

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДНИХ ПО ОБЛАСТИ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ДЛЯ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ В ТРОПИКАХ

Г.В. Баркер, Кванг Фу

*Отделение изучения физики облаков, Служба атмосферного контроля окружающей среды, Канада  
Атмосферная научная программа, Отделение океанографии, Университет в Дальхаузе, Канада*

Поступила в редакцию 8.12.98 г.

Принята к печати 1.02.99 г.

Рассчитаны средние по области суммарные интегральные потоки солнечной радиации для развивающейся мезомасштабной системы конвективной облачности в тропиках с помощью двух приближенных одномерных (1D) моделей, в которых используются различные предположения о структуре облачности подсеточного масштаба. Одна из моделей – это стандартное плоскопараллельное, однородное (PPH) двухпотоковое приближение. Во втором предполагается, что флуктуации коэффициента ослабления облаков  $\beta$  могут быть описаны с помощью гамма-распределения  $p_{\Gamma}(\beta)$ , поэтому в двухпотоковых уравнениях учтена зависимость от  $p_{\Gamma}(\beta)$  и проведено интегрирование по всем  $\beta$ . Эталонные 3D расчеты выполнены по методу Монте-Карло (MC). Облачная система моделировалась с помощью 2D модели с минимальным разрешением порядка размера облака, а расчетная область составляет 514 км по горизонтали и ~18 км по вертикали. Разрешение горизонтальной решетки – 1 км, в то время как 35 вертикальных слоев имеют переменную толщину. В расчетах учитывались капли воды, частицы льда, дождь, крупа и снег. Модельные реализации исследуемой области рассчитывались каждые 5 мин в течение 10 ч, т.е. охватывают жизненный цикл системы.

Показано, что обычная двухпотоковая PPH-модель совершенно неточна: рассчитанные с ее помощью средние за 10 ч альbedo на верхней границе атмосферы (TOA)  $\alpha_{toa}$  и поглощение на поверхности  $\alpha_{sfc}$  составляют 0,56 и 0,20, в то время как соответствующие 3D MC значения равны 0,32 и 0,47. Для двухпотокового приближения с учетом гамма-распределения (GWTSА) значения  $\alpha_{toa}$  и  $\alpha_{sfc}$  составляют 0,32 и 0,49. Кроме того, ошибка в определении скорости нагрева в случае PPH-модели составляет порядка –0,5 К/день вблизи поверхности и почти +2 К/день на высоте 10 км, а для GWTSА это значение составляет ~0,25 К/день на обеих высотах. Показано, что приближение независимых столбов практически идентично 3D MC-модели, а лучшая из возможных PPH-моделей (т.е. точный учет перекрывания облаков) хотя и намного превосходит по точности обычную PPH-модель, но значительно уступает GWTSА.

### 1. Введение

Согласно современным представлениям, неучет облачных флуктуаций на масштабах менее 10 км может вести к существенной систематической ошибке в оценке баланса солнечной радиации в системе «Земля–атмосфера» [4, 6, 18]. Так как крупномасштабные модели (LSM) атмосферы не в состоянии разрешить множество облачных флуктуаций, для их использования требуются параметризации подсеточной облачности и ее взаимодействия с радиацией. Одна из таких параметризаций [2] предполагает, что если горизонтальные флуктуации оптической толщины  $\tau$  облаков можно аппроксимировать, хотя бы грубо, гамма-распределением  $p_{\Gamma}(\tau)$ , тогда в результате усреднения стандартных двухпотоковых решений, взятых с весами  $p_{\Gamma}(\tau)$ , можно получить точную оценку альbedo и пропускания облачности. Это предположение оказалось справедливым в большинстве рассмотренных облачных ситуаций [3, 15], и в данной статье применимость этого приближения проверяется на основе данных, охватывающих практически полный жизненный цикл сложной конвективной облачной системы в тропиках. Во второй части кратко описаны используемые нами данные и модели. В третьей части представлены полученные результаты.

### 2. Данные и модели

#### 2.1. Данные и оптические характеристики из модели облачного масштаба

Исследуемая тропическая облачная система моделировалась с помощью 2D модели облачного масштаба (CRM), исходя из наблюдений, полученных в ходе фазы III эксперимента GATE над подстилающей поверхностью океана [10]. Размеры области составляют 514 км по горизонтали и ~18 км по вертикали. Размер ячейки горизонтальной решетки – 1 км, а 35 слоев имеют переменную толщину, колеблющуюся от ~45 м вблизи поверхности до ~1 км на верхней границе. В модели использованы циклические горизонтальные граничные условия и учитываются капли воды, частицы льда, дождь, крупа и снег. Оптические характеристики облачных капель, дождя, крупы и снега рассчитывались на основе теории рассеяния Ми [9], а частиц льда – на основе гексагональной модели Фу [10]. Также учитывалось рэлеевское рассеяние, а поверхность предполагалась абсолютно черной (чтобы выделить влияние облачности). С помощью метода коррелированного  $k$ -распределения [8] рассчитывались коэффициенты газового поглощения для водяного пара и  $O_3$  (последний с использованием профиля Макклачи для тропической атмосферы [14]).

