

Т.Б. Журавлева

## Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть II: Стохастическая облачность

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 10.09.2007 г.

Посвящается памяти Георгия Александровича Титова,  
которому 5 марта 2008 г. исполнилось бы 60 лет.

Автор

Приведен краткий обзор современных моделей стохастической облачности. Представлены обобщенные формулы метода замкнутых уравнений для расчета средних потоков и полей яркости в статистически однородной пуассоновской модели разорванной облачности с учетом молекулярного поглощения и взаимодействия излучения с аэрозолем и подстилающей поверхностью. Описан подход, разработанный для уменьшения трудоемкости расчетов средних спектральных потоков в ближнем ИК-диапазоне 0,7–3,6 мкм, объединяющий методы замкнутых уравнений и зависимых испытаний. Представлено сопоставление расчетов средних потоков в статистически однородной пуассоновской модели облаков с результатами моделирования в частично интегрированной каскадной и гауссовской моделях разорванной облачности, которые ранее прошли валидацию на реалистических облачных структурах подсеточного масштаба.

В I части данной статьи [1] были описаны алгоритмы метода Монте-Карло, предназначенные для расчета потоков и полей яркости коротковолнового излучения в детерминированной атмосфере — как в горизонтально-однородной, так и содержащей пространственно неоднородные облака. В части II рассматриваются проблемы, связанные с моделированием переноса солнечной радиации при наличии стохастической облачности. Представлено краткое описание некоторых из наиболее часто используемых моделей стохастических облаков. Основное внимание уделено *статистически однородной* модели разорванной облачности на основе *пуассоновских потоков точек на прямых*, развитой в ИОА СО РАН под руководством Г.А. Титова.

Алгоритмы расчетов потоков и полей яркости солнечной радиации для случая *изолированной* разорванной облачности в *отсутствие молекулярного поглощения* были изложены ранее в монографии [2]. В части II приведены обобщенные формулы для расчета средних (по облачным реализациям) радиационных характеристик в системе «аэрозоль — разорванные облака — подстилающая поверхность». Для уменьшения трудоемкости алгоритмов расчета средних спектральных потоков солнечного излучения с учетом *молекулярного поглощения* используется комбинация методов зависимых испытаний и замкнутых уравнений. Представлены подходы к сопоставлению радиационных характеристик, рассчитанных в рамках различных моделей стохастической облачности — пуассоновской, гауссовской и частично интегрированной каскадной, и приведены некоторые результаты этих сравнений.

### 1. Стохастические модели облаков

Как уже отмечалось в [1], двух (2D)- и трехмерные (3D) реализации облачности в настоящее время могут быть получены на основе моделей, которые условно можно разделить на «физические» и «математические» — согласно принципам, лежащим в основе моделирования мезомасштабных облачных полей. При классификации существующих математических моделей облаков выделим 3 группы:

— гауссовская модель (Ю.А.Р. Мулламаа, Б.А. Каргин, С.М. Пригарин, А.Н. Рублев);

— фрактальные модели облаков, предназначенные для имитации сложной геометрической формы отдельных облаков (S. Lovejoy, A. Davis, P. Gabriel, D. Schertzer, Г.А. Титов, Е.А. Бабич) и моделирования распределения водозапаса внутри сплошных слоисто-кучевых облаков (R. Cahalan, W. Wiscombe, A. Davis, A. Marshak и др.);

— модель на основе пуассоновских потоков точек в пространстве и на прямых (Г.А. Титов, Г.Н. Глазов, В.Н. Скоринов, Т.Б. Журавлева, Е.И. Касьянов) и модель, которую предложили G. Pomraning, F. Malvadgi, R. Byrne, R. Somerville.

Далее мы представим краткое описание наиболее часто используемых моделей облаков.

