

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, 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 σ_{sc} – коэффициент рассеяния, σ_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 $\vec{\omega}$, λ – 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 Ω_i . Φ - 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 · м² · 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.