Изображения области фиксировались каждые 5 мин в течение 12 ч модельного времени, таким образом охватывающим время жизни линии тропического шквала. Однако в расчетах использовались лишь последние 10 ч модельного времени, поскольку в течение первых 2 ч облачность отсутствовала и смесевое отношение в модели приравнивалось нулю, если оно составляло менее  $10^{-5}$  г/г.

## 2.2. Модели переноса излучения

Эталонные потоки и скорости нагревания рассчитывались с помощью трехмерной (3D) модели расчета переноса излучения методом Монте-Карло (MC) [1, 11]. Для этого использовались эффективные оптические характеристики, полученные комбинированием газовых параметров и оптических характеристик облачности, в результате чего для каждой ячейки получалось 54 эффективных спектральных значения оптической толщины  $\tau$ , альbedo одно-кратного рассеяния  $\omega_0$  и параметра асимметрии  $g$ . Использовались циклические горизонтальные граничные условия, а для сокращения времени расчетов первоначальные эффективные оптические характеристики преобразовывались согласно формулам:

$$\begin{aligned} \tau' &\leftarrow (1 - \omega_0 g^2) \tau; \\ \omega_0' &\leftarrow \frac{\omega_0(1 - g^2)}{1 - \omega_0 g^2}; \\ g' &\leftarrow \frac{g}{1 + g}. \end{aligned} \quad (1)$$

В большинстве случаев, рассмотренных здесь, это позволяет уменьшить время расчета на ~30% по сравнению с затратами при использовании  $\tau$ ,  $\omega_0$ , и  $g$  (за счет уменьшения количества актов рассеяния) при минимальном ухудшении точности. Повторяя преобразование (1) бесконечное количество раз (т.е. перейдя к приближению изотропного рассеяния), можно еще больше сократить время, при этом значительно потеряв в точности; например, для потоков ошибка может превысить 5% при больших баллах облачности и больших зенитных углах Солнца. Для каждого из 120 изображений количество фотонов составило  $10^6$ , что обеспечило точность в определении среднего по области  $TOA$  альbedo  $\alpha_{toa}$  и поглощения на поверхности  $\alpha_{sfc}$  выше 0,0005 и в определении скоростей нагревания, как правило, выше 1,5% в каждом слое. Угловое распределение радиации моделировалось с помощью индикатрисы Хеньи–Гринстайна [12]. Во всех экспериментах эффективный радиус принимался равным 10 мкм для капель воды и 50 мкм для частиц льда.

Стандартное, плоскопараллельное однородное (PPH) двухпотокное приближение использовалось для расчета приближенного крайнего значения потоков солнечной радиации, которые можно было бы получить в LSM при наличии точного профиля балла облачности и среднего смесового отношения воды в облаке. Значения альbedo и пропускания в слоях рассчитывались с помощью формулы

$$\begin{aligned} R_{pph} &= (1 - C) R_{clr} + C R_{cld}(\bar{\tau}, \bar{\omega}_0, \bar{g}); \\ T_{pph} &= (1 - C) T_{clr} + C T_{cld}(\bar{\tau}, \bar{\omega}_0, \bar{g}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R_{clr}$  и  $T_{clr}$  соответствуют ясному небу;  $R_{cld}$  и  $T_{cld}$  – двухпотокные решения для облачной части слоя и  $C$  – балл облачности в слое, определяемый соотношением

$$C \equiv \frac{\sum_{i=1}^{514} \Phi \left[ \sum_{m=1}^5 \mathcal{L}_m(i) \right]}{514} \leq \frac{\sum_{i=1}^{514} \left\{ \sum_{m=1}^5 \Phi[\mathcal{L}_m(i)] \right\}}{514}, \quad (3a)$$

где

$$\Phi[\mathcal{L}] \equiv \begin{cases} 1; & \mathcal{L} > 0, \\ 0; & \mathcal{L} = 0 \end{cases} \quad (3b)$$

и  $\mathcal{L}_m(i)$  – водозапас ( $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$ )  $m$ -го конденсата в  $i$ -й ячейке.

Средние оптические характеристики  $\bar{\tau}$ ,  $\bar{\omega}_0$  и  $\bar{g}$  для облачной части слоя определены следующим образом: сначала все конденсатные компоненты размываются по облачной области и средние значения водозапаса рассчитываются из формулы

$$\bar{\mathcal{L}} = \frac{\sum_{i=1}^{514} F[\mathcal{L}_m(i)] \mathcal{L}_m(i)}{\sum_{i=1}^{514} \Phi \left[ \sum_{m=1}^5 \mathcal{L}_m(i) \right]}. \quad (4)$$

Затем рассчитываются оптические характеристики  $\tau(m)$ ,  $\omega_0(m)$  и  $g(m)$  для всех 5 конденсатных компонент, а также для рэлеевского рассеяния ( $m = 6$ ), водяного пара ( $m = 8$ ) и  $O_3$  ( $m = 8$ ). Окончательно производится усреднение

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= \sum_m \tau(m); \\ \bar{\omega}_0 &= \sum_m \omega_0(m) \tau(m) / \bar{\tau}; \\ \bar{g} &= \sum_m g(m) \omega_0(m) \tau(m) / \bar{\omega}_0 \bar{\tau}. \end{aligned} \quad (5)$$

Та же процедура используется для безоблачных частей, где, очевидно, выполняется  $\bar{\mathcal{L}}_m = 0$  для всех  $m$ . Следовательно, для 1D моделей рассчитываются только два набора оптических характеристик (облачных и безоблачных;  $2 \times 35 = 70$  ячеек), в то время как для MC необходимо рассчитывать оптические характеристики для всех 17990 (=  $514 \times 35$ ) ячеек. После того как рассчитываются альbedo и пропускание прямой и рассеянной радиации для каждого слоя, эти значения связываются согласно принципу инвариантности Лью [13].

