

Е.И. Касьянов^{1,3}, Е.Л. Коган¹, **Г.А. Титов**^{2,3}**ПЕРЕНОС СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТРЕХМЕРНЫХ СЛОИСТО-КУЧЕВЫХ ОБЛАКАХ:
ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ**¹ Объединенный институт мезомасштабных метеорологических исследований, Университет Оклахомы, США² Национальная лаборатория Северо-западного побережья Тихого океана, США³ Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

Поступила в редакцию 30.12.98 г.

Принята к печати 6.01.99 г.

Рассмотрен перенос солнечного излучения в трехмерных разорванных слоисто-кучевых облаках. Для исследования влияния вертикальной изменчивости коэффициента ослабления σ на радиационные характеристики слоисто-кучевых облаков были использованы трехмерная модель облакообразования с детальной микрофизикой (Оклахома, США) и метод Монте-Карло. Показано, что вертикальная неоднородность облаков способна уменьшить среднее по пространству альbedo приблизительно на 10%. Нерегулярная геометрия облаков по сравнению с их неоднородной внутренней структурой оказывает наиболее сильное влияние на средние альbedo и пропускание. Средние потоки более чувствительны к изменениям вертикального профиля коэффициента вариации $VC(\sigma)$, нежели к изменениям вертикального профиля среднего значения $\langle\sigma\rangle$. Двумерные поля альbedo, пропускания и горизонтального переноса сильно зависят от вертикальной стратификации облаков.

1. Введение

Многочисленные аспекты прогноза и динамики климата, проблемы облакообразования и дистанционного зондирования не могут быть успешно разрешены без точного учета облачно-радиационного взаимодействия. Для адекватного описания зависимости радиационных характеристик от оптических параметров облаков и их геометрической структуры необходимо использовать облачные модели, которые правильно учитывают пространственные (временные) флуктуации облачных параметров, а также соответствующие методы расчета радиационных характеристик.

На основе наземных и космических наблюдений логнормальное [1] и гамма-распределения [2] были предложены для аппроксимации *горизонтального* распределения оптической толщины τ морских слоисто-кучевых (S_c) облаков. Эти распределения, а также предположение о плоскопараллельной геометрии облачного слоя широко используются для изучения влияния горизонтальной неоднородности τ на перенос излучения в S_c облаках, а также на точность восстановления их оптических характеристик [3 – 8]. Показано, что среднее альbedo более сильно зависит от характеристик распределения τ , чем от среднего значения $\langle\tau\rangle$, а горизонтальная неоднородность τ может уменьшить среднее альbedo приблизительно на 15%. Очевидно, что с помощью наземных или спутниковых наблюдений может быть исследована только *горизонтальная* изменчивость облачных полей.

Неоднородность реальных слоисто-кучевых облаков обусловлена как горизонтальными, так и *вертикальными* вариациями оптических и геометрических характеристик. Обычно вертикальные профили микрофизических (оптических) параметров определяются с помощью самолетных измерений [9, 10], а данные лидарного зондирования могут быть успешно использованы для изучения нерегулярной геометрии верхней и нижней границ облаков с высоким пространственным разрешением [11, 12]. Сильная измен-

чивость облачных параметров, а также ограниченные возможности их измерений не позволяют получать подробную и *одновременную* информацию о вертикальной и горизонтальной структуре облаков. По этой причине специалисты, занимающиеся моделированием переноса излучения в трехмерных облаках, вынуждены использовать предположение о *независимости* вертикальной и горизонтальной изменчивости облачных параметров, а также некоторые предположения относительно вертикальной стратификации оптических параметров. Например, вертикальный ход среднего коэффициента ослабления $\langle\sigma\rangle$ задается либо на основе типичных вертикальных профилей эффективного радиуса и водности [13], либо в виде среднего вертикального профиля $\langle\sigma\rangle$, повторяющего адиабатический профиль водности в облачном поле [14].

Для построения облачных моделей, адекватно учитывающих вертикальную структуру облаков и их горизонтальную изменчивость, а также для создания более совершенных схем параметризации радиационных процессов необходимо ответить на следующие вопросы:

– Насколько сильно вертикальная стратификация трехмерных облаков влияет на их радиационные характеристики?

– Какие факторы, характеризующие вертикальную неоднородность облаков, являются наиболее важными?

Так как вертикальные и горизонтальные вариации оптических (геометрических) параметров *взаимосвязаны*, то для ответа на эти вопросы необходим корректный учет этой зависимости. Использование трехмерных моделей облакообразования (см., например, [15, 16]), позволяющих получать исчерпывающую информацию о вертикальной и горизонтальной изменчивости облачного поля, представляется весьма перспективным. С помощью этих моделей можно детально исследовать зависимость радиационных характеристик от структуры облачного поля. Например, трехмерная модель облакообразования (Колорадо, США) была использована для оценки влияния неоднородности

оптических параметров неразорванных *Sc* облаков на среднее интегральное альbedo [15]. Было показано, что последнее существенно зависит от горизонтальной изменчивости облачного слоя, и этот результат в целом согласуется с расчетами среднего спектрального альbedo [3].

Основной целью данной работы является исследование влияния вертикальной изменчивости коэффициента ослабления разорванных трехмерных *Sc* облаков на среднее и двумерные поля альbedo, пропускания и горизонтального переноса на основе трехмерной модели облакообразования, разработанной в Объединенном институте мезомасштабных метеорологических исследований (Оклахома, США) [16, 17].

Статья состоит из четырех частей. Во 2-й части приведены оптические параметры облаков, а также облачные модели и метод решения. Зависимость среднего, коэффициента вариации и горизонтального распределения потоков радиации от вертикальной структуры коэффициента ослабления обсуждается в 3-й части. В 4-й части представлены основные результаты.

