

# Анализ точности компьютерного моделирования освещения сложных сцен

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Л.З. Шапиро

## Аннотация

В работе рассматриваются вопросы физически аккуратного компьютерного моделирования освещения сложных сцен и построения их фотореалистических изображений. Проведен анализ ошибок моделирования (ошибки «дискретизации» и «сходимости»). Основное внимание уделено ошибке «сходимости» как основной ошибке, определяющей качество изображения. Анализ оценок ошибки «сходимости» произведен для двух основных случаев моделирования: вычисления глобальной освещенности (яркости) сцены и вычисления распределения освещенности (яркости) приемника излучения. Приведены оценки прогнозирования времени вычислений, необходимого для достижения заданной точности моделирования, а также критерии, определяющие окончание процесса моделирования.

**Ключевые слова:** моделирование освещенности, реалистичные изображения, глобальная освещенность, оценка точности, метод Монте-Карло, погрешность вычислений.

## 1. Введение

Физически аккуратное компьютерное моделирование освещения находит широкое применение в архитектуре, индустрии дизайна, кинематографии, при проектировании светотехнических устройств, а также при построении фотореалистических изображений сцен виртуальной реальности. Результатом такого моделирования могут быть либо карты распределения световых характеристик (освещенности, яркости или интенсивности света) на объектах сцены или приемниках излучения, либо фотореалистическое изображение сцены.

Для обеспечения физической аккуратности методы моделирования распространения и взаимодействия света с объектами должны основываться на физических законах. Кроме того, необходимым условием физически аккуратного моделирования является возможность оценки точности результата моделирования.

Компьютерное моделирование распределения световых характеристик на объектах сцены направлено на решение уравнения рендеринга [1]. Одним из приближенных решений этого уравнения является метод геометрической трассировки лучей. Принимая во внимание обратимость хода луча, а именно, трасса луча в прямом направлении (от источника света к наблюдателю) совпадает с трассой луча в обратном направлении (от наблюдателя к источнику света), для расчета световых характеристик можно использовать как методы прямой, так и обратной трассировки лучей. Кроме того, методы прямой и обратной трассировки лучей могут использовать как детерминистические решения (методы переноса энергии [2, 3] или методы расчета видимой яркости [4]), так и статистические методы расчета (методы Монте-Карло [5]).

В задачах, связанных с построением фотореалистических изображений, эффективным является сочетание методов прямой трассировки лучей, рассчитывающих распределение глобальной (или вторичной) освещенности или яркости на объектах сцены, с методами обратной трассировки, суммирующих яркости объектов сцены с прямыми яркостями от источников света по трассе луча от наблюдателя в направлении сцены [6-8]. Для расчета глобальной освещенности (яркости) объектов сцены эффективным решением является метод Монте-Карло трассировки лучей. Идея прямой трассировки лучей методом Монте-Карло состоит в статистическом воспроизведении механизма распространения света путем моделирования всевозможных траекторий лучей от источников света до объектов сцены.

Траектории световых частиц (фотонов) прослеживаются на всех этапах их существования, от момента их генерации источниками света до поглощения или выхода из сцены. Начальные параметры луча (положение и направление) распределяются стохастическим образом в соответствии с угловой и пространственной плотностями излучения источника, а количество фотонов, выпущенных источником света, пропорционально его энергии. В процессе распространения лучи взаимодействуют с объектами сцены. В соответствии с оптическими свойствами пересеченной поверхности (такими как поглощение, функциями рассеивания, включая «зеркальные» функции рассеивания) лучи могут вероятностным образом отразиться, рассеяться, преломиться, поглотиться. Метод естественным образом поддерживает все типы поверхностей, включая сочетания диффузных и зеркальных свойств, а также поверхности, описываемые сложными функциями отражения (преломления) света.

