

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 531.521

С.М. Пригарин, Т.Б. Журавлева, П.В. Воликова

Пуассоновская модель многослойной разорванной облачности

*ИВМ и МГ, г. Новосибирск
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 11.06.2002 г.

Предлагается «пуассоновская» модель многослойной разорванной облачности с корреляциями между слоями. Обсуждаются результаты вычислительного эксперимента, в котором радиационные характеристики двухслойной облачности рассчитаны методом Монте-Карло. Показано, что корреляция между облачными слоями может оказывать существенное влияние на средние радиационные потоки.

Введение

Частичная облачность может присутствовать в атмосфере одновременно на нескольких уровнях. Наблюдения показывают [1], что наличие или отсутствие облаков в пределах различных облачных слоев может быть коррелировано. Так, вероятность совместного появления в тропиках облаков типа *Cumulonimbus* и *Cirrus* достаточно велика, тогда как одновременное наличие *Cumulus* и *Stratus* антикоррелировано. Известно также, что облака одного типа (например, *Altostratus* и *Alto cumulus*) могут одновременно присутствовать на различных атмосферных уровнях, формируя многослойную (до 4–6 слоев) систему, толщина межоблачных промежутков в которой колеблется от нескольких десятков метров до километра.

Несмотря на наличие корреляции (или антикорреляции) между облаками различных уровней, в моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА) балл облачности предсказывается *независимо* в каждом отдельном слое без учета вертикальных связей между компонентами сложных облачных систем. Используемая при расчете радиационных характеристик гипотеза «случайного перекрытия», впервые сформулированная S. Manabe и R. Strickler [2], основана на предположении, что все облачные слои независимы. Ее применение приводит к завышению общего количества облачности. Чтобы частично улучшить результаты, J.F. Geleyn и A. Hollingsworth [3] предложили подход, который назван «смешанным перекрытием» («mixed overlap»). Он состоит в следующем: для облаков, принадлежащих разным ярусам, используется гипотеза о «случайном перекрытии», для облачных слоев в пределах одного яруса – гипотеза «максимального перекрытия». Представленные L. Tian и J.A. Curry результаты показали [4], что в этом случае соответствие между экспериментально определенным и рассчитанным общим количеством облачности улучшается. Однако необходимо иметь в виду, что использование «mixed overlap» (или его модификаций) оправдано

при расчете радиационных характеристик, осредненных по площади, сравнимой с размерами сетки МОЦА (как правило, 300–1000 км²). Для более детального изучения влияния вертикальной структуры на радиационные эффекты облаков следует использовать другие подходы.

Существующие методы исследования переноса радиации при наличии многослойной облачности на уровне мезомасштабных процессов можно условно разделить на две группы. С одной стороны, это подходы, предложенные, например, X.-Z. Liang и W.-C. Wang [5] и C.J. Stubenrauch et al. [6] и основанные, в конечном итоге, на решении уравнения переноса излучения в горизонтально-однородной среде.

В другой группе методов для расчета средних потоков солнечного и теплового излучения используются математические модели стохастической структуры облаков, которые активно разрабатываются в настоящее время (см., например, [7–12]) и могут быть приспособлены для многослойной облачности. L. Ogeoropoulos и H. Barker [13] предложили модель многослойной облачности, которая получается после рассеяния (параллельно плоскости XOY) горизонтально-неоднородного облачного слоя, распределение оптической толщины в котором описывается Г-распределением. Модель, рассмотренная в [14], предполагает *статистическую независимость* облачных полей, принадлежащих различным слоям. Модель из работы [15] позволяет описывать радиационный режим *коррелированных* облачных полей, но в качестве входных параметров, которые «отвечают» за корреляцию принадлежащих различным слоям облаков, используются характеристики, трудно поддающиеся экспериментальному определению.

В настоящей статье предлагается обобщение хорошо известной пуассоновской модели разорванной облачности для нескольких слоев. Модель позволяет строить реализации статистически зависимых облачных слоев и исследовать влияние корреляционных связей между лежащими на различных уровнях облаками на перенос радиации в облачной атмосфере.

1. Пуассоновская модель многослойной разорванной облачности

1.1. Однослойная модель

Опишем структуру и свойства пуассоновской модели однослойной разорванной облачности, разработанной в [7, 16–19]. В рамках этой модели геометрия облачного поля описывается случайной индикаторной функцией наличия облаков $\kappa(\mathbf{r})$, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, определенной в слое $H_{bot} \leq z \leq H_{top}$. Значения индикаторной функции не зависят от z , а в плоскости XOY в пределах области моделирования $[0, R_x] \times [0, R_y]$ определяются через случайное поле $\xi(\mathbf{p}) = \kappa(\mathbf{r})$, $\mathbf{p} = (x, y)$, которое строится следующим образом. На осях OX и OY рассмотрим пуассоновские точечные потоки $\{x_i\}$ и $\{y_j\}$ с интенсивностями A_x и A_y соответственно. В каждом прямоугольнике $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$ случайное поле $\xi(\mathbf{p})$ принимает значение «1» (наличие облака) с вероятностью p и «0» (отсутствие облака) с вероятностью $(1 - p)$. Значения индикаторной функции для каждого прямоугольника выбираются независимо друг от друга.