2. Метод

В используемой модели облакообразования (Оклахома, США) учитывается трехмерная динамика и детально описаны микрофизические процессы, основанные на прогностических уравнениях для спектра размеров облачных частиц [17]. Учитываются спектры основных облачных частиц: ядра конденсации (19 категорий) и облачные и дождевые капли (25 категорий). В уравнениях для функций распределения частиц по размерам представлены процессы адвекции, седиментации, турбулентного перемешивания и непосредственно микрофизические процессы ядрообразования, конденсации (парообразования) и стохастической коагуляции. При исследовании эволюции динамических полей учитываются радиационные процессы коротковолновой и длинноволновой области спектра, расчет которых производится интерактивно на каждом временном шаге на основе явно рассчитанных спектров капель. Детальное сравнение модельных результатов с данными измерений проводилось в ходе экспериментов Atlantic Stratocumulus Experiment (ASTEX), Monterey Area Ship Experiment и некоторых других.

Моделировалась разорванная *Sc* облачность нижнего яруса, наблюдения за которой велись во время эксперимента ASTEX. Значительная запирающая инверсия способствовала образованию достаточно однородной верхней границы облачности. Из-за неоднородного распределения потоков на поверхности и присутствия мороси в турбулентном граничном слое нижняя граница облачного слоя изменилась очень сильно. Область моделирования представляла собой пространственную «решетку» $40 \times 40 \times 51$ с разрешением по горизонтали и вертикали 0,075 и 0,025 км соответственно.

Расчеты радиационных характеристик проводились с использованием метода Монте-Карло и периодических граничных условий. Для уменьшения компьютерных затрат применялся метод максимального сечения [18]. Для каждого пикселя рассчитывались восходящие, нисходящие и горизонтальные потоки солнечной радиации для зенитного угла Солнца 60° . Азимутальный угол Солнца, отсчитываемый от оси *OX*, во всех расчетах принимался равным нулю. Предполагалось, что на верхнюю границу облачного слоя поступает параллельный единичный поток солнечной радиации. Влияние аэрозольной атмосферы и подстилаю-

щей поверхности не учитывалось. Было использовано 120 миллионов траекторий, что обеспечило ошибку вычислений менее 1%.

2.1. Оптические характеристики облаков

По формулам теории Ми [19] для длины волны 0,69 мкм были вычислены оптические параметры для каждой ячейки (пикселя): коэффициент ослабления σ и индикатриса рассеяния. В расчетах использованы данные о комплексном показателе преломления, представленные в работе [20].

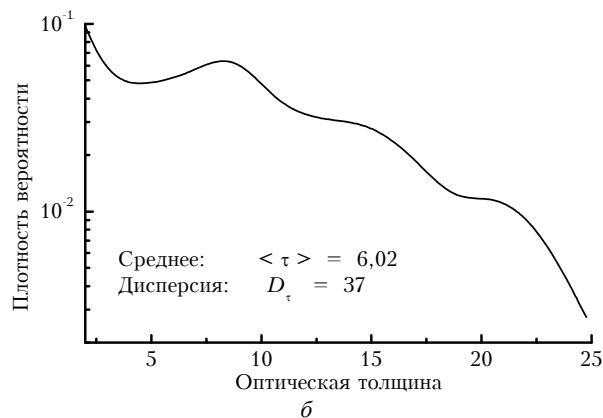
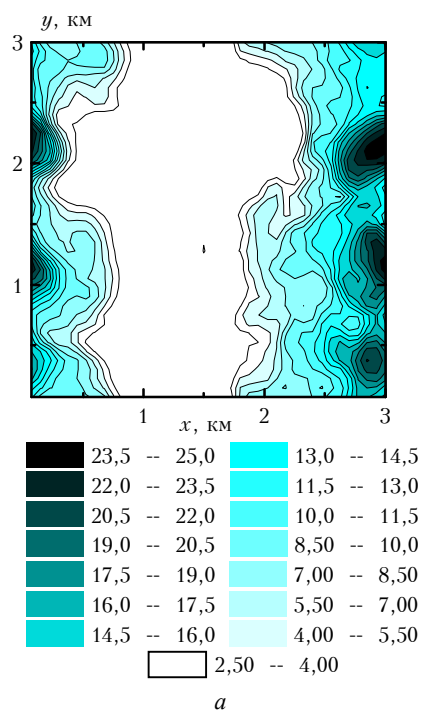


Рис. 1. Двумерное поле (а) и плотность вероятности (б) оптической толщины

Для вычисления радиационных характеристик необходима информация о геометрии облачного поля и, в частности, о высоте верхней H_t и нижней H_b границ облаков. Другими словами, необходимо задать критерий, позволяющий однозначно определять принадлежность произвольного пикселя к облаку или безоблачному пространству. В настоящее время отсутствует ясное количественное определение «облачности» и «облачных границ». Здесь в качестве критерия использовалось пороговое значение

3 км⁻¹, т.е. пиксели с $\sigma > 3 \text{ км}^{-1}$ считались облачными. Отметим, что значения σ в пределах 2,5 и 250 км⁻¹ измеряются с ошибкой, не превышающей 20% [21]. В качестве высоты верхней (нижней) границы облака была принята максимальная (минимальная) высота в облаке. Согласно выбранному критерию ($\sigma > 3 \text{ км}^{-1}$) и способу определения облачных границ высота верхней и нижней границ составляла 0,775 и 0,15 км соответственно. Двумерное горизонтальное распределение и одноточечная плотность вероятности τ представлены на рис. 1. Отметим, что параметры распределения τ смоделированного облачного поля хорошо согласуются с параметрами распределения τ (scene B13), восстановленного из спутниковых измерений [2].

