

Б.А. Каргин, А.Е. Лаврентьев, С.М. Пригарин

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск*

Поступила в редакцию 30.12.98 г.

Принята к печати 4.01.99 г.

Представлена система автоматизации статистического моделирования радиационного поля атмосферы «Фотон». Приводятся схема функционального построения системы, перечень задач системы, схема функционального построения и состав базы данных. В качестве примера использования системы рассматривается задача переноса изображения в системе «атмосфера–подстилающая поверхность». Представлены два алгоритма оценки оптической передаточной функции системы и приведены результаты расчетов. В расчетах использованы горизонтально-однородные и горизонтально-неоднородные модели стохастической атмосферы, построенные на потоках Пальма. Полученные значения оптической передаточной функции использовались для коррекции модельных «космических фотографий» тест-объектов.

### 1. Введение

В связи с решением задач дистанционного оптического мониторинга природной среды из космоса важную роль приобретают исследования закономерностей переноса излучения в природных рассеивающих средах. В силу многообразия научных и прикладных задач подобного типа нами начата разработка системы автоматизации численных экспериментов, проводимых методами статистического моделирования при исследовании закономерностей формирования радиационного поля в системах «аэрозольная и облачная атмосфера – подстилающая поверхность» и «океан – атмосфера». Алгоритмической основой системы автоматизации является комплекс алгоритмов и программ, созданный в отделе статистического моделирования в физике ИВМиМГ СО РАН (до 1997 г. – ВЦ СО РАН). Специфическими особенностями, обуславливающими трудность решения указанных задач, являются:

– Наличие большого количества факторов, участвующих в формировании радиационного поля.

– Сложные граничные условия. Особенно это относится к задачам, в которых необходимо учитывать пространственную неоднородность альбедо и рельефа земной поверхности, а также стохастическую структуру облачности и ветрового волнения морской поверхности.

– Случайный характер пространственно-временных вариаций большинства оптически активных компонентов атмосферы.

Современный уровень развития методов статистического моделирования позволяет ставить и успешно решать задачи теории переноса излучения в атмосфере и в системе «океан–атмосфера» в следующей общей трактовке. Заданы характеристики детерминированной или случайной функции (модель источников излучения), поступающей на вход системы с заданными параметрами, которые также могут быть детерминированными или случайными функциями (оптическая и геометрическая модель среды), а требуется определить характеристики случайных функций на выходе системы (искомые характеристики радиационного поля).

Под системой здесь понимается расчетная модель, разработанная на основе теоретических и численных исследований процессов переноса оптического излучения в дисперсных средах. Этапы разработки расчетной модели замыкаются в итерационный цикл, отражаемый схемой процесса управления научным экспериментом. Этот подход положен в основу представляемой в работе автоматизированной системы моделирования и исследования процесса переноса излучения в стохастических рассеивающих средах. Ключевыми особенностями системы являются:

– Оригинальное алгоритмическое содержание, охватывающее широкий спектр задач оптики атмосферы.

– Использование реляционной базы данных для хранения параметров и результатов численных и физических экспериментов.

– Графический диалоговый интерфейс пользователя, организованный с использованием многоуровневых меню и всплывающих окон.

– Открытая модульная архитектура, обеспечивающая возможность пользовательского расширения классов решаемых задач.

На данном этапе система предназначена для решения следующих задач:

– Оценка поля яркости и расчет оптической передаточной функции (ОПФ) в системах «атмосфера – подстилающая поверхность», «океан – атмосфера».

– Моделирование изображения подстилающей поверхности.

– Фильтрация искажений изображений, обусловленных рассеиванием электромагнитного излучения.

– Смежные задачи – моделирование случайных полей (рельеф земной поверхности, поверхность океана, облака), быстрое преобразование Фурье.

Система автоматизирует следующие функции: подготовка и проведение численного эксперимента методом Монте-Карло, хранение и просмотр данных, статистический анализ данных, оценка эффективности алгоритмов, получение различных отчетов, таблиц и графиков.

В настоящее время макет системы реализован для системы WINDOWS 95/NT в среде Delphi с использовани-

ем баз данных в формате Paradox. В дальнейшем планируется использование сетевой СУБД класса Oracle.

## 2. Схема функционального построения

На рис. 1 приведена схема функционального построения системы «Фотон». Система подразделяется на следующие подсистемы: ядро, база данных, сервис конечного пользователя, подсистема выполнения запросов к базе данных, подсистема описания алгоритмов и создания приложений, библиотеки шаблонов алгоритмов, функций, типов, подсистема накопленных данных, подсистема сопровождения информации.



Рис. 1. Функциональная схема системы

### 2.1. Ядро

Главная функция ядра состоит в приеме сообщений, их регистрации и передаче на обработку соответствующей подсистеме. Прием сообщений ведется в режиме реального времени, что позволяет параллельную и независимую работу многих пользователей в режиме ввода, корректировки, расчета и выдачи информации. Ядро обслуживает кэш системы, под которым понимается резервируемая системой оперативная память для хранения некоторой выборки из базы данных.