GWTSA отличается от PPH-модели лишь способом расчета характеристик слоев:

$$\begin{aligned} R_{\Gamma} &= (1 - C) R_{clr} + C \int_0^{\infty} p_{\Gamma}(\bar{\tau}, \nu) R_{clr}(\tau, \bar{\omega}_0, \bar{g}) d\tau; \\ T_{\Gamma} &= (1 - C) T_{clr} + C \int_0^{\infty} p_{\Gamma}(\bar{\tau}, \nu) T_{clr}(\tau, \bar{\omega}_0, \bar{g}) d\tau, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $p_{\Gamma}(\bar{\tau}, \nu)$  – гамма-распределение [2];  $\nu$  является решением уравнения

$$\frac{d}{d\nu} \ln \Gamma(\nu) + \ln \left( \frac{\bar{\mathcal{L}}_{\Sigma}}{\nu} \right) - \ln \bar{\mathcal{L}}_{\Sigma} = 0, \quad (7a)$$

где

$$\mathcal{L}_\Sigma = \sum_{m=1}^5 \mathcal{L}_m \quad (76)$$

– полный водозапас каждой ячейки. Кроме того, при наличии облачности в смежных слоях значения  $\tau$  искусственно уменьшаются для слоев, расположенных под верхним слоем. Это частично компенсирует ошибку от использования (в процессе суммирования) средних (т.е. однородных) потоков. Также обращаем внимание на то, что вводится эмпирическая поправка на неточность неявно принятого предположения о случайном перекрывании облаков. Подробнее с этими приближениями и замкнутой формой выражений для интегралов в (6) можно ознакомиться в работе [15].

В обеих 1D программах используется улучшенный практический потоковый метод Здунковского [17], преимуществом которого, по сравнению с более известным приближением дельта-Эддингтона, является отсутствие отрицательных потоков в полосах сильного поглощения.

Две другие модели приводятся в качестве эталонных. В приближении независимых столбов (ICA) используются полные CRM-поля, применяется обычная 1D PPH-модель в каждом из 514 столбов, а результаты усредняются. Во второй модели смешиваются отношения в облаке, так же как и в (4), вначале усредняются и гомогенизируются в пределах каждого слоя, оставляя неизменным расположение облака. Затем, как и в ICA, в каждом столбе используется 1D PPH-модель, а результаты усредняются. Эта модель называется (совершенная) PPH-модель, так как в ней точно учитывается перекрывание облаков, но сами облака остаются PPH-облаками в пределах каждого слоя. Очевидно, данную модель следует называть лучшей возможной PPH-моделью.

### 3. Результаты

Сначала рассмотрим рис. 1, на котором представлен ряд основных радиационных характеристик, рассчитанных в CRM, в форме диаграмм временной эволюции высотных профилей средних по области величин. На верхней диаграмме представлена эволюция балла облачности. Первоначальный обширный облачный слой в интервале высот 1–2 км

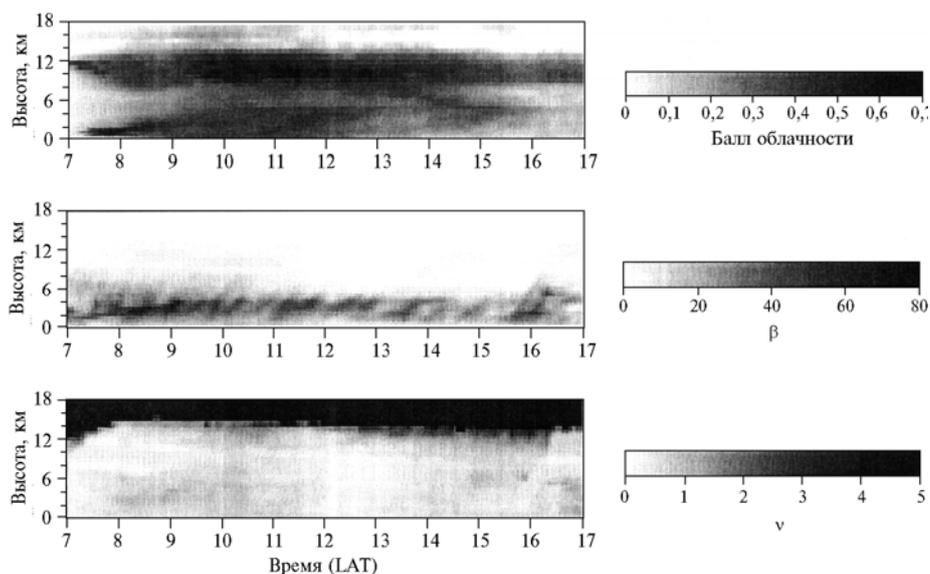


Рис. 1. Диаграммы (время–высота) средних по области профилей балла облачности, коэффициента ослабления облаков  $\beta, \text{км}^{-1}$ , и  $\nu$ , определяемой формулой (7а)

быстро распадается по мере вертикального развития облачности. Приблизительно к 9 ч высокого развития достигает наковальня, и в 10 ч она может покрывать до 50 % области на высоте приблизительно 12 км. Повторно конвекция активизируется в 11 ч, но на этот раз она менее интенсивна и слабо подпитывает наковальню. К 16 ч лишь распадающаяся наковальня сохраняет достаточную мощность и покрывает приблизительно 35 % области на высоте 10 км.

