«Оптика атмосферы и океана», **34**, № 9 (2021)
DOI: 10.15372/AOO20211006

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521.3; 551.576

Влияние микроструктуры и горизонтальной неоднородности разорванной кристаллической облачности на средние потоки солнечной радиации в видимой области спектра: результаты численного моделирования

Т.Б. Журавлева, И.М. Насртдинов*

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

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

Представлены результаты статистического моделирования альбедо и диффузного пропускания атмосферы в видимой области спектра в присутствии сплошной и разорванной кристаллической облачности. Основные численные эксперименты выполнены с использованием третьей версии модели, предложенной группой авторов в составе B.A. Baum, P. Yang, A.J. Heymsfield et al. (смесь частиц разной формы и размеров с сильно шероховатой поверхностью). Для оценки влияния эффектов случайной геометрии облаков на перенос солнечного излучения в атмосфере использован предложенный Г.А. Титовым метод замкнутых уравнений, разработанный в рамках модели на основе пуассоновских потоков точек на прямых. Анализ влияния микроструктуры кристаллической облачности на усредненные по множеству реализаций альбедо и диффузное пропускание при средних баллах облачности показал, что среднее значение неопределенности, обусловленное отсутствием информации о форме и размерах частиц, находится в пределах примерно ±2%. Эта величина сопоставима с влиянием эффектов случайной геометрии в оптически тонких облаках, тогда как в оптически плотной облачности диапазон ошибок, вызванных игнорированием горизонтальной неоднородности, увеличивается и составляет примерно ± 5% при расчетах альбедо при занижении диффузного пропускания на 10–20%.

Ключевые слова: модели кристаллической облачности, метод Монте-Карло, эффекты случайной геометрии облаков, пуассоновская модель, потоки солнечного излучения в видимой области спектра; cirrus cloud models, Monte Carlo method, effects of random geometry of clouds, Poisson model, solar radiation fluxes in the visible spectral region.

Введение

Несмотря на признание того факта, что кристаллические облака существенно влияют на климатическую систему Земли посредством регулирования баланса радиационной энергии атмосферы [1, 2], фундаментальные представления об их микрофизических, оптических и радиационных свойствах все еще остаются ограниченными. Расхождения между результатами расчетов в рамках климатических моделей и данными наблюдений (см., например, [3]) вызваны не только проблемами в воспроизведении таких характеристик облачности, как частота появления, сезонная изменчивость, положение облачного слоя в атмосфере и т.д., но и недостаточно реалистичными предположениями о микрофизических характеристиках кристаллических облаков, а также радиационными кодами, используемыми в оперативных алгоритмах восстановления параметров облачности и моделях климата.

В оперативных алгоритмах восстановления характеристик облачности по данным дистанционного зондирования (в частности, оптической толщины и размера облачных частиц) предполагается, что каждый пиксель является горизонтально однородным, а радиационное взаимодействие между соседними пикселями отсутствует. Исследованию влияния, которое оказывает на восстановленные результаты игнорирование неоднородной структуры реальной облачности, посвящено достаточно много работ. В большинстве из них рассматриваются оптически плотные жидкокапельные облака [4–9], однако анализ показывает, что горизонтальная неоднородность облачного поля может проявиться и в результатах восстановления характеристик оптически тонкой кристаллической облачности [10–12].

Поскольку появление кристаллической облачности может быть причиной смены знака радиационного форсинга облаков [13], в последние два десятилетия проводятся интенсивные исследования, связанные с оценкой влияния формы и размеров ледяных частиц на формирование интегральных потоков солнечного излучения. Часть работ в этом направлении выполнена с использованием горизонтально

* Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов (wizard@iao.ru).

© Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., 2021

однородной (1D) модели атмосферы [14, 15]. Однако накопленные экспериментальные данные позволяют учитывать в этих исследованиях влияние такого фактора, как неоднородная структура (3D) облаков, используя облачные реализации, построенные на основе радарных, лидарных и радиометрических измерений [16–18] либо сконструированные в рамках новых стохастических моделей кристаллической облачности [19, 20]. В частности, N. Buschmann с соавторами показали [16], что в неоднородных кристаллических облаках с оптической толщиной (ОТО) менее 5 и относительным значением вариации ОТО менее 0,2 относительная ошибка в расчетах широкополосных потоков излучения, обусловленная использованием 1D-модели, не превышает ± 10%. Согласно результатам [17] отклонение потока восходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА), обусловленное стохастической структурой облачности, достигает 15 Вт/м^2. Оценки, полученные с использованием генератора облачных реализаций кучевых, слоистокучевых и кристаллических облаков 3DCLOUD [20], показали, что яркостная температура на ВГА при расчетах в 1D- и 3D-моделях может различаться на 15 К [21]. В видимой области спектра различие в отражательной способности облаков определяется пространственным разрешением модели и в зависимости от ОТО и условий наблюдения/освещения может достигать десятков процентов [11].

Исследование влияния неоднородной структуры облаков в вышеперечисленных публикациях выполнено с использованием облачных реализаций, где горизонтальная неоднородность поля обусловлена флуктуациями оптических характеристик и касается в основном широкополосных потоков излучения. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы сопоставить влияние двух различных факторов – эффектов случайной геометрии и микрофизических характеристик кристаллической облачности – на средние потоки солнечного излучения (на примере видимого диапазона). Мы используем в работе набор общедоступных оптических моделей, подробно представленных в разд. 2, и пуассоновскую модель разорванной облачности [22], которая позволяет оценить влияние стохастической геометрии облаков на радиационные характеристики в широком диапазоне изменчивости формы и размеров ледяных кристаллов. Отметим, что такая модель уже была использована нами ранее для оценок влияния эффектов случайной геометрии кристаллических облаков на перенос солнечного излучения в атмосфере, но на тот момент моделирование было выполнено на ограниченном множестве входных параметров [22].

1. Модель атмосферы и методы расчета

Рассматривается многослойная плоскопараллельная модель атмосферы (0–100 км), один из слоев которой может быть полностью или частично занят кристаллическими облаками. Предполагается, что на верхнюю границу атмосферы падает единичный поток солнечного излучения; отражение от подстилающей поверхности (ПП) описывается законом Ламберта; молекулярное поглощение не учитывается.

Проанализируем результаты моделирования потоков солнечного излучения в видимой области спектра (длина волны $\lambda = 0{,}5$ мкм): 1) в аэрозольно-молекулярной атмосфере, а также в присутствии 2) сплошной и 3) разорванной облачности. В первых двух случаях для расчета использованы классические алгоритмы метода Монте-Карло [23], реализованные для случая многослойной горизонтально однородной атмосферы (прямое моделирование [24]). В 3-м случае вычисление средних (по множеству облачных реализаций) потоков солнечного излучения с учетом эффектов стохастической геометрии выполнено в рамках модели на основе пуассоновских потоков точек на прямых [22]. Облака аппроксимируются вытянутыми в одном направлении прямоугольными параллелепипедами (полосами) со средними горизонтальными размерами R_x и R_y (вдоль осей OX и OY соответственно) и высотой H. Такая форма выбрана из тех соображений, что ряд разновидностей кристаллических облаков имеет вид раздельных нитеобразных элементов в виде белых тонких волокон или чуть сероватых вытянутых гряд и клочьев, а иногда располагается полосами, пересекающими небесный свод [25]. Оптические характеристики облаков предполагаются неизменными в пределах всех облачных элементов и не меняются от реализации к реализации. Подробное описание модели и примеры реализаций облачного поля приведены в монографии [22]; краткое описание можно найти, например, в [26].