### 2.2. База данных

База данных в автоматизированной системе является одной из основных структурных компонент и предназначена для информационного обеспечения задач, решаемых в условиях коллективного пользования хранимой информацией. Основным характерным свойством базы данных является ее независимость от рабочих программ, с которыми она взаимодействует. В настоящее время в системе используется реляционная база данных с прямым доступом с таблицами в формате Paradox. Данные в системе подразделяются на следующие категории: первичные справочники, модели, дополнительные справочники, журнал расчетов, данные физических измерений, результатов расчетов.

#### 2.2.1. Справочники

Справочники содержат вспомогательную информацию и необходимы для обеспечения обработки информации (контроль, алгоритмы и параметры расчетов) и получения отсчетов (расшифровка, связь, настройка). Также справочники могут активно использоваться для облегче-

ния ввода данных и поэтому наделены функциями поиска информации. Первичные справочники отражают алгоритмы, реализованные в системе, и служат для облегчения ввода данных. Первичные справочники не могут быть изменены пользователем системы. Модели формируются на основе первичных справочников и параметров модели. Количество моделей и их структура программно не ограничены и могут быть изменены пользователем системы, если эти изменения не противоречат правилам работы с информацией в системе для данного пользователя.

### Примеры первичных справочников

- Список задач системы.
- Список оценок.
- Список индикатрис рассеяния.
- Список математических моделей разорванной облачности.
- Список математических моделей взволнованной поверхности.
- Список корреляционных функций.
- Список методов моделирования длины свободного пробега.
- Список функций распределения альbedo подстилающей поверхности.

### Примеры моделей

- Модели стохастической рассеивающей среды.
- Модели подстилающей поверхности.
- Геометрические схемы расчета.
- Алгоритмические схемы расчета.
- Модели данных.

### Дополнительные справочники

- Список пользователей системы.
- Права доступа пользователей к информации.
- Математическое описание алгоритмов.

### 2.2.2. Документы и данные

Под документом понимается список параметров, определяющих численный эксперимент. Данные – это результаты численного эксперимента или результата физических измерений, помещенные в базу данных. Документы и данные являются основой информации, обрабатываемой в системе. Доступ к ним, ввод новых документов и корректировка существующих данных осуществляются через различные экранные формы документов. Принципиальное отличие данных от справочников состоит в том, что именно данные составляют основное содержание обрабатываемой информации.

### 2.3. Подсистема сервиса пользователя

Подсистема сервиса пользователя – это интерфейс пользователя для доступа к базе данных и алгоритмическому содержанию системы. Подсистема предоставляет возможность выборки из базы данных отдельных и сводных результатов численных расчетов и данных физических экспериментов. Данные могут быть представлены в табличном и графическом виде на экране дисплея, могут быть напечатаны на принтере или сохранены отдельно в текстовом или графическом формате. Интерфейс пользователя имеет две формы: интерфейс в виде HTML документа,

предназначенный прежде всего для просмотра динамически формируемых сечений базы данных результатов расчетов; интерфейс в виде экранных форм программы клиента, предназначенной для работы с системой в локальной сети.

Интерфейс пользователя локальной сети обеспечивает следующие возможности: просмотр результатов численных экспериментов в табличном и графическом виде, планирование и проведение нового эксперимента или уточнение уже проведенного эксперимента, формирование отчетов статистического анализа по поднаборам параметров моделей, формирование личного профиля интересов.

Под профилем интересов пользователя понимается некоторое подмножество из общего состава информации, тематически обособленное и определяемое самим пользователем. На рис. 2 приведен пример экранной формы, демонстрирующий выбор из всплывающего меню значений параметра численного эксперимента.

#### 2.4. Подсистема выполнения запросов к базе данных

Подсистема выполнения запросов к базе данных является интерфейсом логического представления данных внутри системы. Подсистема является программной моделью процессора, призванного исполнять подаваемую ему на вход последовательность команд с получением результата в виде таблиц данных. Фактическая информация,

требуемая для проведения вычислений, выбирается из базы данных в момент процессирования.

#### 2.5. Подсистема описания алгоритмов и создания приложений

Подсистема описания алгоритмов и создания приложений обеспечивает достаточно быструю разработку новых приложений. Под приложением понимается информационно-независимая область численных исследований, обладающая своим набором входных данных и параметров и своим набором объектов исследования (моделей), поведение которых характеризуются этими данными. Описание алгоритмов и моделей, составляющих основу приложения, производится с помощью языковых средств, приближенных к математическому языку.

#### 2.6. Подсистема накопления данных и подсистема сопровождения данных

Подсистемы накопления и сопровождения данных предназначены для обслуживания и администрирования базы данных и обеспечивают следующие возможности: импорт данных физических измерений из внешних баз данных, ввод данных с экрана дисплея, корректировку данных, получение протоколов логических ошибок, накопление статистики.