Напомним свойства пуассоновского точечного потока с интенсивностью A :

– расстояние Δ между соседними точками потока распределено по экспоненциальному закону (с параметром A) с плотностью

$$\varphi(\Delta) = A \exp(-A\Delta), \quad \Delta > 0,$$

функцией распределения

$$\Phi(x) = P\{0 \leq \Delta \leq x\} = 1 - \exp(-A\Delta),$$

математическим ожиданием $M\Delta = 1/A$ и дисперсией $D\Delta = 1/A^2$;

– количество точек потока $n(L)$ на множестве длины L удовлетворяет закону Пуассона с параметром AL :

$$P\{n(L) = k\} = \exp(-AL) (AL)^k / k!, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

математическое ожидание и дисперсия которого равны

$$Mn(L) = Dn(L) = AL,$$

т.е. интенсивность пуассоновского потока A равна среднему числу точек на единичном интервале.

Таким образом, точки пуассоновского потока на интервале можно моделировать двумя способами: либо последовательно (например, по возрастанию) с экспоненциальным распределением между соседними точками, либо «разбрасывая» точки равномерно на отрезке, заранее разыграв их число согласно распределению Пуассона.

Для первых двух моментов поля $\xi(\mathbf{p})$ выполнены соотношения:

$$\begin{aligned} M\xi(\mathbf{p}) &= p, \quad M\xi(\mathbf{p}_1) \xi(\mathbf{p}_2) = \\ &= P\{\xi(\mathbf{p}_1) = 1, \xi(\mathbf{p}_2) = 1\} = pV(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где p – безусловная, а $V(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ – условная вероятность наличия облака (в точке \mathbf{p}_1 при условии, что точка \mathbf{p}_2 находится в облаке):

$$\begin{aligned} V(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) &= P\{\xi(\mathbf{p}_1) = 1 / \xi(\mathbf{p}_2) = 1\} = p + (1 - p) \times \\ &\times \exp\{-A_x|x_1 - x_2| - A_y|y_1 - y_2|\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Очевидно, что балл облачности N для данной модели определяется равенством $N = p$, а условную вероятность $V(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ удобно представить в виде

$$V(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = p + (1 - p) \exp\{-A(\mathbf{a}) \times |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|\}, \quad (2a)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= (a, b) = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) / |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|, \\ A(\mathbf{a}) &= A_x|a| + A_y|b|. \end{aligned}$$

Таким образом, случайная функция $\xi(\mathbf{p})$ является статистически однородной, анизотропной с математическим ожиданием $M\xi(\mathbf{p}) = p$, дисперсией $D\xi(\mathbf{p}) = p(1 - p)$ и экспоненциальной нормированной корреляционной функцией

$$B(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \exp\{-A(\mathbf{a}) \times |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|\}.$$

Для согласованности с экспериментальными данными в работе [20] предлагается эмпирическое соотношение

$$\begin{aligned} A_x &= [1,65(N - 0,5)^2 + 1,04] / D_x, \\ A_y &= [1,65(N - 0,5)^2 + 1,04] / D_y, \end{aligned} \quad (3)$$

где D_x, D_y – средние горизонтальные размеры отдельного облака в направлении OX и OY .

1.2. Многослойная облачность

Перейдем к описанию модели многослойной разорванной облачности. Предположим, что каждый из M непересекающихся облачных слоев занимает область пространства

$$H_{bot}^{(m)} \leq z \leq H_{top}^{(m)}, \quad m = 1, 2, \dots, M,$$

где $H_{bot}^{(m)}$ и $H_{top}^{(m)}$ – нижняя и верхняя границы m -го слоя облачности соответственно, и

$$H_{top}^{(m)} \leq H_{bot}^{(m+1)}, \quad m = 1, 2, \dots, M - 1.$$

Основной принцип предлагаемой нами модификации пуассоновской модели для многослойной разорванной облачности состоит в следующем:

на одной и той же реализации пуассоновских потоков $\{x_i\}$ и $\{y_j\}$ (с интенсивностью A_x и A_y по осям OX и OY) для каждого слоя строится индикаторная функция (поле) $\xi_m(\mathbf{p})$, $\mathbf{p} = (x, y)$, $m = 1, 2, \dots, M$; случайные векторы $[\xi_1(\mathbf{p}), (\xi_2(\mathbf{p}), \dots, \xi_M(\mathbf{p})]$ моделируются независимо для каждого прямоугольника $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$, однако сами элементы вектора, т.е. значения $\xi_m(\mathbf{p})$ для разных $m = 1, 2, \dots, M$, могут быть зависимы между собой.

Рассмотрим следующие параметры модели:

$$\begin{aligned} p_m &= P\{\xi_m(\mathbf{p}) = 1\}, \\ P_{nm} &= P\{\xi_n(\mathbf{p}) = 1, \xi_m(\mathbf{p}) = 1\}, \\ Q_{nm} &= P\{\xi_n(\mathbf{p}) = 1 / \xi_m(\mathbf{p}) = 1\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{Q}_{nm} = P\{\xi_n(\mathbf{p}) = 1/\xi_m(\mathbf{p}) = 0\}.$$

Для этих параметров выполнены простые соотношения:

$$P_{nm} = p_n Q_{mn} = p_m Q_{nm},$$

$$Q_{mn} \in [0, \min(p_m/p_n, 1)], \quad Q_{nm} \in [0, \min(p_n/p_m, 1)],$$

$$p_n = Q_{nm} p_m + \bar{Q}_{nm} (1 + p_m).$$

Последнее равенство доказывается следующим образом:

$$\begin{aligned} p_n &= P\{\xi_n(\mathbf{p}) = 1\} = P\{\xi_n(\mathbf{p}) = 1/\xi_m(\mathbf{p}) = 1\} P\{\xi_m(\mathbf{p}) = 1\} + \\ &+ P\{\xi_n(\mathbf{p}) = 1/\xi_m(\mathbf{p}) = 0\} P\{\xi_m(\mathbf{p}) = 0\} = \\ &= Q_{nm} p_m + \bar{Q}_{nm} (1 - p_m). \end{aligned}$$