#### 1.1. Гауссовская модель разорванной облачности

В работе Ю.А.Р. Мулламаа и его коллег была выдвинута гипотеза о возможности описания кучевой облачности на основе стационарного гауссовского

процесса и создана теоретико-экспериментальная модель статистической структуры кучевых облаков [3]. Численные модели облачной структуры, предназначенные для моделирования реализаций полей облаков и вычисления радиационных характеристик, построены Б.А. Каргиным и С.М. Пригариним [4], а также А.Н. Рублевым и его соавторами [5, 6].

Предполагается, что нижняя граница облачности задана плоскостью  $z = H_0$ , а верхняя граница  $z = w(x, y)$  определяется выражением

$$w(x, y) = H_0 + \max\left[\left(v(x, y) - c\right), 0\right], \quad c > 0,$$

где  $v(x, y)$  — однородное гауссовское поле с нулевым средним, корреляционной функцией  $K(x, y)$  и дисперсией  $\sigma^2 = K(0, 0)$ . Подбирая входные параметры  $c$ ,  $\sigma$  и  $K(x, y)$ , гауссовскую модель достаточно просто настроить таким образом, чтобы получить требуемый балл облачности  $N$  и средние вертикальные и горизонтальные размеры облаков.

В первых численных экспериментах для одно-родных изотропных полей корреляционная функция определялась как

$$K(x, y) = \sigma^2 J_0 \left[ v(x^2 + y^2)^{1/2} \right], \quad (1)$$

$J_0$  — функция Бесселя 1-го рода;  $v$  — параметр, отвечающий за горизонтальные размеры облаков, а распределение геометрической толщины облаков  $H = w(x, y) - H_0$  описывалось усеченным гауссовским распределением. Форма распределения  $H$  жестко регламентировалась параметрами модели, и необходимого среднего значения  $\bar{H}$  можно было добиться лишь масштабированием с помощью параметра  $\sigma$  [7]. При таком подходе проблемы состояли в том, что при использовании  $K(x, y)$  в виде (1) конфигурации облачного поля имели излишне «регулярную» структуру и реальные распределения толщины облаков могли существенно отличаться от усеченных гауссовских распределений (см. [7] и цитируемую там библиографию).

В связи с этим С.М. Пригарин и А.Л. Маршак [7] предложили модификацию гауссовской модели, настраиваемой по результатам натурных наблюдений. Входными параметрами модифицированной модели служат автокорреляционная функция индикаторного поля облачности и распределение геометрической толщины облачного слоя. Как показали основанные на данных спутниковых и наземных наблюдений результаты тестирования, предложенная методика позволяет более адекватно воспроизводить реальные ковариации индикаторного поля облачности и распределение его геометрической толщины и поэтому является весьма перспективной для дальнейшего использования.

Принципы, описанные в [7] (предварительное моделирование гауссовского поля на основе дискретного преобразования Фурье и последующее нелинейное преобразование гауссовского поля), использовали К.Ф. Evans и W. Wiscombe [8] и V. Venema et al. [9] для моделирования трехмерных полей водности  $LWC$  (Liquid Water Content) облаков. Заметим, что в от-

личие от гауссовских моделей, которые конструируют лишь *геометрию* облачного поля, методы [8, 9] позволяют строить индикаторное поле облачности, коррелированное с *оптическими характеристиками* облачной среды.

## 1.2. Фрактальные модели

В течение последнего времени развивается большой класс фрактальных моделей, позволяющих учесть изменчивость той или иной характеристики облаков (например, геометрической формы, водозапаса  $LWP$ , Liquid Water Path) в широком диапазоне масштабов.

Для имитации сложной *геометрической формы* реальных *кучевых* облаков, которая может рассматриваться как фрактальная структура, используются специальные способы моделирования (см., например, [10, 11]). Близкие к каскадным, модели кучевых облаков с учетом случайной геометрии отдельных облаков предложены Е.А. Бабичем и Г.А. Титовым: для моделирования используется сумма  $n$  независимых однородных изотропных гауссовских полей с уменьшающимися дисперсиями и радиусами корреляций [2].