Для расчета средних значений альбедо $\langle A \rangle$ (на уровне ВГА) и диффузного пропускания $\langle T_s \rangle$ (на уровне ПП) используется предложенный Г.А. Титовым метод замкнутых уравнений [22]. В пределах облачного слоя взаимодействием оптического излучения с аэрозольно-молекулярной составляющей атмосферы будем пренебрегать.

Относительная погрешность расчетов не превышала в большинстве случаев 0,5%.

2. Входные параметры радиационных расчетов

2.1. Молекулярно-аэрозольная атмосфера

Модель аэрозоля задавалась в соответствии с моделью OPAC continental average [27]; коэффициенты молекулярного рассеяния рассчитывались метеомоделью «лето умеренных широт» на основе [28]. Оптические толщины аэрозоля и рэлеевского рассеяния при $\lambda = 0{,}5$ мкм составляли $\tau_a = 0{,}17$ и $\tau_R = 0{,}14$ соответственно. Альбедо подстилающей поверхности полагалось равным альбедо травяного покрова A_s ($\lambda = 0{,}5$ мкм) = 0,045 [29].

2.2. Кристаллическая облачность

Несмотря на сложности в получении экспериментальных данных, за последние несколько десятилетий накоплен большой материал о форме частиц, ледности и распределении частиц по размерам, базирующийся на лидарных, самолетных, шар-зондовых и спутниковых измерениях в различных регионах земного шара. На основе этих данных из всего многообразия форм частиц выделены наиболее часто встречающиеся в перистых облаках типы кристаллов (см., например, [30–33] и др.): гексагональные столбики (сплошные и полые), гексагональные пластинки, квазисферические частицы (усеченные сферы – дрокталы, вытянутые и приплюснутые сферы), пульки (сплошные и полые), розетки (2D- и 3D-пульки), агрегаты (образования из нескольких монокристаллов, таких как пластинки, столбики, пульки). На основе информации о форме частиц и их распределении по размерам, а также современных методов расчета оптических характеристик несферических частиц в предположении их хаотической ориентации сформированы оптические модели кристаллических облаков, которые нашли широкое применение при решении задач дистанционного зондирования (восстановление параметров облаков на основе радиометрических наблюдений) и интерпретации измерений отраженного излучения [15, 34–40].

В таблице представлены использованные в настоящей работе 19 моделей кристаллических облаков: две версии модели, разработанной группой авторов в составе B.A. Baum, P. Yang, A.J. Heymsfield et al. [31, 41, 42] (в дальнейшем будем обозначать их как BYH2 (4 варианта) и BYH3 (12 вариантов) – вторая и третья версии соответственно), а также модели кристаллических облаков, представленные в пакете OPAC (3 варианта) [27].

Оптические характеристики BYH2 и BYH3 рассчитаны для моделей микроструктуры, различающихся как формой, так и распределением частиц по размерам, характеризующимся значением эффективного диаметра D_{eff}. Модель BYH3 [42] является улучшенной и дополненной версией модели BYH2 [31, 41]: существенно расширен спектральный диапазон, включены три типа шероховатости поверхности частиц, три типа смесей частиц в зависимости от формы и размеров, полная матрица рассеяния для частиц с сильной шероховатостью, более частая сетка по углу рассеяния индикатрисы и т.д. Существенное различие оптических характеристик BYH2 и BYH3 обусловлено тем, что учет поверхностной шероховатости в модели BYH3 сглаживает угловой ход индикатрисы рассеяния излучения и – в отличие от гладких частиц – приводит к нивелированию гало и существенному уменьшению обратного рассеяния [35].

Модели кристаллических облаков

Модель	Форма частиц	D_{eff}, мкм	Фактор асимметрии $\langle\mu\rangle$ (0,5 мкм)
	Модель BYH3		
Агрегаты из сплошных столбиков (Aggregates of solid columns, ASC)	Агрегаты из сплошных гексагональных столбиков	10	0,746 (1)*
		30	0,749 (2)
		70	0,75 (3)
		120	0,75 (4)
Смесь частиц различной формы (General habit mixture, GHM)	Дрокталы, пластинки, сплошные и полые столбики и пульки, агрегаты из сплошных столбиков, большие и малые агрегаты из пластинок	10	0,77 (5)
		30	0,783 (8)
		70	0,8 (10)
		120	0,811 (12)
Сплошные столбики (Solid columns, SC)	Сплошные гексагональные столбики	10	0,77 (6)
		30	0,782 (7)
		70	0,789 (9)
		120	0,804 (11)
	Модель BYH2		
Смесь частиц различной формы	$D_{\max} < 60$ мкм – 100% дрокталы;	10	0,777
	60 мкм $< D_{\max} <$ 1000 мкм – 15% 3D-пульки, 50% сплошных столбиков, 35% пластинок;	30	0,784
	1000 мкм $< D_{\max} <$ 2500 мкм – 45% полых столбиков, 45% сплошных столбиков, 10% агрегатов;	70	0,81
	2500 мкм $< D_{\max} <$ 9500 мкм – 97% 3D-пульки, 3% агрегатов	120	0,865
	Модель OPAC		
Cirrus1, температура –25 °C	Гексагональные столбики	183,4	0,783
Cirrus2, температура –50 °C	Розетки из гексагональных столбиков	114,8	0,77
Cirrus3, температура –50 °C	Модель Cirrus2 с добавлением мелких частиц	68,6	0,763

* В скобках указан номер модели по возрастанию $\langle\mu\rangle$.

Тестирование модели BYH3 выполнялось на основе сопоставлений с экспериментальными данными (см., например, [42] и приведенную там библиографию). На базе *in situ* наблюдений было показано, что наилучшее согласие между ледностью IWC и диаметром средней массы D_{mm} имело место для модели, форма частиц в которой задавалась в виде сплошных столбиков (модель SC), а измеренная с использованием PARASOL отражательная способность облаков была наиболее близкой к результатам моделирования для смеси частиц различной формы с сильной шероховатостью поверхности (модель GHM). Оптимальное соответствие между значениями OTO, восстановленными на основе измерений в солнечном и ИК-диапазонах спектра, наблюдалось при использовании модели агрегатов из сплошных столбиков (ASC). В заключение отметим, что на основе моделей BYH2 и BYH3 были сформированы модели кристаллических облаков, которые использовались и используются для получения продуктов дистанционного зондирования на основе измерений сканером MODIS: BYH2 – коллекция 5, BYH3 (модель агрегатов из сплошных столбиков) – коллекция 6 [34, 35].

При проведении радиационных расчетов, помимо BYH2 и BYH3, мы будем использовать модели OPAC, оптические характеристики которых соответствуют трем различным моделям микроструктуры (Cirrus1, Cirrus2, Cirrus3) в зависимости от температуры облаков и формы частиц [27]. Гексагональной формой и гладкой поверхностью ледяных частиц обусловлено наличие в видимом диапазоне выраженных гало в углах рассеяния $\theta_1 \approx 22°$ и $\theta_2 \approx 46°$. Сопоставление угловой структуры индикатрис рассеяния излучения в моделях BYH3 и OPAC представлено нами ранее в [43]. Отметим также, что для 18 из 19 рассматриваемых кристаллических моделей величина фактора асимметрии (среднего косинуса индикатрисы рассеяния излучения) $\langle\mu\rangle$ варьируется в диапазоне 0,746–0,811; исключение составляет лишь одна модель BYH2 ($D_{\mathrm{eff}} = 120$ мкм), для которой $\langle\mu\rangle = 0{,}865$.