По мере взаимодействия лучей с объектами сцены энергия фотонов накапливается на объектах сцены в виде глобальной освещенности или яркости. Когда количество протрассированных лучей достаточно велико, можно говорить, что распределение световых характеристик с некоторой степенью точности соответствует реальности, и, очевидно, чем больше лучей было использовано в трассировке, тем выше точность моделирования. Конечно, данная оценка точности моделирования является качественной и очень общей. Поэтому прогнозирование и оценка точности моделирования является актуальной задачей физически аккуратного моделирования освещения сложных сцен.

Данная работа посвящена методам оценки погрешностей моделирования глобальной освещенности (яркости) объектов сцены и прогнозированию времени моделирования, необходимого для достижения заданной точности.

## **2. Расчет глобальной освещенности и построение фотореалистических изображений**

Для понимания источников ошибок моделирования изображения сцены и ошибок расчета распределения световых характеристик на объектах сцены необходимо определить, как данные световые характеристики рассчитываются и как формируется визуальное изображение сцены.

Оптическое моделирование в разработанном нами программном комплексе использует приближение трассировки лучей для расчета основных световых характеристик сцены. Для построения изображения используется алгоритм обратной трассировки лучей. Идея алгоритма состоит в том, что из глаза наблюдателя через каждую точку экрана запускается луч до пересечения его с объектом сцены. Рис. 1 демонстрирует алгоритм обратной трассировки лучей. В точке пересечения с объектом луч считывает значение его яркости и эта яркость и есть яркость, видимая глазом наблюдателя. Предполагается, что видимую яркость могут создавать либо диффузно рассеивающие объекты, либо самосветящиеся объекты. Зеркальные и прозрачные нерассеивающие объекты не являются источниками яркости, а только переносят взгляд наблюдателя (отражают или преломляют) на другие светящиеся объекты сцены. Идея отражения (преломления) реализована в алгоритме обратной трассировки лучей посредством соответственно зеркального отражения или преломления луча на объектах сцены с последующей его трассировкой до ближайших видимых объектов сцены, до тех пор пока вся видимая яркость в направлении луча не будет рассчитана.