На рис. 2 представлен профиль среднего за 10 ч значения балла облачности, с характерным максимумом в области наковальни. В отличие от этого рисунка, данные [10, рис. 9] являются средними величинами за полные 12 ч и не учитывают поля осадков.

На средней диаграмме рис. 1, на которой представлен коэффициент ослабления облака (в видимом диапазоне), наблюдается волнообразный конвективный рост. Как правило, значимый рост облака происходит в интервале высот 3–5 км в течение ~30 мин. Иногда среднее значение  $\beta$  на высоте приблизительно 4 км может превышать  $50 \text{ км}^{-1}$ , но выше уровня замерзания, приблизительно 4,5 км, оно редко превышает  $20 \text{ км}^{-1}$ . Этот переход от оптически плотных капель к мало ослабляющим частицам льда, снегу, и крупе отчетливо виден на рис. 2, где представлены средние профили за весь 10-часовой период: вблизи 4 км среднее значение  $\beta$  обычно составляет  $\sim 32 \text{ км}^{-1}$  и убывает до  $\sim 8 \text{ км}^{-1}$  на высоте 6 км.

На нижней диаграмме рис. 1 представлен параметр  $\nu$ , определяемый формулой (7а). В большинстве случаев  $\nu < 1$ , и лишь в оптически тонкой области вблизи верхней границы облачности  $\nu$  систематически превышает 1. Фактически, начиная с поверхности до 12 км,  $\nu$  устойчиво близко к 0,5 (см. рис. 2). Если поля осадков не учитываются,  $\nu$ , как правило, увеличивается до 1,0. Влияние столь малого значения  $\nu$  иллюстрируется на крайней правой диаграмме рис. 2, на которой представлены профили средних за 10 ч значений истинного и приведенного  $\beta$ ; последняя величина используется в GWTSА. Выше 12 км значения приведенного и истинного  $\beta$  приблизительно равны, но ниже 5 км значение  $\beta$ , используемое GWTSА, почти на порядок меньше истинного значения! Если бы в GWTSА использовались истинные значения  $\beta$ , результат был бы непредсказуем.

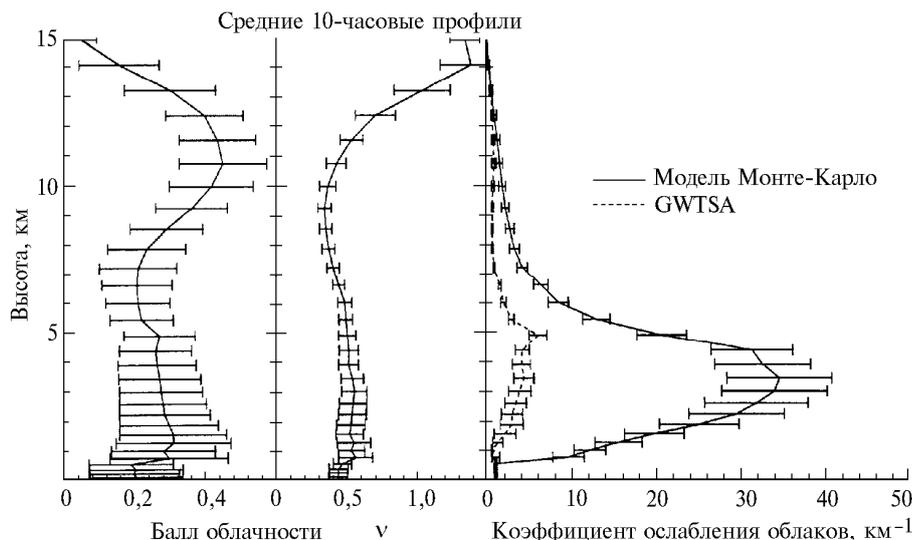


Рис. 2. Средние за 10 ч и по области профили балла облачности  $C$  и величины  $v$ , определяемой формулой (7а), а также коэффициента ослабления облаков,  $\text{км}^{-1}$ , который используется в РРН и МС (истинный) и GWTSА моделях. Горизонтальными отрезками показано  $\pm 1$  стандартное отклонение. За исключением  $C$ , все данные нормированы на балл облачности

Расчет переноса излучения выполнен для условий экватора 15 июля. Для оптимального использования данных считается, что середина 10-часового временного интервала данных приходится на полдень. Таким образом, моделирование начинается в 7 ч и заканчивается в 17 ч, когда косинус зенитного угла Солнца  $\mu_0$  равен  $\sim 0,25$ . Кроме того, 2D поле ориентировано в направлении восток-запад: при восходе Солнце светит в направлении моделируемых вариаций из точки 0 в точку 514 км; в полдень оно разворачивается и светит в направлении, перпендикулярном направлению вариаций, причем его зенитный угол равен  $21^\circ$ ; и на закате оно вновь ориентировано параллельно направлению моделируемых вариаций, но светит из точки 514 км в точку 0. Облака сдвинуты в западном направлении.

