

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521.3; 535.361

Влияние формы и размеров кристаллических частиц на угловые распределения пропущенной солнечной радиации в двух геометрических схемах зондирования: результаты численного моделирования

Т.Б. Журавлева*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

Рассматриваются результаты статистического моделирования интенсивности пропущенного солнечного излучения в присутствии оптически тонких перистых облаков для двух геометрических схем зондирования – в альмукартате Солнца и гибридного сканирования (фотометрическая сеть AERONET). Численные эксперименты выполнены с использованием моделей кристаллической облачности: OPAC (гексагональные частицы с гладкой поверхностью) и модель, предложенная группой авторов в составе Baum В.А., Yang P., Neumysfield A.J. и др. (смесь частиц разной формы, гексагональные столбики и агрегаты из гексагональных столбиков с сильно шероховатой поверхностью). Представлены оценки влияния формы и размеров ледяных кристаллов на угловые распределения нисходящей радиации в спектральных каналах 440 и 870 нм для фоновых атмосферных ситуаций, наблюдаемых в г. Томске в летний период.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, модели кристаллической облачности, угловые распределения нисходящего солнечного излучения, AERONET; Monte Carlo method, models of crystal clouds, angular distribution of downward solar radiation, AERONET.

Введение

Фотометрическая сеть глобально распределенных наземных приборов AERONET (Aerosol Robotic Network [1]) обеспечивает основу для восстановления микрофизических и оптических характеристик аэрозоля в столбе атмосферы, необходимых для решения широкого круга научных и прикладных задач (валидация спутниковых данных [2–8], исследование радиационных эффектов аэрозоля [9–12], выделение характерных типов аэрозоля [13–16] и т.д.).

Входящие в состав сети AERONET наземные радиометры в автоматическом режиме выполняют измерения прямого излучения (340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020 и 1640 нм) и диффузной яркости неба (440, 675, 870 и 1020 нм). Значения спектральной аэрозольной оптической толщины (АОТ) в сочетании с диффузной радиацией являются входными параметрами алгоритмов решения обратной задачи оптики аэрозоля [17, 18], которые постоянно совершенствуются. В настоящее время для восстановления аэрозольных характеристик используется третья версия исходных алгоритмов [19].

До недавнего времени измерения рассеянной радиации выполнялись в двух режимах – в альмукартате Солнца (ALM) и в плоскости главного

солнечного вертикала (PP); в модернизированных инструментах реализована схема гибридного сканирования (HYB, [19]). Сканирование ALM выполняется при фиксированном зенитном угле детектора (DZA) с изменяющимся азимутальным углом (DAA) в диапазоне от ± 3 до $\pm 180^\circ$. Симметрия между положительной и отрицательной полуплоскостями используется для контроля качества состояния небосвода в период измерительного цикла: с точки зрения решения обратной задачи максимально допустимая разница между соответствующими парами измерений в альмукартате составляет 20% [20]; измерения, превышающие этот порог, исключаются из процедуры обращения. В геометрической схеме сканирования PP измерения выполняются для различных зенитных углов наблюдения в плоскости солнечного вертикала, определяемого азимутом Солнца. Геометрия сканирования PP имеет преимущество перед геометрией ALM с точки зрения увеличения диапазона углов рассеяния при небольших значениях зенитного угла Солнца (SZA). Однако в этом случае остается открытым вопрос, насколько справедливо предположение о горизонтальной однородности атмосферы, которое является одним из базовых в процедуре решения обратной задачи. В новых приборах Cimel Model-T измерения в плоскости солнечного вертикала отключены в пользу гибридного сканирования, при котором

* Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru).

измерения выполняются в диапазоне азимутальных углов от ± 3 до $\pm 180^\circ$ при изменяющемся зенитном угле детектора.

Качество восстановления оптических и микрофизических характеристик аэрозоля напрямую связано с отбором результатов сканирования, используемых в процедурах обращения. Если рассматривать такой аспект проблемы, как соблюдение симметрии измерений рассеянной радиации относительно направления «на Солнце» (в пределах 20%), то наиболее явно это условие нарушается при появлении в области сканирования отдельных облачных элементов или их конгломератов (например, облаков вертикального развития). Однако нередки случаи, когда условие симметрии выполнено, но на небосводе присутствуют перистые облака, которые в ряде случаев могут быть не идентифицированы ввиду, например, малых значений оптической толщины или в экстремальных ситуациях, наблюдаемых в нижней тропосфере (пыльные бури, плотные дымовые шлейфы и т.д.). В этих случаях измерения рассеянной радиации могут удовлетворять условиям, сформулированным для входных параметров алгоритмов восстановления характеристик аэрозоля, но результаты решения обратной задачи могут быть подвержены влиянию вклада перистых облаков, причем при проведении рутинных наблюдений в режиме мониторинга форма и размеры кристаллов, как правило, неизвестны. Отметим, что присутствие перистой облачности на небосводе может повлиять на некоторые характеристики аэрозоля, которые восстанавливаются по данным измерений прямого солнечного излучения, например на доли мелкодисперсной фракции на основе алгоритма SDA (spectral deconvolution algorithm [21]).

В настоящей работе рассматривается влияние формы и размеров кристаллов льда на угловые распределения диффузной радиации в сплошной перистой облачности для двух схем зондирования, используемых в радиометрах сети AERONET, — в альмикантаре Солнца и гибридного сканирования.

1. Оптические модели кристаллических облаков

Состоящие из ледяных кристаллов облака верхнего яруса (перистые облака, ПО) покрывают значительную часть небосвода (в глобальном масштабе — от 17 до 30%); протяженность полей ПО в горизонтальном направлении может достигать со-

тен и тысяч километров, а их площадь — варьироваться от сотен тысяч до миллионов квадратных километров [22, 23].

Одна из проблем исследования свойств перистых облаков состоит в многообразии форм и большом диапазоне размеров ледяных кристаллов. Тем не менее, несмотря на сложности в получении экспериментальных данных, на сегодняшний день накоплено большое количество информации о форме и распределении частиц по размерам, а также об их ледности, базирующейся на результатах лидарных, самолетных, шар-зондовых и спутниковых измерений в различных регионах земного шара. В частности, из всего многообразия форм частиц выявлены наиболее часто встречающиеся в перистых облаках типы кристаллов [24–28]: гексагональные столбики (сплошные и полые), гексагональные пластинки, квазисферические частицы (усеченные сферы — дроксталь, вытянутые и приплюснутые сферы), пульки (сплошные и полые), розетки (2D- и 3D-пульки), агрегаты (образования из нескольких монокристаллов, таких как пластинки, столбики, пульки). Однако в большинстве ситуаций задачу об отнесении кристалла к той или иной определенной форме решить не удастся, хотя основная масса по своему внешнему виду, по данным [27], тяготеет к вышеперечисленным (столбики, квазисферы, пластинки, розетки).