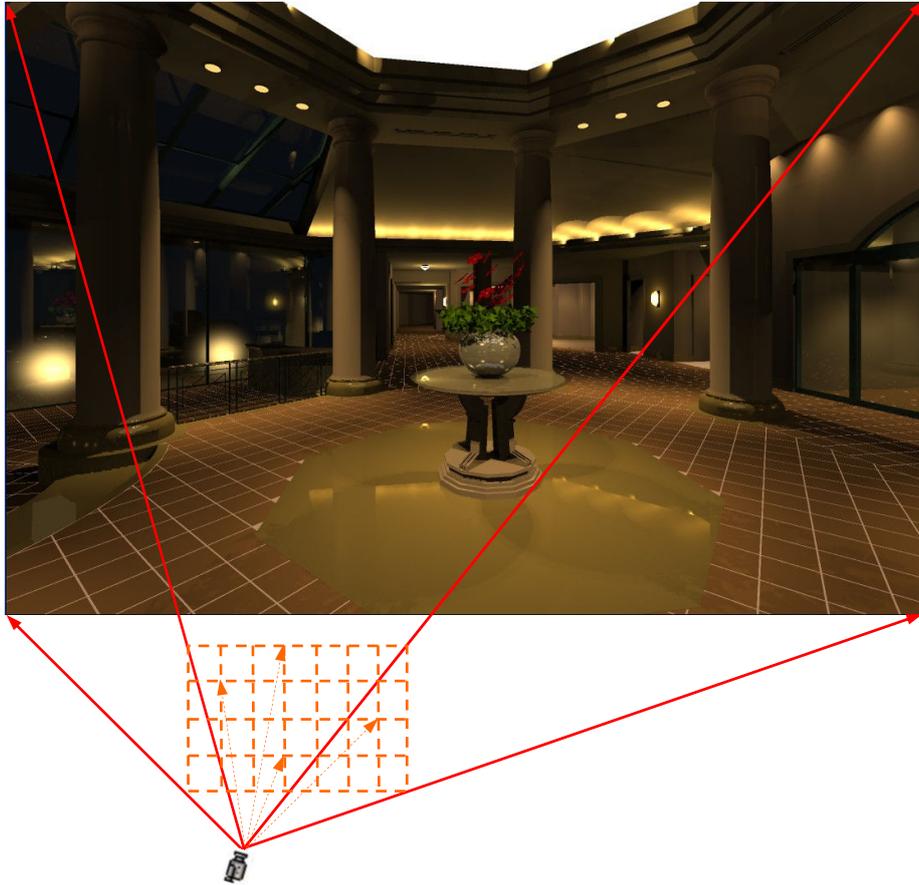


Рис. 1. Идея алгоритма трассировки лучей для построения изображения сцены.

Важным элементом обратной трассировки лучей является расчет яркости объектов сцены. Очевидно, что расчет яркости самосветящихся объектов не вызывает никаких проблем, однако вычисление яркости рассеивающих объектов является достаточно сложной процедурой. Можно выделить два основных случая освещения рассеивающих объектов: прямое освещение, когда объект непосредственно освещен источником света (на пути света от источника до объекта нет никаких других объектов), и вторичное освещение, когда объект освещен светом, рассеянным другими объектами сцены.

В случае прямого освещения яркость объекта, формируемая протяженным источником света, выглядит следующим образом:

$$L(\vec{p}', \vec{u}') = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} BSDF(\vec{u}', \vec{p}' - \vec{p}) L(\vec{p}, \vec{p}' - \vec{p}) \cos \gamma d\omega, \quad (1)$$

где:

$\vec{p}$  – положение источника света,

$\vec{p}'$  – точка поверхности наблюдения,

$\vec{u}'$  – направление наблюдения,

$\gamma$  – угол между направлением наблюдения и нормалью к освещаемой поверхности,

$L(\vec{p}, \vec{p}' - \vec{p})$  – яркость источника в направлении точки наблюдения,

$BSDF(\vec{u}', \vec{p}' - \vec{p})$  – двунаправленная функция рассеивания (отношение яркости поверхности в данном направлении к яркости идеального диффузора).

Интегрирование происходит по всей видимой области источника света и может быть сведено к простому суммированию постоянных яркостей от элементарных участков источника света. В случае точечного или параллельного источника света выражение (1) имеет вид:

$$L(\vec{p}', \vec{u}') = \frac{1}{\pi} BSDF(\vec{u}', \vec{p}' - \vec{p}) E(\vec{p}) \cos \gamma, \quad (2)$$

где:

$E(\vec{p})$  – освещенность в точке  $\vec{p}$ , формируемая источником света.

Вычисление вторичного (глобального) освещения – задача более сложная, и для ее решения используется прямая трассировка лучей методом Монте-Карло, о которой говорилось ранее. Поскольку каждый фотон переносит элементарный поток (поток фотона равен суммарному потоку всех источников света, деленному на количество испущенных фотонов), то объекты сцены могут накапливать падающий на них поток и, в зависимости от типа объекта, сохранять его в виде карт освещенности или яркости. Исключая первичное освещение, можно получить карты вторичной освещенности (яркости).

Результаты моделирования, учитывающие первичное и вторичное освещение, представлены на рис. 2.



Рис. 2. Изображение сцены с учетом первичного и вторичного освещений.

Вычисление первичного освещения, как правило, не содержит ошибок. В простых случаях выражения (1) и (2) могут быть вычислены аналитическим образом, сложные случаи сводятся к точному интегрированию яркости по видимой поверхности источника света. Однако вычисление глобальных карт освещенности (яркости) на объектах сцены содержит ошибки, связанные со спецификой геометрии сцены и стохастическим шумом, обусловленным используемым методом Монте-Карло.