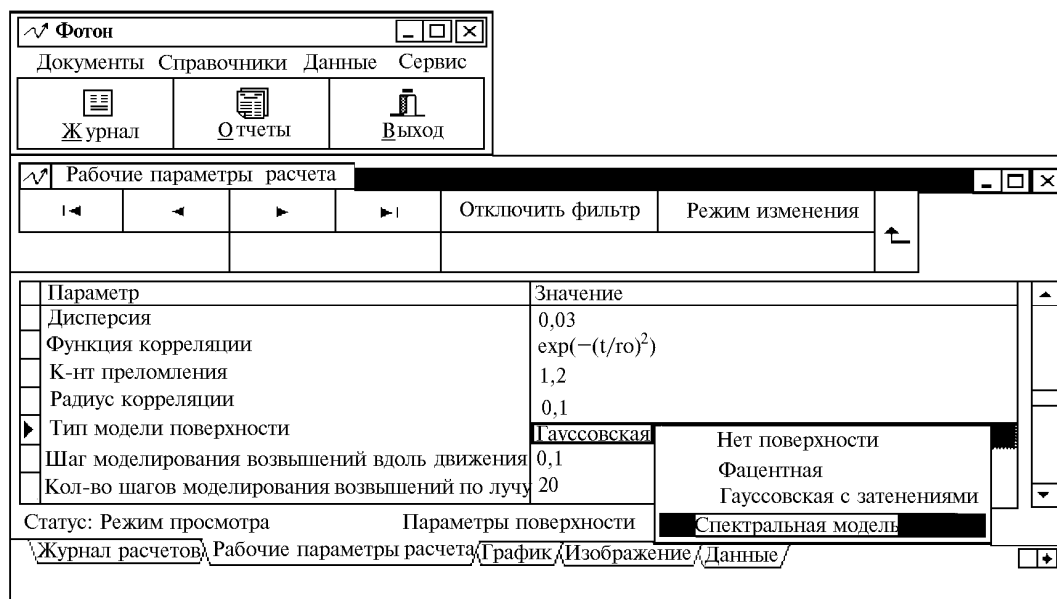


Рис. 2. Пример экранной формы

### 3. Доступ к информации

В соответствии с задачами, выполняемыми в системе различными пользователями, необходимо четко определить, какая информация доступна различным пользователям. При этом доступ пользователей к информации имеет несколько уровней (прав доступа): нет доступа к информации, есть возможность просмотра информации, есть права на корректировку информации.

При необходимости права на корректировку информации могут быть разделены на несколько отдельных прав: создание, ввод новой информации, изменение существующей информации, удаление существующей информации.

### 4. Отчеты и выборка данных

Отчетные формы в отличие от данных строятся на основе выборки и сопоставления всевозможных первичных данных, т.е. они являются выходными документами системы. Основное требование, которому должны удовлетворять отчеты в системе, – это наличие параметров настройки отчетов и возможность создания новых отчетных форм со своими программами формирования. В настоящее время можно условно разделить отчетные документы на две группы:

1. Отчеты, отражающие анализ ряда численных экспериментов (например, сравнение эффективности алгоритмов, оценки функций корреляции).

2. Отчеты, отражающие результаты конкретных численных экспериментов (например, график ЧКХ).

Основное отличие этих групп отчетов заключается в том, что при получении отчетов первой группы могут изменяться состояние и содержимое данных, а при получении отчетов второй группы состояние и содержимое данных не изменяются. Отчеты первой группы являются продолжением численного эксперимента, а отчеты второй группы отражают текущее состояние данных.

### 5. Варианты эксплуатации системы

Наибольший эффект от эксплуатации автоматизированных систем достигается при обработке данных в локальной сети компьютеров различными пользователями с различным набором возможностей и прав доступа к информации. В настоящее время система «Фотон» реализована в локальном варианте, который автоматизирует: подготовку и проведение численного эксперимента; хранение и просмотр данных; статистический анализ данных; получение различных отчетов, таблиц и графиков.

В стадии проектирования находится сетевой вариант системы, который призван дополнительно автоматизировать следующие функции:

- связь с другими программами, в частности подключение выполняемых модулей, использование программы в качестве сервера и клиента технологии ActiveX;
- генерация независимых программ;
- предоставление Intranet интерфейса, генерация отчетов в виде HTML документов;
- пользовательское расширение типов базы данных и типов алгоритмов;
- обеспечение распределенных вычислений в локальной сети.

### 6. Задача переноса изображения

В качестве примера использования системы «Фотон» рассматривается задача моделирования изображения и оценки оптической передаточной функции в системе «атмосфера – подстилающая поверхность». Представлены два алгоритма оценки оптической передаточной функции системы и приведены результаты расчетов. Исследование влияния светорассеяния на качество передачи изображения в работе основано на принципах теории линейных систем [1]. Основное уравнение формирования изображения линейной изопланатической системой имеет вид

$$I(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\rho') G(\rho - \rho') d\rho' = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\rho - \rho') G(\rho') d\rho, \quad (1)$$

где  $\rho = (x, y)$ ,  $\rho' = (x', y')$  – точки плоскости приемника и изображения соответственно;  $I(\rho)$ ,  $I_0(\rho)$  – яркость в точке  $\rho$  плоскости приемника и изображения;  $G(\rho)$  – функция Грина или функция размытия точки. После преобразования Фурье уравнения свертки (1) получим уравнение, записанное в плоскости пространственных частот:

$$\hat{I}(\rho) = \hat{I}_0(\rho) \hat{G}(\rho), \quad (2)$$

где « $\hat{\phantom{x}}$ » обозначает преобразования Фурье. Функция  $\hat{G}(\rho)$  называется оптической передаточной функцией (ОПФ) системы и далее обозначается  $T(\rho)$ . Таким образом, ОПФ

является оптимальным фильтром искажений пространственной структуры яркости изображения для линейных изопланатических систем.