Наличие фактической информации о свойствах перистой облачности и современные алгоритмы расчета оптических характеристик ледяных кристаллов составляют основу для создания моделей оптических характеристик ПО. В настоящее время для проведения радиационных расчетов в различных атмосферных условиях и широком спектральном диапазоне наиболее часто используются модель OPAC (Optical Properties of Aerosol and Clouds [29]) и модель, разработанная группой авторов в составе Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J. и др. [25, 30–32] (в дальнейшем будем называть ее моделью ВУН (Baum–Yang–Heymsfield)). В обеих моделях предполагается, что частицы хаотически ориентированы.

В наших расчетах будут использованы модель OPAC и третья версия модели ВУН. Ниже приведено их краткое описание.

В модели OPAC представлены оптические характеристики, которые соответствуют трем различным моделям микроструктуры (Cirrus1, Cirrus2, Cirrus3) в зависимости от температуры облаков и формы частиц (табл. 1). Отличие Cirrus2 от Cirrus3

Таблица 1

Характеристики кристаллической облачности в модели OPAC [29]

Модель	Температура, °C	Форма частиц	Диапазон размеров; эффективный диаметр	Фактор асимметрии
Cirrus1	–25	Гексагональные столбики	20–2000 мкм; $D_{\text{eff}} = 183,4$ мкм	$AF_{440} = 0,772$; $AF_{870} = 0,794$
Cirrus2	–50	Розетки из гексагональных столбиков	20–2000 мкм; $D_{\text{eff}} = 114,8$ мкм	$AF_{440} = 0,764$; $AF_{870} = 0,789$
Cirrus3	–50	Модель Cirrus2 с добавлением мелких частиц	2–20 мкм + + 20–2000 мкм; $D_{\text{eff}} = 68,6$ мкм	$AF_{440} = 0,756$; $AF_{870} = 0,773$

состоит в добавлении мелких кристаллов и уменьшении по этой причине эффективного диаметра частиц D_{eff} . На рис. 1 (цв. вкладка) приведены индикатрисы рассеяния излучения $g(\theta)$ для Cirrus1, Cirrus2 и Cirrus3 при $\lambda = 440$ и 870 нм. Из-за гексагональной формы кристаллов $g(\theta)$ имеют выраженные гало при углах рассеяния излучения $\theta_1 \approx 22-24^\circ$ и $\theta_2 \approx 46-48^\circ$. Индикатрисы рассеяния излучения характеризуются сильной вытянутостью в направлении «вперед» с максимальным значением фактора асимметрии AF для модели Cirrus1 (табл. 1).

Для построения модели ВУН использованы полученные в различных регионах земного шара экспериментальные данные о распределении частиц по размерам $f(D)$, ледности облаков IWC и диаметре средней массы D_{mm} , среди которых было отобрано более 14000 распределений $f(D)$, соответствующих температуре облаков $T \leq -40^\circ$. Для набора фиксированных форм ледяных кристаллов (дроксталлы, пластинки, сплошные и полые столбики, сплошные и полые пульки, агрегаты из сплошных столбиков, а также большие и малые агрегаты из пластинок) были выполнены расчеты оптических характеристик в диапазоне размеров 2–10000 мкм и спектральном интервале 0,2–100 мкм для гладкой, умеренной и сильной степеней шероховатости поверхности частиц.

В настоящей работе использованы данные, представленные в третьей версии модели ВУН [31, 32] и соответствующие трем различным моделям микроструктуры для кристаллов с сильно шероховатой поверхностью (табл. 2). Оптические характеристики частиц в моделях представлены как функции D_{eff} в диапазоне от 10 до 120 мкм с шагом 5 мкм.

На рис. 2 приведены индикатрисы рассеяния излучения для двух моделей микроструктуры – GHM (General habit mixture) и ASC (Aggregates of solid columns). Сильная шероховатость поверхности кристаллов сглаживает угловой ход $g(\theta)$ и, в отличие от гладких частиц, приводит к нивелированию гало, а также к существенному уменьшению обратного рассеяния [31]. Наибольшее значение фактора асимметрии AF наблюдается для модели смеси частиц различной формы GHM, тогда как для модели агрегатов из сплошных столбиков ASC величина AF уменьшается вместе с существенным ослаблением зависимости фактора асимметрии от размеров частиц (табл. 2). Представленные на рис. 2, б, г результаты показывают также трансформацию угловой структуры $g(\theta)$

в пределах $0-2^\circ$: если вблизи направления рассеяния «вперед» максимальные значения соответствуют $g(\theta)$ с $D_{\text{eff}} = 120$ мкм, то после прохождения точки перегиба $\sim 0,3-0,5^\circ$ максимум наблюдается для индикатрисы рассеяния излучения при $D_{\text{eff}} = 10$ мкм.

В заключение отметим, что тестирование модели ВУН выполнялось на основе сопоставлений с экспериментальными данными (см., например, [31] и приведенную там библиографию). На базе *in situ* наблюдений было показано, что наилучшее согласие между IWC и D_{mm} имело место для модели, форма частиц в которой задавалась в виде сплошных столбиков (модель SC (Solid columns)), а измеренная с использованием PARASOL отражательная способность облаков была наиболее близкой к результатам моделирования для смеси частиц различной формы с сильно шероховатой поверхностью (модель GHM).

2. Результаты численных экспериментов

Для моделирования полей яркости пропущенной солнечной радиации в безоблачном небе I_{clr} и в присутствии перистых облаков I использованы статистические алгоритмы, входящие в состав развиваемого в ИОА СО РАН программно-алгоритмического комплекса MATHRAN (Monte Carlo Codes for Three-Dimensional Radiative Transfer, [33, 34]). Согласно [35] влияние сферичности атмосферы на результаты моделирования радиации в альмукантарате Солнца для зенитных углов менее 75° и значений АОТ, характерных для фоновых ситуаций, не превышает в основном 1,5–2,0%. Это дает основание применять в расчетах алгоритмы метода локальной оценки, реализованные в плоскопараллельной модели атмосферы Земли с учетом рассеяния и поглощения молекулами воздуха, а также аэрозольными и облачными частицами. Отражение от подстилающей поверхности (ПП) определяется законом Ламберта.

2.1. Входные параметры

Предполагается, что атмосфера 0–100 км состоит из 30 слоев, в пределах каждого из которых давление, температура и концентрация атмосферных газов являются постоянными.

Таблица 2

Характеристики кристаллической облачности в модели ВУН [31, 32] с сильно шероховатой поверхностью частиц

Модель микроструктуры	Форма частиц	Фактор асимметрии для $D_{\text{eff}} = 10-120$ мкм
Смесь частиц различной формы (GHM)	Дроксталлы, пластинки, сплошные и полые столбики, сплошные и полые пульки, агрегаты из сплошных столбиков, большие и малые агрегаты из пластинок	$AF_{440} = 0,769 \div 0,809$; $AF_{870} = 0,774 \div 0,816$
Сплошные столбики (SC)	Сплошные гексагональные столбики	$AF_{440} = 0,767 \div 0,802$; $AF_{870} = 0,775 \div 0,809$
Агрегаты из сплошных столбиков (ASC)	Агрегаты из сплошных гексагональных столбиков	$AF_{440} = 0,744 \div 0,748$; $AF_{870} = 0,751 \div 0,757$

Коэффициенты молекулярного рассеяния рассчитываются с использованием метеомодели «лето умеренных широт» на основе [36]. В настоящей работе представлены результаты моделирования рассеянной радиации в двух спектральных каналах $\lambda = 440$ и 870 нм, в пределах которых молекулярным поглощением можно пренебречь.