### 3. Основные источники ошибок моделирования и методы их оценки

Вычисление световых характеристик, таких как глобальная освещенность (яркость) на объектах сцены или распределение освещенности (яркости) на приемниках излучения осуществляется методом Монте-Карло и, как любой вероятностный метод, содержит стохастические ошибки вычисления. Также необходимо понимать, что световые характеристики вычисляются на элементах объектов сцены конечных размеров (в вершинах треугольной сетки, формирующей геометрию сцены, в текстурных ячейках, привязанных к

геометрии сцены, или ячейках приемников излучения). Поэтому точная оценка световых характеристик в заданных точках сцены невозможна. Оценка может быть сделана с точностью до размера области, в которой аккумулировался падающий свет. Таким образом, погрешность вычисления состоит из двух основных ошибок – ошибки «дискретизации» сцены, связанной с конечными размерами элементов сцены, и ошибки «сходимости», связанной со случайным процессом вычислений.

Ошибка «дискретизации» – это ошибка интерполяции освещенности (яркости) в пределах элемента сцены, накапливающего световой поток. Каждый элемент сцены накапливает единственную величину, и, очевидно, чем больше элемент сцены, тем более проблематично осуществлять точное распределение этой величины в пределах элемента сцены. Поэтому для улучшения качества интерполяции этой величины используются соседние элементы, и чем меньше размер элемента сцены, тем более точно может быть восстановлена интерполяционная функция. Естественным условием уменьшения ошибки «дискретизации» является уменьшение элементов сцены, аккумулирующих падающих свет. Однако уменьшение элементов сцены при сохранении времени моделирования, как правило, приводит к увеличению ошибки «сходимости». Поэтому оптимальным решением является адаптивное разбиение сцены, критерием которого будет сведение ошибок «дискретизации» и «сходимости» к одному значению.

Данная работа не рассматривает аспекты адаптивного разбиения сцены, и потому анализ ошибок «дискретизации» не производится. Предполагается, что размер элементов сцены достаточен для выполнения аккуратной интерполяции освещенности или яркости. Дальнейшая часть работы посвящена анализу ошибок «сходимости» расчета распределения освещенности (яркости) на двух различных типах объектов сцены – треугольной сетки, описывающей геометрию сцены, и ячейках приемника излучения.

### 3.1. Методы оценки погрешности вычисления глобальной освещенности

Глобальная освещенность (яркость) сцены является компонентом модели построения фотореалистического изображения сцены, и ее расчет требует высокого уровня точности. Поскольку термин «высокий» уровень точности не является количественной характеристикой, необходима методика оценки уровня точности, в рамках которой, можно было бы определить значение «высокого» уровня точности.

Для метода Монте-Карло ошибка «сходимости» может быть определена как дистанция между идеально правильной картой освещенности (яркости) и реально вычисленной картой. Принимая во внимание, что размеры и форма треугольников, на которых представлены карты, меняются по сцене, необходимо выполнить усреднение вычисленной дистанции по размеру сцены (суммарной площади всех треугольников сцены). Данная дистанция есть среднеквадратическое отклонение распределения глобальной освещенности (яркости) от идеальной карты и может служить оценкой ошибки моделирования. Выражение среднеквадратического отклонения имеет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_0(x, y) - E(x, y))^2}{S}}, \quad (3)$$

где:

$E_0$  – идеальная карта освещенности (яркости),

$E$  – карта освещенности (яркости), вычисленная методом Монте-Карло,

$S$  – суммарная площадь поверхности всех треугольников, на которых была рассчитана карта освещенности (яркости).