Для большинства практических задач, связанных с наблюдением земной поверхности через атмосферу, качество передачи изображения достаточно характеризовать частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), которая определяется выражением

$$T_a(\rho) = |T(\rho)| = \sqrt{(\text{Im } T)^2 + (\text{Re } T)^2}. \quad (3)$$

Далее предполагается, что подстилающая поверхность (плоскость изображения) излучает радиацию по закону Ламберта. В этом случае  $G(\rho)$  имеет смысл относительного распределения яркости в плоскости изображения в направлении визирования точечного диффузного источника «единичной мощности», находящегося в плоскости изображения, и является решением стохастического уравнения переноса с соответствующими краевыми условиями [2].

### 7. Постановка задачи, геометрическая схема, обозначения

Плоский горизонтальный слой рассеивающего вещества освещается параллельным потоком солнечной радиации «единичной мощности» (рис. 3). Взаимодействие света с веществом определяется заданием случайного поля коэффициентов ослабления и индикатрисы рассеяния. От подстилающей поверхности свет отражается по закону Ламберта (диффузно). Положение частицы (кванта света) в фазовом пространстве характеризуется радиусом-вектором  $r = (x, y, z)$  и единичным вектором направления движения  $w = (a, b, c)$ . Задача состоит в установлении связи между альбедо поверхности и яркостью светового поля, регистрируемого на некоторой высоте над поверхностью.

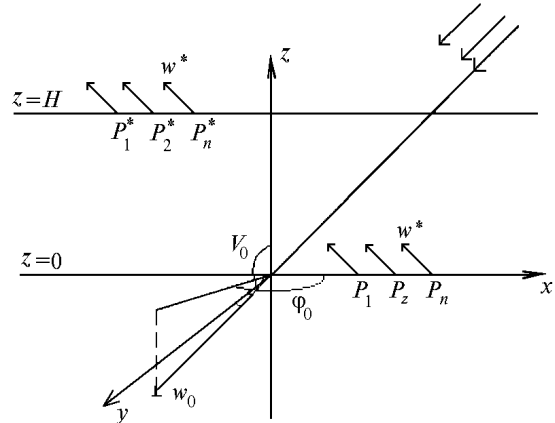


Рис. 3. Геометрическая схема задачи

Далее используются следующие обозначения:  $n = (0, 0, 1)$  – вектор нормали к поверхности  $z = \text{const}$ ;  $P_1^*$ ,  $P_2^*$ , ...,  $P_n^*$  – точки визирования;  $\sigma(r)$ ,  $\sigma_a(r)$  – сечения рассеяния и поглощения;  $\Sigma(r) = \sigma(r) + \sigma_a(r)$  – полное сечение ослабления;  $q(r) = \sigma_a(r)/\Sigma(r)$  – вероятность поглощения;  $\Phi(r, w)$  – плотность потока частиц;  $f(r, w) = \Sigma(r)\Phi(r, w)$  – плотность столкновений;  $\tau(r', r) = \int_0^l \Sigma(r' + ws) ds$  – оптическая длина пути между точками  $r'$  и  $r$ ;  $l = |r - r'|$ ;

$f_i(s) = \Sigma(r(s)) \exp[-\tau(r', r(s))]$ ,  $r(s) = r' + ws$  – плотность распределения длины свободного пробега;  $\mu = (\omega', \omega)$  – косинус угла между направлениями движения до и после рассеяния;  $g(r, \mu)$  – плотность распределения косинуса рассеяния в точке  $r$  (индикатриса рассеяния) с нормировкой  $\int_{-1}^{+1} g(r, \mu) d\mu = 1$ ;

$R(r_{\perp}, w, w')$  – коэффициент яркости, характеризующий отражательные свойства земной поверхности;  $A(r_{\perp})$  – альbedo поверхности в точке  $r_{\perp}$ ;  $I(r, w)$  – спектральная яркость (интенсивность) излучения;

$E(r, n) = \int_{(w,n)<0} |(n,w)| I(r, w) dw$  – монохроматическая освещенность единичной площадки в точке  $r$  и нормалью  $n$ ;

$I(P^*, w^*) = \{I(P_1^*, w^*), I(P_2^*, w^*), \dots, I(P_n^*, w^*)\}$  – космическая и

$I(P, w^*) = \{I(P_1, w^*), I(P_2, w^*), \dots, I(P_n, w^*)\}$  – приземная фотографии.