Как показали данные измерений [12–15], распределение жидкой воды внутри морских слоисто-кучевых облаков имеет степенной спектр

$$E(k) \propto k^{-\beta} \quad (2)$$

при изменении пространственного масштаба в пределах, по крайней мере, трех порядков (здесь  $k = \pi/r$  — волновое число;  $r$  — масштаб, км). С учетом этого обстоятельства в работах R. Cahalan, A. Davis, S. Lovejoy, A. Marshak, D. Schertzer, W. Wiscombe и др. предложены фрактальные модели пространственного распределения водозапаса  $LWP$ , которые позволяют сохранять ее баланс в пределах *сплошного* облачного поля (сингулярные и ограниченные каскады, частично интегрированная каскадная модель [12–17]). Каждая реализация модели определяется средней оптической толщиной  $\bar{\tau}$  (оптическая толщина связана с водозапасом  $LWP$  известным соотношением  $\tau = (3LWP)/(2\rho r_{ef})$ ,  $\rho$  — плотность воды,  $r_{ef}$  — эффективный размер облачных капель), параметром  $p$ , характеризующим вариации оптической толщины  $\sigma_\tau$ , и показателем  $\beta$  [см. (2)].

Достоинство фрактальных моделей состоит в том, что, варьируя небольшое количество сравнительно легко измеряемых входных параметров, можно получать различные структуры распределения жидкой воды, пространственные корреляции которых соответствуют наблюдаемым. Фрактальные модели кучевых облаков предложены также в работах A. Benassi и его коллег (tdMAP метод, [18]), F. Di Giuseppe и A. Tompkins [19] и т.д. (см. также [http://i3rc.gsfc.nasa.gov/Public\\_codes\\_clouds.htm](http://i3rc.gsfc.nasa.gov/Public_codes_clouds.htm)).

Моделирование облачных реализаций, которые в той или иной степени адекватно описывают реальные поля облаков, является первым шагом в исследовании особенностей переноса радиации в стохастической облачности. Следующий этап состоит в решении

уравнения переноса излучения (УПИ), для которого пространственное распределение оптических характеристик (коэффициентов ослабления и рассеяния, индикатрисы рассеяния излучения) определяется конкретной реализацией облачного поля.

Для всех упомянутых выше физических и математических моделей облаков расчет *статистических характеристик* радиации связан с *численным усреднением* УПИ, суть которого состоит в моделировании совокупности облачных реализаций; решении УПИ в рамках каждой из них и последующей статистической обработке рассчитанных радиационных характеристик. При таком подходе необходимые для вычисления затраты компьютерного времени существенно зависят от того, насколько трудоемкой является процедура построения одной реализации. Однако при определенных физически обоснованных предположениях относительно вероятностных свойств облачного поля удастся выполнить *аналитическое усреднение* уравнения переноса излучения и, тем самым, избежать необходимости моделирования множества облачных реализаций.

Впервые один из вариантов такого подхода для разорванных облаков был сформулирован в работе О.А. Авасте и Г.М. Вайникко [20]. Уравнения для моментов интенсивности при различных предположениях о свойствах облачного поля были получены различными исследователями группами, однако широкое применение в настоящее время нашли модели, в развитие которых наибольший вклад внесли Г.А. Титов и G. Pomraning.

### 1.3. Пуассоновская модель разорванной облачности

Однослойная *статистически однородная* модель разорванной облачности на основе пуассоновских потоков точек на прямых подробно описана в [2]. В рамках этой модели (которую в дальнейшем будем называть «пуассоновской») облака аппроксимируются прямоугольными параллелепипедами со случайными горизонтальными размерами. Пуассоновская модель полностью определяется баллом облачности  $N$ , геометрической толщиной облака  $H$  и средним горизонтальным размером облаков  $D$ ; входные оптические характеристики (коэффициент ослабления  $\sigma$ , альбеда однократного рассеяния  $\Lambda$  и индикатриса рассеяния излучения в облаках) предполагаются постоянными в пределах всех облачных элементов и не меняются от реализации к реализации. При фиксированной геометрической толщине облаков  $H$  вместо диаметра облаков  $D$  в качестве входного параметра часто используют величину  $\gamma = H/D$  (aspect ratio), которая более наглядно характеризует геометрическую структуру облачного поля.