Выражение (3) имеет размерность освещенности (яркости) на единицу площади. Более удобным выражением для оценки среднеквадратического отклонения может служить выражение данной оценки в относительных единицах. В последнем случае абсолютное значение среднеквадратического отклонения нормируется на среднее значение

освещенности (яркости) сцены. В качестве среднего значения могут быть использованы как среднеквадратическое, так и среднеарифметическое значения освещенности (яркости).

$$\sigma_{rel} = \frac{\sigma}{\langle E \rangle} \left\langle E \right\rangle = \frac{\sigma}{\langle E \rangle} \left( \begin{array}{l} \langle E \rangle = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^K E_i \quad (\text{арифметическое усреднение}) \\ \langle E \rangle = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^K E_i^2} \quad (\text{квадратическое усреднение}) \end{array} \right), \quad (4)$$

где:

$E_i$  – значение освещенности (яркости) в  $i$ -ом треугольнике сцены,

$K$  – количество треугольников сцены.

Основным недостатком выражения (4) является невозможность применения его на практике. Идеальная карта освещенности (яркости) неизвестна, она есть результат моделирования при бесконечном времени вычисления. Поэтому в условиях реального моделирования в качестве оценки идеальной карты освещенности (яркости) используется карта, вычисленная при других (независимых) начальных значениях датчиков случайных чисел. Было принято решение использовать в качестве двух независимых карт освещенности (яркости) «четную» и «нечетную» карты. Результаты трассировки четных лучей сохраняются в «четной» карте, а результаты трассировки нечетных лучей – в «нечетной» карте. Рис. 3 (а) и (б) демонстрируют результаты трассировки (карты распределения освещенности) нечетных и четных лучей соответственно для сцены, изображенной на рис. 2.



Рис. 3 (а). Глобальная карта освещенности, сформированная нечетными лучами.



Рис. 3 (б). Глобальная карта освещенности, сформированная четными лучами.

При этом выражение (3) для оценки погрешности вычисления глобальной освещенности (яркости) примет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_{\text{нечет}}(x, y) - E_{\text{чет}}(x, y))^2}{S}}, \quad (5)$$

где:

$E_{\text{нечет}}$  – карта освещенности (яркости), вычисленная для нечетных лучей,

$E_{\text{чет}}$  – карта освещенности (яркости), вычисленная для четных лучей.

Глобальная карта освещенности (яркости) есть карта, сформированная нечетными и четными лучами. Рис. 4 демонстрирует карту распределения освещенности, сосчитанную для данной сцены.



Рис. 4. Глобальная карта освещенности, сформированная всеми лучами.

Несмотря на простоту принятого решения (использовать «четные» и «нечетные» карты), оно показало себя достаточным для задач оценки точности моделирования освещенности (яркости). Это было проверено на тысячах проведенных моделирований реальных моделей (сцен).

### 3.2. Методы оценки погрешности вычисления освещенности на приемниках излучения

Для расчета распределения освещенности или яркости виртуального детектора наша система использует модель приемника излучения в виде регулярной прямоугольной решетки, в ячейках которой накапливается либо падающая световая энергия (освещенность), либо исходящая световая энергия в заданном направлении и телесном угле (яркость). Таким образом, значения световых величин в ячейках приемника излучения пропорциональны количеству фотонов, аккумулированных в данных ячейках.

Необходимо отметить, что распределение освещенности (яркости) на приемнике излучения, как правило, не содержит ошибку «дискретизации». Модель приемника излучения, используемая в нашей системе, является аналогом физического измерительного прибора (фотоприемника, ССD матрицы и т.п.). Поэтому размер ячейки детектора приемника и телесный угол захвата излучения совпадают с физическими параметрами приемника излучения, который может использоваться в данной реальной сцене. В результате реальный прибор не может измерить распределение освещенности (яркости) с более высоким разрешением, чем модель используемого приемника.

Исключая ошибку «дискретизации», погрешность вычисления световых характеристик в ячейках приемника сводится к ошибкам «сходимости». Для оценки ошибки «сходимости» используется стандартный подход расчета среднеквадратического отклонения случайной величины (энергии фотонов в ячейках приемника излучения). Во-первых, рассчитывается среднее значение световой энергии в ячейках:

$$\langle E \rangle = \frac{E_0}{N} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (6)$$

где:

$E_i$  – относительное значение световой энергии, приносимой в ячейку приемника  $i$ -ым фотоном (принимает целое значение, равное сколько раз  $i$ -ый фотон попал в данную ячейку),

$E_0$  – энергия единичного фотона,

$N$  – количество фотонов, испущенных при моделировании.