## 8. Модель стохастической среды

Рассмотрим модели облачности, в которых случайным является только индикаторное поле облачного вещества  $\zeta(r)$ . Внутри и вне облака параметры рассеяния постоянны. Индексом 1 обозначены параметры рассеяния атмосферы, индексом 2 – параметры рассеяния облака:

$$\zeta(r) = \begin{cases} (0,1), & r \in G, \\ (1,0), & r \notin G, \end{cases}$$

где  $G$  – случайное множество точек в слое  $\{0 < z < H\}$ . Тогда  $\Sigma(r) = (\Sigma_1, \Sigma_2)\zeta(r)$  – коэффициент ослабления среды;  $g(\mu, r) = (g_1(\mu), g_2(\mu))\zeta(r)$  – индикатриса рассеяния среды. Здесь  $\Sigma_1$  – коэффициент ослабления атмосферы,  $\Sigma_2$  – коэффициент ослабления облака,  $g_{1,2}(\mu)$  – индикатрисы рассеяния атмосферы и облака соответственно. Статистика оптических параметров полностью определяется статистическими характеристиками индикаторного поля  $\zeta(r)$ .

## 9. Построение индикаторного поля

### 9.1. Одномерная модель

Вдоль оси  $z$  при  $0 < z < H$  строится поток Пальма  $z_k = z_{k-1} + \eta_k$ ,  $z_0 = 0$ .  $\{\eta_k\}$  – независимые в совокупности случайные величины, распределенные по закону Пуассона с плотностью  $f_{\eta}(t) = \lambda \exp\{-\lambda t\}$ . Получается разбиение слоя  $\{0 \leq z \leq H\}$  на  $m$  случайных слоев  $\tau_i \leq z \leq \tau_{i+1}$ ,  $\tau_0 = 0$ ,  $\tau_m = H$ . В каждом слое выбирается значение индикаторного поля  $\zeta_i$ :

$$\zeta_i = \begin{cases} (0,1)^T, & \text{с вероятностью } p, \\ (1,0)^T, & \text{с вероятностью } 1-p. \end{cases}$$

Нормированная корреляционная функция для такого поля равна  $\exp(-\lambda z)$  [2], а следовательно, корреляционная длина –  $1/\lambda$ .

### 9.2. Трехмерная модель

Вдоль каждой оси в пределах параллелепипеда  $\{0 < x < H_x, 0 < y < H_y, 0 < z < H\}$  независимо строятся указанные потоки точек:

по  $x$   $\tau_i, i = 0, 1, \dots, m_x$  слоев;

по  $y$   $t_j, j = 0, 1, \dots, m_y$  слоев;

по  $z$   $l_k, k = 0, 1, \dots, m_z$  слоев.

В каждом из  $m_x, m_y, m_z$  параллелепипедов выбирается значение индикаторного поля  $\zeta_{ijk}$ :

$$\zeta_{ijk} = \begin{cases} (0,1)^T, & \text{с вероятностью } p, \\ (1,0)^T, & \text{с вероятностью } 1-p. \end{cases}$$

Случайное поле статистически однородно, изотропно с нормированной корреляционной функцией  $\exp(-\lambda_z z - \lambda_x x - \lambda_y y)$ , где  $\lambda_z, \lambda_x, \lambda_y$  – параметры потоков вдоль координатных осей. Отдельные облака имеют форму параллелепипедов с экспоненциальной функцией распределения по размерам вдоль каждой из координатных осей.

## 10. Комплексное уравнение для ОПФ

Точное перенесение принципов линейных систем на системы формирования изображения в неоднородной среде, ограниченной подстилающей поверхностью, неправомерно. Нелинейность обусловлена многократным переотражением излучением между средой и подстилающей поверхностью. Принцип изопланатичности нарушается для каждой реализации горизонтально неоднородной среды. Если случайное поле коэффициентов ослабления однородно, то система в среднем изопланатична, иначе систему можно считать инвариантной к сдвигу только в пределах локальных зон однородности [3].

В работе [4] на основе представления альbedo поверхности в виде  $A(r_{\perp}, z, w) = \bar{A} + \tilde{A}(r_{\perp})$  получено соотношение  $I(r_{\perp}, z, w) = \bar{I}(z, w) + \tilde{I}(r_{\perp}, z, w)$ , где  $\bar{I}(z, w)$  – яркость системы с альbedo  $\bar{A}$ ;  $\tilde{I}(r_{\perp}, z, w)$  – горизонтально-неоднородная составляющая яркости в пренебрежении многократного переотражения. В этом случае связь альbedo с  $\tilde{I}(r_{\perp}, z, w)$  выражается соотношением

$$\hat{\tilde{I}}(z, p, w) = E T(z, p, w) \hat{A}(p), \quad (4)$$

где  $E$  – средняя освещенность поверхности; « $\hat{\phantom{x}}$ » – преобразование Фурье;  $T(z, p, w)$  – ОПФ атмосферы, удовлетворяющая комплексному «уравнению переноса»:

$$\mu \frac{T(z, p, w)}{z} + \hat{\Sigma}(z) T(z, p, w) = \sigma(p) \int_{\Omega} T(z, p, w) g[z, (w' w)] dw' \quad (5)$$

с краевыми условиями

$$T(z, p, w) \Big|_{z=H, w \in \Omega} = 0, \quad T(z, p, w) \Big|_{z=0, w \in \Omega} =$$

$$= \frac{\bar{A}}{\pi} \int_{\Omega} T(0, p, w) |(n, w')| dw' + 1.$$

Здесь  $\hat{\Sigma} = \Sigma(z) - i(p, w_{\perp})$ ,  $w_{\perp} = (\sqrt{1-\mu^2} \cos \varphi, \sqrt{1-\mu^2} \sin \varphi)$ ,  $p = (p_x, p_y)$  – вектор пространственных частот.