Моделирование переноса излучения выполнено в присутствии сплошной и разорванной кристаллической облачности для оптически тонких (оптическая толщина $\tau = 0{,}3$) и оптически плотных ($\tau = 3$) облаков [44], занимающих слой 9–10 км; альбедо однократного рассеяния облаков полагалось равным 1.

Условия освещенности задавались значениями зенитного угла Солнца SZA = {30°, 75°} и азимутального угла SAA, который отсчитывался от положительного направления оси OX и во всех расчетах полагался равным 0. В общем случае значение SAA может быть выбрано произвольным, $0 \le \mathrm{SAA} \le 180°$, что при фиксированных горизонтальных размерах полос R_x и R_y позволяет исследовать, как меняются средние потоки излучения в зависимости от условий освещенности. В настоящей работе мы ограничились рассмотрением двух крайних случаев, когда прямое солнечное излучение падает вдоль и поперек полос: в этом случае достаточно зафиксировать SAA = 0 и изменить горизонтальные размеры полос вдоль осей OX и OY. Были выбраны средние горизонтальные размеры облаков $R_x = 10$ км, $R_y = 1$ км и $R_x = 1$ км, $R_y = 10$ км. В первом случае прямое солнечное излучение распространяется вдоль, а во втором – поперек вытянутых полос.

3. Результаты численных экспериментов

В этом разделе представлены результаты численного моделирования альбедо атмосферы A и диффузного пропускания T_{s}, соответственно, на уровне ВГА и ПП и полученные на их основе оценки влияния: 1) микроструктуры в сплошной горизонтально однородной облачности (подразд. 3.1), 2) эффектов случайной геометрии для фиксированной оптической модели кристаллической облачности (подразд. 3.2). Также обсуждается совместное воздействие микроструктуры и 3D-эффектов облаков на формирование рассеянных потоков солнечного излучения в разорванной кристаллической облачности на множестве моделей BYH3 (подразд. 3.3). Мы не рассматриваем в этой работе потоки прямого излучения на уровне ПП, поскольку влияние микроструктуры облаков оценивается при фиксированной оптической толщине и, следовательно, не зависит от формы и спектра размеров частиц и определяется лишь эффектами стохастической геометрии.

3.1. Влияние микроструктуры кристаллических облаков (сплошная горизонтально однородная облачность)

На рис. 1 представлены A и T_{s}, рассчитанные с использованием 19 представленных в таблице моделей кристаллической облачности. Результаты расчетов показывают, что A и T_{s} слабо варьируются при изменении угловой структуры индикатрисы рассеяния излучения (отсутствие/наличие гало, степень вытянутости индикатрисы вблизи направления «вперед» и т.д.) и определяются в основном $\langle\mu\rangle$. Зависимость A и T_{s} от $\langle\mu\rangle$ при фиксированных значениях OTO и SZA близки к линейным и характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции ($R > 0{,}96$). Учитывая, что средний косинус во всех моделях, за исключением BYH2 ($D_{\mathrm{eff}} = 120$ мкм), изменяется в интервале 0,746–0,811, в дальнейшем мы будем рассматривать результаты расчетов потоков излучения, полученные моделью BYH3 (число вариантов $N_{Ci} = 12$), поскольку они полностью отражают вариации A и T_{s} на множестве моделей кристаллической облачности, представленных в таблице.

Очевидно, что качество радиационных расчетов (в частности, при сравнении с данными эксперимента) зависит от того, насколько точна информация об оптической модели облачности. Рассмотрим далее две ситуации: 1) известно только τ; 2) известны τ и D_{eff}.

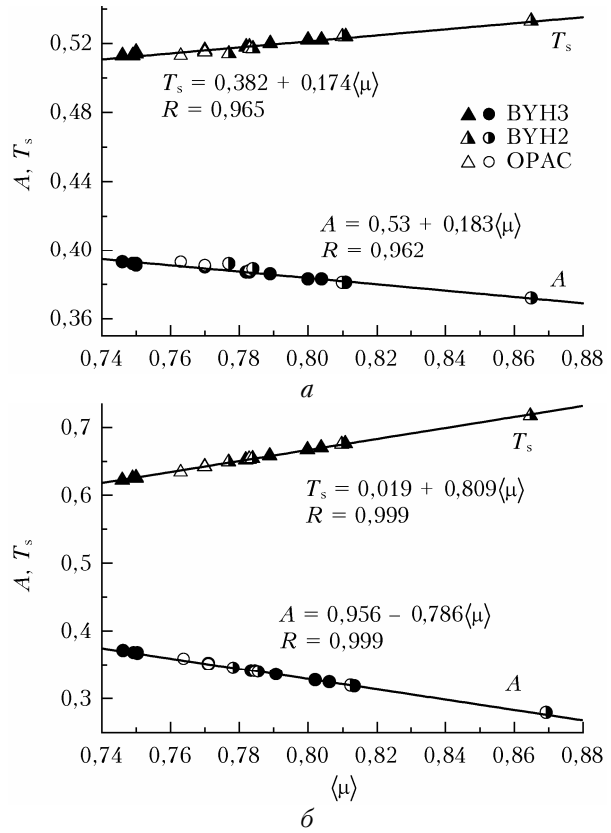


Рис. 1. Альбедо A и диффузное пропускание T_s сплошной кристаллической облачности в зависимости от формы и размеров частиц (таблица) при $\tau = 0{,}3$; SZA = 75° (*а*); $\tau = 3$; SZA = 30° (*б*)

В первом случае важным аспектом является соотношение между оптическими толщинами безоблачной атмосферы $\tau_{clr} = \tau_a + \tau_R$ и кристаллических облаков τ, значение которой может быть меньше или сравнимо с τ_{clr}. Для оценки его влияния сравним диапазоны изменчивости альбедо и диффузного пропускания, рассчитанные с учетом аэрозольно-молекулярного компонента атмосферы (A и T_s), с результатами аналогичных расчетов, выполненных для изолированного облачного слоя (A_{Ci} и $T_{s,\,Ci}$). В последнем случае вариации альбедо и диффузного пропускания зависят исключительно от оптической модели кристаллических облаков.

Диапазон изменчивости $F = A,\ T_s,\ A_{Ci},\ T_{s,\,Ci}$ определим минимальными и максимальными их относительными различиями $\delta_i^j F,\ i, j = 1, \ldots, N_{Ci} = 12$, обусловленными использованием в расчетах различных моделей BYH3:

$$\Delta^i F = \left\{\min_j \delta_j^i F, \max_j \delta_j^i F\right\},\quad \delta_j^i F = 100\% \cdot (F^j - F^i)/F^i,$$
$$i, j = 1, \ldots, 12. \qquad (1)$$

Анализ результатов численного моделирования показывает следующее. Если $\tau \lesssim \tau_{clr}$, то различия, определяемые особенностями кристаллической модели, существенно сглаживаются. Так, при $\tau \approx \tau_{clr} \approx 0{,}3$ (рис. 2, *а*, *б*) диапазон различий альбедо и диффузного пропускания в изолированном слое и облачной атмосфере уменьшается в зависимости от модели от примерно ±12 до примерно ±2% и от примерно ±5 до примерно ±2% соответственно. С увеличением оптической толщины кристаллических облаков при неизменной τ_{clr} влияние аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния снижается: при $\tau = 3$ различия между $\Delta^i A_{Ci}$ и $\Delta^i A$ уменьшаются незначительно (от ±20 до ±15%), а $\Delta^i T_{s,\,Ci}$ и $\Delta^i T_s$ мало отличаются друг от друга (±10%) (рис. 2, *в*, *г*). Как следует из представленных результатов, относительные различия средних потоков, обусловленные многообразием оптических моделей, тем больше, чем больше различия в значениях соответствующих факторов асимметрии, а в облачной атмосфере, по сравнению с изолированным слоем, зависимость альбедо и диффузного пропускания от модели тем сильнее, чем больше ОТО для типичных значений $0{,}3 \le \tau \le 3$. Кроме того, более чувствительными к вариациям микроструктуры являются потоки отраженной радиации.