В предположении, что  $n$ -мерная вероятность наличия облаков факторизуется, Г.А. Титовым совместно с Г.Н. Глазовым и В.Н. Скориновым получена замкнутая система уравнений для *средней интенсивности* и развиты эффективные алгоритмы ее решения методом Монте-Карло — метод замкнутых уравнений (МЗУ). Точность и границы применимо-

сти этих уравнений оценены путем сравнения с соответствующими расчетами, выполненными с помощью метода численного моделирования. Результаты сопоставления показали, что уравнения для средней интенсивности достаточно точны и могут быть использованы для исследования влияния случайной геометрии на радиационные свойства разорванной облачности. Основное преимущество МЗУ состоит в том, что лежащее в его основе *аналитическое усреднение* уравнения переноса излучения позволяет проводить расчеты средних радиационных характеристик облаков при существенно меньших затратах компьютерного времени по сравнению с *численным усреднением* УПИ [2].

Приведем соотношения, лежащие в основе моделирования средних потоков и полей яркости в условиях *изолированной* разорванной облачности [2]. Рассмотрим облачный слой, занимающий промежуток  $H_0 = \{0, H\}$ , и предположим, что на верхнюю границу  $H$  в направлении  $\omega_0 = (\xi_0, \varphi_0)$  падает единичный поток солнечного излучения. Средняя (по множеству облачных реализаций) плотность столкновений функция  $f(\mathbf{x})$  удовлетворяет интегральному уравнению типа [1, формула (3)] с ядром

$$k(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \Lambda g(\mu) \sum_{i=1}^2 D_i \eta_i \exp\{-\eta_i |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|\} \times \\ \times \delta\{\omega - (\mathbf{r} - \mathbf{r}')/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|\} / (2\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2) \quad (3)$$

и свободным членом

$$\psi(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^2 C_i \eta_i \exp\{-\lambda_i |\mathbf{r} - \mathbf{r}_H|\} \delta(\omega - \omega_0). \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{x} = (\mathbf{r}, \omega)$ ,  $\omega = (a, b, c)$  — направление движения фотона после рассеяния в точке  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ ;  $\mu = [\omega', (\mathbf{r} - \mathbf{r}')]/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ ;  $\mathbf{r}_H = \mathbf{r} + \omega(z - H)/c$ . Значения  $C_i$ ,  $D_i$  и  $\eta_i$ ,  $i = 1, 2$ , вычисляются по формулам:

$$\eta_{1,2} = \left\{ (\sigma + A(\omega)) \mp \sqrt{[\sigma + A(\omega)]^2 - 4A(\omega)N\sigma} \right\} / 2; \\ D_1 = (\eta_2 - \sigma)/(\eta_2 - \eta_1), D_2 = 1 - D_1, \\ C_1 = (\eta_2 - \sigma N)/(\eta_2 - \eta_1), C_2 = 1 - C_1. \quad (5)$$

Значение  $A(\omega)$  определяется выражением [21]:

$$A(\omega) = A_x |a| + A_y |b| + A_z |c|, \\ A_x = A_y = [1,65(N - 0,5)^2 + 1,04]/D, A_z = 0. \quad (6)$$

В предположении о постоянстве оптических характеристик облаков среднюю интенсивность  $\langle I(z, \omega) \rangle$  можно представить в виде линейного функционала  $J_h = (f, h)$  от решения интегрального уравнения [1, формула (3)] с учетом (3), (4):

$$\langle I(z, \omega) \rangle = \frac{\Lambda}{2\pi |c|} \int_{E_z} \sum_{i=1}^2 D_i \exp\{-\eta_i |z - z'|/|c|\} dz' \times \\ \times \int_{4\pi} g(\mu) f'(z', \omega') d\omega' + \langle j(z, \omega) \rangle \delta(\omega - \omega_0), \quad (7)$$