Корреляции между случайными полями ξ_n и ξ_m определяются выражением

$$\begin{aligned} K_{nm}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) &= M[\xi_n(\mathbf{p}_1) - M\xi_n(\mathbf{p}_1)] \times \\ &\times [\xi_m(\mathbf{p}_2) - M\xi_m(\mathbf{p}_2)] = M\xi_n(\mathbf{p}_1) \xi_m(\mathbf{p}_2) - p_n p_m = \\ &= (p_n Q_{mn} - p_n p_m) \exp\{-A(\mathbf{0}) \times |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Действительно,

$$\begin{aligned} P\{\xi_n(\mathbf{p}_1) = 1, \xi_m(\mathbf{p}_2) = 1\} &= P\{\xi_n(\mathbf{p}_1) = 1\} \times \\ &\times P\{\xi_m(\mathbf{p}_2) = 1/\xi_n(\mathbf{p}_1) = 1\} = \\ &= p_n \{P\{\xi_m(\mathbf{p}_2) = 1/\xi_m(\mathbf{p}_1) = 1\} \times \\ &\times P\{\xi_m(\mathbf{p}_1) = 1/\xi_n(\mathbf{p}_1) = 1\} + \\ &+ P\{\xi_m(\mathbf{p}_2) = 1/\xi_m(\mathbf{p}_1) = 0\} \times \\ &\times P\{\xi_m(\mathbf{p}_1) = 0/\xi_n(\mathbf{p}_1) = 1\}\}. \end{aligned}$$

Учитывая (2), (2а) и тот факт, что

$$\begin{aligned} P\{\xi_m(\mathbf{p}) = 1/\xi_n(\mathbf{p}) = 1\} + P\{\xi_m(\mathbf{p}) = 0/\xi_n(\mathbf{p}) = 1\} &= 1, \\ P\{\xi_m(\mathbf{p}_2) = 1/\xi_m(\mathbf{p}_1) = 0\} &= \\ &= p_m [1 - \exp\{-A(\mathbf{0}) \times |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|\}], \end{aligned}$$

получаем соотношение (5).

Математическое ожидание и дисперсии полей $\xi_m(\mathbf{p})$, $m = 1, 2, \dots, M$, равны соответственно

$$M\xi_m(\mathbf{p}) = p_m, \quad D\xi_m(\mathbf{p}) = p_m (1 - p_m).$$

Нормированные корреляционные функции $B_{nm}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ между индикаторами различных слоев $\{\xi_m(\mathbf{p})\}$, $m = 1, 2, \dots, M$, имеют вид

$$\begin{aligned} B_{nm}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) &= \frac{K_{nm}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{\sqrt{D\xi_n(\mathbf{p}) D\xi_m(\mathbf{p})}} = \\ &= \frac{P_{nm} - p_n p_m}{\sqrt{p_n (1 - p_n) p_m (1 - p_m)}} \times \\ &\times \exp\{-A(\mathbf{0}) \times |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты корреляции $b_{nm} = B_{nm}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ удовлетворяют соотношению

$$b_{nm} \in \left[-\sqrt{\frac{p_n p_m}{(1 - p_n)(1 - p_m)}}, \frac{\min(p_n, p_m) - p_n p_m}{\sqrt{p_n (1 - p_n) p_m (1 - p_m)}} \right]. \quad (7)$$

Наименьшее из возможных значений $b_{nm} = -1$ достигается только при условии, что $p_n + p_m = 1$ (при этом $Q_{nm} = Q_{mn} = 0$, $\bar{Q}_{nm} = \bar{Q}_{mn} = 1$), а максимальное зна-

чение $b_{nm} = 1$ – при $p_n = p_m$ (при этом $Q_{nm} = Q_{mn} = 1$, $\bar{Q}_{nm} = \bar{Q}_{mn} = 0$).

В целом пуассоновская модель M -слоистой разорванной облачности задается параметрами A_x и A_y (интенсивности точечных потоков по оси OX и OY соответственно), а также вероятностями

$$P(\xi_m(\mathbf{p}) = a_m, m = 1, 2, \dots, M), \quad \text{где } a_m = 0 \text{ или } a_m = 1,$$

для 2^M всевозможных комбинаций (a_1, a_2, \dots, a_M) . Так как

$$\sum_{(a_1, a_2, \dots, a_M)} P(\xi_m(\mathbf{p}) = a_m, m = 1, 2, \dots, M) = 1,$$

то всего для описания пуассоновской модели M -слоистой облачности достаточно задать $(2^M - 1)$ вероятностей.

Балл облачности m -го слоя N_m совпадает с вероятностью наличия облаков: $N_m = p_m$. Общее количество облаков M -слоистой облачности p определяется выражением

$$p = 1 - P\{\xi_1(\mathbf{p}) = 0, \xi_2(\mathbf{p}) = 0, \dots, \xi_M(\mathbf{p}) = 0\}, \quad (8)$$

а диапазон изменения p соответственно равен

$$\begin{aligned} \max(p_1, p_2, \dots, p_M) = p_{\max} \leq p \leq p_{\min} &= \\ &= \min \left(\sum_{i=1}^M p_i, 1 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Величины p_{\min} и p_{\max} соответствуют общему количеству облаков M -слоистой облачности для гипотез «минимального» и «максимального» перекрытия.