Далее представлены два алгоритма метода Монте-Карло. Первый предназначен для оценки пространственного распределения интенсивности излучения, выходящего из атмосферы, и использовался для моделирования косми-

ческой фотографии. Алгоритм заключается в оценке решений краевой задачи теории переноса для различных краевых условий методом сопряженных блужданий и коррелированной выборки. Оценка ЧКХ с помощью указанного алгоритма основана на физической интерпретации ее значений как отношения глубины модуляции в изображении синусоидального тест-объекта к глубине модуляции его приземного контраста. Второй алгоритм основан на интерпретации комплексного «уравнения переноса» (5) как краевой задачи теории переноса в среде с комплексным коэффициентом ослабления и однородным изотропным источником «единичной мощности» в плоскости  $z = 0$ .

### 11. Алгоритм 1: моделирование «космической фотографии» и оценка ЧКХ с помощью решения уравнения переноса для специальных краевых условий

Рассмотрим произвольную траекторию  $\{(r_0, w^*, W_0), (r_1, w_1, W_1), \dots, (r_N, w_N, W_N)\}$ , где  $r_i(x_i, y_i, z_i)$  – точка  $i$ -го столкновения, ( $r_0 = P^*$ );  $w_i$  – единичный вектор движения фотона после  $i$ -го столкновения;  $W_i$  – вес фотона после  $i$ -го столкновения ( $W_0 = 1$ ),  $r_N$  – точка  $N$ -го столкновения, предшествующего вылету.

Для оценки используется один набор траекторий, соответствующий  $P_1^*$ . Для произвольной точки  $P_1^*$  обозначим  $I_i = \tilde{I}_i = \tilde{I}(P_1^*, w^*)$  в системе с характеристиками  $\tilde{A}, \tilde{\Sigma}, \tilde{q}, \tilde{g}$ , полученной из исходной системы сдвигом на вектор  $P_1^* - P_1^*$ . Далее  $\tilde{P} = P - P_1^* + P_1^*$ .

Траектории частиц строятся по стандартной схеме [2] и в соответствии с принципом весового метода зависимых испытаний для получения несмещенной оценки яркости  $I_i = \tilde{I}_i$  вес фотона необходимо умножить на соответствующие весовые множители:  $q(\tilde{r})$  – после столкновения в среде,  $A(\tilde{r}_\perp)$  – после отражения от плоскости  $z = 0$ :

$$\frac{\Sigma(\tilde{r}_{i+1})}{\Sigma(r_{i+1})} \exp \left\{ - \int_0^l [\Sigma(\tilde{r}_i + tw_i) - \Sigma(r_i + tw_i)] dt \right\}$$

– после перехода  $r_i \rightarrow r_{i+1} = (r_{\perp, i+1}, z > 0)$ ,

$$\exp \left\{ - \int_0^{|r_{i+1}-r_i|} [\Sigma(\tilde{r}_i + tw_i) - \Sigma(r_i + tw_i)] dt \right\}$$

– после перехода  $r_i \rightarrow r_{i+1} = (r_{\perp, i+1}, z = 0)$ ,

$$\frac{g[\tilde{r}_i, (w_{i-1}, w_i)]}{g[r_i, (w_{i-1}, w_i)]}$$

– после моделирования угла рассеяния при столкновении в точке  $r_i$ .

Случайная величина, определяющая величину вклада траектории в искомое значение яркости, определяется выражением  $M\xi = I(P^*, w^*)$ ,

$$\xi = \sum_{i=1}^N \frac{e^{-\tilde{\tau}_i} \tilde{\varphi}_i \tilde{W}_i}{2\pi},$$

где

$$\tilde{\tau}_i = \int_0^{(H-z_i)/(-w_0, n)} \Sigma(\tilde{r} - tw_0) dw;$$

$$\tilde{\varphi}_i = \begin{cases} g[\tilde{r}_i, (w_{i-1}, -w_0)], & \text{если } r = (r_\perp, z > 0), \\ 2A(\tilde{r}_\perp), & \text{если } r = (r_\perp, z = 0). \end{cases}$$