На рис. 3 представлены временные развертки значений альbedo на верхней границе атмосферы ( $\alpha_{\text{toa}}$ ) и поглощения на поверхности  $\alpha_{\text{sfc}}$  и в атмосфере  $\alpha_{\text{atm}}$  для всех пяти моделей, рассмотренных здесь, а также косинуса зенитного угла Солнца  $\mu_0$ . Как видно, результаты расчетов по ICA и 3D МС-моделям практически совпадают; следовательно, если требуются лишь средние потоки для достаточно большой области, детальную геометрию облачности можно не учитывать [4]. Этот вывод подтверждается результатами табл. 1, в которой представлены радиационные характеристики, средние по области и за 10 ч моделирования.

Таблица 1

Средние за 10 ч  $\text{TOA}$  альbedo ( $\alpha_{\text{toa}}$ ), поглощение на поверхности ( $\alpha_{\text{sfc}}$ ) и в атмосфере ( $\alpha_{\text{atm}}$ ) для пяти рассмотренных моделей (т.е. средние значения величин на рис. 3, нормированные на  $\mu_0$ ). Ошибка расчета по методу Монте-Карло составляет менее 0,01% от табличных значений

Параметр	3D	ICA	GWTSА	РРН (совершенное)	РРН
$\alpha_{\text{toa}}$	0,321	0,326	0,317	0,393	0,564
$\alpha_{\text{sfc}}$	0,471	0,469	0,488	0,389	0,196
$\alpha_{\text{atm}}$	0,208	0,207	0,195	0,218	0,240

В табл. 2 представлены средние за 10 ч среднеквадратические ошибки ( $RMSE$ ) и средние систематические ошибки ( $MBE$ ) для отраженного потока на  $\text{TOA}$  и поглощения на поверхности и в атмосфере, рассчитанные как

разность между результатами четырех приближенных моделей и 3D МС значениями:

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ [x_{\text{approx}}(i) - x_{\text{MC}}(i)] S_{\text{O}} \mu_0(i) \}^2 \right)^{1/2}, \quad (8a)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_{\text{approx}}(i) - x_{\text{MC}}(i)] S_{\text{O}} \mu_0(i), \quad (8б)$$

где  $n$  ( $=120$ ) – количество изображений;  $S_{\text{O}}$  – зависящая от времени солнечная постоянная;  $x_{\text{approx}}$  и  $x_{\text{MC}}$  соответствуют значениям, представленным на рис. 3 для приближенных и 3D МК-моделей. Для ICA значения  $MBE$  не превышают  $5 \text{ Вт/м}^2$ , а случайная и систематическая ошибки приблизительно равны по величине.

Таблица 2

Средние систематические ( $MBE$ ) и среднеквадратические ( $RMSE$ ) ошибки, определяемые формулой (8) и рассчитанные из отклонений от 3D МК-результатов, для 4 наборов модельных результатов, представленных на рис. 3; величины  $MBE > 0$  указывают на завышение значений; в скобках даны  $RMSE$ , все величины в единицах  $\text{Вт/м}^2$

Радиационные характеристики	ICA	GWTSА	РРН (совершенная)	РРН
Отраженное на $\text{TOA}$	5,1 (7,4)	-2,9 (24,8)	66,2 (73,3)	221,3 (237,3)
Поглощение на поверхности	-3,8 (7,6)	14,9 (30,3)	-75,0 (84,6)	-250,6 (272,3)
Поглощение в атмосфере	-1,2 (2,0)	-12,0 (12,4)	8,9 (12,1)	29,3 (36,8)

В большинстве случаев GWTSА работает очень хорошо, особенно в важной области больших зенитных углов Солнца. Точность для значений  $\alpha_{\text{toa}}$  и  $\alpha_{\text{sfc}}$ , как правило, не менее чем 0,05 (средние за 10 ч значения  $MBE$  для этих величин составляют всего  $-3$  и  $15 \text{ Вт/м}^2$ ), а для поглощения в атмосфере  $\alpha_{\text{atm}}$  не менее чем 0,02, хотя и существует отчетливая тенденция занижения результата. Действительно, как видно из табл. 1, в GWTSА средние значения за 10 ч вычисляются с точностью, не более чем на 5% лучшей, чем в ICA.