1.3. Двухслойная модель разорванной облачности

Более подробно остановимся на модели двухслойной облачности. В этом разделе индекс «1» будет относиться к нижнему, а индекс «2» – соответственно к верхнему слою. Вместо вероятностей

$$P(\xi_m(\mathbf{p}) = a_m, m = 1, 2),$$

где a_m принимают значения «0» или «1», в качестве параметров модели можно рассматривать балл одного из слоев облачности p_j и условные вероятности

$$Q_{ij} = P\{\xi_i(\mathbf{p}) = 1/\xi_j(\mathbf{p}) = 1\},$$

$$\bar{Q}_{ij} = P\{\xi_i(\mathbf{p}) = 1/\xi_j(\mathbf{p}) = 0\}, \quad i \neq j.$$

Баллы облачности для разных слоев связаны [см. (4)] следующим образом:

$$\begin{aligned} p_1 &= Q_{12} p_2 + \bar{Q}_{12} (1 - p_2), \\ p_2 &= Q_{21} p_1 + \bar{Q}_{21} (1 - p_1). \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно (8) для общего количества облаков p можно получить ряд простых соотношений

$$\begin{aligned} p &= P\{\xi_1(\mathbf{p}) = 1, \xi_2(\mathbf{p}) = 1\} + P\{\xi_1(\mathbf{p}) = 1, \xi_2(\mathbf{p}) = 0\} + \\ &+ P\{\xi_1(\mathbf{p}) = 0, \xi_2(\mathbf{p}) = 1\} = p_1 Q_{21} + p_1 (1 - Q_{21}) + \\ &+ p_2 (1 - Q_{12}) = p_1 + p_2 - p_2 Q_{12} = p_1 + p_2 - p_1 Q_{21} = \end{aligned}$$

$$= p_1 + p_2 - P_{12}. \quad (11)$$

Таким образом, если, например, известны величины p_1 , Q_{21} , \bar{Q}_{21} , то можно однозначно определить p_2 [см. (10)] и p :

$$p = p_1 + \bar{Q}_{21} (1 - p_1). \quad (12)$$

Из (10) следует, что при фиксированном p_1 балл облачности p_2 зависит и от Q_{21} , и \bar{Q}_{21} (рис. 1), тогда как общее количество облачности p определяется только \bar{Q}_{21} [см. (12)].

Если $Q_{21} = 1$, $\bar{Q}_{21} = 0$, то $p = p_1 = p_2$, а коэффициент корреляции $b_{12} = 1$: эта облачная реализация соответствует случаю, когда *облако в одном слое располагается только над (под) облаком в другом слое*. Если $Q_{21} = 0$, $\bar{Q}_{21} = 1$, то $p_2 = 1 - p_1$, $p = 1$, $b_{12} = -1$: в этом случае облака в одном слое располагаются только над безоблачными промежутками в другом слое («шахматная доска»). На рис. 2 представлены реализации облачного поля для промежуточных значений условных вероятностей Q_{21} и \bar{Q}_{21} .

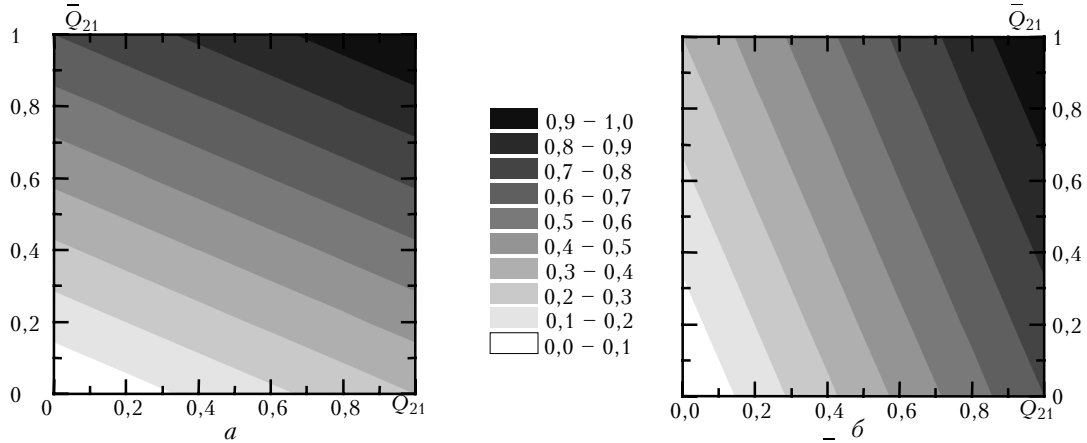


Рис. 1. Балл облачности верхнего слоя p_2 как функция условных вероятностей Q_{21} и \bar{Q}_{21} для различных значений балла облачности нижнего слоя: $a - p_1 = 0,3$; $b - p_1 = 0,7$