Этот алгоритм может быть использован для моделирования «космической фотографии» и оценки ЧКХ по одним и тем же траекториям. Для оценки ЧКХ представим функцию  $A(r_\perp)$  в виде  $A(r_\perp) = \bar{A} + \tilde{A} \cos(2\pi p r_\perp)$ , тогда  $I(r_\perp, z, w) = \bar{I}(z, w) + \tilde{I}(r_\perp, z, w)$  – яркость излучения на уровне  $z$ . Далее  $w^* = (0, 0, 1)$ , тогда  $T(z, p, w) = |T(z, p, w)| = \sqrt{(\text{Im}T)^2 + (\text{Re}T)^2}$ . ОПФ можно представить в виде  $T(z, p, w) = e^{-\tau(z)} + T(z, p, w)$ , где  $T(z, p, w)$  – ОПФ рассеянного излучения, тогда  $\tilde{I}(r_\perp, z, w) = E\bar{A} [e^{-\tau(z)} + T(z, p, w) \cos(2\pi p r_\perp)]$ . Случайная оценка  $\xi$  искомого значения  $T(z, p, w)$  на данной траектории определяется выражением  $M\xi(z, p, w) = T(z, p, w)$ :

$$\xi(z, p, w) = \frac{\xi(z, p, w) - \bar{\xi}(z, p, w)}{\tilde{A} \xi_E},$$

где  $\bar{\xi}, \bar{\xi}$  – оценки яркости в точке  $P^* = [r^* = (0, 0, H); w^* = (0, 0, 1)]$  для альбедо  $A(r_\perp, w) = \bar{A} + \tilde{A} \cos(2\pi p r_\perp)$  и  $\bar{A}$  соответственно;  $\xi_E = \sum_{j=1}^M W'_j$  – оценка средней освещенности подстилающей поверхности;  $M$  – количество отражений от плоскости  $z = 0$ ;  $W'_j$  – вес частицы при  $j$ -м отражении  $M\xi(z, p, w) = T(z, p, w)$ .

Алгоритм позволяет по одному и тому же набору траекторий оценивать значения  $T(z, p, w)$  для произвольного количества параметров  $p$ , а также значения  $\bar{I}(z, w)$  и  $E$ .

### 12. Алгоритм 2: оценка ЧКХ с помощью решения комплексного уравнения переноса

Рассмотрим произвольную траекторию  $\{(z_0, w_0, W_0), (z_1, w_1, W_1), \dots, (z_N, w_N, W_N)\}$ .  $Z_i (i = 0 \dots N)$  – вертикальная координата точки  $i$ -го столкновения частицы, имеющей направление  $w_i$ , ( $z_0 = 0$ ),  $N$  – номер столкновения, предшествующий вылету.  $F_{w_0}(w) = (w, n)\pi$  – плотность распределения  $w_0, n = (0, 0, 1)$ .

В силу того что коэффициент ослабления комплексный, длину свободного пробега  $l$  «частицы», имеющей направление  $w_i$  после столкновения в точке  $z_i$ , целесообразно выбирать соответственно плотности

$$f(l) = \sigma [z_i + (w_i, n) l] \exp \left\{ - \int_0^l \sigma [z_i + (w_i, n) t] dt \right\}.$$

Масса при этом пересчитывается по формуле

$$W_{i+1} = W_i \exp \left\{ - \int_0^l \sigma_c [z_i + (w_i, n) t] dt \right\},$$

$$\sigma_c = \Sigma(z) - \sigma(z) - i(p, w_{\perp}).$$

Случайная оценка  $\xi$  искомого значения  $T(z, p, w)$  на данной траектории определяется выражением:

$$M \xi(z, p, w) = T(z, p, w),$$

$$\xi(z, p, w) = \sum_{i=0}^N \frac{1}{|(w_i, n)|} w_i \varphi_i \exp \left[ -\frac{1}{(w, n)} \int_{z_1}^z \hat{\Sigma}(t, p, w_i) dt \right] \Delta(z_i),$$

где

$$\varphi_i = \begin{cases} \frac{g[z_i, (w_i, w)]}{2\pi}, & 0 < z_i < H \\ \frac{A}{\pi} |(w_i, n)|, & z_i = 0 \end{cases}, \Delta(z_i) = \begin{cases} 1, & z_i < z, w \in \Omega_+, \\ z_i > z, w \in \Omega_-, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Алгоритм позволяет по одному и тому же набору траекторий оценивать значения  $T(z, p, w)$  для произвольного количества параметров  $p$  и произвольного набора значений  $z$  и  $w$ .

### 13. Численный эксперимент

Далее приведены некоторые результаты расчетов средних значений ЧКХ системы «атмосфера – подстилающая поверхность», а также модельные «космические фотографии» подстилающей поверхности и их отфильтрованные изображения (рис. 4). Для индикаторного поля облачного вещества использовались одномерная и трехмерная модели. Первая соответствует одномерной стохастической среде и моделируется на основе вертикального точечного потока интенсивности  $\lambda$ , между точками которого значения поля полагаются постоянными. Переход к трехмерной модели осуществляется путем аналогичной рандомизации плотности в горизонтальных слоях вертикального разбиения.