Для задания оптических характеристик аэрозоля используются среднемесячные значения, полученные в июле 2014 г. на сайте Tomsk-22 сети AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Согласно результатам многолетнего мониторинга эти значения (табл. 3) соответствуют фоновым условиям наблюдений в пунктах Tomsk и Tomsk-22 [11]: $AOT(500 \text{ нм}) = 0,148$; показатель Ангстрема $\alpha(440-870 \text{ нм}) = 1,48$. Коэффициенты ослабления (σ_a) и альbedo однократного рассеяния (АОР) аэрозоля задавались постоянными в пределах слоев 0–2, 2–12 и 12–35 км и получены в результате комбинации натуральных данных и оптических характеристик континентального и стратосферного аэрозолей, представленных в модели OPAC [29]:

$\lambda = 440 \text{ нм}$: $\sigma_a = \{6,3 \cdot 10^{-2}; 4,01 \cdot 10^{-3}; 2,59 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}\}$,
 АОР = {0,962; 0,94; 1,0};

$\lambda = 870 \text{ нм}$: $\sigma_a = \{2,5 \cdot 10^{-2}; 1,41 \cdot 10^{-3}; 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}\}$,
 АОР = {0,931; 0,92; 1,0}.

Индикатрисы рассеяния излучения аэрозольными частицами предполагаются постоянными вплоть до высоты 35 км. Моделирование переноса излучения выполнено в присутствии сплошной перистой облачности для полупрозрачных (оптическая

При использовании модели OPAC нет возможности выявить зависимости I от формы частиц при фиксированном значении D_{eff} или от размера частиц при заданной форме кристаллов, поскольку оптические характеристики трех типов облаков однозначно определяются для фиксированной формы частиц и значения D_{eff} (см. табл. 1).

На рис. 3, а приведены расчеты интенсивности солнечного излучения при различных условиях освещенности и оптических толщинах облаков (ОТО) типа Cirrus2 в диапазоне $DAA = 2-180^\circ$. В канале $\lambda = 870$ нм оптическая толщина аэрозольно-молекулярного компонента атмосферы равна $\tau_{aR}^{870} = 0,0822$, и в присутствии как полупрозрачных ($\tau = 0,03$), так и оптически тонких ($\tau = 0,1$) перистых облаков наблюдаются выраженные явления гало при $\theta = \{22^\circ, 46^\circ\}$ (см. рис. 1). При переходе в канал $\lambda = 440$ нм вклад ОТО в оптическую толщину атмосферы существенно меньше, чем $\tau_{aR}^{440} = 0,416$. Вследствие этого возможные всплески интенсивности, которые могли бы быть обусловлены локальными максимумами $g(\theta)$, становятся менее выраженными ($\theta = 24^\circ$) или нивелируются ($\theta = 48^\circ$).

Чтобы оценить влияние моделей микроструктуры, используемых в OPAC, введем характеристику

$$\Delta I(DAA) = 100\% \left(\frac{I(\text{Cirrus}^*, DAA) - I(\text{Cirrus2}, DAA)}{I(\text{Cirrus2}, DAA)} \right), \quad (1)$$

где $\text{Cirrus}^* = \{\text{Cirrus1}, \text{Cirrus3}\}$.

Таблица 3

Оптические характеристики в столбе атмосферы и альbedo подстилающей поверхности, используемые при проведении радиационных расчетов

Длина волны	АОТ	АОР	Фактор асимметрии в столбе атмосферы	Рэлеевская толщина рассеяния в столбе атмосферы	Альbedo ПП (трава) [37]
440	0,172	0,958	0,677	0,244	0,04
870	0,067	0,927	0,558	0,0152	0,5

толщина $\tau = 0,03$) и оптически тонких ($\tau = 0,1$) облаков, занимающих слой 9–10 км. В обеих рассматриваемых моделях коэффициент ослабления облаков в спектральном интервале 0,44–0,87 мкм является постоянным, а АОР = 1.

Предполагается, что на верхнюю границу атмосферы падает единичный мононаправленный поток солнечного излучения. Расчеты интенсивности излучения выполнены для $SZA = \{50, 60, 75^\circ\}$ с относительной погрешностью, не превышающей в подавляющем большинстве случаев 0,3–0,5%. Апертура приемника равна $0,6^\circ$.

2.2. Радиационные расчеты

Рассмотрим угловые характеристики поля яркости пропущенного излучения, рассчитанные для ALM в безоблачных условиях и в присутствии кристаллических облаков.

В качестве модели микроструктуры, относительно которой оценивается вариабельность интенсивности I , может быть в принципе выбрана любая из трех моделей OPAC. Мы остановили свой выбор на Cirrus2, исходя из тех соображений, что значения D_{eff} и AF являются промежуточными по отношению к Cirrus1 и Cirrus3 (см. табл. 1).

Очевидно, что при выбранных значениях ОТО наиболее сильную зависимость I от формы и размеров частиц следует ожидать в канале $\lambda = 870$ нм, когда влияние молекулярно-аэрозольного компонента атмосферы на формирование полей яркости солнечного излучения проявляется в существенно меньшей степени по сравнению с облачностью. Как следует из результатов моделирования (рис. 3, б), изменчивость микроструктуры облаков при $7^\circ \leq DAA \leq 20^\circ$ приводит к различиям интенсивности $|\Delta I(DAA)|$ в пределах $\sim 10\%$, тогда как при $DAA > 20^\circ$ влияние формы и размеров кристаллов не превышает

по абсолютной величине 5%. В области ореола зависимость I от микроструктуры проявляется более значительно (рис. 3, *в*): интенсивность рассеянной радиации в облаках типа Cirrus1 в направлении «вперед» примерно в 2 раза больше, чем в облаках Cirrus3, тогда как при $\theta \approx \text{DAA} = 2^\circ$ соотношение между I меняется на обратное.

Особенности поля яркости пропущенной радиации в предположении сильно шероховатой поверхности частиц анализировались с использованием модели ВУН [25, 30–32]. Отличительная черта зависимостей интенсивности от DAA в рамках этой модели – отсутствие гало (рис. 4, *а*), поскольку для рассмотренных предположений о микроструктуре облаков угловые зависимости $g(\theta)$ являются гладкими функциями угла рассеяния (сравните рис. 1 и 2).