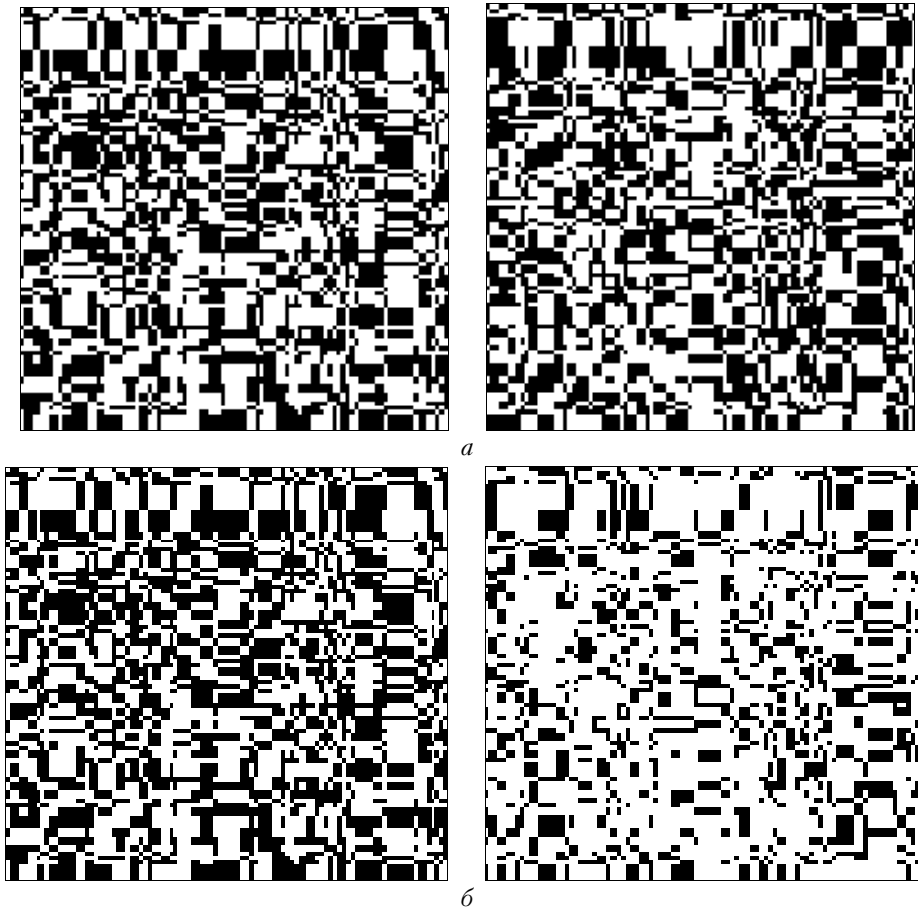


Рис. 2. Реализации облаков в двухслойной разорванной облачности. Балл облачности нижнего слоя $p_1 = 0,5$; $a - p_2 = 0,5$, $p = 0,75$; $b - p_2 = 0,7$, $p = 0,85$

Заметим, что в качестве достаточного набора параметров двухслойной модели ($M = 2$) можно использовать общее количество облаков p и баллы облачности p_j ($j = 1, 2$) каждого из слоев (этой информации недостаточно для описания модели с числом слоев M больше двух).

2. Средние потоки солнечной радиации для двухслойной модели облаков

В этом разделе представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного с использованием метода Монте-Карло для оценки влияния вариации параметров \bar{Q}_{21} и Q_{21} на средние альбедо R (на уровне верхней границы атмосферы) и диффузное пропускание Q_s (на уровне подстилающей поверхности). При анализе результатов будем иметь в виду, что возрастание (убывание) Q_{21} при фиксированном \bar{Q}_{21} равносильно возрастанию (убыванию) балла облачности в верхнем слое облачности p_2 при фиксированном общем количестве облачности p [соотношения (11), (12)]. Вариации \bar{Q}_{21} при заданном Q_{21} означают одновременное изменение как p_2 , так и p .

Средние потоки солнечной радиации на различных атмосферных уровнях рассчитаны для модели

атмосферы, описанной, например, в [21]. Предполагалось, что на верхнюю границу атмосферы в направлении $\omega_0 = (\xi_0, \varphi_0)$, где ξ_0, φ_0 – зенитный и азимутальный углы Солнца соответственно, падает единичный поток солнечного излучения. Расчеты выполнены при следующих параметрах: нижний слой облаков расположен на высоте $3 - 3,25$ км, а верхний – на высоте $3,5 - 3,75$ км; коэффициент ослабления в облачных слоях σ равен 20 км^{-1} , поглощение в облаках не учитывалось; интенсивности пуассоновских потоков A_x, A_y вычислялись из соотношения (3) со средними горизонтальными размерами облачных элементов $D_x = D_y = 0,25$ км для нижнего слоя. Облачное поле моделировалось в области 3×3 км, граничные условия – периодические. В качестве индикатрисы рассеяния облаков использовалась индикатриса рассеяния облака C_1 из [22] (длина волны $\lambda = 0,69$ мкм). Результаты расчетов приведены для альбедо подстилающей поверхности $A_s = 0,0$.

На рис. 3 представлены средние значения альбедо R и диффузного пропускания Q_s как функции условных вероятностей $0 \leq Q_{21} \leq 1$ и $0 \leq \bar{Q}_{21} \leq 1$. Если параметр \bar{Q}_{21} фиксирован (т.е. задано общее количество облачности p), то приращение среднего альбедо при возрастании Q_{21} может достигать примерно $0,1 \div 0,15$.