Низкие значения  $\alpha_{\text{toa}}$  и  $\alpha_{\text{sfic}}$  вблизи 8 ч являются следствием чрезмерного уменьшения  $\beta$  на высоте ниже 4 км, и наоборот, высокие значения  $\alpha_{\text{toa}}$  вблизи 7 и 17 ч, по-видимому, являются следствием недостаточного уменьшения  $\beta$  вблизи 11 км. Вероятно, в обоих случаях ошибка объясняется неадекватным учетом облачного перекрытия. Несомненно, в следующих версиях GW TSA можно будет использовать более точные методы учета облачного перекрытия [Bergman J., 1988, частное сообщение]; однако на данном этапе трудно представить себе способ уменьшения подобной ошибки в

LSM-модели ввиду существующей значительной неопределенности в степени облачного перекрытия и потенциально большого влияния различных предположений о величине перекрытия на радиационные характеристики [5]. Из рис. 3 и таблиц следует, что (совершенная) PPH-модель достаточно точна, несмотря на полное пренебрежение горизонтальной изменчивостью. Это говорит о том, что значительная часть полной облачной изменчивости сосредоточена в неявной горизонтальной изменчивости, которую можно учесть путем правильного задания перекрытия PPH-облаков.

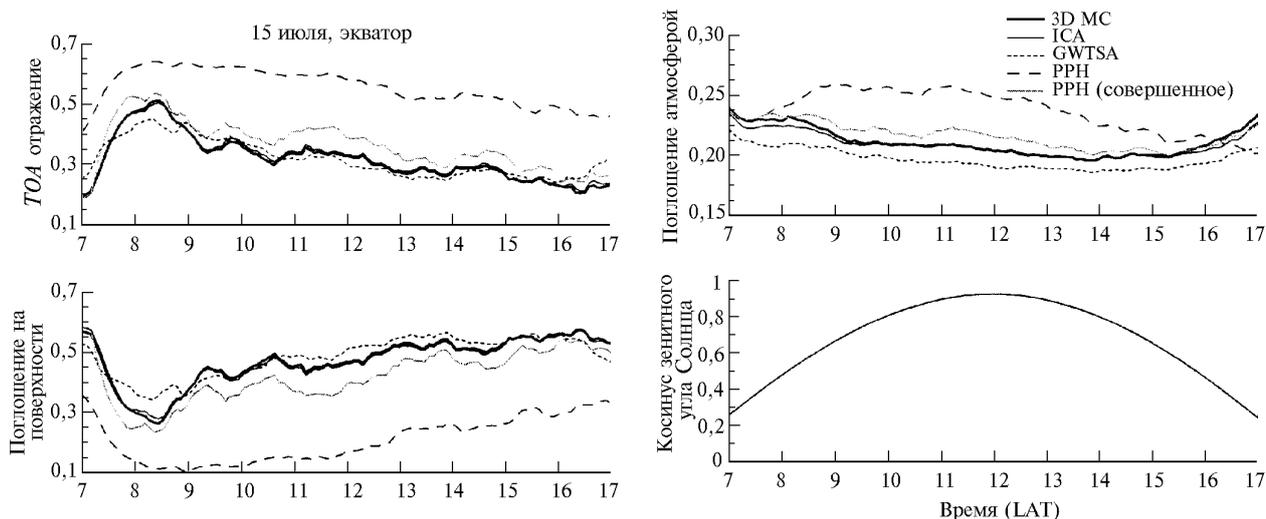


Рис. 3. Временной ход средних по области  $TOA$  альbedo, поглощения на поверхности и в атмосфере, а также  $\mu_0$  для моделей, основанных на методе Монте-Карло (3D MC), на приближении независимых столбов (ICA), двухпоточковом приближении с учетом гамма-распределения (GW TSA), стандартном плоскопараллельном однородном (PPH) двухпоточковом приближении и PPH-приближении, точно учитывающем перекрытие облаков [(совершенное) PPH]

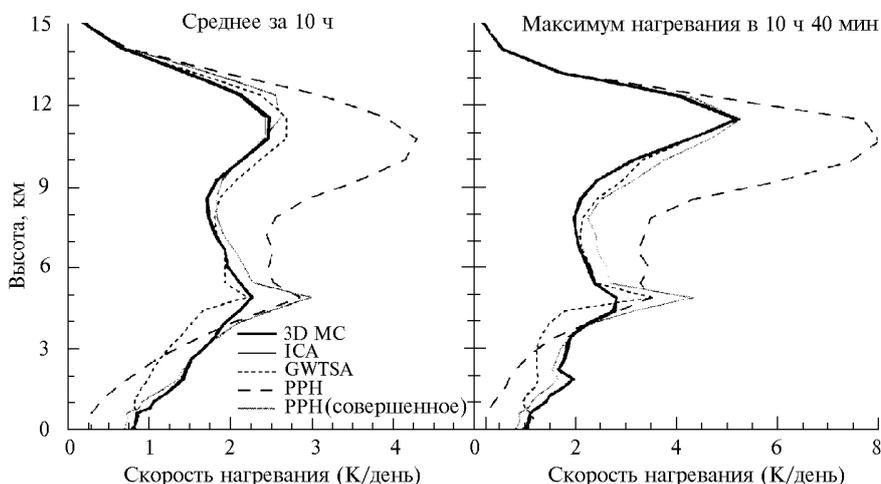


Рис. 4. Средние по области скорости нагрева для моделей, основанных на методе Монте-Карло (3D MC), на приближении независимых столбов (ICA), двухпоточковом приближении с учетом гамма-распределения (GW TSA), стандартном плоскопараллельном однородном (PPH) двухпоточковом приближении и PPH-приближении, точно учитывающем перекрытие облаков [(совершенное) PPH]. Профили слева построены для средних величин за 10 ч, а справа для момента времени 10 ч 40 мин, когда наблюдались максимальные значения