2.2. Облачные модели

Обычно для изучения радиационных свойств трехмерных облаков используется только средний вертикальный профиль $\langle \sigma \rangle$ (см., например, [13, 14]). Однако хорошо известно, что радиационные свойства облаков нелинейно зависят как от оптических, так и от геометрических параметров облаков. Это обстоятельство диктует необходимость детального изучения чувствительности радиационных свойств к статистическим характеристикам вертикального профиля σ и геометрической структуре облаков. Отметим, что информацию о вертикальных профилях среднего $\langle \sigma \rangle$ и коэффициента вариации $VC(\sigma)$ можно получить на основе самолетных измерений [19]. Для того чтобы оценить влияние $\langle \sigma \rangle$, $VC(\sigma)$ и нерегулярной геометрии Sc облаков на их радиационные характеристики, были предложены четыре облачные модели:

– Первая модель (3D) имеет нерегулярную геометрию и неоднородную внутреннюю структуру. Коэффициент ослабления σ_{3D} изменяется как в горизонтальном, так и вертикальном направлении. Оптическая толщина облака $\tau(x, y)$ рассчитывается путем интегрирования $\sigma_{3D}(x, y)$ по вертикали.

– Вторая модель (2D) является плоскопараллельным горизонтально неоднородным облачным слоем. Коэффициент ослабления σ_{2D} изменяется только в горизонтальном направлении, а в каждой вертикальной колонке его значение равно $\sigma_{2D}(x, y) = \tau(x, y)/\Delta H$.

– Третья модель (2Dmv) состоит из двух плоскопараллельных, горизонтально неоднородных слоев. Верхний (TOP) и нижний (BTM) слои имеют приблизительно одинаковую среднюю оптическую толщину, т.е. $\langle \tau_{2Dmv}^{TOP} \rangle \approx \langle \tau_{2Dmv}^{BTM} \rangle \approx \langle \tau \rangle / 2$ и $\langle \tau_{2Dmv}^{TOP} \rangle + \langle \tau_{2Dmv}^{BTM} \rangle = \langle \tau \rangle$. Значения коэффициента ослабления для этих слоев рассчитывались по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{2Dmv}^{TOP}(x, y) &= \tau_{2Dmv}^{TOP}(x, y) / \Delta H_{TOP}, \\ \sigma_{2Dmv}^{BTM}(x, y) &= \tau_{2Dmv}^{BTM}(x, y) / \Delta H_{BTM}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ΔH_{TOP} и ΔH_{BTM} – геометрические толщины верхнего и нижнего слоев соответственно.

– Четвертая модель (2Dm) отличается от 2Dmv модели только способом расчета коэффициента ослабления в верхнем и нижнем слоях:

$$\begin{aligned} \sigma_{2Dm}^{TOP}(x, y) &= \sigma_{2D}(x, y) \langle \sigma_{2Dmv}^{TOP} \rangle / \langle \sigma_{2D} \rangle, \\ \sigma_{2Dm}^{BTM}(x, y) &= \sigma_{2D}(x, y) \langle \sigma_{2Dmv}^{BTM} \rangle / \langle \sigma_{2D} \rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 2 представлены вертикальные профили среднего $\langle \sigma \rangle$ и коэффициента вариации $VC(\sigma)$, соответствующие этим моделям. Модели 2D и 2Dm отличаются только вертикальными профилями $\langle \sigma \rangle$. Модели 2Dm и 2Dmv имеют одинаковую вертикальную стратификацию $\langle \sigma \rangle$, но различные вертикальные профили $VC(\sigma)$. Отметим, что 3D, 2D, 2Dmv и 2Dm модели имеют одинаковое двумерное поле оптической толщины $\tau(x, y)$, а следовательно, и функцию распределения $p(\tau)$ (см. рис. 1).

3. Радиационные характеристики Sc облаков

3.1. Средние потоки

Приближение независимых пикселей (ИПА) широко используется для расчета среднего по пространству альбедо $\langle R \rangle$ [3 – 5]. Смысл этого приближения состоит в том, что радиационные свойства каждого пикселя зависят только от его вертикальной оптической толщины τ . Среднее альбедо облака $\langle R \rangle$ можно аппроксимировать, проинтегрировав $R_{pp}(\tau)p(\tau)$ по всем τ , где $R_{pp}(\tau)$ – альбедо, рассчитанное для плоскопараллельного однородного слоя с оптической толщиной τ , и $p(\tau)$ – функция распределения вероятности. Это приближение имеет хорошую точность при вычислении среднего альбедо сплошных Sc облаков [3, 4]. Также установлено, что для сплошной Sc облачности вертикальная неоднородность σ оказывает слабое влияние на среднее альбедо [15, 22, 23]. Будет ли этот вывод справедлив и для разорванных Sc облаков? Другими словами, насколько сильно будут отличаться средние альбедо, рассчитанные для разорванных Sc облаков с одинаковой $p(\tau)$, но различной вертикальной стратификацией коэффициента ослабления?

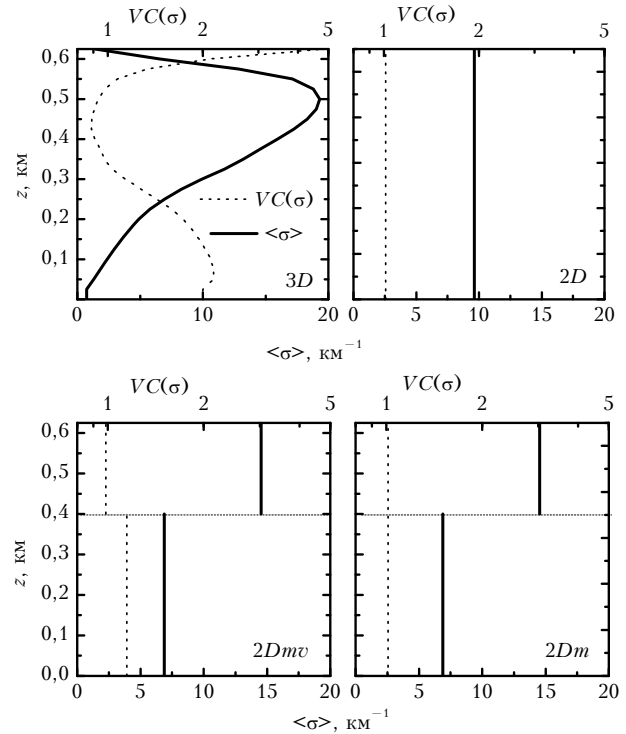


Рис. 2. Вертикальные профили среднего $\langle \sigma \rangle$ и коэффициента вариации $VC(\sigma)$ коэффициента ослабления, соответствующие различным моделям

Для иллюстрации влияния эффектов, связанных с вертикальной неоднородностью облаков, на рис. 3 приведены реализации облачных полей, имеющих одинаковое поле τ и различную вертикальную структуру. Хорошо видно, что в вертикально неоднородных облаках значительная часть излучения может распространяться в просветах между ними, а также через их оптически тонкие края. Следовательно, можно ожидать, что вертикально неоднородные облака по сравнению с вертикально однородными облаками будут пропускать больше солнечной радиации.