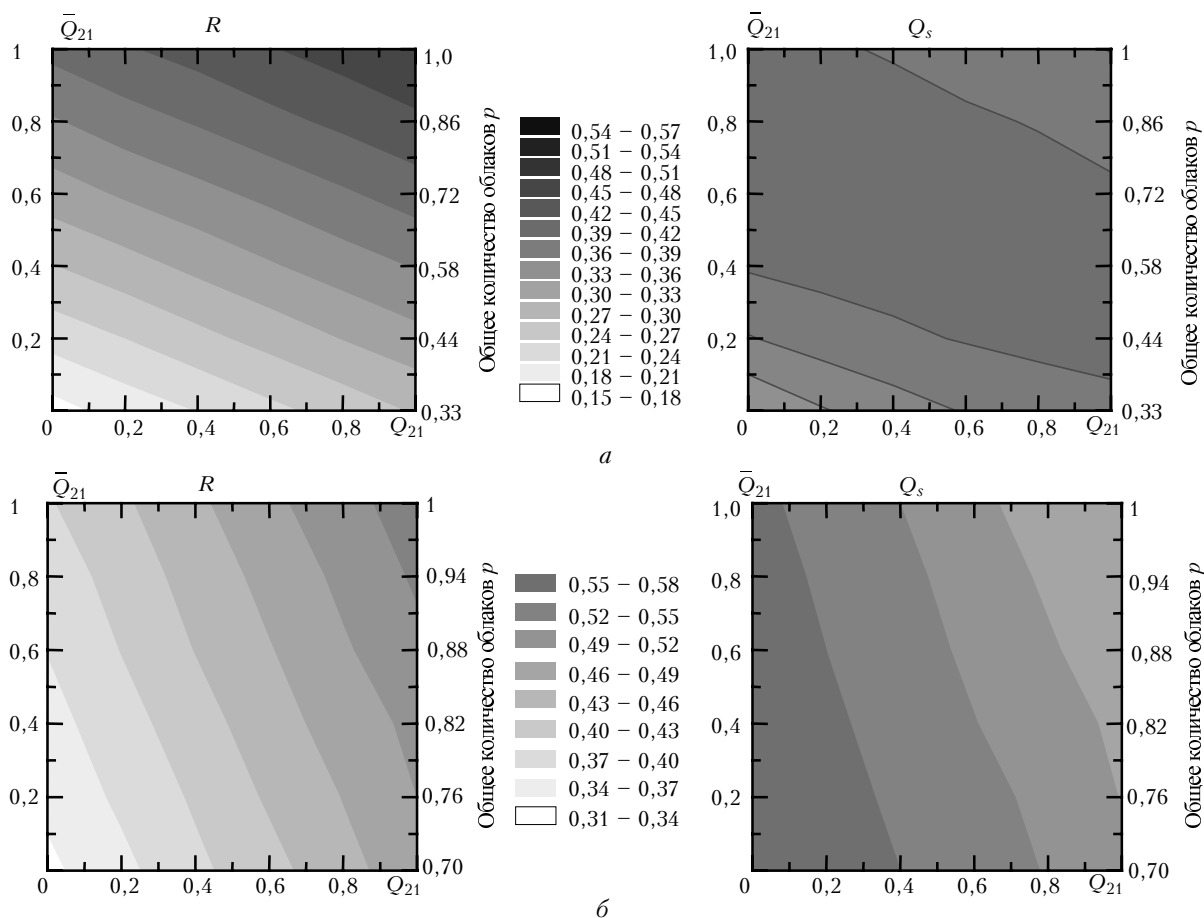


Рис. 3. Средние значения альбедо R и диффузного пропускания Q_s при $0 \leq Q_{21} \leq 1$ и $0 \leq \bar{Q}_{21} \leq 1$ для фиксированного балла облачности нижнего слоя p_1 : а – $p_1 = 0,3$; б – $p_1 = 0,7$. Зенитный угол Солнца $\xi_0 = 60^\circ$, коэффициент ослабления в облаках $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$, средние размеры облаков нижнего слоя $D_x = D_y = 0,25$ км, альбедо подстилающей поверхности $A_s = 0,0$

При заданном значении Q_{21} и увеличении \bar{Q}_{21} общее количество облаков p возрастает от $p = p_1$ до $p = 1$. Следовательно, чем больше балл облачности нижнего слоя p_1 , тем меньше диапазон изменения p и, стало быть, меньше изменчивость среднего альbedo при возрастании \bar{Q}_{21} . Вышесказанное подтверждают результаты расчетов альbedo, представленные на рис. 3: приращение альbedo составляет $\approx 0,2$ при $p_1 = 0,3$ и $\approx 0,05 \div 0,07$ при $p_1 = 0,7$.

Известно, что в однослойной облачности диффузное пропускание как функция оптической толщины облаков и (или) балла облачности достигает максимального значения, положение и величина которого зависят от зенитного угла Солнца. Это свойство Q_s сохраняется и при переходе к многослойной облачности: например, среднее диффузное пропускание не монотонно зависит от \bar{Q}_{21} (и от p соответственно) при $p_1 = 0,3$ и фиксированном $Q_{21} \geq 0,3$ (рис. 3, а). При небольших и средних значениях балла облачности $p \leq 0,5 \div 0,6$ (что предполагает, естественно, небольшой балл облачности в нижнем слое p_1) увеличение Q_{21} приводит к возрастанию Q_s , тогда как при $p > 0,6$ имеет место противоположная зависимость.

Обсудим вопрос о том, как соотносятся между собой средние потоки излучения, рассчитанные в описанной выше модели облаков и в пуассоновской модели разорванной облачности [14], в которой слои облаков предполагаются статистически независимыми

(для обозначения характеристик в модели [14] будем использовать индекс «ind» – independent). Если зафиксировать общее количество облаков p и балл облачности нижнего слоя p_1 , то в модели со статистически независимыми облачными полями наличие сведений о p и p_1 однозначно определяет балл облачности верхнего слоя:

$$p_2^{\text{ind}} = (p - p_1) / (1 - p_1).$$

Подход, предложенный в данной статье, позволяет при одних и тех же p и p_1 получить целое семейство моделей, которые отличаются друг от друга значением балла облачности в верхнем слое.