Тогда среднеквадратическая вариация энергии фотонов в ячейке может быть оценена следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \frac{E_0^2}{N} \sum_{i=1}^N E_i^2 - \langle E \rangle^2 \right)}. \quad (7)$$

Таким образом, для оценки точности освещенности (яркости) в ячейках приемника каждая ячейка должна аккумулировать не только количество фотонов, пришедших на ячейку, но и сумму квадратов количества попаданий фотонов в ячейку. Оценка точности, приведенная в выражении (7), – это абсолютная среднеквадратическая вариация величины освещенности или яркости в ячейке. Представление ошибки в форме относительного среднеквадратического отклонения имеет следующий вид:

$$\sigma_{rel} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i^2}{\left( \sum_{i=1}^N E_i \right)^2} - \frac{1}{N}}. \quad (8)$$

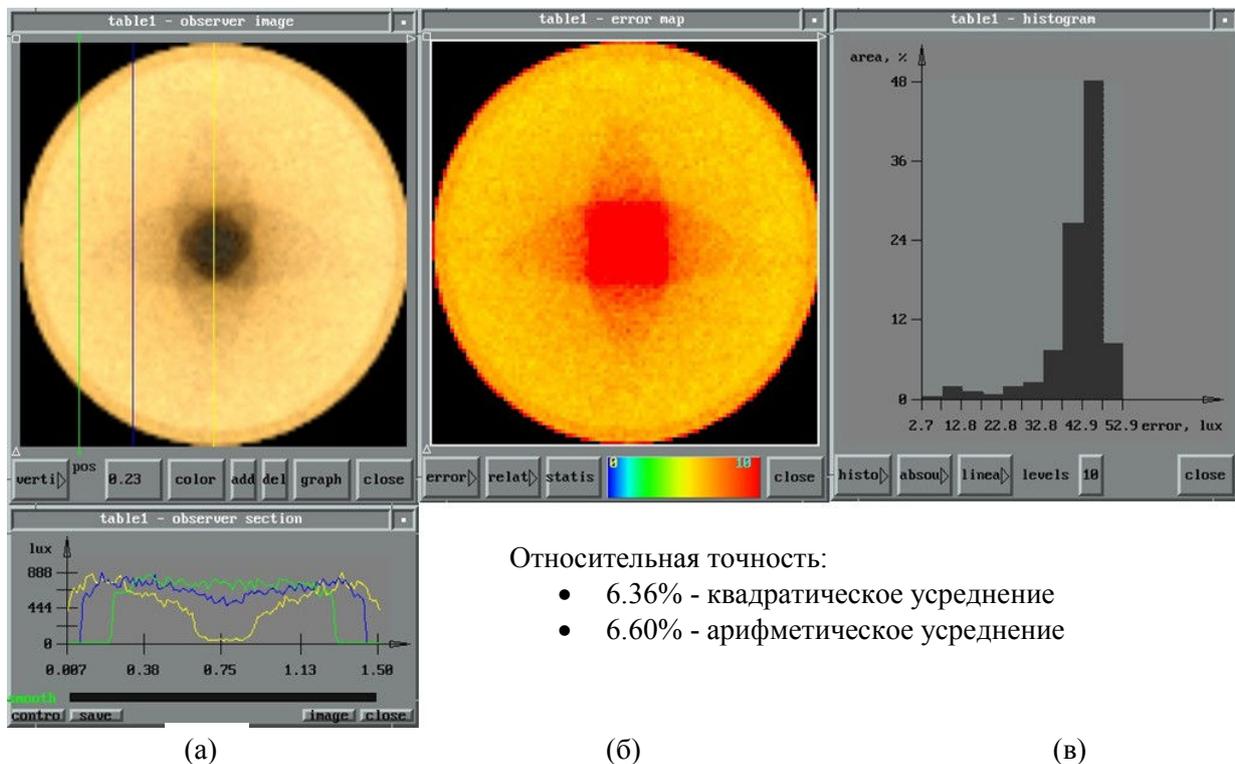
Основное отличие метода оценки погрешности распределения световых величин на приемнике излучения от оценки погрешностей на поверхностях сцены заключается в том, что для приемника излучения допускается оценка локальной ошибки в любой заданной ячейке, в то время как для поверхностей сцены оценивается усредненная ошибка по всем элементам поверхностей сцены. Также различие методов оценки погрешностей обуславливается возможностями графического интерфейса программного комплекса. Если оценка погрешности при вычислении распределения освещенности сцены выдается в виде одного числа (среднего по всей сцене), то для оценки ошибок на приемнике излучения разработан богатый графический интерфейс.