Для количественной оценки чувствительности среднего альбедо $\langle R \rangle$ и пропускания $\langle T \rangle$ к трем факторам: 1) среднему вертикальному профилю $\langle \sigma \rangle$,

2) вертикальному профилю коэффициента вариации $VC(\sigma)$ и 3) нерегулярной геометрии облаков, рассмотрим три относительных отклонения

$$\begin{aligned} \delta F_m &= 100\% \{ \langle F_{2D} \rangle - \langle F_{2Dm} \rangle \} / \langle F_{2D} \rangle, \\ \delta F_{m,VC} &= 100\% \{ \langle F_{2D} \rangle - \langle F_{2Dm,VC} \rangle \} / \langle F_{2D} \rangle, \\ \delta F_{m,VC,IR} &= 100\% \{ \langle F_{2D} \rangle - \langle F_{3D} \rangle \} / \langle F_{2D} \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle F \rangle$ обозначает $\langle R \rangle$ или $\langle T \rangle$. Эти отклонения δF_m , $\delta F_{m,VC}$ и $\delta F_{m,VC,IR}$ характеризуют влияние вертикальной стратификации $\langle \sigma \rangle$, совместное влияние вертикальных профилей $\langle \sigma \rangle$ и $VC(\sigma)$ и суммарное влияние внутренней неоднородности и нерегулярной геометрии соответственно.

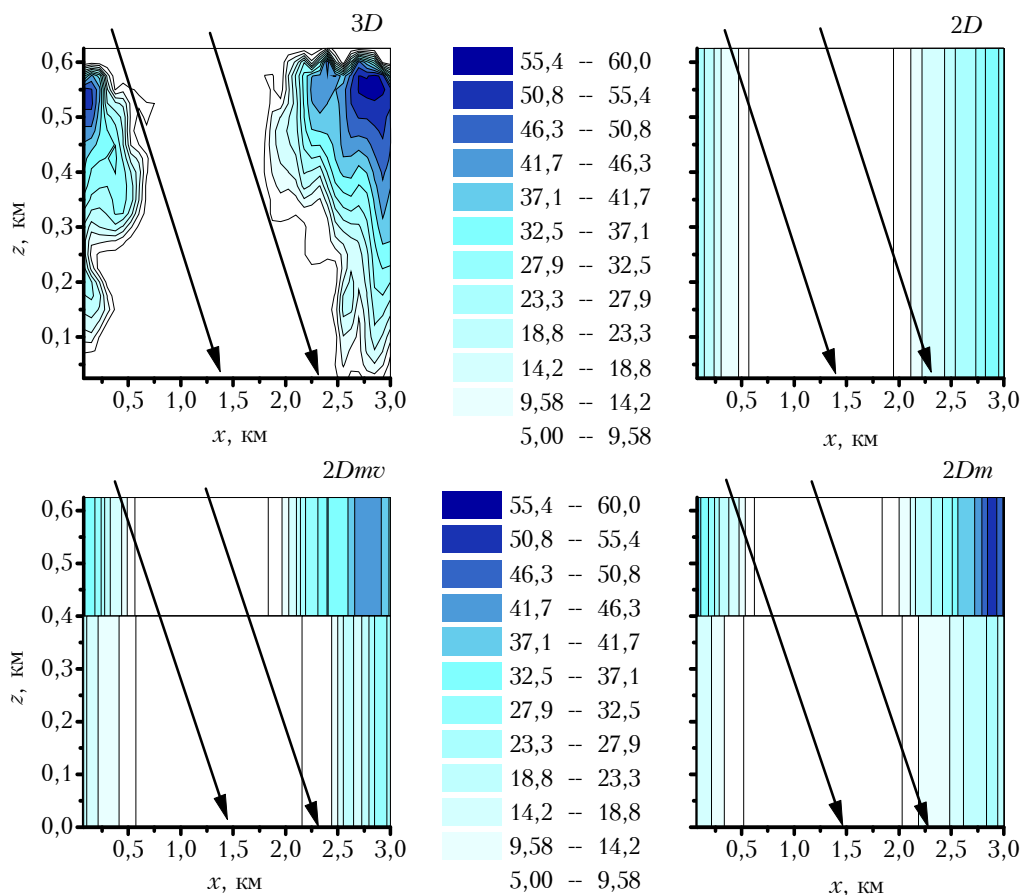


Рис. 3. Вертикальные сечения ($y = 0,05$ км) реализаций облачного поля, соответствующие различным моделям. Стрелки показывают направление распространения солнечного излучения

Значения этих отклонений приведены на рис. 4. Из представленных результатов видно, что вертикальный профиль $\langle \sigma \rangle$ оказывает слабое влияние на средние потоки. Аналогичный результат был получен для облачного поля в виде совокупности регулярно расположенных в пространстве облаков одинакового размера [13]. Коэффициент вариации $VC(\sigma)$ по сравнению со средним $\langle \sigma \rangle$ изменяется с высотой незначительно (см. рис. 2), однако значение $\delta R_{m,VC}$ примерно в три раза больше значения δR_m (см. рис. 4). Следовательно, зависимость среднего альбедо от вертикального профиля $VC(\sigma)$ более сильная. Этот вывод справедлив и для пропускания. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что для корректной оценки средних потоков нельзя ограничиться знанием

только среднего профиля $\langle \sigma \rangle$, необходима более полная информация о вертикальной структуре облаков, по крайней мере о коэффициенте вариации $VC(\sigma)$. Значения $\delta F_{m,VC,IR}$ более чем в три раза превышают значения $\delta F_{m,VC}$. Следовательно, нерегулярная геометрия облаков по сравнению с их неоднородной внутренней структурой оказывает наиболее сильное влияние на перенос солнечного излучения. Этот вывод согласуется с результатами, полученными для более простых облачных моделей [24, 25]. В результате суммарного воздействия вертикальной стратификации облаков среднее альбедо может уменьшиться приблизительно на 10%. Это обстоятельство следует учитывать при параметризации радиационных свойств разорванных облаков.