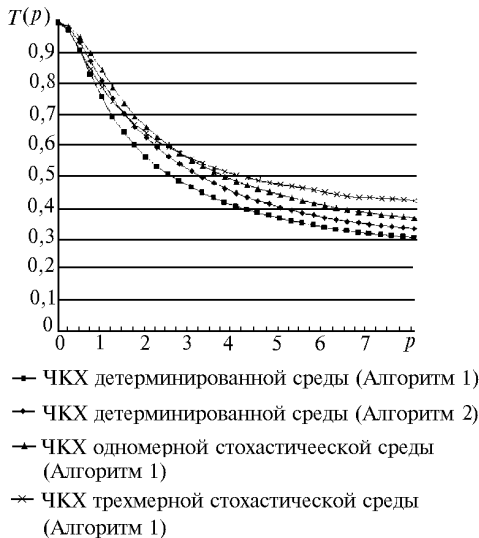


Рис. 4. ЧКХ стохастических рассеивающих сред

Атмосфера освещается вертикальным параллельным потоком единичной мощности. Наблюдение ведется в надир. Средняя оптическая толщина системы 1. При столкновении в слое  $0 < z < H$  частица рассеивается с вероятностью 1 по закону Рэлея, отражение от плоскости  $z = 0$  про-

исходит по закону Ламберта. Сечение ослабления совпадает с сечением рассеяния. Траектории моделируются в однородной среде с  $\Sigma(r) = \sigma = 1$ . Смещение оценки компенсируется соответствующими весовыми множителями. Статистическая погрешность расчетов не превышает 5%.

Для детерминированной среды расчеты проводились методом краевых условий (алгоритм 1) с учетом многократного переотражения от подстилающей поверхности и с помощью алгоритма решения комплексного «уравнения переноса» (алгоритм 2) с учетом переотражения от однородной составляющей альбедо. Результаты расчетов показывают, что для сред с достаточно изотропным рассеянием и оптической толщиной 1 многократное переотражение на 5–10% снижает значения нормированной ЧКХ.

Для стохастических моделей расчеты проводились методом специальных краевых условий с учетом многократного переотражения от подстилающей поверхности (алгоритм 1). Интенсивность потока точек при построении вертикального и горизонтального разбиения рассеивающего слоя  $\lambda = 1$ , безусловная вероятность наличия облака  $p = 0,5$ , сечение рассеяния облака  $\Sigma_1 = 1,4$ , сечение рассеяния атмосферы  $\Sigma_2 = 0,6$ . Результаты расчетов показывают, что при переходе от детерминированной модели к стохастической одномерной и затем к стохастической трехмерной значения нормированной ЧКХ в среднем увеличиваются.

Оценка «космической фотографии» проводилась методом краевых условий для детерминированной среды (рис. 5) и для стохастической одномерной среды (рис. 6). Фотографии представляют собой матрицы размером  $256 \times 256$  элементов. Значениями элементов матриц являются яркости в заданном направлении в соответствующих точках дискретизации «космической фотографии».

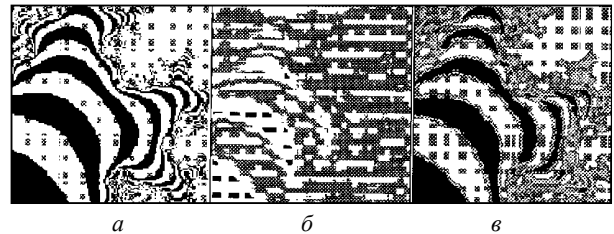


Рис. 5. Исходное изображение тест-объекта (множество Мандельбротта) (а), «космическая фотография» (б), отфильтрованное изображение (в). Детерминированная среда

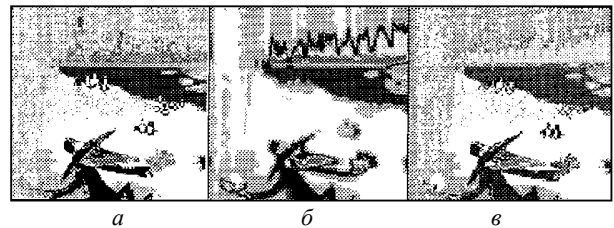


Рис. 6. Исходное изображение тест-объекта (а), «космическая фотография» (б), отфильтрованное изображение (в). Стохастическая одномерная среда

Фильтрация заключалась в двумерном преобразовании Фурье матрицы дискретизации, в умножении полученного Фурье-образа на функцию, обратную ЧКХ, и в обратном преобразовании Фурье. В результате фильтрации удовлетворительно восстанавливаются низкочастотные детали изображения и несколько хуже высокочастотные,

что связано с обрезанием спектра изображения при дискретизации функции распределения альбедо.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-01-00685).

1. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 495 с.

2. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с. [Engl. Transf. Springer-Verlag. 1980].

3. Валентюк А.Н., Предко К.Г. Оптическое изображение при дистанционном наблюдении. Минск: Наука и техника, 1991. 358 с.

4. Мишин И.В., Сушкевич Т.А. Математическая модель пространственно-частотной характеристики системы подстилающая поверхность-атмосфера. // Исследование Земли из космоса. 1980. N 4. С. 69-80.

*B.A. Kargin, A.E. Lavrentiev, S.M. Prigarin. Automatization System of Stochastic Modeling of Atmosphere Radiation Field.*

The first part of the paper presents a system of automatization of numerical experiments carried out by statistical methods of modeling when studying the optical radiation transfer in the stochastic scattering media. The functional scheme of the system and database are presented. The second part of paper provides the example of using the system. Two algorithms of the Monte Carlo method for estimating the optical transfer function (OTF) of the atmosphere-underlying surface system are presented. The obtained values of OTF were used for the correction of the simulated «space snapshots» of test objects.