Влияние размеров частиц при фиксированной форме кристаллов на нисходящее диффузное излучение иллюстрируется на рис. 4, *а, б*. Из результатов численных экспериментов следует, что в рассматриваемых спектральных каналах изменение эффективного диаметра как частиц в виде агрегатов из столбиков, так и смеси частиц сказывается на значениях интенсивности излучения в основном в пределах ореола (рис. 4, *б*): при увеличении D_{eff} значение $I(D_{\text{eff}} = 120 \text{ мкм})$ возрастает по отношению к $I(D_{\text{eff}} = 10 \text{ мкм})$ от ~ 2 раз ($\lambda = 440 \text{ нм}$) до ~ 2 порядков величины ($\lambda = 870 \text{ нм}$). В фоновых условиях в области $\text{DAA} \geq 8^\circ$ влияние размеров частиц существенно уменьшается: при $\lambda = 440 \text{ нм}$ различие интенсивностей излучения не превышает в основном 2–3%, возрастая при $\lambda = 870 \text{ нм}$ до ~ 10 –12% в зоне $\text{DAA} > 100^\circ$.

На рис. 4, *в* представлены относительные различия интенсивностей излучения, обусловленные вариацией формы частиц. Как и в модели ОРАС, оценка влияния формы частиц при фиксированном значении D_{eff} выполнена с использованием соотношения, аналогичного (1), но в качестве базовой модели была выбрана модель кристаллического облака, состоящего из шероховатых гексагональных столбиков (SC). При сравнительно небольших рассматриваемых значениях ОТО влияние формы кристаллов проявляется преимущественно в области углов рассеяния $\theta \approx \text{DAA} < 10^\circ$, где относительное различие $\Delta I(\text{DAA})$ достигает десятков процентов. При дальнейшем увеличении DAA значение $\Delta I(\text{DAA})$ находится в основном в пределах $\pm 5\%$.

В заключение сравним результаты численного моделирования пропущенного излучения в альмукантарате Солнца и при гибридном сканировании. Значения интенсивности I приведены как функции углов рассеяния, соответствующих схемам зондирования радиометров, функционирующих в сети AERONET. Отметим, что в альмукантарате Солнца интенсивность излучения I измеряется на жестко заданной сетке азимутальных углов DAA, не зависящих от $\text{DZA} = \text{SZA}$, тогда как при гибридном сканировании I представляется как функция θ при изменяющихся зенитных и азимутальных углах детектора. Соотношение между DZA и θ при $\text{SZA} = 60^\circ$ приведено на рис. 5, *а*.

Для проведения сравнительного анализа были выполнены расчеты I в диапазоне углов $\theta \geq 3^\circ$ в спектральных каналах $\lambda = 440 \text{ нм}$ при $\tau = 0,03$ (рис. 5, *б*) и $\lambda = 870 \text{ нм}$ при $\tau = 0,1$ (рис. 5, *в*). Из результатов численных экспериментов следует, что независимо от геометрии сканирования в рассматриваемом диапазоне углов рассеяния влияние формы ледяных кристаллов при сопоставимых размерах частиц находится в пределах 3–5%. Исключение составляет область вблизи углов рассеяния $\theta_1 = 22$ – 24° и $\theta_2 = 46$ – 48° : в случае, если облако состоит из гексагональных частиц (в данном случае – столбиков) с гладкой поверхностью, то в указанных зонах могут наблюдаться всплески интенсивности, обусловленные наличием двух локальных максимумов индикатрисы рассеяния излучения гексагональными частицами (см. рис. 1). Однако зафиксировать эти отличия можно лишь в случаях, когда имеет место сравнительно большой вклад ОТО в оптическую толщину атмосферы в целом и при анализе данных в ближнем ИК-диапазоне, что наглядно иллюстрируется результатами на рис. 5, *б, в*.

Заключение

В работе рассмотрены результаты статистического моделирования полей яркости пропущенного солнечного излучения в присутствии оптически тонких перистых облаков для двух геометрических схем зондирования, реализованных в сканирующих солнечных фотометрах сети AERONET, – в альмукантарате Солнца и гибридного сканирования. Влияние формы и размеров хаотически ориентированных ледяных кристаллов исследовано с использованием двух общедоступных моделей облачности: модели ОРАС и модели ВУН, предложенной группой авторов в составе Baum B.A., Yang P., Neumysfield A.J. и др. В модели ОРАС оптические характеристики облаков рассчитаны в предположении о гексагональной форме частиц с гладкой поверхностью, следствием чего является наличие двух локальных максимумов в угловой зависимости индикатрисы рассеяния излучения. Вторая модель (ВУН) базируется на расчетах оптических характеристик сильно шероховатых кристаллов различных форм, на основе которых сформированы модели смеси частиц, сплошных столбиков и состоящих из них агрегатов для широкого диапазона эффективных диаметров частиц. Ввиду шероховатой поверхности кристаллов индикатрисы рассеяния излучения являются гладкими функциями угла рассеяния и не имеют столь выраженного пика в направлении «назад», наблюдаемого, в частности, в модели ОРАС.

Моделирование интенсивности нисходящей радиации I в каналах $\lambda = 440$ и 870 нм выполнено для полупрозрачных и оптически тонких облаков ($\tau = \{0,03; 0,1\}$) и значений аэрозольных характеристик, соответствующих фоновым условиям наблюдения на сайтах сети AERONET Tomsk и Tomsk-22. Результаты численных экспериментов показали, что максимальные отличия I , обусловленные различной микроструктурой облаков, имеют место в области ореола (угол рассеяния менее $\sim 3^\circ$) и могут дости-

гать двух порядков в ближней ИК-области спектра. Это обстоятельство является важным при решении задач, связанных с восстановлением оптических характеристик перистых облаков по данным фотометрических наблюдений [38, 39]. В диапазоне углов рассеяния вне ореола в угловой структуре диффузной радиации может быть зафиксировано гало, что свидетельствует о присутствии на небосводе перистых облаков, состоящих преимущественно из гексагональных частиц с гладкой поверхностью. Однако если всплесков яркости пропущенного излучения в зонах возможного появления гало не наблюдается, то это не означает отсутствие перистой облачности: угловая зависимость поля радиации представляет собой гладкую функцию угла рассеяния в присутствии сильно шероховатых гексагональных частиц. Кроме того, влияние микроструктуры облаков, состоящих из кристаллов с шероховатой поверхностью, на интенсивность излучения проявляется достаточно слабо: изменение формы кристаллов при фиксированных эффективном диаметре и форме частиц приводит к вариациям I , не превышающим ~5–10% начиная с $\theta \geq 10^\circ$.

Подчеркнем, что в настоящей работе рассматривались только фоновые атмосферные ситуации (экстремальные случаи, обусловленные пожарами, пыльными бурями и т.д. не анализировались) и оптически тонкие перистые облака. Кроме того, при проведении численных экспериментов были использованы модели кристаллических облаков, состоящих из хаотически ориентированных частиц, а также предположение о горизонтальной однородности атмосферы. Мы планируем продолжить исследования радиационных характеристик перистой облачности, частично сняв эти ограничения, а именно использовать в расчетах оптические модели, развитые для анизотропных сред (частицы с преимущественно горизонтальной ориентацией), а также учесть при моделировании полей яркости стохастическую структуру облачных полей.