3.2. Горизонтальный перенос

В настоящее время достаточно хорошо изучен *полный* горизонтальный перенос излучения, определяемый внутри облачного слоя между его верхней и нижней гра-

ницами [7, 24, 26, 27]. Здесь мы рассмотрим вертикальный профиль стандартного отклонения горизонтального переноса $Sd(E)$ и влияние горизонтального переноса E на коэффициент вариации восходящих и нисходящих потоков.

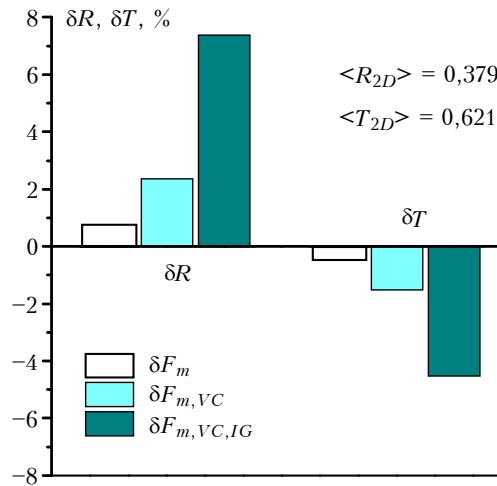


Рис. 4. Относительные отклонения среднего альbedo δR и пропускания δT , обусловленные неоднородной внутренней структурой и нерегулярной геометрией облаков

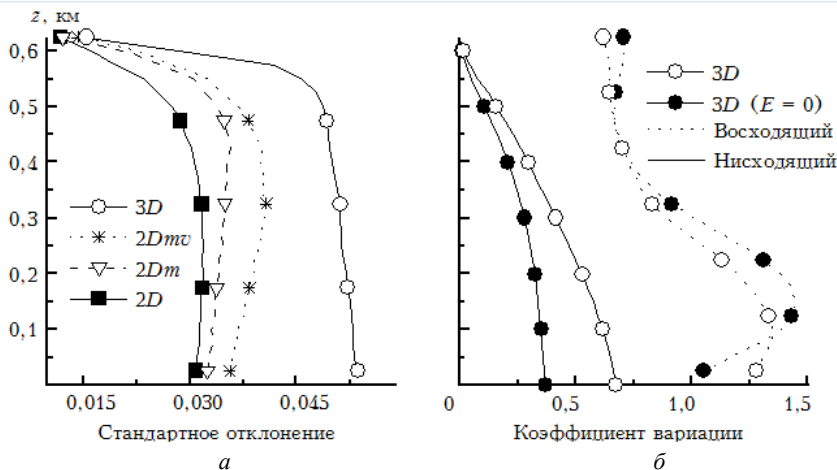


Рис. 5. Стандартные отклонения горизонтального переноса внутри облачного слоя, соответствующие различным облачным моделям (а), и вертикальные профили коэффициента вариации восходящих и нисходящих потоков, рассчитанных с учетом (светлые кружки) и без учета (черные кружки) горизонтального переноса (б)

Дисперсия горизонтального переноса в основном определяется нерегулярной геометрией облаков [24]. Вариации Hb очень сильные, а для Ht справедливо обратное (см. раздел 2). По указанным причинам максимальные значения $Sd(E)$ имеют место вблизи нижней границы облачного слоя (рис. 5,а). В отличие от нерегулярной геометрии вертикальные профили $\langle \sigma \rangle$ и $VC(\sigma)$ оказывают наиболее сильное влияние на $Sd(E)$ в верхней и средней частях облачного слоя (см. рис. 5,а). Стандартное отклонение $Sd(E)$ сильно зависит от вертикальной стратификации разорванных Sc облаков: максимальные различия между $Sd(E_{3D})$ и $Sd(E_{2D})$ составляют порядка 200%. Неравенство $Sd(E_{3D}) > Sd(E_{2D})$ выполняется для всех вертикальных уровней, а для полного горизонтального переноса значения $Sd(E)$ составляют 0,209 и 0,292 для 2D и 3D моделей соответственно. Следовательно, вертикальная неоднородность облаков может

приблизительно в два раза увеличить дисперсию полного горизонтального переноса.

Насколько сильно горизонтальный перенос влияет на среднее и коэффициент вариации восходящих и нисходящих потоков? Чтобы ответить на этот вопрос, сравним результаты расчетов, выполненных для 3D модели с учетом и без учета горизонтального переноса. В последнем случае предполагалось, что излучение может поступать в произвольный пиксель и выходить из него только через его верхнюю и нижнюю границы. Это в свою очередь приводит к тому, что на радиационный перенос не будут оказывать влияние, во-первых, эффекты, связанные с конечными горизонтальными размерами пикселей, и, во-вторых, эффекты, обусловленные влиянием соседних боковых пикселей (экранирование, взаимное затенение, радиационное взаимодействие) [28–30]. Влиянием этих эффектов объясняются качественные и количественные различия между радиационными характеристи-

ками, полученными с учетом и без учета E . Анализ результатов расчетов показал, что средние вертикальные профили восходящих и нисходящих потоков слабо зависят от горизонтального переноса. Однако E может оказывать значительное влияние на их коэффициенты вариации (рис. 5,б). Например, горизонтальный перенос может увеличить коэффициент вариации нисходящего потока приблизительно в два раза (см. рис. 5,б). Поскольку $Sd(E)$ максимально вблизи нижней границы, то E оказывает наиболее сильное влияние на коэффициент вариации потоков в нижней части облачного слоя.