Как и следовало ожидать, стандартная PPH-модель неточна с самого начала. При усреднении за 10 ч значения  $\alpha_{\text{toa}}$  завышаются на 75% из-за полного пренебрежения облачной изменчивостью и предположения о случайном перекрытии облаков (полное отсутствие зависимости между оптическим и радиационным полем [16]). Как видно из

табл. 2, следствием этого является значительная систематическая ошибка, превышающая  $200 \text{ Вт/м}^2$  (см. [5]). Для  $\alpha_{\text{sfic}}$  относительная ошибка еще более значительна, и если бы облачность моделировалась над сушей, где ее развитие существенно зависит от нагрева поверхности солнечным излучением, это бы существенно повлияло на время

жизни облаков. При усреднении за 10 ч в PPH-модели систематически завышается  $\alpha_{\text{атм}}$  приблизительно на 15% (*MBE* составляет  $\sim 30 \text{ Вт/м}^2$ ); дело в том, что PPH облака – это плоский обширный слой, при попадании в который фотоны редко возвращаются в безоблачное пространство. В других моделях облачность может либо значительно экранироваться вышележащими облаками, либо вследствие значительных вариаций она содержит множество разреженных промежутков, через которые фотоны легко туннелируют без рассеяния. На рис. 4 показаны профили средних за 10 ч скоростей нагревания (HR) в атмосфере для всех пяти моделей. Также представлены профили для изображения с максимальными HR. Ясно видно, что профили для GWTSA и (совершенного) PPH гораздо ближе к MC-профилю, чем профиль для PPH. Очевидными ошибками, присущими GWTSA, являются чрезмерное нагревание вблизи 10 км (чего, однако, не наблюдается в 10 ч 40 мин) и очень слабое нагревание в интервале высот 0,5–4 км. Как и прежде, эти ошибки почти полностью обусловлены неправильным учетом облачного перекрытия и, как результат, неправильным моделированием  $\beta$ .

С другой стороны, PPH-модель постоянно завышает нагревание выше 4 км. Ниже 4 км нагревание постоянно занижается вследствие чрезмерного ослабления радиации, главным образом из-за отражения вышележащими облаками. HR-профиль для (совершенного) PPH близок к профилю для GWTSA, за исключением области вблизи 5 км: вследствие расширения плотных конвективных пузырей на этой высоте значительно увеличивается оптическая плотность оптически тонкой верхней части облаков. В то же время ICA профиль практически неотличим от 3D MC-профиля.

#### 4. Заключение

Выполнены многочисленные расчеты переноса излучения и представлены интегральные потоки солнечной радиации. 2D модель облачного масштаба [10] использована для расчета 120 изображений развивающейся тропической конвективной облачной системы, которые затем использованы для моделирования переноса излучения методом Монте-Карло. Размеры моделируемой области – 514 км по горизонтали и 18 км по вертикали, а ее изображения фиксировались каждые 5 мин в течение 10 ч модельного времени. В моделях учитывались облачные капли, частицы льда, дождь, снег и крупа, оптические характеристики которых соответствуют моделям Фу и Лью [10, 9].

Параметризация несерого газового поглощения выполнена с помощью метода коррелированного  $k$ -распределения [8]. Средние по области профили балла облачности и среднего коэффициента ослабления  $\beta$  были использованы в двух радиационных 1D моделях, первая из которых представляет собой обычное плоскопараллельное, однородное (PPH) двухпотоковое приближение, а вторая построена на двухпотоковом приближении с учетом гамма-распределения (GWTSA) [2, 15], в котором дополнительно используется средний логарифм смесевых отношений конденсированной воды для описания подсеточных горизонтальных флуктуаций.

Так же, как и в работе [5], нами показано, что в PPH-модели средние за 10 ч значения *TOA* альbedo и поток на поверхности рассчитываются с систематической ошибкой, превышающей  $\pm 200 \text{ Вт/м}^2$ . Соответственно в ней завышается и поглощение в атмосфере на  $\sim 30 \text{ Вт/м}^2$ . На основании

того, что LSM-модель, в которой расчет переноса солнечного излучения основывается на PPH-теории (т.е. практически все LSM-модели) будет правильно рассчитывать одновременно баланс воды и радиационный баланс в тропической атмосфере. Этим недостатком мотивировано возобновление одного из направлений проекта InterComparison of Radiation Codes for Climate Models (ICRCCM) [7] (подробнее об этом можно узнать по электронному адресу в Интернете <http://reef.atmos.colostate.edu/icrccm/icrccm.html>). Кроме того, нами показано, что систематическую ошибку при использовании PPH-модели для расчета потоков в граничном слое можно уменьшить приблизительно на 70 %, если точно учитывать перекрытие PPH-облаков в пределах исследуемой области.