В работе использованы данные измерений, полученных на пунктах Tomsk и Tomsk-22 сети AERONET; автор выражает признательность В. Holben, М.В. Панченко и С.М. Сакерину за организацию и проведение этих наблюдений. Автор благодарен также организаторам сайтов http://stc-se.com/data/bbaum/Ice_Models/index.html и <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> за формирование информации и возможность ее свободного использования. Содержание работы обсуждалось с А. Смирновым (А. Smirnov, GSFC/NASA), которому автор выражает искреннюю признательность за полезные советы и рекомендации.

Модификация алгоритма статистического моделирования переноса солнечного излучения в кристаллических облаках и подготовка входных параметров выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН; проведение численных экспериментов и анализ результатов выполнен при поддержке РФФИ (грант № 19-01-00351).

1. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermore E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.

AERONET – a federal instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.

2. Sayer A.M., Hsu N.C., Lee J., Kim W.V., Dutcher S.T. Validation, stability, and consistency of MODIS collection 6.1 and VIIRS version 1 Deep Blue aerosol data over land // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2019. V. 124, iss. 8. P. 4658–4688.

3. Levy R.C., Munchak L.A., Mattoo S., Patadia F., Remme L.A., Holz R.E. Towards a long-term global aerosol optical depth record: applying a consistent aerosol retrieval algorithm to MODIS and VIIRS-observed reflectance // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 4083–4110.

4. Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanre D., Mattoo S., Chu D.A., Martins J.V., Li R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermore E., Holben B.N. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62, iss. 4. P. 947–973.

5. Holzer-Popp T., de Leeuw G., Griesfeller J., Martynenko D., Klüser L., Bevan S., Davies W., Ducos F., Deuzé J.L., Grainger R. G., Heckel A., von Hoyningen-Hüne W., Kolmonen P., Litvinov P., North P., Poulsen C.A., Ramon D., Siddans R., Sogacheva L., Tanre D., Thomas G.E., Vountas M., Desclotres J., Griesfeller J., Kinne S., Schulz M., Pinnock S. Aerosol retrieval experiments in the ESA Aerosol_cci project // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 1919–1957.

6. Jethva H., Torres O., Ahn C. Global assessment of OMI aerosol single-scattering albedo using ground-based AERONET inversion // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119, iss. 14. P. 9020–9040.

7. Афонин С.В., Белов В.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Сравнение спутниковых (AVHRR/NOAA) и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15, № 12. С. 1118–1123.

8. Афонин С.В., Белов В.В., Панченко М.В., Сакерин С.М., Энгель М.В. Корреляционный анализ пространственных полей аэрозольной оптической толщи на основе спутниковых данных MODIS // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 6. С. 510–515.

9. Garcia O.E., Diaz A.M., Exposito F.J., Diaz J.P., Dubovik O., Dubuisson P., Roger J.-C., Eck T.F., Sinyuk A., Derimian Y., Dutton E.G., Schafer J.S., Holben B.N., Garcia C.A. Validation of AERONET estimates of atmospheric solar fluxes and aerosol radiative forcing by ground-based broadband measurements // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D21207. DOI: 10.1029/2008JD010211.

10. Garcia O. E., Diaz J. P., Exposito F. J., Diaz A. M., Dubovik O., Derimian Y., Dubuisson P., Roger J.-C. Shortwave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 5129–5145.

11. Zhuravleva T.B., Kabanov D.M., Nasrtdinov I.M., Rus-skova T.V., Sakerin S.M., Smirnov A., Holben B.N. Radiative characteristics of aerosol during extreme fire event over Siberia in summer 2012 // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P.179–198.

12. Derimian Y., Dubovik O., Huang X., Lapyonok T., Litvinov P., Kostinski A.B., Dubuisson P., Ducos F. Comprehensive tool for calculation of radiative fluxes: illustration of shortwave aerosol radiative effect sensitivities to the details in aerosol and underlying surface characteristics // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 5763–5780.

13. Lee J., Kim J., Song C., Kim S., Chun Y., Sohn B., Holben B. Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44. P. 3110–3117.

14. Russell P.B., Bergstrom R.W., Shinozuka Y., Clarke A.D., DeCarlo P.F., Jimenez J.L., Livingston J.M.,

- Redemann J., Dubovik O., Strawa A.* Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 1155–1169.
15. *Giles D.M., Holben B.N., Eck T.F., Sinyuk A., Smirnov A., Slutsker I., Dickerson R., Thompson A., Schafer J.* An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, N D17203. DOI: 10.1029/2012JD018127.
 16. *Shin S.-K., Tesche M., Noh Y., Müller D.* Aerosol-type classification based on AERONET version 3 inversion products // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 3789–3803.
 17. *Dubovik O., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N D16. P. 20673–20696.
 18. *Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Muñoz O., Veiheilmann B., van der Zande W.J., Leon J.F., Sorokin M., Slutsker I.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, N D11208. DOI: 10.1029/2005JD006619.
 19. *Sinyuk A., Holben B.N., Eck T.F., Giles D.M., Slutsker I., Korkin S., Schafer J.S., Smirnov A., Sorokin M., Lyapustin A.* The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2 // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 3375–3411.
 20. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Smirnov A., Sinyuk A., Schafer J., Giles D., Dubovik O.* Aeronet's Version 2.0 quality assurance criteria // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6408. DOI: 10.1117/12.706524.
 21. *Smirnov A., Zhuravleva T.B., Segal-Rosenheimer M., Holben B.N.* Limitations of AERONET SDA product in presence of cirrus clouds // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2018. V. 206. P. 338–341.
 22. *Wylie D.P., Jackson D.L., Menzel W.P., Bates J.J.* Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations // *J. Climate.* 2005. V. 18, iss. 15. P. 3021–3031.
 23. *Sassen K., Wang Z., Liu D.* Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol lidar and infrared Pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements // *J. Geophys. Res.* D. 2008. V. 113. DOI: 10.1029/2008JD009972.
 24. *Мазин И.П., Шметер С.М.* Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.
 25. *Baum B.A., Heymsfield A.J., Yang P., Bedka S.T.* Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part 1: Microphysical data and models // *J. Appl. Meteor.* 2005. V. 44, iss. 12. P. 1885–1895.
 26. *Heymsfield A.J., Schmitt C., Bansemmer A.* Ice cloud particle size distributions and pressure dependent terminal velocities from in situ observations at temperatures from 0° to –86° C // *J. Atmos. Sci.* 2013. V. 70. P. 4123–4154.
 27. *Fridlind A.M., Atlas R., van Diedenhoven B., Um J., McFarquhar G.M., Ackerman A.S., Moyer E.J., Lawson R.P.* Derivation of physical and optical properties of mid-latitude cirrus ice crystals for a size-resolved cloud microphysics model // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 7251–7283.
 28. *Kienast-Sjögren E., Rolf C., Seifert P., Krieger U.K., Luo B.P., Krämer M., Peter T.* Climatological and radiative properties of midlatitude cirrus clouds derived by automatic evaluation of lidar measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 7605–7621.
 29. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. P. 831–844.
 30. *Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Platnick S., King M.D., Hu Y.-X., Bedka S.T.* Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part II: Narrowband models // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44, iss. 12. P. 1896–1911.
 31. *Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Schmitt C.G., Xie Y., Bansemmer A., Hu Y.X., Zhang Z.* Improvements in shortwave bulk scattering and absorption models for the remote sensing of ice clouds // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2011. V. 50, iss. 5. P. 1037–1056.
 32. *Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemmer A., Merrelli A., Schmitt C., Wang C.* Ice cloud bulk single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm // *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer.* 2014. V. 146. P. 123–139.
 33. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I: Детерминированная атмосфера // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 2. С. 99–114.
 34. *Zhuravleva T.B., Nasrtdinov I.M., Russkova T.V., Chesnokova T.Yu.* Mathematical simulation of brightness fields in broken clouds for observations from Earth's surface and from space in plane and spherical atmospheric models // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 1003502.
 35. *Назаралиев М.А.* Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1990. 226 с.
 36. *Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S.* The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 Model. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscom AFB, MA 01731-3010, 1996. 260 p.
 37. *Hook S.J.* ASTER Spectral Library: Johns Hopkins University (JHU) spectral library; Jet Propulsion Laboratory (JPL) spectral library; The United States Geological Survey (USGS-Reston) spectral library [Electron resource]. 1998. Dedicated CD-ROM. Version 1.2.
 38. *Shiobara M., Asano S.* Estimation of cirrus optical thickness from Sun-photometer measurements // *J. Appl. Meteorol.* 1994. V. 33, iss. 6. P. 672–681.
 39. *Segal-Rosenheimer M., Russell P.B., Livingston J.M., Ramachandran S., Redemann J., Baum B.A.* Retrieval of cirrus properties by Sun photometry: A new perspective on an old issue // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 4503–4520.