3.3. Двумерные поля альbedo, пропускания и горизонтального переноса

Рассмотрим влияние вертикальной неоднородности облаков на горизонтальное распределение R и T и полного E . При отсутствии поглощения и горизонтального переноса ($E = 0$) существует однозначная связь между τ и R , T [31], т.е. последние не зависят от вертикальной стратификации σ . Если вертикальная изменчивость σ оказывает влияние на горизонтальный перенос, то альbedo и пропускание также будут зависеть от вертикальной изменчивости σ . Выше было показано, что вертикальные профили $\langle \sigma \rangle$, $VC(\sigma)$ и нерегулярная геометрия разорванных S_c облаков оказывают заметное влияние на $Sd(E)$ внутри облачного слоя (см. рис. 5,а), поэтому двумерное поле полного горизонтального переноса E , а следовательно, и поля R и T также достаточно сильно зависят от указанных факторов (рис. 6).

Измерения альbedo и пропускания на небольшом масштабе (порядка 0,05 км) в последние годы широко используются для детального изучения горизонтальной изменчивости оптической толщины [5, 6] и поглощения [7, 24, 27, 32] в облаках. Если горизонтальный перенос не учитывается, то эти указанные характеристики восстанавливаются со значительными ошибками. Пространственное усреднение альbedo

и пропускания уменьшает эти ошибки. Область, по которой производится усреднение, зависит не только от среднего и дисперсии, но также от пространственной структуры альbedo, пропускания и горизонтального переноса (см., например, [32]). Результаты расчетов наглядно показывают, что вертикальное распределение σ оказывает существенное влияние на двумерные поля E , R , и T (рис. 6–8). Это обстоятельство необходимо учитывать при восстановлении облачных параметров из наземных и спутниковых наблюдений. Например, в случае разорванной облачности измерения альbedo на малых пространственных масштабах используются для определения балла облачности. За балл облачности принимается отношение облачных пикселей к их общему числу. Для идентификации облачных и безоблачных пикселей используются пороговые значения альbedo R_C , т.е. если альbedo пикселя больше заданного R_C , то пиксель считается облачным, если альbedo пикселя меньше или равно R_C , то справедливо обратное [33]. Радиационные эффекты приводят к тому, что все безоблачные пиксели в $2D$ модели и некоторые безоблачные пиксели в $2Dm$, $2Dmv$, $3D$ моделях имеют альbedo выше нуля (см. рис. 7). Таким образом, пренебрежение вертикальной структурой облаков при анализе данных спутниковых наблюдений может приводить к существенным ошибкам в определении балла облачности.

4. Обсуждение результатов и выводы

На основе трехмерной модели облакообразования слоисто-кучевых облаков с детальной микрофизикой (CIMMS, Оклахома) и метода Монте-Карло исследовано влияние вертикальной изменчивости коэффициента ослабления σ разорванной слоисто-кучевой облачности на среднее, коэффициент вариации VC и горизонтальное распределение восходящих, нисходящих и горизонтальных потоков радиации в видимой области спектра. Основные полученные результаты можно сформулировать следующим образом.

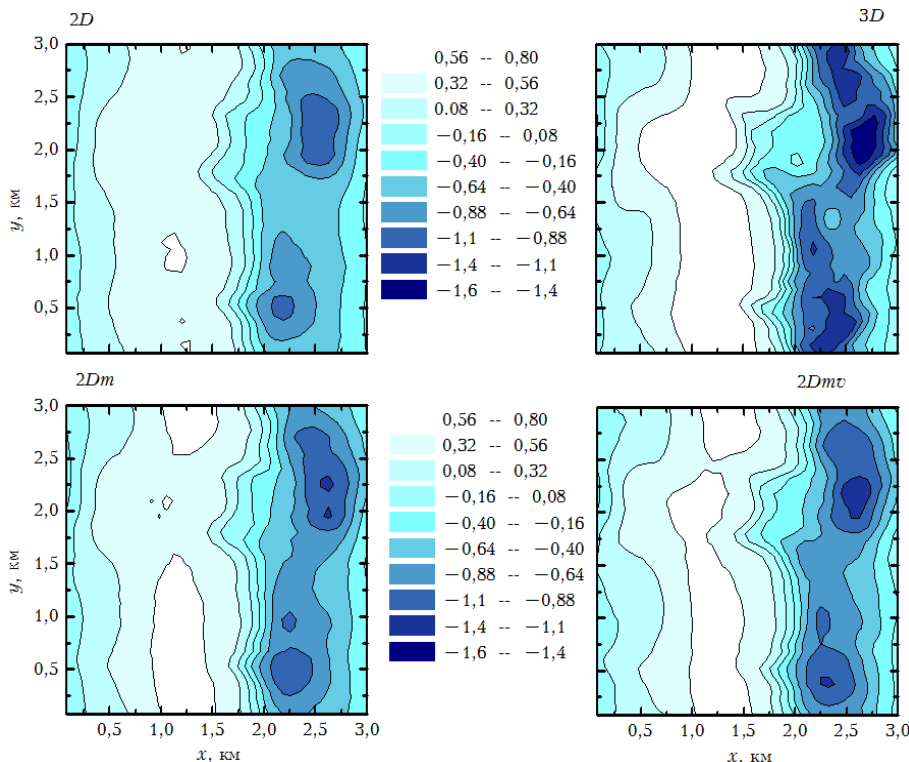


Рис. 6. Двумерные поля горизонтального переноса, соответствующие 3D, 2D, 2Dm и 2Dmv облачным моделям