Модификация GWTSA, используемая здесь и в основном совпадающая с моделью, представленной в [15], позволяет уменьшить на порядок величины систематическую ошибку при использовании PPH-модели для расчета потоков в граничном слое и приблизительно в 5 раз ошибку при определении поглощения в атмосфере. Однако это улучшение потребует дополнительных затрат в LSM-модели, например применение GWTSA потребует расчета среднего логарифма смесового отношения в облаке, что приблизительно в 2 раза увеличит время расчета по сравнению с PPH-моделью. Однако можно предположить, что медленнее будет работать и PPH-алгоритм, точно учитывающий облачное перекрытие. Тем не менее можно утверждать, что в данном строгом эксперименте GWTSA показал себя с самой лучшей стороны.

Авторы благодарят Брюса Велики (NASA-Langley) за предоставление компьютерного времени.

Работа Говарда Баркера частично профинансирована администрацией DOE по программе ARM (грант DE-FG02-97ER2361), а работа Кванга Фу полностью финансирована администрацией DOE по программе ARM (грант DE-FG02-97ER62363).

1. *Barker H.W.* // Solar radiative fluxes for realistic extended broken cloud fields above reflecting surfaces. Ph. D. Thesis. McMaster Univ. 1991. 257 p.
2. *Barker H.W.* // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 2289–2303.
3. *Barker H.W., Wielicki B.A. and Parker L.* // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 2304–2316.
4. *Barker H.W., Morcrette J.-J., Alexander G.D.* // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1998 V. 124. P. 1245–1271.
5. *Barker H.W., Stephens G.L., and Fu Q.* // The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry (In press). Q. J. R. Meteorol. Soc. 1999.
6. *Cahalan R.F., Ridgeway W., Wiscombe W.J., Bell T.B., Snider J.B.* // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 2304–2316.
7. *Fouquart Y., Bonnel B., and Ranaswamy V.* // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 8955–8968.
8. *Fu Q., Liou K.-N.* // J. Atmos. Sci. 1992. V. 49. P. 2139–2156.
9. *Fu Q., Liou K.-N.* // J. Atmos. Sci. 1993. V. 50. P. 2008–2025.
10. *Fu Q., Krueger S.K., Liou K.-N.* // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. P. 1310–1328.
11. *Fu Q., Cribb M., Barker H.W., Krueger S.K., Grossman A.* A study of atmospheric absorption of solar radiation using cloud fields derived from a cloud resolving model // Submitted to J. Atmos. Sci. June 1998.
12. *Heney L.C., Greenstein J.L.* // Astrophys. J. 1941. V. 93. P. 70–83.
13. *Liou K.-N.* Radiation and cloud processes in the atmosphere. Oxford University Press. New York, 1992. 487 p.
14. *McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Voltz F.E., Garing J.S.* // Optical properties of the atmosphere. 3rd ed. AFCRL-72-0497. 1972. 108 p. [NTIS N7318412].

15. Oreopoulos L., Barker H.W. Accounting for subgrid-scale cloud variability in a multilayer, 1D solar radiative transfer algorithm (In press). Q. J. R. Meteorol. Soc.
16. Stephens G.L. // J. Atmos. Sci. 1988. V. 49. P. 1837–1848.
17. Zdankowski W.G., Welch R.M., Korb G. // Beitr. Phys. Atmos. 1980. V. 53. P. 147–166.
18. Zuev V.E. and Titov G.A. // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. P. 176–190.

*Homard W. Barker, Qiang Fu. Modelling Domain-averaged Solar Fluxes for an Evolving Tropical Cloud System.*

Domain-averaged, broadband solar radiative budgets for an evolving tropical mesoscale convective cloud system are computed by two approximate 1D models which make different assumptions about the structure of unresolved clouds. One model is the standard plane-parallel, homogeneous (PPH) two-stream approximation. The other assumes that fluctuations in cloud extinction  $\beta$  can be described by a gamma distribution  $p_{\Gamma}(\beta)$  and so weights the two-stream equations by  $p_{\Gamma}(\beta)$  and integrates over all  $\beta$ . A 3D Monte Carlo (MC) algorithm provides reference calculations. The cloud system was simulated by a 2D cloud-resolving model and the domain measures 514 km horizontally and ~18 km vertically. Horizontal grid-spacing is 1 km while the 35 layers vary in thickness. The hydrometeors accounted for are liquid droplets, ice crystals, rain, graupel, and snow. Snapshots of the domain were saved every 5 model-minutes for 10 hours thus spanning the life-cycle of the system.

It is shown that the conventional PPH two-stream is thoroughly inappropriate as it yields 10 hour mean TOA albedo  $\alpha_{\text{toa}}$  and surface absorptance  $\alpha_{\text{sfc}}$  of 0.56 and 0.20 but the corresponding 3D MC values are 0.32 and 0.47. For the gamma-weighted two-stream approximation (GWTS), however,  $\alpha_{\text{toa}}$  and  $\alpha_{\text{sfc}}$  are 0.32 and 0.49. Moreover, while heating rate errors for the PPH model are about  $-0.5$  K/day near the surface and almost  $+2$  K/day at 10 km, they are diminished at both altitudes to 0.25 K/day for the GWTS. For reference, it is shown that the independent column approximation is almost identical to the 3D MC and that while the best possible PPH model (i.e., perfect account of cloud overlap) is vastly superior to the regular PPH model, it is significantly inferior to the GWTS.