T.B. Zhuravleva. Influence of the shape and size of crystal particles on the angular distribution of transmitted solar radiation in two geometric sounding schemes: results of numerical simulation.

The results of statistical simulation of transmitted solar radiation intensity in the presence of optically thin cirrus clouds for two geometrical sensing schemes – solar almucanthrate and hybrid scanning (AERONET photometric network) are considered. Numerical experiments were performed using crystal cloud models: OPAC (hexagonal particles with a smooth surface) and a model proposed by Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J. et al. (a mixture of particles of different shapes, hexagonal columns and aggregates of hexagonal columns with a very rough surface). Estimates of the influence of the shape and size of ice crystals on the angular distribution of downward radiation in the 440 and 870 nm spectral channels for background atmospheric situations observed in Tomsk in the summer period are presented.

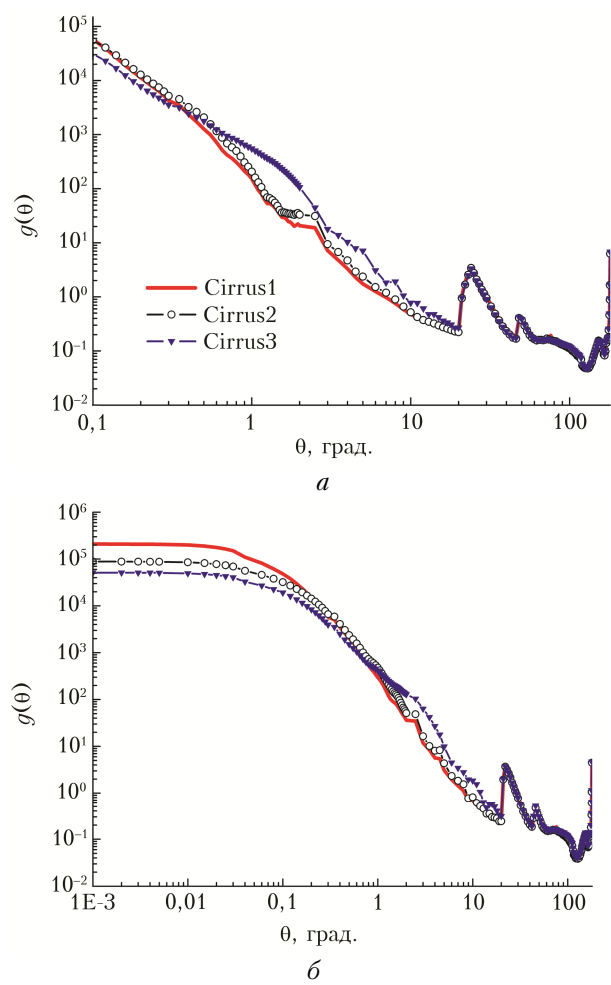


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния излучения кристаллическими частицами в модели ОРАС [29] на длинах волн $\lambda = 440$ (а) и 870 нм (б)