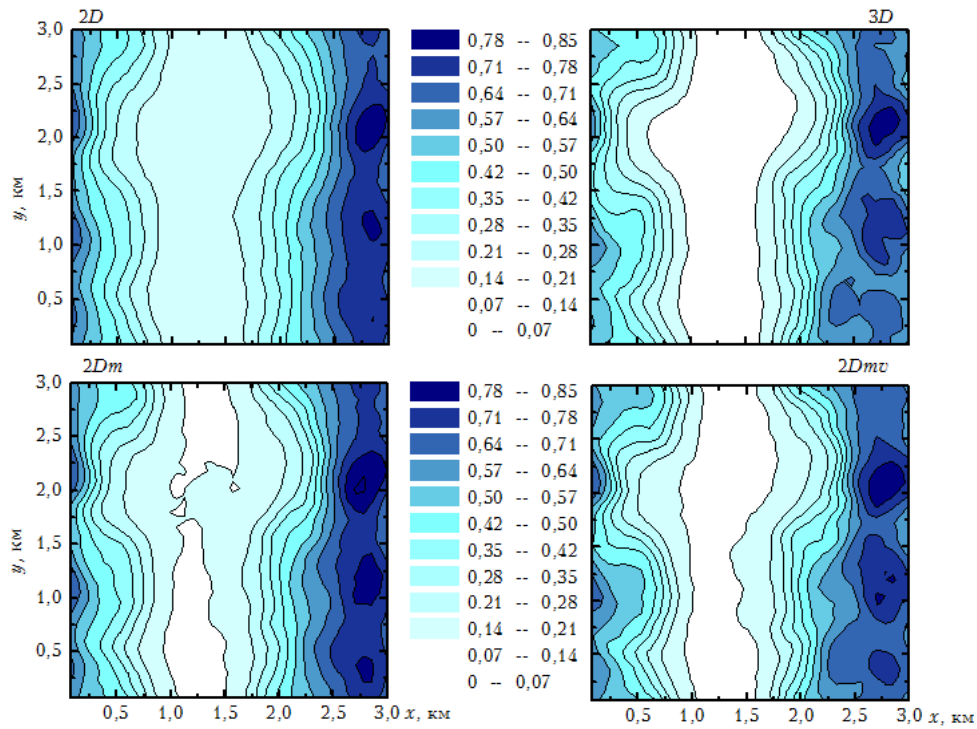


Рис. 7. Двумерные поля альbedo, соответствующие 3D, 2D, 2Dm и 2Dmv облачным моделям

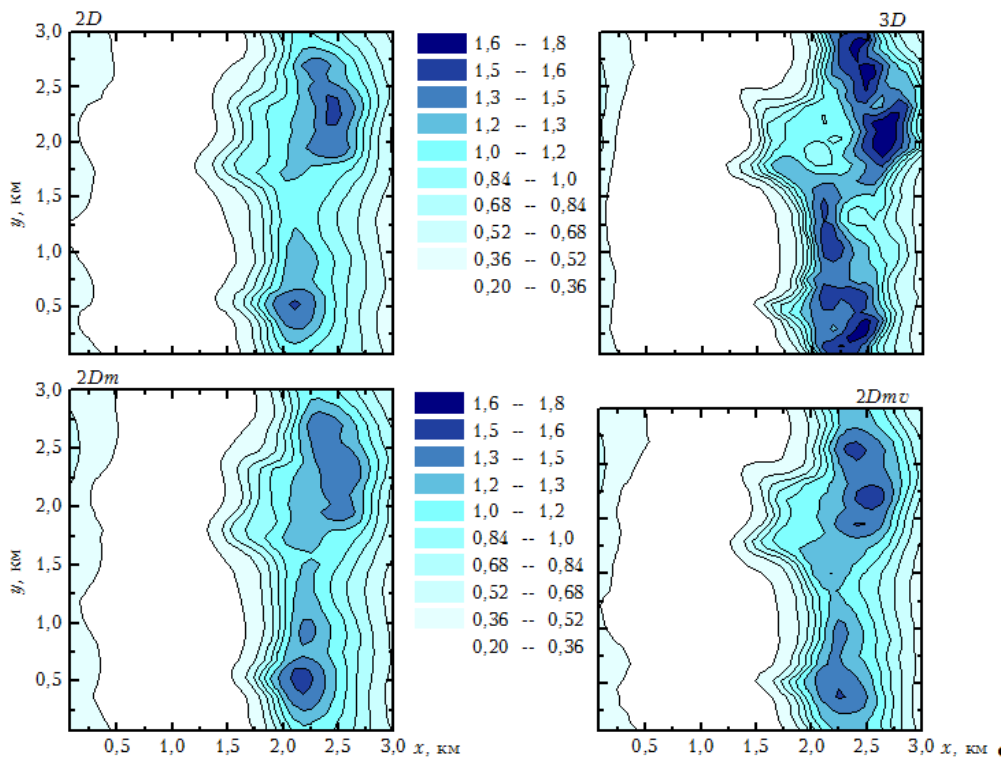


Рис. 8. Двумерные поля пропускания, соответствующие 3D, 2D, 2Dm и 2Dmv облачным моделям

Многочисленные данные свидетельствуют о том, что среднее альbedo горизонтально неоднородного слоя со средней оптической толщиной $\langle \tau \rangle$ меньше альbedo плоскопараллельного однородного слоя с той же $\langle \tau \rangle$ (см., например, [3]). Различие между альbedo может достигать 15%. В данной статье показано, что вертикальная

неоднородность облаков способна усилить указанное различие приблизительно на 10%. Это обусловлено тем, что с увеличением вертикальной неоднородности облачного слоя может возрастать доля излучения, проходящего в просветах между облаками и через их оптически тонкие края.

Для изучения радиационных свойств трехмерных облаков на практике, как правило, используется информация о среднем вертикальном профиле $\langle\sigma\rangle$. В данной статье показано, что среднее альbedo и пропускание слабо зависят от вертикальной стратификации среднего значения коэффициента ослабления $\langle\sigma\rangle$. Среднее альbedo и пропускание более чувствительны к вертикальному профилю $VC(\sigma)$, чем к среднему вертикальному профилю $\langle\sigma\rangle$. Нерегулярная геометрия облаков по сравнению с их неоднородной внутренней структурой оказывает более сильное влияние на среднее альbedo и пропускание.