Сравним результаты расчетов средних потоков излучения с одинаковыми значениями p и p_1 (и согласованными горизонтальными размерами облаков для обеих моделей). Если значение Q_{21} варьируется во всем множестве возможных значений и, следовательно, балл облачности верхнего слоя изменяется в интервале $0 \leq p_2 \leq 1$, то разница средних потоков $\Delta F = F - F^{\text{ind}}$, $F = R, S, Q_s$, может достигать $\approx 0,1 \div 0,2$ (рис. 4). Однако если положить

$$Q_{21} = \bar{Q}_{21} = (p - p_1) / (1 - p_1),$$

то получим модель с коррелированными облачными слоями, в которой

$$p_2 = (p - p_1) / (1 - p_1).$$

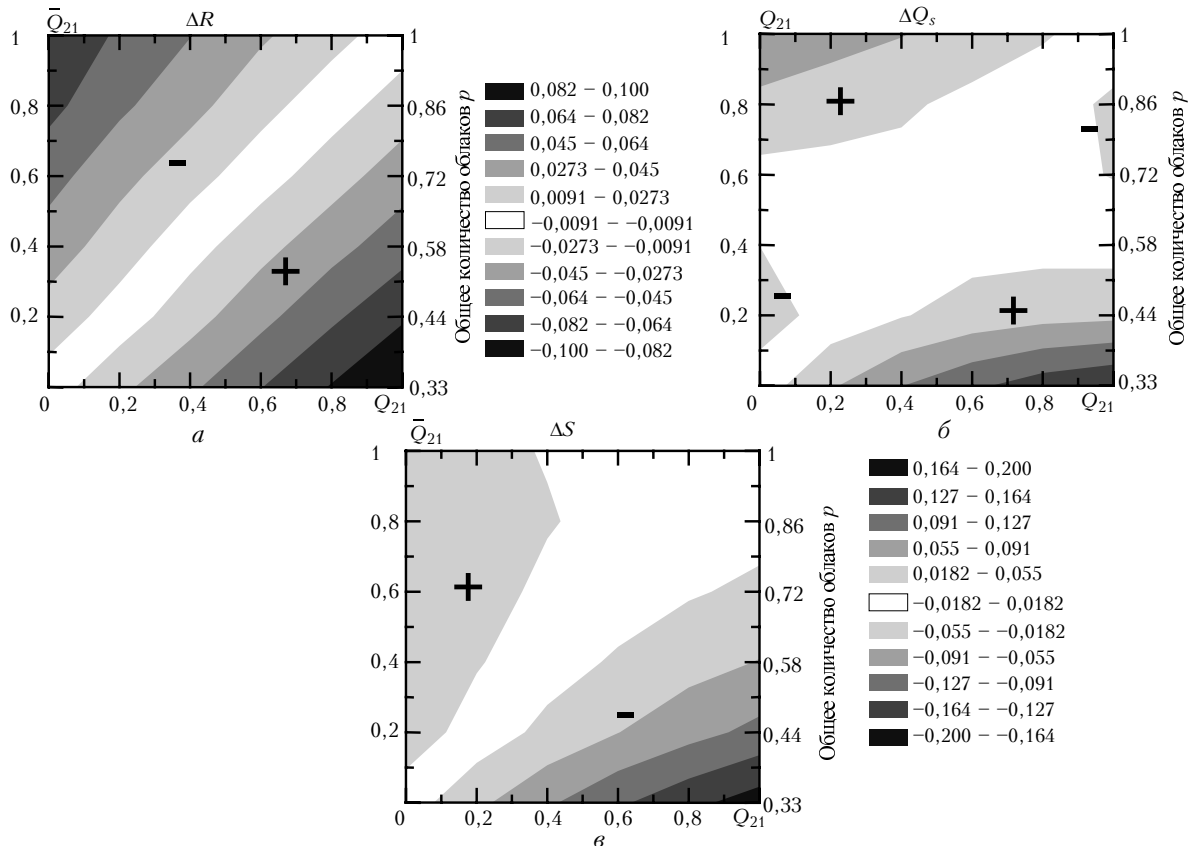


Рис. 4. Разница средних значений альbedo (а), диффузного пропускания (б) и нерассеянного излучения (в), рассчитанных в предлагаемой модели облаков и в модели [14]: $\Delta F = F - F^{\text{ind}}$, $F = R, Q_s, S$. Расчеты выполнены при $p_1 = 0,3$; значения остальных параметров указаны в подписи к рис. 3

Таким образом, мы рассмотрели две модели, имеющие одинаковые p , p_1 и $p_2 = p_2^{\text{ind}}$, но отличающиеся тем, что реализации облаков в пределах верхнего и нижнего слоев в предлагаемой модели строились на одних и тех же пуассоновских потоках точек в отличие от модели [14]. Результаты расчетов показывают, что при $p_2 = p_2^{\text{ind}}$ различия потоков пропущенного (как диффузного Q_s , так и нерассеянного S) и отраженного излучения, рассчитанных в двух рассматриваемых моделях, находятся в пределах 0,01–0,02. Это свидетельствует о том, что средние потоки излучения при $p_2 = p_2^{\text{ind}}$ слабо зависят от того, каким образом строятся реализации облачности в верхнем слое.

Заключение

Предлагаемая модель многослойной разорванной облачности на основе пуассоновских точечных потоков обладает следующими особенностями:

– входные параметры модели имеют ясный физический смысл и могут быть сравнительно просто определены на основе экспериментальных данных;

– модель допускает широкий диапазон корреляций между различными слоями облачности и является естественным обобщением известной однослойной пуассоновской модели.

Данная модель позволяет изучать закономерности процессов переноса излучения в многослойной облачности, обусловленные наличием корреляций между облаками различных уровней. В частности, наши расчеты для модели двухслойной облачности показали, что при фиксированных значениях балла облачности нижнего слоя и общего количества облачности (именно эти две характеристики фиксируются на метеорологических станциях) корреляции между слоями могут сильно влиять на радиационные характеристики системы.

