазигоризонтально ориентированных пластинок**.

1. Особенности алгоритма статистического моделирования переноса солнечной радиации в облаках, **оптически анизотропных относительно зенитного угла падающего излучения**

Плоскопараллельная модель атмосферы; сплошной облачный слой; рассеяние и поглощение аэрозольными частицами и молекулами не учитываются

А. Моделирование длины свободного пробега l выполняется с использованием распределения плотности в виде

$$p(l) = \sigma(c) \exp\{-l\sigma(c)\}, l > 0$$

Б. Направление движения фотона после столкновения рассчитывается с учетом зависимости индикатрисы рассеяния излучения от зенитного угла падающего излучения:

На первом шаге моделируется косинус зенитного угла c : для этого используется распределение $\mathbf{P}(c', c)$ по $-1 \leq c \leq 1$ для фиксированного значения c' .

Второй шаг состоит в моделировании изменения азимутального угла $\Delta\psi$, которое выполняется с использованием распределения $\mathbf{Q}(c', c, \Delta\psi)$ по $0 \leq \Delta\psi \leq 180^\circ$ для фиксированных значений c' и c . Аппроксимации распределений $\mathbf{P}(c', c)$ и $\mathbf{Q}(c', c, \Delta\psi)$ в виде двух- и трехмерного массивов рассчитываются заранее и зависят от формы и размера частиц (раздел 2).

Для расчета интенсивности солнечной радиации используется стандартный **метод локальной оценки**

2. Модель оптически анизотропной среды: горизонтально ориентированные пластинки

Локальные оптические характеристики среды рассчитаны для горизонтально ориентированных гексагональных пластинок **методом геометрической оптики**: полувысота $L=5$ мкм, длина грани $a=50$ мкм ($L/2a=0.1$), $\lambda=0.55$ мкм. Распределения $P(c',c)$ и $Q(c',c, \Delta\psi)$ аппроксимированы массивами с размерностями 101×201 и $101 \times 201 \times 91$ с равномерным шагом по каждой из переменных.

В среде из горизонтально ориентированных гексагональных пластинок зенитные углы выходящего θ^* и падающего θ_0 излучения связаны соотношением:

$$\theta^* = \begin{cases} \pi/2 - \arcsin \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_0}, & \text{если } \theta_0 > \theta_0^{(1)} = \arcsin \sqrt{n_r^2 - 1} \\ \arcsin \sqrt{n_r^2 - \cos^2 \theta_0}, & \text{если } \theta_0 < \theta_0^{(2)} = \arccos \sqrt{n_r^2 - 1} \end{cases}$$