Для описания радиационного режима в неоднородных облаках широко используется приближение независимых пикселей (ИРА). В частности, с его помощью можно достаточно точно рассчитать среднее альbedo неоднородной сплошной облачности, если известна функция распределения вертикальной оптической толщины облаков $p(\tau)$ ([2]). Нами показано, что для получения достоверных оценок среднего альbedo разорванной слоисто-кучевой облачности необходимо иметь информацию не только о $p(\tau)$, но и о вертикальной структуре облачного слоя.

В ИРА пренебрегается горизонтальным радиационным взаимодействием пикселей. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что внутри облачного слоя горизонтальный перенос излучения может быть значительным и сильно зависеть от вертикальной стратификации σ . Горизонтальный перенос способен оказать существенное влияние на коэффициент вариации восходящих и нисходящих потоков. Следовательно, термодинамические уравнения в моделях облакообразования должны учитывать горизонтальный перенос излучения для точного описания динамики облачного и граничного атмосферного слоев.

Целью дистанционного зондирования является определение параметров облаков по измеренным радиационным характеристикам. Например, измерения альbedo и пропускания на малых пространственных масштабах (порядка 0,05 км) используются для детального изучения горизонтальной изменчивости оптической толщины и поглощения облаков. Нами установлено, что вертикальная стратификация коэффициента ослабления оказывает существенное влияние на двумерные поля горизонтального переноса, альbedo и пропускания. Неучет вертикальной стратификации облачного слоя при интерпретации данных дистанционного зондирования разорванных облаков из космоса может приводить к завышению восстанавливаемого балла облачности.

В спектральном интервале 0,7–3,6 мкм коэффициент ослабления изменяется незначительно. Таким образом, выводы, полученные в данной статье для видимого диапазона, также будут верны в ближней ИК-области спектра.

1. Cahalan R.F., Snider J.B. // Remote Sens. Environ. 1989. V. 28. P. 95–107.

E.I. Kas'yanov, E.L. Kogan, [G.A. Titov]. Solar Radiation Transfer in 3D Stratocumulus Clouds: Influence of Vertical Inhomogeneity.

Solar radiative transfer in 3D broken stratocumulus clouds is considered. 3D cloud model with explicit microphysics (Oklahoma, USA) and Monte Carlo method are used to study the influence of vertical variability of extinction coefficient σ on the radiative characteristics of stratocumulus clouds. It is shown that vertical cloud inhomogeneity can decrease area – mean albedo by as much as 10%. Irregular cloud geometry has stronger influence on the mean albedo and transmittance than inhomogeneous internal cloud structure. Mean fluxes are more sensitive to variations of the vertical profile of variation coefficient $VC(\sigma)$ than to those of the vertical profile of $\langle\sigma\rangle$. 2D fields of albedo, transmittance, and horizontal transport depend strongly on the vertical stratification of clouds.

2. Barker H.W., Wielicki B.A., Parker L. // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 2304–2316.
3. Cahalan R.F., Ridgway W., Wiscombe W.J., Bell T.L. // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 2434–2455.
4. Barker H.W. // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 2289–2303.
5. Chambers L.H., Wielicki B.A., Evans K.F. // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54. P. 1525–1532.
6. Davis A.B., Marshak A., Cahalan R.F., Wiscombe W.J. // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54. P. 241–260.
7. Marshak A., Davis A.B., Wiscombe W.J., Cahalan R.F. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 16619–16637.
8. Oreopoulos L., Davies R. // J. Climate. 1998. V. 11. P. 933–944.
9. Stephens G.L., Platt C.M. // J. Climate Appl. Meteor. 1987. V. 26. P. 1243–1269.
10. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 216 с.
11. Stephens G.L. // Remote sensing of the lower atmosphere. Oxford University Press, 1994. 523 p.
12. Зуев В.В., Зуев В.Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 232 с.
13. Li J., Geldart D.J.W., Chylek P. // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 2542–2552.
14. O'Hirok W., Gautier C. // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 2162–2179.
15. Duda D.P., Stephens G.L., Stevens B., Cotton W.R. // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 3757–3769.
16. Kogan Y.L., Khairoutdinov M.P., Lilly D.K., Kogan Z.N., Liu Q. // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. P. 2923–2940.
17. Kogan Y.L. // J. Atmos. Sci. 1991. V. 48. P. 1160–1189.
18. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаров Н.А. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
19. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. Wiley&Sons. 1983. 530 p.
20. Deirmendjian D. Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions. American Elsevier publishing company, INC. 1969. 292 p.
21. Feigelson E.M. Radiation in a Cloudy Atmosphere. D. Reidel Publishing Company. 1984. 293 p.
22. Marshak A., Davis A.B., Wiscombe W.J., Ridgway W., Cahalan R.F. // J. Climate. 1998. V. 11. P. 431–445.
23. Тумов Г.А., Касьянов Е.И. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. P. 1833–1842.
24. Тумов Г.А., Касьянов Е.И. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 8. P. 843–855.
25. Каргин Б.А. Статистическое моделирование поля солнечной радиации в атмосфере. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. 206 с.
26. Тумов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. P. 1295–1307.
27. Ackerman S.A., Cox S.K. // J. Appl. Meteor. 1981. V.20. P. 1510–1515.
28. Zuev V.E. and Titov G.A. // J. Atmos. Sci. 1995. V.52. P. 176–190.
29. Welch R.M., and Zdunkowski W.G. // Contrib. Atmos. Phys. 1981. V. 54. P. 258–285.
30. Weinman J.A., Harshvardhan // Appl. Opt. 1982. V.21. P. 2940–2944.
31. Перенос излучения в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета / Под ред. Ж. Ленобль. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 263 с.
32. Тумов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. P. 1308–1318.
33. Rossow W.B., Moshier F., Kinsella E., Arking A., Desbois M., Harrison E., Minnis P., Ruprecht E., Seze G., Simmer C., Smith E. // J. Climate Appl. Meteorol. 1985. V. 24. P. 877–903.