Оценим влияние формы ледяных кристаллов на альбедо и диффузное пропускание при фиксированном значении эффективного диаметра частиц. Результаты моделирования показывают (рис. 3), что влияние формы частиц зависит от ОТО и возрастает по мере увеличения D_{eff}. Так, при $\tau = 3$ неопределенность в расчетах A и T_s, обусловленная отсутствием информации о форме кристаллов, увеличивается от примерно ±5 до примерно ±15% и от примерно ±3 до примерно ±8% при возрастании D_{eff} от 10 до 120 мкм. В оптически тонких кристаллических облаках ($\tau = 0{,}3$) воздействие формы частиц существенно меньше и во всем рассматриваемом диапазоне $10 \le D_{eff} \le 120$ мкм не превышает 2–3%.

В заключение этого подраздела отметим: из сопоставления результатов на рис. 2 и 3 следует, что основными факторами, от которых зависит неопределенность в расчетах потоков излучения, являются оптическая толщина облаков и форма частиц. Аналогичные результаты были получены в [18, 44], однако приведенные там данные свидетельствуют о том, что влияние размеров кристаллов возрастает при наличии поглощения [45].

3.2. Оценка влияния горизонтальной неоднородности кристаллической облачности

Для понимания того, каким образом эффекты случайной геометрии облаков влияют на средние значения потоков $\langle F\rangle = \{\langle A\rangle, \langle T_s\rangle\}$, выберем модель GHM ($D_{eff} = 70$ мкм) и оценим величины

$$\Delta_{3D} F = 100\% \cdot \left(F_{o-c} - \langle F\rangle\right)/\langle F\rangle,$$
$$F_{o-c} = (1 - CF) \cdot F_{clr} + CF \cdot F, \qquad (2)$$

где F_{o-c} – поток солнечного излучения, рассчитанный на основе моделирования потоков излучения в условиях безоблачного неба F_{clr} и сплошной облачности F (приближение «открыто–закрыто»/open–closed [22, 46]); CF – балл облачности в долях еди-

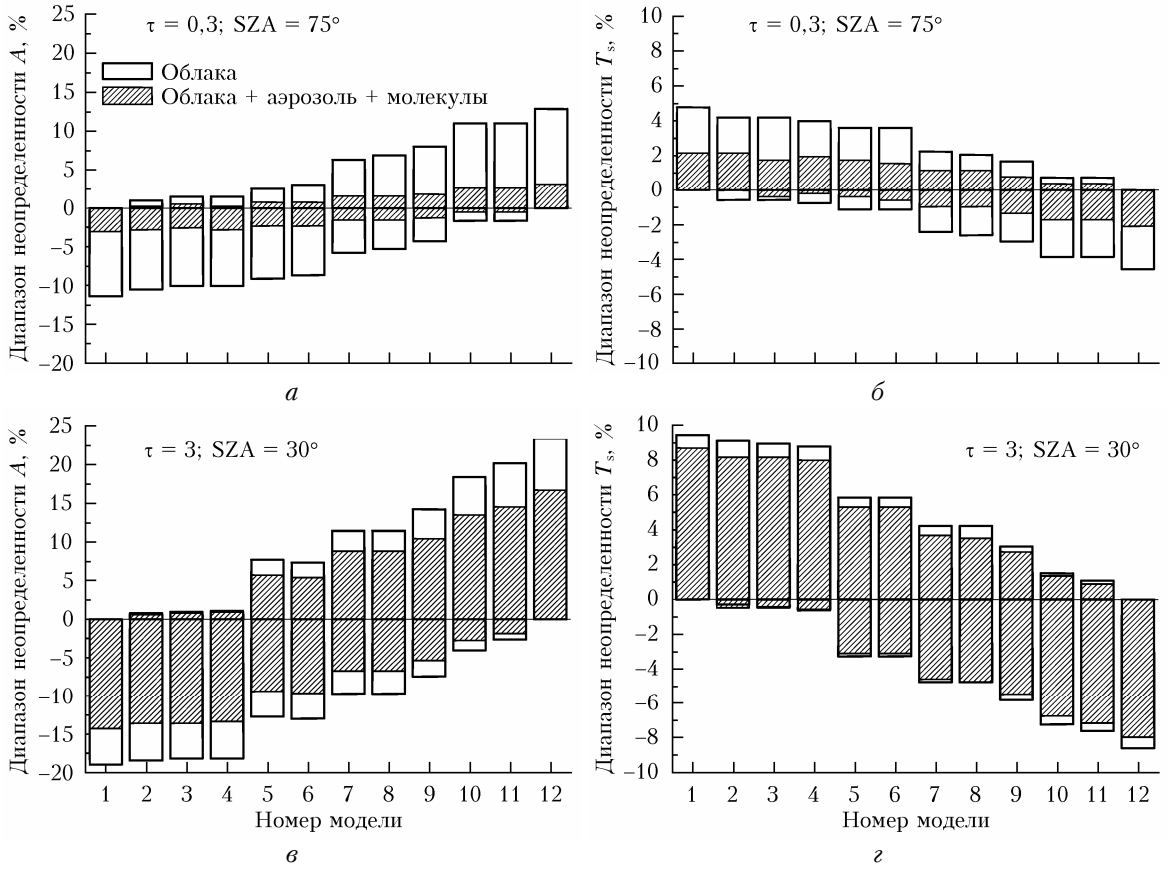


Рис. 2. Диапазон изменений A (*а*, *в*) и T_s (*б*, *г*) при вариациях входящих в BYH3 оптических моделей кристаллических облаков в зависимости от значений τ и SZA