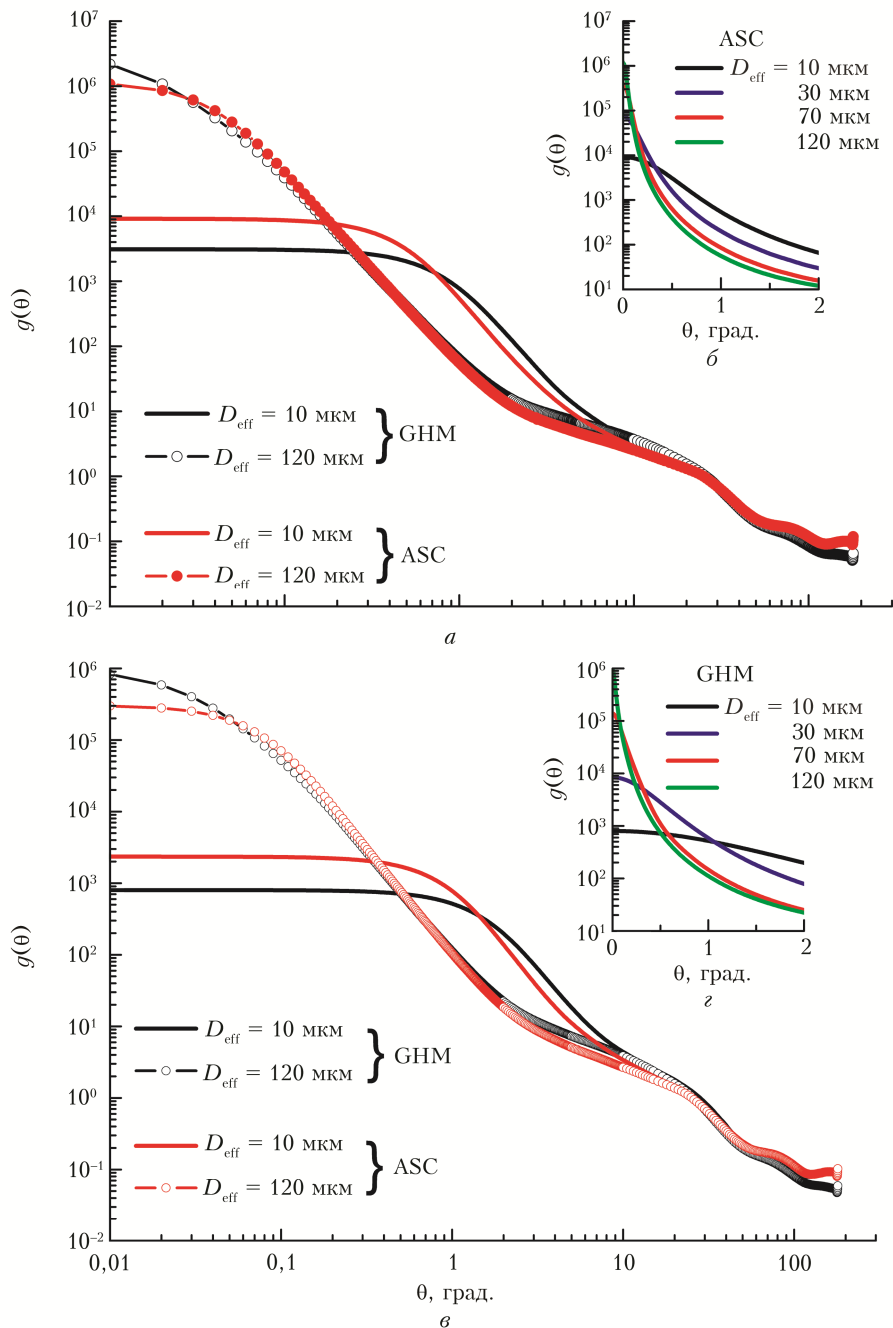


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния излучения кристаллическими частицами в модели ВУН на длинах волн $\lambda = 440$ (а, б) и 870 нм (θ , z) в различных угловых диапазонах [31, 32]

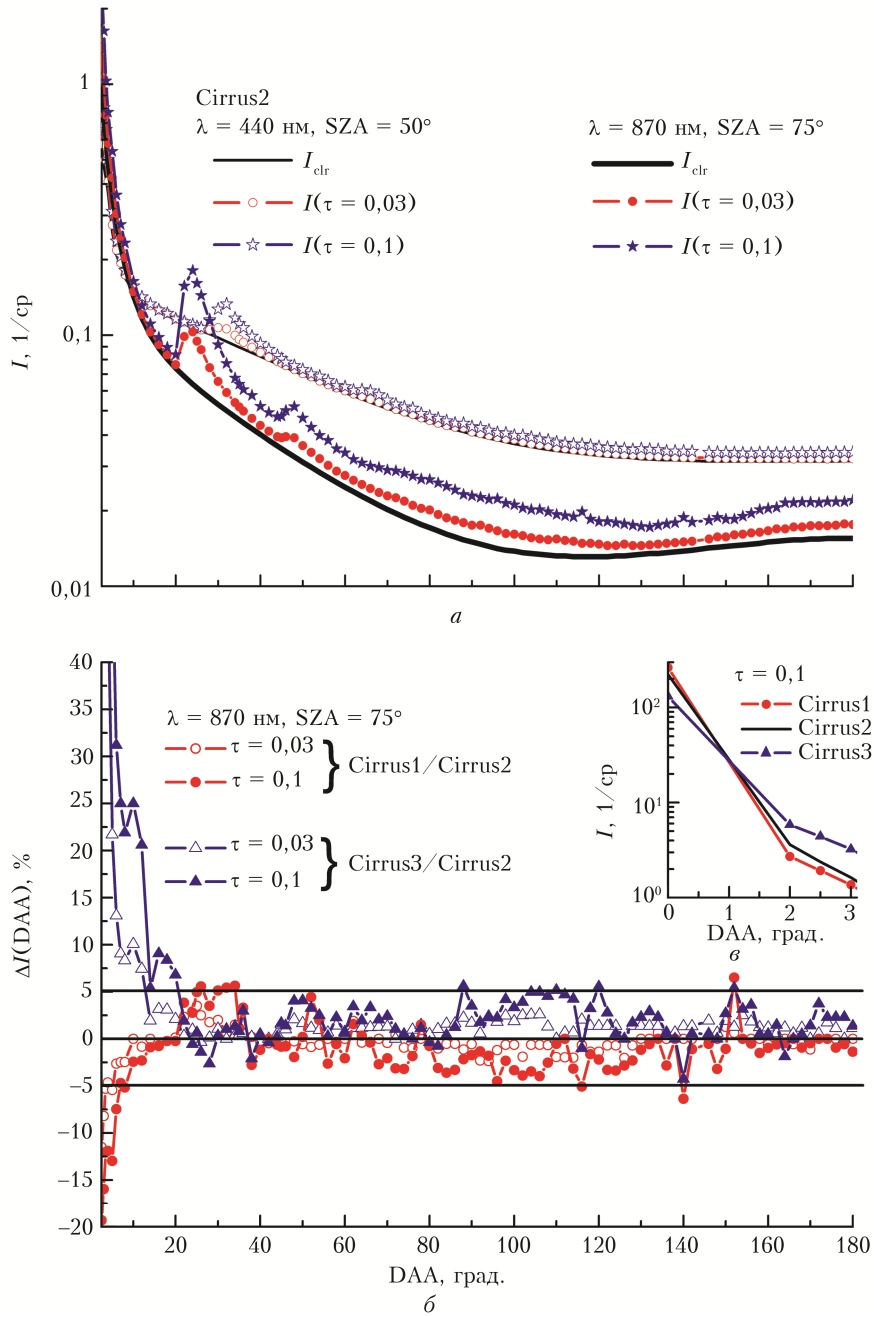


Рис. 3. Интенсивность пропущенной солнечной радиации в альмукуантарате Солнца в различных условиях освещенности (a) и относительное различие интенсивностей различных моделей (b) и интенсивностей в области ореола (β) в разных угловых диапазонах, рассчитанные с использованием моделей микроструктуры ОРАС [29]