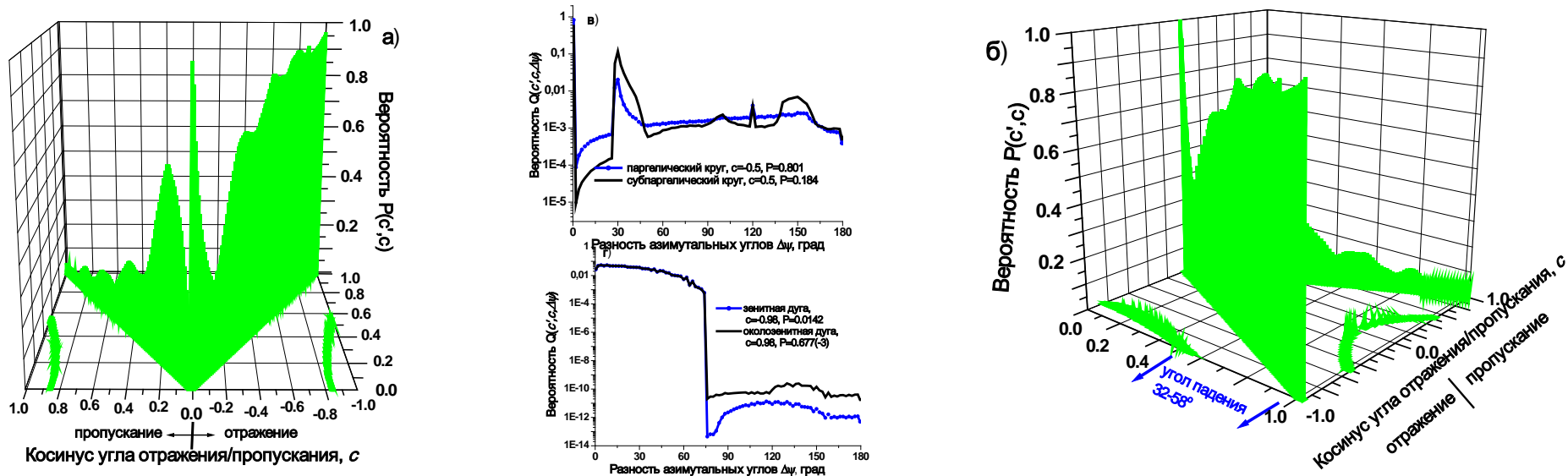


Рисунок 1. Распределения $P(c',c)$ (а, б) и $Q(c',c, \Delta\psi)$ (в, г): при $n_r=1.311$ излучение распространяется в пределах 2-ух конусов ($32^\circ \leq \theta_0 \leq 58^\circ$), иначе – 4-ех конусов

3. Результаты тестирования алгоритма

Входные параметры численных экспериментов: $SZA=\{60^\circ, 80^\circ\}$, $SAA=0$; $DZA=\{10^\circ, 60^\circ\}$; геометрическая толщина облачного слоя $H=1$ км, коэффициент ослабления в направлении «надир» $\sigma(c=0)=\{0.1; 1 \text{ км}^{-1}\}$; альbedo подстилающей поверхности $A_s=0$

3.1. Цель эксперимента - сопоставление расчетов интенсивности отраженной радиации с использованием **развитого ранее алгоритма для оптически изотропной среды** (I_{iso}), и данного алгоритма для **оптически анизотропной среды** (I_{aniso}).

Шаг 1. Аппроксимация распределений $P(c', c)$ и $Q(c', c, \Delta\psi)$ для **хаотически ориентированных частиц**.

Расчеты были выполнены с использованием таблично заданной индикатрисы рассеяния излучения кристаллического облака Cirrus3 из модели OPAC ($\lambda=0.55$ мкм)

Шаг 2. Радиационные расчеты.

Относительное **различие** между I_{iso} и I_{aniso} **не превышает в большинстве случаев 3%**, достигая иногда 6-8%, при относительной погрешности расчетов $\sim 1-2\%$.

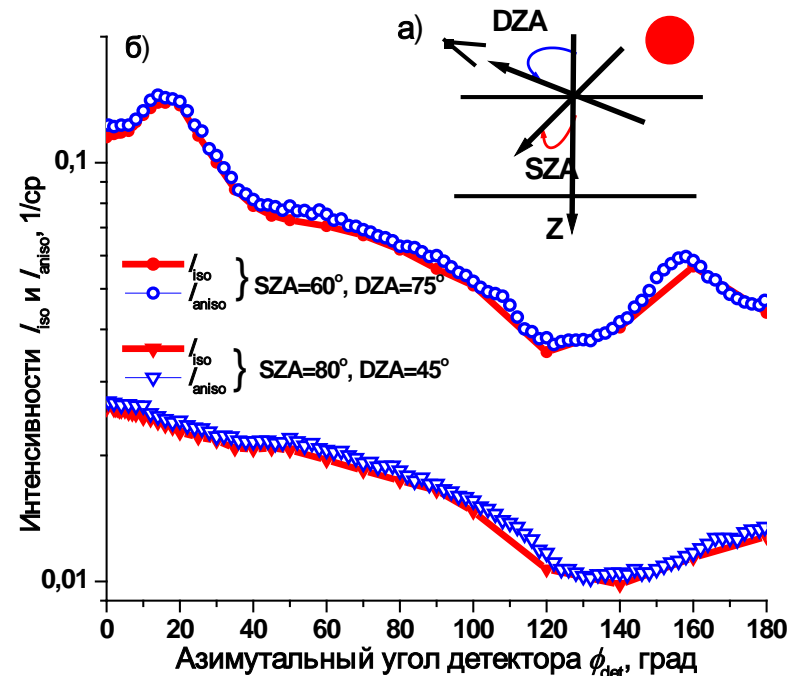


Рисунок 2. (а) схема зондирования; (б) интенсивность отраженной солнечной радиации в зависимости от азимута угла детектора при различных SZA и DZA . $\sigma(c=0)=1 \text{ км}^{-1}$

3.2. Цель эксперимента - сопоставление расчетов **интенсивности** в оптически тонких облаках, рассчитанной без учета зависимости коэффициента ослабления от направления движения фотона, и **углового хода индикатрисы рассеяния излучения**