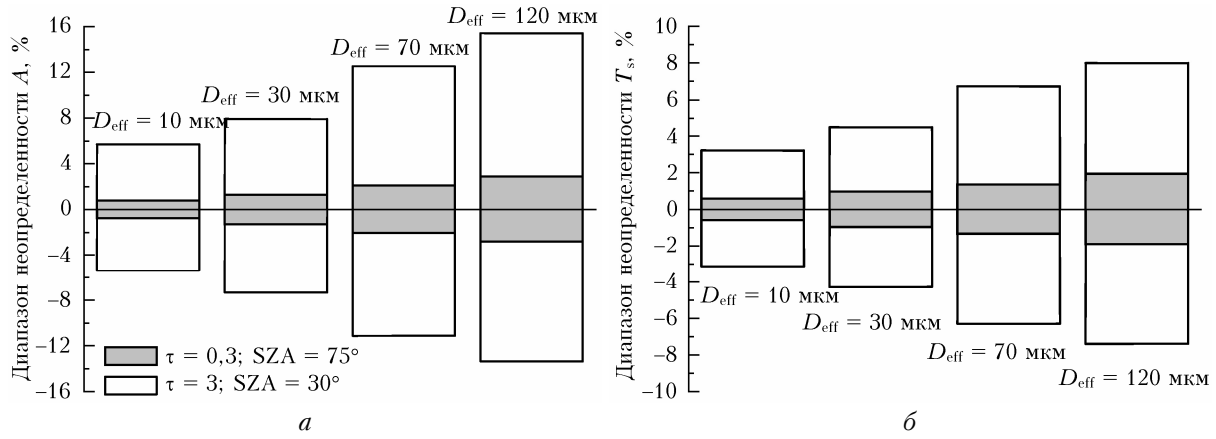
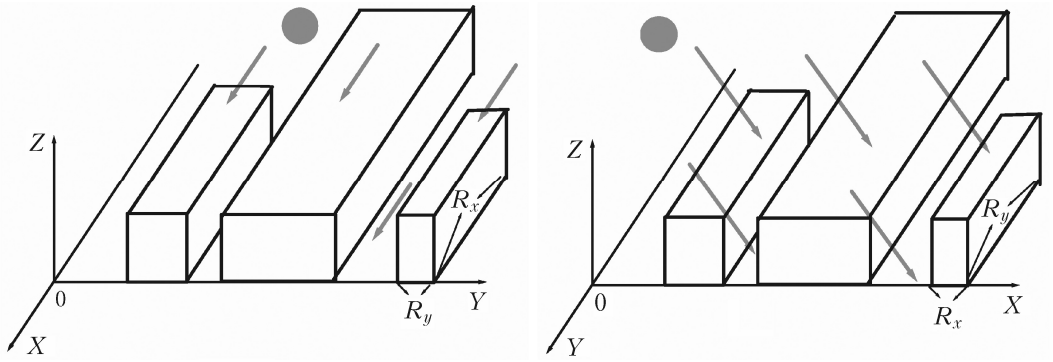


Рис. 3. Зависимость изменений A (*а*) и T_s (*б*) от формы при фиксированном D_{eff} и различных значениях τ и SZA

ницы. Это приближение используется для описания радиационных характеристик в облаках, вертикальные размеры которых существенно меньше горизонтальных (слоистые облака).

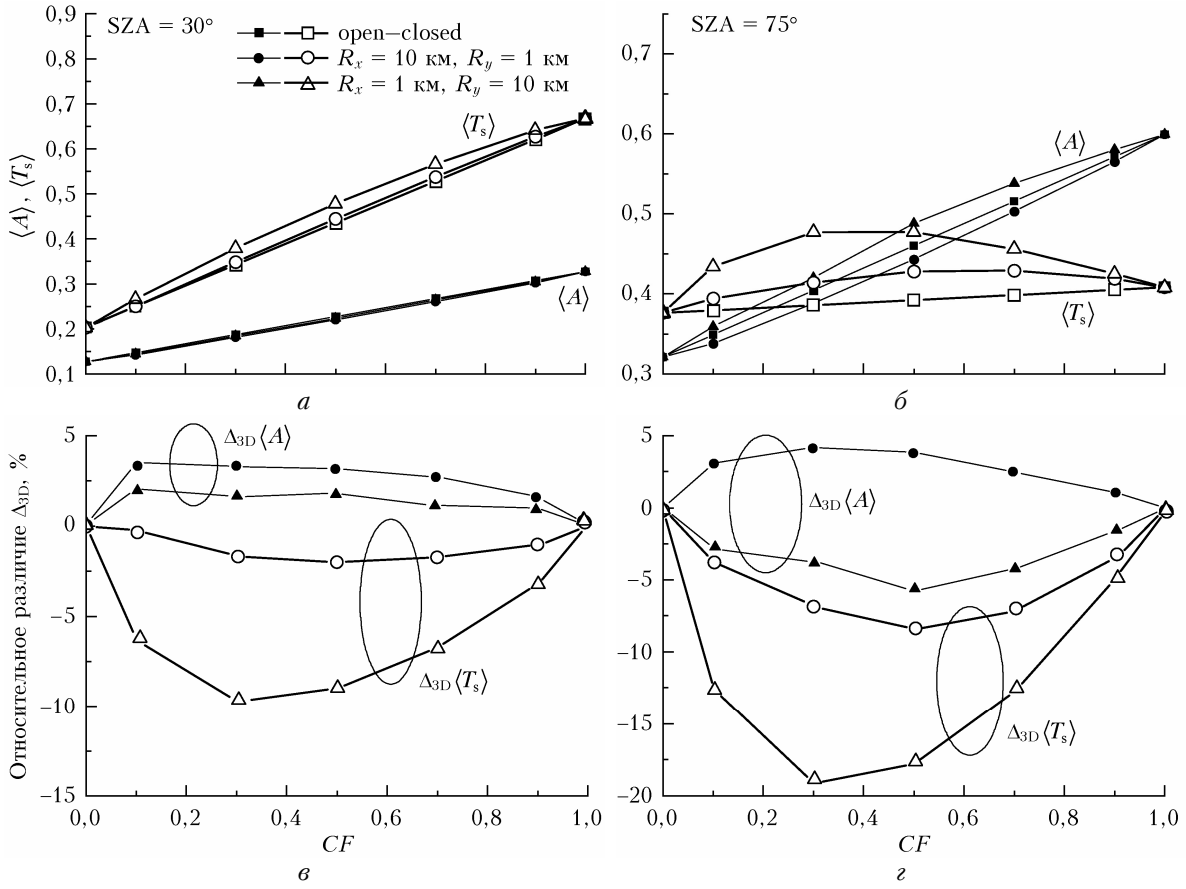
Рассмотрим две различные ситуации, связанные с ориентацией облачных полос: 1) $R_x = 10$ км, $R_y = 1$ км (рис. 4, *а*); 2) $R_x = 1$ км, $R_y = 10$ км (рис. 4, *б*). Выберем для анализа ситуации с $\tau = 3$, поскольку по мере увеличения ОТО относительная роль боковых сторон и радиационного взаимодействия отдельных облаков усиливаются, и проявление 3D-эффектов облаков становится более выраженным [22].

Если SZA = 30°, то независимо от ориентации облачных полос имеет место неравенство $\langle A \rangle < A_{o-c}$ (рис. 5, *а*). Это связано с тем, что при таких условиях освещенности доля прямого излучения слабо зависит от структуры облачного поля, и для рассеянной радиации в случае консервативного рассеяния и малых значений A_s справедливо соотношение $\langle A \rangle + \langle T_s \rangle \approx A_{o-c} + T_{s,\,o-c}$. В случае слоистой облачности (приближение open–closed) практически все



а *б*

Рис. 4. Схема расположения облачного поля в зависимости от ориентации полос при различных условиях освещенности: прямое солнечное излучение падает вдоль (*а*) и поперек полос (*б*)



а *б* *в* *г*

Рис. 5. Зависимость средних значений альбедо и диффузного пропускания, рассчитанных с учетом и без учета горизонтальной неоднородности облаков (*а*, *б*) и их относительных различий (*в*, *г*), от балла облачности; модель GHM (D_{eff} = 70 мкм), τ = 3

излучение выходит через вершины и основания облаков, тогда как в поле, состоящем из облаков конечных размеров, значительная часть излучения может покинуть облако через его боковые стороны, испытав в среднем меньше актов рассеяния, чем излучение, выходящее через вершину и основание. Ввиду сильной вытянутости индикатрисы рассеяния излучения в направлении «вперед» большая часть выходящего через боковые стороны излучения дает вклад в пропускание, т.е. $\langle T_s \rangle > T_{s,\,o-c}$ и, следовательно, $\langle A \rangle < A_{o-c}$.