Отметим в заключение, что отсутствие достаточной информации о вероятностных характеристиках пространственной структуры облачных полей является общей проблемой при создании и тестировании новых моделей. Возросший в последнее время интерес к комплексным исследованиям сложных облачных систем (см., например, [23–25]) позволяет в обозримом будущем надеяться на получение информации такого рода и, как следствие, на разработку более адекватных стохастических моделей облаков.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов РФФИ (гранты № 00-05-65456, 00-01-00797, 00-15-96173), INTAS-01-0239 и СО РАН (Интеграционный грант 2000, № 43).

1. *Облака и облачная атмосфера* / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.
2. *Manabe S., Strickler R.F.* Thermal equilibrium of the atmosphere with convective adjustment // *J. Atmos. Sci.* 1964. V. 21. P. 361–385.

3. *Geleyn J.F., Hollingsworth A.* An economical analytical method for the computation of the interaction between scattering and line absorption of radiation // *Contrib. Atmos. Phys.* 1979. V. 52. P. 1–16.
4. *Tian L., Curry J.A.* Cloud overlap statistics // *J. Geophys. Res. D.* 1989. V. 94. P. 9925–9935.
5. *Liang X.-Z. and Wang W.-C.* Cloud overlap effects on general circulation model climate simulation // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102. N 10. P. 11039–11047.
6. *Stubenrauch C.J., Del Genio A.D., Rossow W.B.* Implementation of subgrid cloud vertical structure inside GSM and its effects on radiation budget // *J. Climate.* 1997. N 2. P. 273–287.
7. *Зуев В.Е., Тутов Г.А.* Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1996. 271 с.
8. *Cahalan R.F., Ridgway W., Wiscombe W.J., Bell T.L., Shider J.B.* The albedo of fractal stratocumulus clouds // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. N 16. P. 2434–2455.
9. *Marshak A., Davis A., Cahalan R.F., Wiscombe W.J.* Bounded cascade models as non-stationary multifractals // *Phys. Rev. E.* 1994. V. 49. P. 55–79.
10. *Пригарин С.М., Тутов Г.А.* Спектральные методы численного моделирования геофизических полей // *Оптика атмосф. и океана.* 1996. Т. 9. № 7. С. 993–1003.
11. *Prigarin S.M., Kargin B.A., and Oppel U.G.* Random fields of broken clouds and their associated direct solar radiation, scattered transmission, and albedo // *Pure and Appl. Optics. A.* 1998. V. 7. N 6. P. 1389–1402.
12. *Prigarin S.M., Gubina N.I., Oppel U.G.* Numerical modeling of stochastic fields of vertical optical thickness for stratocumulus clouds / W.L. Smith and Yu.M. Timofeyev (Eds.). *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation.* A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. 2001. P. 257–260.
13. *Oreopoulos L., Barker H.* Accounting for subgrid-scale cloud variability in multi-layer 1D solar radiative transfer algorithms // *Quant. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1999. N 125. P. 301–333.
14. *Тутов Г.А., Журавлева Т.Б.* Сравнение двух методов расчета средних потоков солнечной радиации в двухслойной разорванной облачности (видимый диапазон) // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 3. С. 207–215.
15. *Тутов Г.А., Касьянов Е.И.* Радиационные эффекты неоднородных облаков // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 10. С. 911–921.
16. *Глазов Г.Н., Тутов Г. А.* Уравнения моментов интенсивности излучения в разорванной облачности в марковском приближении // *Изв. вузов. Физ.* 1980. Т. XXIII. № 4. С. 424–431.
17. *Скоринов В.Н., Тутов Г.А.* Перенос оптического излучения в модели разорванной облачности в виде пуассоновского индикаторного поля // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1983. Т. XXVI. № 8. С. 971–980.
18. *Тутов Г.А.* Перенос излучения в модели разорванной облачности на основе пуассоновского потока точек // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1985. Т. 21. № 9. С. 940–948.
19. *Тутов Г.А.* Некоторые вероятностные свойства пуассоновского индикаторного поля // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1983. Т. XXVI. № 8. С. 966–970.
20. *Журавлева Т.Б., Тутов Г.А.* Статистические характеристики нерассеянного излучения при кучевой облачности

- // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы / Под ред. Г.М. Крекова и В.С. Комарова. Новосибирск: Наука, 1987. С. 108–119.
21. *Титов Г.А., Журавлева Т.Б.* Параметризация потоков солнечной радиации в разорванной облачности // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 7. С. 707–721.
22. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
23. *Wang J., Rossow W.A.* Determination of cloud vertical structure from upper-air observations // J. Appl. Meteor. 1995. V. 34. N 10. P. 2243–2258.
24. *Bergman J., Hendon H.H.* Calculating Monthly Radiative fluxes and heating rates from monthly cloud observations // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 3471–3491.
25. *Wang J., Rossow W.A., Uttal T., Rozendaal M.* Variability of cloud vertical structure during ASTEX observed from combination of rawinsonde, radar, ceilometer and satellite // Mon. Weath. Rev. 1999. V. 127. P. 2484–2502.

Prigarin S.M., Zhuravleva T.B., Volikova P.V. **Poisson model of multilayer broken clouds.**

A Poisson model of multilayer broken clouds with correlations between layers is suggested. We discuss the results of numerical experiment, in which the radiative characteristics of two-layer clouds are calculated by the Monte Carlo method. It is shown that the correlation between cloud layers can affect substantially the mean radiative fluxes.