

**КОНФЕРЕНЦИЯ В**

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ.

М. А. Алексеенко, И. Ю. Гендрина

Научно-исследовательский Томский государственный университет

[masha\\_af6@mail.ru](mailto:masha_af6@mail.ru), [igendrina@bk.ru](mailto:igendrina@bk.ru)

**Ключевые слова:** система видения, угловое распределение яркости, метод Монте-Карло, регрессия.

## Аннотация

В последнее время в связи с обилием различного рода данных наблюдений в системах видения через атмосферу и необходимостью их обработки актуальным является использование при изучении таких систем различных методов статистического исследования: корреляционно-регрессионного анализа, динамических рядов, дисперсионного анализа и т.д. Нами предпринята попытка применить элементы корреляционно-регрессионного анализа для изучения и последующего прогнозирования закономерностей переноса излучения в таких системах так же, как это делают при построении радиационных моделей атмосферы. В настоящей работе представлены некоторые результаты статистической обработки результатов численного моделирования характеристик систем видения через атмосферу, полученных с помощью программного комплекса [1].

Под системой видения понимают схему наблюдения, включающую в себя подстилающую поверхность, «мутную среду» (атмосферу) и оптическое устройство, осуществляющее регистрацию приходящего излучения. Для изучения переноса излучения в таких системах традиционно используется теория систем и теория переноса излучения [2].

Модель атмосферы включает в себя следующие характеристики: полный коэффициент ослабления  $\sigma(\lambda, \vec{r}) = \sigma_{sc}(\lambda, \vec{r}) + \sigma_a(\lambda, \vec{r})$ , где  $\sigma_{sc}$  – коэффициент рассеяния,  $\sigma_a$  – коэффициент поглощения;  $g(\lambda, \mu, \vec{r})$  – индикатриса рассеяния. Здесь  $\vec{r} = (x, y, z)$  – радиус-вектор текущей точки в пространстве,  $\mu(\vec{\omega}', \vec{\omega})$  – косинус угла рассеяния излучения, пришедшего с направления  $\vec{\omega}'$ , в направлении  $\vec{\omega}$ ,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения.

В работе рассматриваются 2 модели атмосферы:

1. вертикально ограниченная плоскопараллельная слоисто-однородная аэрозольно-молекулярная;

2. вертикально ограниченная плоскопараллельная аэрозольно-молекулярная, включающая слой сплошной облачности. Для облачного слоя предполагается задание характеристик, отличных от характеристик первой модели: коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и индикатрисы рассеяния.

Геометрическая схема расчетов такова: на нижней границе атмосферы (на подстилающей поверхности  $z = 0$ ) находится точечный источник единичной мощности. На верхней границе атмосферы ( $z = 30 \text{ km}$ ) находится идеальный оптический приемник, который может принимать рассеянное излучение, приходящее с различных направлений (углов наблюдения). Яркость рассеянного излучения является решением интегро-дифференциального уравнения переноса

[3], которое практически может быть решено только приближенными или численными методами.

Одним из наиболее универсальных методов решения поставленной задачи является метод имитационного моделирования, или метод Монте-Карло. Основой метода Монте-Карло является интегральное уравнение переноса 2-го рода с обобщенным ядром для плотности столкновений частиц [3]:

$$f(\bar{x}) = \int_X k(\bar{x}', \bar{x}) f(\bar{x}') d\bar{x}' + \psi(\bar{x}), \quad f = Kf + \psi$$

Здесь  $\bar{x} = (\bar{r}, \bar{\omega})$  - точка фазового пространства координат и направлений,  $\psi(\bar{x})$  - функция источников,  $K$  - интегральный оператор с ядром  $k(\bar{x}', \bar{x})$ :

$$k(\bar{x}', \bar{x}) = \frac{\sigma_{sc}(\bar{r}) \cdot g(\mu) \exp(-\tau(\bar{r}', \bar{r})) \sigma(\bar{r})}{\sigma(\bar{r}') 2\pi |\bar{r} - \bar{r}'|^2} \cdot \delta\left(\bar{\omega} - \frac{\bar{r} - \bar{r}'}{|\bar{r} - \bar{r}'|}\right).$$

В работе был использован один из алгоритмов метода Монте-Карло - метод локальной оценки [3].

Алгоритм локальной оценки заключается в расчете следующего функционала:

$$J(\Omega_i) = \int_{\Omega_i} \Phi(\bar{r}^*, \bar{\omega}^*) d\bar{\omega}^* = \int_X l_i(\bar{x}', \bar{x}^*) f(\bar{x}') d\bar{x}' = M \sum_{n=0}^N Q_n \cdot l_i(\bar{x}_n, \bar{x}^*), \quad (1)$$

$$l_i(\bar{x}, \bar{x}^*) = \frac{\exp(-\tau(\bar{r}, \bar{r}^*)) \cdot g(\mu^*)}{2\pi |\bar{r} - \bar{r}^*|^2} \Delta_i(\bar{s}^*). \quad (2)$$

Здесь  $\bar{s}^* = \frac{\bar{r}^* - \bar{r}}{|\bar{r}^* - \bar{r}|}$ ,  $\mu^* = (\bar{\omega}, \bar{s}^*)$ ,  $\Delta_i(\bar{s})$  - индикатор области  $\Omega_i$ .  $\Phi$  - поток частиц в

заданной точке  $\bar{x}^*$ .  $Q_n$  - вес частицы,  $f(\bar{x})$  - плотность столкновений.