При SZA = 75° соотношение между $\langle A \rangle$ и A_{o-c} зависит от ориентации облаков относительно направления падающего солнечного излучения. Если солнечное излучение падает *вдоль* вытянутых полос (R_x = 10 км, R_y = 1 км), то роль боковых сторон сравнительна невелика и можно считать, что

$$\langle A(R_x = 10 \text{ км}, R_y = 1 \text{ км}) \rangle + \\ + \langle T_s(R_x = 10 \text{ км}, R_y = 1 \text{ км}) \rangle \approx A_{o-c} + T_{s,\,o-c}. \quad (3)$$

Следствием этого, как и при SZA = 30°, являются неравенства

$$\left\langle T_s(R_x = 10 \text{ км}, R_y = 1 \text{ км})\right\rangle > T_{s,o-c}$$

$$\text{и } \left\langle A(R_x = 10 \text{ км}, R_y = 1 \text{ км})\right\rangle < A_{o-c}. \quad (4)$$

Если излучение падает *поперек* полос (рис. 4, *б*), боковые стороны перекрывают направление «на Солнце», и ввиду существенного уменьшения доли прямого излучения возрастает вклад рассеянного, т.е.

$$\left\langle A(R_x = 1 \text{ км}, R_y = 10 \text{ км})\right\rangle +$$

$$+ \left\langle T_s(R_x = 1 \text{ км}, R_y = 10 \text{ км})\right\rangle > A_{o-c} + T_{s,o-c}. \quad (5)$$

При указанных параметрах задачи это неравенство является настолько сильным, что, помимо соотношения

$$\left\langle T_s(R_x = 1 \text{ км}, R_y = 10 \text{ км})\right\rangle > T_{s,o-c}, \quad (6)$$

аналогичное неравенство выполняется и для альбедо:

$$\left\langle A(R_x = 1 \text{ км}, R_y = 10 \text{ км})\right\rangle > A_{o-c}. \quad (7)$$

Полученные количественные оценки влияния случайной геометрии показывают (см. рис. 5), что максимальные отклонения от приближения open–closed наблюдаются для потоков диффузного пропускания: при $CF = 0{,}3$–$0{,}5$ значение $\Delta_{3D}\langle T_s\rangle$ изменяется в зависимости от SZA и направления облачных полос от примерно –10 до –20%. Воздействие случайной геометрии облаков на среднее альбедо проявляется в меньшей степени и по абсолютной величине не превышает от 2 (SZA = 30°) до 5% (SZA = 75°). При $\tau = 0{,}3$ влияние случайной геометрии на $\langle A\rangle$ и $\langle T_s\rangle$ менее значимо и находится в пределах 1–3% по абсолютной величине.

3.3. Совместное воздействие микроструктуры и эффектов стохастической геометрии на средние потоки солнечного излучения

Рассмотрим, как соотносятся между собой неопределенности в расчетах альбедо и диффузного пропускания, обусловленные, во-первых, отсутствием информации о микроструктуре кристаллической облачности $\Delta^i\langle F\rangle$ и, во-вторых, пренебрежением в рамках известной кристаллической модели эффектами случайной геометрии $\Delta_{3D}\langle F^i\rangle$, $i = 1, \ldots, N_{Ci}$. Поскольку предварительные расчеты показали, что диапазон изменчивости средних потоков вследствие вариаций формы и размеров ледяных кристаллов практически не зависит от ориентации облачных полос относительно падающего солнечного излучения, будем оценивать $\Delta^i\langle F\rangle$ на основе моделирования средних потоков излучения при $R_x = 1$ км, $R_y = 10$ км.

Анализ различий средних потоков на всем множестве оптических моделей $i = 1, \ldots, N_{Ci}$ показывает, что при среднем значении $CF = 0{,}5$ в рассматриваемом диапазоне параметров диапазон изменчивости $\Delta^i\langle F\rangle$ не превышает по абсолютной величине 4–5% при средних значениях ±2% (рис. 6). Влияние микроструктуры в разорванных облаках несколько

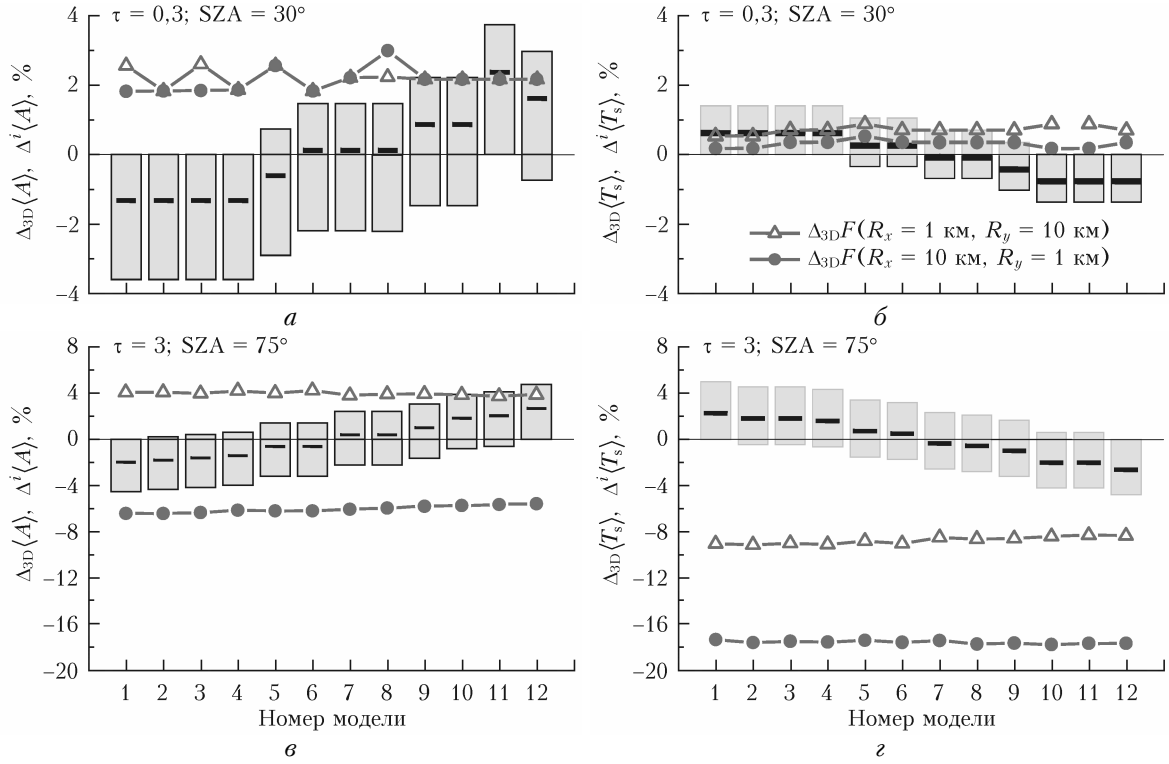


Рис. 6. Неопределенности в моделировании $\langle A\rangle$ (*а*, *в*) и $\langle T_s\rangle$ (*б*, *г*), обусловленные отсутствием информации о микроструктуре облаков и пренебрежением эффектами случайной геометрии при $CF = 0{,}5$: серые столбики – диапазон изменений $\langle A\rangle$ и $\langle T_s\rangle$ при вариациях микроструктуры кристаллической облачности; горизонтальные линии – средние значения неопределенности; серые кривые – ошибки, обусловленные неучетом горизонтальной неоднородности облачного слоя

уменьшается по сравнению со сплошной облачностью (рис. 2 и 6). Так, при $\tau = 0{,}3$ $\Delta^i\langle F\rangle$, $i = 1, \ldots, N_{Ci}$ сокращается не столь значительно (в основном на 1–2%), тогда как при $\tau = 3$ и SZA = 75° $\Delta^i\langle T_s\rangle$ уменьшается почти в 2 раза: от (–6%, +10%) до (–4%, +5%) при сравнительно небольшом изменении $\Delta^i\langle A\rangle$ (на ~ 1–2%).