Рисунок 3а (однократное излучение I_0)

Угловые зависимости $I_0(c \simeq 0.5, c = -0.5, \Delta\psi)$ и $I_0(c \simeq 0.5, c = -0.98, \Delta\psi)$ хорошо согласуются с $Q(c \simeq 0.5, c = -0.5, \Delta\psi)$ и $Q(c \simeq 0.5, c = -0.98, \Delta\psi)$: при $DZA=60^\circ$ имеют место **всплески** I_0 и Q при $\Delta\psi \sim 30^\circ$ и $\Delta\psi \sim 120^\circ$; при $DZA=10^\circ$ наблюдается **резкий** - на несколько порядков – **спад** интенсивности при $\Delta\psi \sim 70^\circ$ (рис. 1вг)

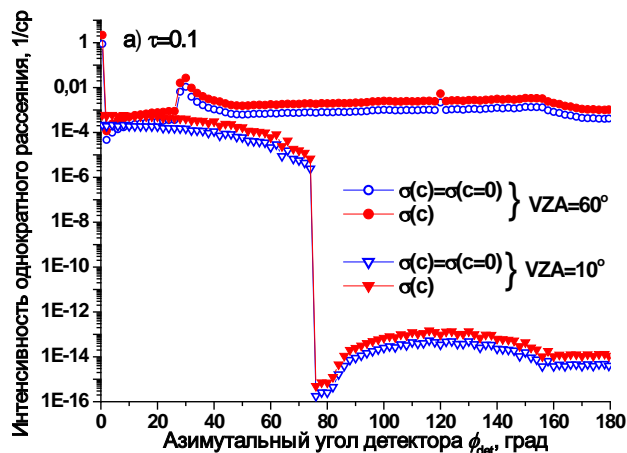


Рисунок 3б

При $DZA=60^\circ$ **угловая структура** отраженной радиации при $\tau=0.1$ и $\tau=1$ **идентична и близка к угловой зависимости I_0** (рисунок 3а), т.к. вклад I_0 в I изменяется от $\sim 80-90\%$ до $\sim 10-50\%$ в направлениях «вперед» и «назад»
 При $DZA=10^\circ$ и $\varphi_{\text{det}} > 75^\circ$ **вклад I_0 в I резко падает** до $\sim 10^{-7}-10^{-10}\%$, и **изменение интенсивности** за счет многократного рассеяния происходит в **существенно меньшем диапазоне значений**: при $\tau=0.1$ - в пределах одного порядка

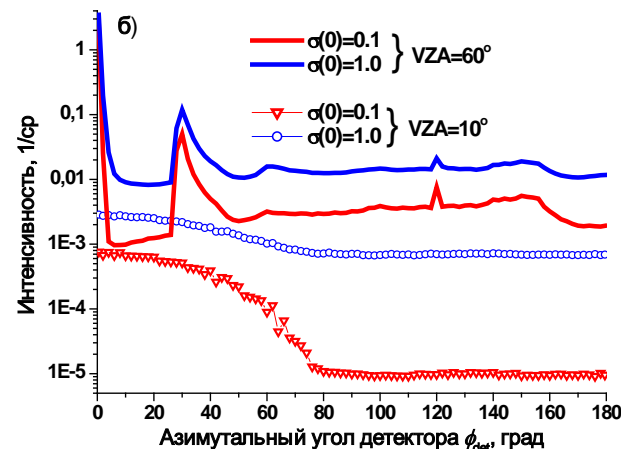


Рисунок 3. Интенсивность солнечной радиации для различных условий наблюдения, рассчитанная (а) с учетом и без учета зависимости коэффициента ослабления от направления распространяющегося излучения при (б) двух значений коэффициента ослабления среды; $SZA=60^\circ$.

Заключение

Результаты обоих численных экспериментов подтверждают **адекватность** учета особенностей переноса солнечной радиации в моделях кристаллических облаков, оптические характеристики которых зависят от зенитного угла распространяющегося излучения.

Данный алгоритм будет расширен для проведения радиационных расчетов с учетом молекулярно-аэрозольного компонента атмосферы и использован для исследования полей яркости восходящего и нисходящего излучения в оптически анизотропных кристаллических облаках **с учетом вариаций размеров и флаттера** горизонтально ориентированных частиц, а также **стохастической геометрии облаков**.