Количественные значения яркости рассеянного излучения для безоблачной атмосферы приведены в [4]. Аналогичные значения для облачной атмосферы приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Яркость рассеянного излучения для атмосферы с облачным слоем типа «Дымка Н»,  
Вт/мкм · м<sup>2</sup> · ср**

Углы приема, град	Длина волны, мкм						
	$\lambda=0,374$	$\lambda=0,530$	$\lambda=0,694$	$\lambda=0,860$	$\lambda=1,060$	$\lambda=3,390$	$\lambda=10,60$
4,5	2,24E-05	1,67E-05	1,38E-05	1,13E-05	1,19E-05	5,55E-06	3,51E-06

13,5	1,09E-06	7,65E-07	6,60E-07	5,30E-07	4,56E-07	2,09E-07	1,43E-07
22,5	2,23E-07	1,83E-07	1,55E-07	1,39E-07	1,12E-07	4,84E-08	3,51E-08
31,5	8,44E-08	5,63E-08	5,54E-08	4,73E-08	3,85E-08	1,95E-08	1,32E-08
40,5	3,49E-08	2,73E-08	2,81E-08	6,65E-08	4,33E-08	8,70E-09	5,38E-09
49,5	1,86E-08	5,15E-08	1,54E-08	1,18E-08	9,30E-09	4,23E-09	4,59E-09
58,5	1,30E-08	1,10E-08	1,71E-08	7,75E-09	6,64E-09	3,58E-09	3,57E-09
67,5	1,94E-08	1,12E-08	7,95E-09	2,11E-08	1,73E-08	8,16E-08	6,37E-09
76,5	1,58E-07	2,13E-08	4,96E-09	3,68E-09	2,90E-09	1,99E-09	1,18E-09
85,5	1,20E-08	6,37E-09	1,23E-09	1,03E-09	1,00E-09	5,13E-11	1,16E-11

Для установления функциональной связи между угловым распределением яркости и оптическими параметрами был применен регрессионный анализ, который широко используется для восстановления характеристик аэрозоля и облачности, а также для оценки их влияния на климат [5].

Уравнение регрессии для углового распределения яркости в аэрозольно-молекулярной и облачной атмосфере относительно длины волны падающего излучения было получено в виде  $y = \frac{b_1}{x} + b_0$  для всех углов приема. Регрессионные коэффициенты для безоблачной атмосферы приведены в таблице 2. Регрессионные коэффициенты для облачной атмосферы приведены в таблице 3. В таблицах приведены также коэффициенты детерминации.

Таблица 2

**Коэффициенты уравнения регрессии для безоблачной атмосферы**

Углы приема, град	Коэффициент $b_0$	Коэффициент $b_1$	Коэффициент детерминации, $R^2$
4,5	1,19595E-05	3,25534E-05	0,993636438
13,5	2,31401E-07	5,05694E-07	0,976885608
22,5	6,98539E-08	1,19799E-07	0,927503534
31,5	3,92659E-08	4,04551E-08	0,784773208
40,5	2,4403E-08	1,51266E-08	0,570060008
49,5	1,39106E-08	6,51344E-09*	0,482543448
58,5	6,82884E-09	3,64745E-09	0,609744683
67,5	2,74359E-09	2,35355E-09	0,771155104
76,5	5,21933E-10	1,23544E-09	0,907220265
85,5	3,00774E-11	1,7624E-10	0,929769833

**Коэффициенты уравнения регрессии для облачной атмосферы**

Углы приема, град	Коэффициент $b_0$	Коэффициент $b_1$	Коэффициент детерминации, $R^2$
4,5	3,52884E-06	7,12796E-06	0,98542826
13,5	1,08652E-07	3,63939E-07	0,997272
22,5	3,63765E-08	7,53979E-08	0,973075322
31,5	1,26022E-08	2,66418E-08	0,976384876
58,5	3,68558E-09*	4,34001E-09	0,598507887
76,5	-3,34288E-08*	5,0401E-09	0,606097561
85,5	-2,37483E-09*	4,50822E-09	0,809969895

Примечание. \* - незначимый коэффициент

Статистическая оценка полученных уравнений регрессии на значимость была проведена на основе  $F$ -критерия и оценки коэффициента детерминации. С уверенностью 90% можно утверждать, что рассмотренные зависимости являются статистически значимыми.

В целом, проведенный анализ показывает, что между полученными угловыми распределениями интенсивности и длиной волны, как для безоблачной, так и для облачной атмосферы, существует связь, которую можно с хорошей степенью точности описать гиперболическим уравнением регрессии.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Gendrina I.Yu., Kvach A.S. // The Monte Carlo method for determining the vision system characteristics.// J. of International Scientific Publication: Education Alternatives. Volume 11, Part 1. ISSN 1313-2571. – Bulgaria, p.236 – 244.
2. Зуев В.Е., Белов В. В., Веретенников В. В. Теория систем в оптике дисперсных сред. – Томск: Издательство СО РАН, 1997. – 402 с.
3. Под ред. Марчука Г.И.Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. – Новосибирск: Наука, 1976. – 100 с.
4. M. M. Khayer et al. //Evaluation of a 5-Year Cloud and Radiative Property Dataset Derived from GOES-8 Data Over the Southern Great Plains. // Twelfth ARM Science Team Meeting Proceedings. - St. Peterburg, Florida, April 8-12, 2002, p. 1-14.