В оптически тонких облаках среднее значение неопределенности, обусловленной отсутствием данных о форме и размерах кристаллов $\Delta^i\langle F\rangle$, сопоставимо с $\Delta_{3D}\langle F^i\rangle$, $i = 1, \ldots, N_{Ci}$, связанной с использованием в расчетах горизонтально однородной модели, и по абсолютной величине находится в пределах 2% (рис. 6, *а*, *б*). С увеличением ОТО до $\tau = 3$ и при SZA = 75° влияние эффектов случайной геометрии облаков возрастает: при расчетах альбедо и диффузного пропускания неучет горизонтальной неоднородности приводит к неопределенностям в диапазоне (–6%, 4%) и (–20%, –10%) соответственно, тогда как среднее значение $\Delta^i\langle F\rangle = \pm 2\%$. Подчеркнем, что если при моделировании диффузного пропускания в приближении open–closed величина $\langle T_s^i\rangle$ занижается, то при расчетах среднего альбедо может наблюдаться как завышение, так и занижение этой характеристики (причины этого обсуждаются в подразд. 3.2, см. также рис. 5).

Заключение

В работе рассмотрены результаты статистического моделирования альбедо A и диффузного пропускания T_s на уровне ВГА и ПП в кристаллической облачности (видимый диапазон), предназначенные для сопоставления влияния на их формирование двух факторов – микроструктуры облаков и эффектов стохастической геометрии.

Для исследования влияния формы и размеров хаотически ориентированных ледяных кристаллов использованы вторая и третья версии модели, предложенной группой авторов в составе B.A. Baum, P. Yang, A.J. Heymsfield et al. (BYH2 и BYH3), а также модели кристаллических облаков, представленные в пакете OPAC. Выполненный на первом этапе анализ влияния микроструктуры в *сплошной* горизонтально однородной облачности с оптической толщиной $0{,}3 \le \tau \le 3$ показал, что потоки рассеянного излучения слабо зависят от угловой структуры индикатрис рассеяния излучения и определяются в основном фактором асимметрии. Оценка относительных различий потоков излучения, рассчитанных моделью BYH3 (12 вариантов в зависимости от формы и эффективного диаметра частиц), показала, что влияние микроструктуры увеличивается с ростом ОТО: при $\tau = 3$ диапазон неопределенностей при отсутствии информации о форме и размерах частиц составляет примерно ± 15 и примерно $\pm 10\%$ при расчетах A и T_s соответственно. По мере увеличения D_{eff} от 10 до 120 мкм возрастает влияние формы кристаллов, и диапазон относительных различий изменяется от примерно ± 5 до примерно $\pm 15\%$ для A и от примерно ± 3 до примерно $\pm 8\%$ для T_s. В оптически тонких кристаллических облаках $\tau = 0{,}3$ воздействие формы на результаты расчетов A и T_s существенно меньше и не превышает 2–3% по абсолютной величине.

Оценка влияния стохастической геометрии облаков на формирование средних потоков солнечного излучения выполнена на основе сопоставлений расчетов в пуассоновской модели разорванной облачности и приближении open–closed на примере одного из вариантов BYH3. Показано, что влияние случайной геометрии, максимальное при средних баллах облачности $CF = 0{,}3$–$0{,}5$ и $\tau = 3$, зависит от ориентации вытянутых облаков относительно падающего солнечного излучения и наиболее сильно проявляется при больших зенитных углах Солнца: среднее альбедо может быть как завышено, так и занижено в пределах 5%, а среднее диффузное пропускание занижается в пределах 10–20%.

Анализ совместного воздействия эффектов случайной геометрии и микроструктуры кристаллической облачности на *всем множестве* рассматриваемых вариантов модели BYH3 выполнен при средних значениях балла облачности ($CF = 0{,}5$). Показано, что в рассматриваемом диапазоне входных параметров среднее значение неопределенности, обусловленное отсутствием информации о микроструктуре, находится в пределах примерно $\pm 2\%$. Эта величина сопоставима с влиянием эффектов случайной геометрии в оптически тонких облаках (< 1–2%), тогда как в оптически плотной облачности диапазон ошибок, вызванный игнорированием горизонтальной неоднородности облаков, увеличивается и при расчетах альбедо и диффузного пропускания составляет (–6%, 4%) и (–10%, –20%) соответственно.

Модификация алгоритма статистического моделирования переноса солнечного излучения в разорванной кристаллической облачности и подготовка входных параметров выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН; численные эксперименты и анализ результатов выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-01-00351).

1. *Liou K.N.* Influence of cirrus clouds on weather and climate processes – A global perspective // Mon. Weather Rev. 1986. V. 114. P. 1167–1199.
2. *Baran A.J.* From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward // Atmos. Res. 2012. V. 112. P. 45–69.
3. *Zhang M.H., Lin W.Y., Klein S.A., Bacmeister J.T., Bony S., Cederwall R.T., Del Genio A.D., Hack J.J., Loeb N.G., Lohmann U., Minnis P., Musat I., Pincus R., Stier P., Suarez M.J., Webb M.J., Wu J.B., Xie S.C., Yao M.-S., Zhang J.H.* Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric general circulation models with satellite measurements // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. D15S02.
4. *Loeb N.G., Coakley J.A.* Inference of marine stratus cloud optical depths from satellite measurements: Does 1D theory apply? // J. Clim. 1998. V. 11, iss. 2. P. 215–233.
5. *Várnai T., Marshak A.* Statistical analysis of the uncertainties in cloud optical depth retrievals caused by three-dimensional radiative effects // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58, N 12. P. 1540–1548.