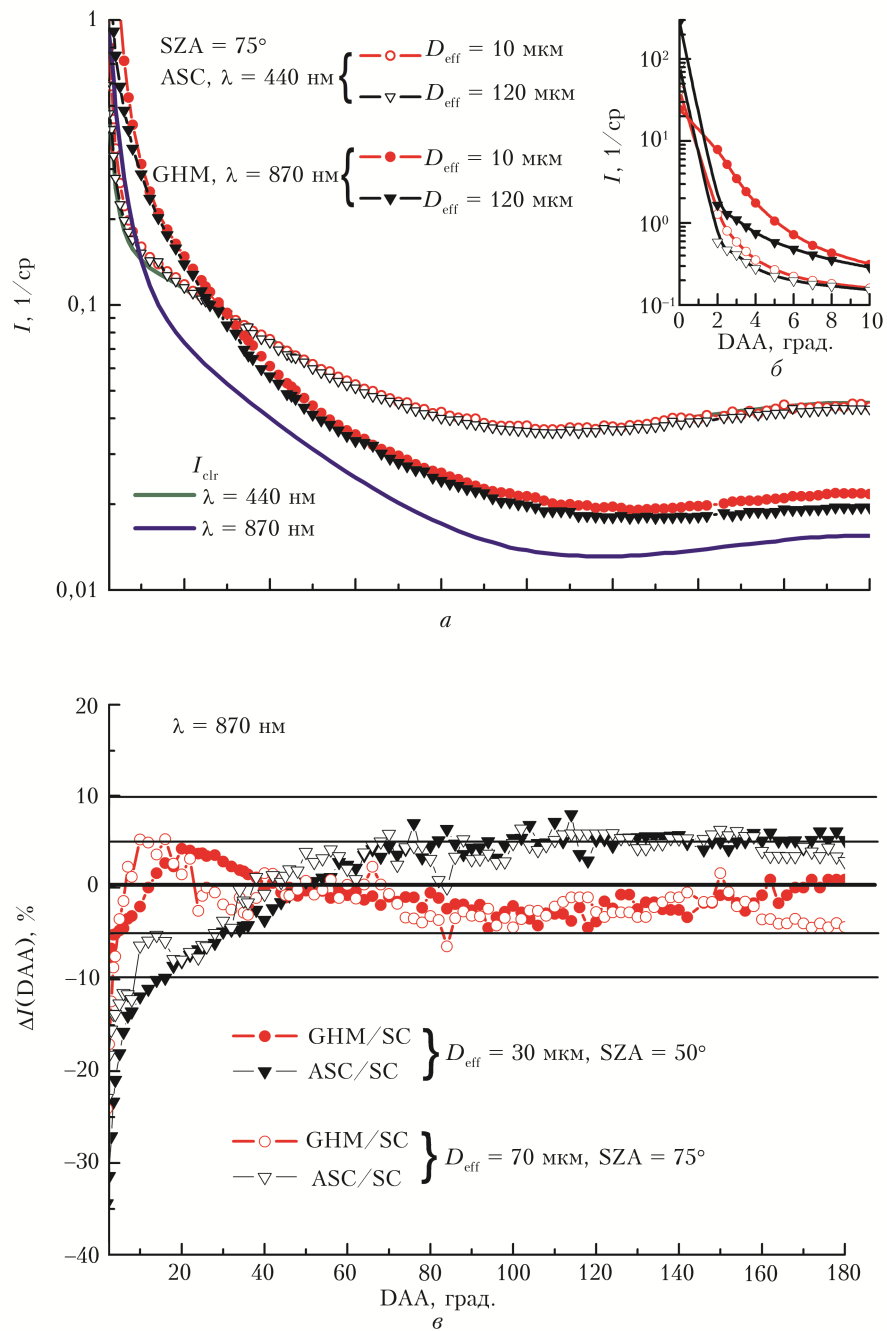


Рис. 4. Интенсивность пропущенной солнечной радиации в альмуокантарате Солнца в зависимости от эффективного диаметра частиц в различных диапазонах азимутальных углов детектора (a , b); относительное различие интенсивностей, рассчитанных с использованием разных моделей микроструктуры ВУН [31, 32] (δ); $\tau = 0,1$

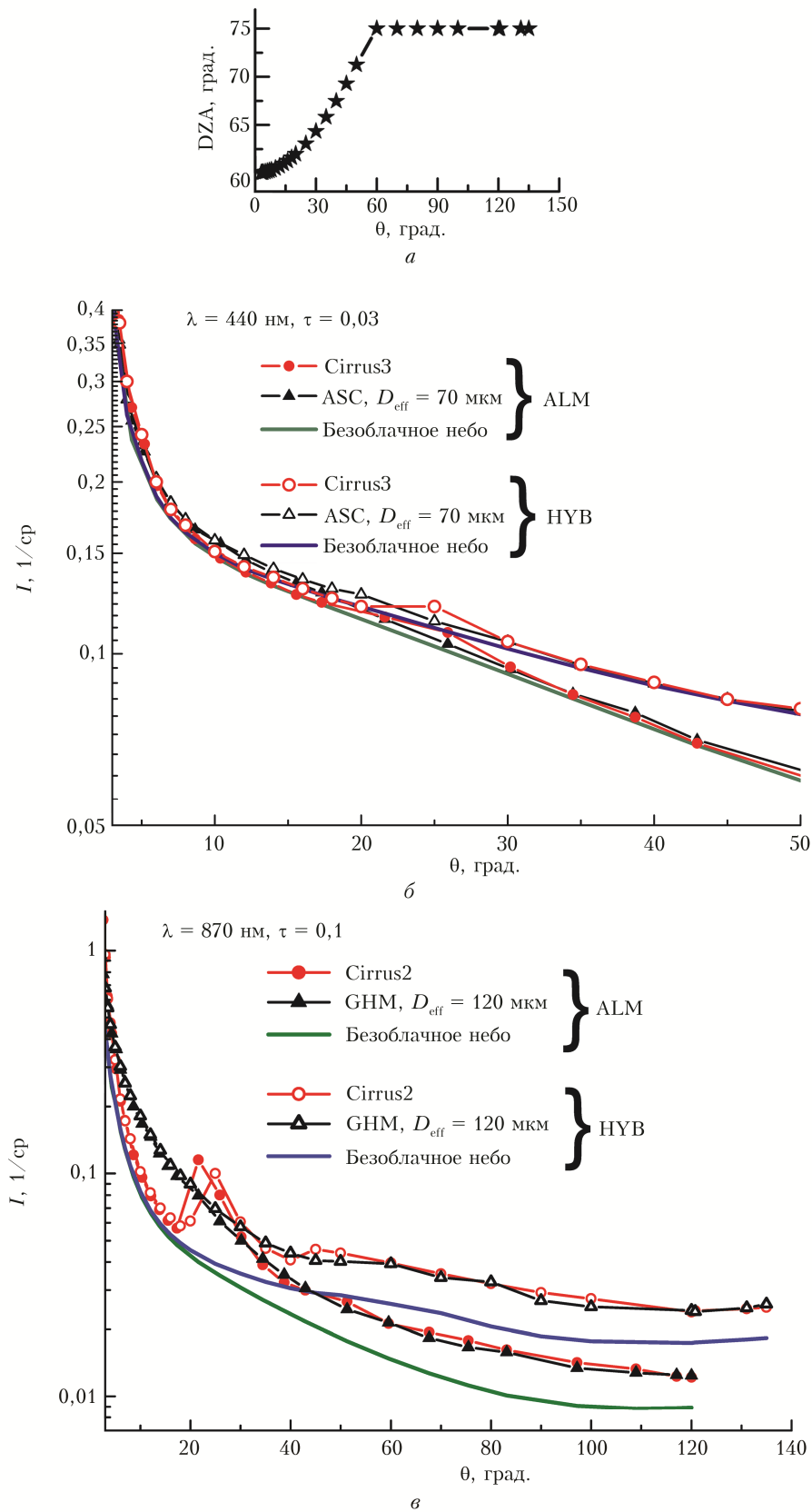


Рис. 5. Соотношение между углом рассеяния и $DZA = 60^\circ$ в схеме гибридного сканирования (а); интенсивности пропущенного излучения, рассчитанные с использованием различных моделей микроструктуры ОРАС и ВУН в альмукантарате Солнца и при гибридном сканировании (б, в)