6. *Iwabuchi H., Hayasaka T.* Effects of cloud horizontal inhomogeneity on the optical thickness retrieved from moderate-resolution satellite data // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, iss. 14. P. 2227–2242.
7. *Zinner T., Mayer B.* Remote sensing of stratocumulus clouds: Uncertainties and biases due to inhomogeneity // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. D14209.
8. *Marshak A., Platnick S., Várnai T., Wen G., Cahalan R.F.* Impact of 3D radiative effects on satellite retrievals of cloud droplet sizes // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. DO9207.
9. *Cornet C., Davies R.* Use of MISR measurements to study the radiative transfer of an isolated convective cloud: Implications for cloud optical thickness retrieval // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. D04202.
10. *Zhou Y., Sun X., Zhang R., Zhang C., Li H., Zhou J., Li S.* Influences of cloud heterogeneity on cirrus optical properties retrieved from the visible and near-infrared channels of MODIS/SEVIRI for flat and optically thick cirrus clouds // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. V. 187. P. 232–246.
11. *Fauchez T., Platnick S., Várnai T., Meyer K., Cornet C., Szczap F.* Scale dependence of cirrus heterogeneity effects. Part II: MODIS NIR and SWIR channels // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. P. 12105–12121.
12. *Kalesse H.* Influence of ice crystal habit and cirrus spatial inhomogeneities on the retrieval of cirrus optical thickness and effective radius: Ph.D. thesis. Mainz, Germany: Johannes Gutenberg University. 2009. P. 65–85.
13. *Chen T., Rossow W.B., Zhang Y.* Radiative effects of cloud-type variations // J. Clim. 2000. V. 13, iss. 1. P. 264–286.
14. *Zhang Y., Macke A., Albers F.* Effect of crystal size spectrum and crystal shape on stratiform cirrus radiative forcing // Atmos. Res. 1999. V. 52. P. 59–75.
15. *Loeb N.G., Yang P., Rose F.G., Hong G., Sun-Mack S., Minnis P., Kato S., Ham S.-H., Smith W.L.Jr., Hioki S., Tang G.* Impact of ice cloud microphysics on satellite cloud retrievals and broadband flux radiative transfer model calculations // J. Clim. 2018. V. 31, iss. 5. P. 1851–1864.
16. *Buschmann N., McFarquhar G.M., Heymsfield A.J.* Effects of observed horizontal inhomogeneities within cirrus clouds on solar radiative transfer // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107, N 20. P. 4445.
17. *Carlin B., Fu Q., Lohmann U., Mace G.G., Sassen K., Comstock J.M.* High-cloud horizontal inhomogeneity and solar albedo bias // J. Clim. 2002. V. 15, iss. 17. P. 2321–2339.
18. *Schlimme I., Macke A., Reichardt J.* The impact of ice crystal shapes, size distributions, and spatial structures of cirrus clouds on solar radiative fluxes // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62, N 7. P. 2274–2283.
19. *Szczap F., Gour Y., Fauchez T., Cornet C., Faure T., Jourdan O., Penide G., Dubuisson P.* A flexible three-dimensional stratocumulus, cumulus and cirrus cloud generator (3DCLOUD) based on drastically simplified atmospheric equations and the Fourier transform framework // Geosci. Model Dev. 2014. V. 7. P. 1779–1801.
20. *Schäfer M., Bierwirth E., Ehrlich A., Jäkel E., Werner F., Wendisch M.* Directional, horizontal inhomogeneities of cloud optical thickness fields retrieved from ground-based and airbornespectral imaging // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 2359–2372.
21. *Fauchez T., Platnick S., Meyer K., Cornet C., Szczap F., Várnai T.* Scale dependence of cirrus horizontal heterogeneity effects on TOA measurements – Part I: MODIS brightness temperatures in the thermal infrared // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 8489–8508.
22. *Зуев В.Е., Титов Г.А.* Оптика атмосферы и климат. Томск: Спектр, 1996. 271 с.
23. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
24. *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.
25. *Облака* и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.
26. *Пригарин С.М., Журавлева Т.Б., Воликова П.В.* Пуассоновская модель многослойной разорванной облачности // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 917–924.
27. *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.
28. *Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shetle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S.* The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model. Hanscom, MA: Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, 1996. 260 p.
29. *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 (CD-ROM).
30. *Мазин И.П., Шметер* С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 279 с.
31. *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.
32. *Heymsfield A.J., Schmitt C., Bansemer 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.
33. *Fridlind A.M., Atlas R., van Diedenhoven B., Um J., McFarquhar G.M., Ackerman A.S., Moyer E.J., Lawso 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.
34. *Platnick S., Meyer K.G., King M.D., Wind G., Amarasinghe N., Marchant B., Arnold G.T., Zhang Z., Hubanks P.A., Holz R.E., Yang P., Ridgway W.L., Riedi J.* The MODIS Cloud optical and microphysical products: collection 6 updates and examples from terra and aqua // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2017. V. 55, N 1. P. 502–525.
35. *Yang P., Hioki S., Saito M., Kuo C.-P., Baum B., Liou K.-N.* A Review of ice cloud optical property models for passive satellite remote sensing // Atmosphere. 2018. V. 9, N 12. P. 499.
36. *Minnis P., Sun-Mack S., Young D.F., Heck P.W., Garber D.P., Chen Y., Spangenberg D.A., Arduini R.F., Trepte Q.Z., Smith Jr., Ayers J.K., Gibson S.C., Miller W.F., Hong G., Chakrapani V., Takano Y., Liou K.-N., Xie Y., Yang P.* CERES Edition-2 cloud property retrievals using TRMM VIRS and Terra and Aqua MODIS data, Part I: Algorithms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. V. 49. P. 4374–4400.
37. *Zhang Z., Yang P., Kattawar G.W., Riedi J., Labonnote C.-L., Baum B.A., Platnick S., Huang H.-L.* Influence of ice particle model on satellite ice cloud

retrieval: Lessons learned from MODIS and POLDER cloud product comparison // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 7115–7129.
38. *Labonnote C.-L., Brogniez G., Buriez J.C., Doutriaux-Boucher M.* Polarized light scattering by inhomogeneous hexagonal monocrystals: Validation with ADEOS-POLDER measurements // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 12139–12153.
39. *Cole B.H., Yang P., Baum B.A., Riedi J., Labonnote C.-L., Thieuleux F., Platnick S.* Comparison of PARASOL observations with polarized reflectances simulated using different ice habit mixtures // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2013. V. 52. P. 186–196.
40. *Cole B.H., Yang P., Baum B.A., Riedi J., Labonnote C.-L.* Ice particle habit and surface roughness derived from PARASOL polarization measurements // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 3739–3750.
41. *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.
42. *Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemer 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.
43. *Журавлева Т.Б.* Влияние формы и размеров кристаллических частиц на угловые распределения пропущенной солнечной радиации в двух геометрических схемах зондирования: результаты численного моделирования // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 798–804; *Zhuravleva T.B.* Effect of shape and sizes of crystal particles on angular distributions of transmitted solar radiation in two sensing geometries: Results of numerical simulation // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 1. P. 50–60.
44. *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, N 8. P. 347–348.
45. *Macke A., Francis P.N., McFarquhar G.M., Kinne S.* The role of ice particle shapes and size distributions in the single scattering properties of cirrus clouds // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55, N 17. P. 2874–2883.
46. *Скоринов В.Н., Титов Г.А.* О точности одного приближения метода расчета лучистых потоков при разорванной облачности // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосф. и океана. 1984. Т. 20, № 3. С. 263–270.

T.B. Zhuravleva, I.M. Nasrtdinov. **Impact of microstructure and horizontal heterogeneity of broken cirrus clouds on mean solar radiation fluxes in the visible spectral region: results of numerical simulation.**

The results of statistical simulation of the albedo and diffuse transmission of the atmosphere in the visible region in the presence of overcast and broken cirrus clouds are presented. The main numerical experiments were performed using the third version of the model proposed by a group of authors consisting of B.A. Baum, P. Yang, A.J. Heymsfield et al. (a mixture of particles of different shapes and sizes with a rough surface). To assess the effect of random geometry of clouds on the solar radiation transfer in the atmosphere, G.A. Titov method of closed equations, developed within the framework of a model based on Poisson fluxes of points on straight lines, was used. Analysis of the influence of the microstructure of cirrus clouds on the mean albedo and diffuse transmission at average cloud fraction showed that the average value of the uncertainty due to the lack of information on the particle shape and size is within ~ ± 2%. This value is comparable to the effect of random geometry effects in optically thin clouds, while in optically dense clouds, the range of errors caused by ignoring the horizontal heterogeneity increases and is ~ ± 5% in *albedo* calculations with an underestimation of the diffuse transmission by ~ 10–20%.