Следующая серия рисунков демонстрирует возможности анализа распределения световых характеристик и их точности на приемнике излучения. Рис. 5 демонстрирует интерьерную сцену, в которой имеется стол с расположенным на нем приемником излучения.



Рис. 5. Сцена с приемником излучения на столе.

На рис. 6 показаны результаты моделирования распределения освещенности на приемнике излучения в виде изображения и графиков сечений данного распределения, распределения относительных ошибок на приемнике излучения в виде изображения в псевдоцветах и гистограммы распределения ошибок на приемнике излучения.



Относительная точность:

- 6.36% - квадратическое усреднение
- 6.60% - арифметическое усреднение

Рис. 6. Результаты моделирования распределения освещенности. (а) – собственно распределение освещенности, (б) – распределение ошибок моделирования, (в) – гистограмма ошибок моделирования в абсолютных значениях ошибки распределения освещенности.

Для оценки средней ошибки на приемнике излучения используются арифметические и квадратические методы усреднения. Поскольку размер ячейки постоянен, то выражения для средних значений световых величин и их ошибок на приемнике изучения достаточно просты.

$$\sigma_{rel} = \frac{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sigma_i^2}}{\langle L \rangle} \left\{ \begin{array}{l} \langle L \rangle = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K L_i \quad (\text{арифметическое усреднение}) \\ \langle L \rangle = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K L_i^2} \quad (\text{квадратическое усреднение}) \end{array} \right. \quad (9)$$

где:

- $L_i$  – значение освещенности (яркости) в ячейке  $i$ -ой ячейки приемника излучения,
- $K$  – количество ячеек в приемнике излучения.

На рис. 6 дополнительно показаны значения оценки средних ошибок приемника излучения, вычисленные арифметическим и квадратическим методами усреднения.

#### 4. Прогнозирование времени расчета, необходимого для достижения заданной точности вычислений, и критерии продолжительности моделирования

Оценка точности моделирования является необходимым условием физически аккуратного оптического моделирования. Достаточным же условием является прогнозирование времени расчета, необходимого для достижения заданной точности. Для оценки необходимого времени моделирования можно использовать хорошо известную теоретическую зависимость:

$$\sigma_{rel} \approx \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad (10)$$

Эта зависимость хорошо согласуется с оценкой точности, приведенной в выражении (8). Предполагая, что количество испущенных фотонов достаточно велико ( $N \rightarrow \infty$ ) и ячейки приемника излучения накапливают независимые фотоны ( $E_i=0$  или  $E_i=1$ ), выражение (8) сводится к:

$$\sigma_{rel} = \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (11)$$

где:

$n$  – количество лучей, аккумулированных ячейкой приемника излучения.

Принимая во внимание, что в среднем время на трассировку одного луча (фотона), приходящего на ячейку приемника, меняется незначительно, можно заключить, что количество лучей, аккумулированных приемником, пропорционально времени моделирования. Очевидно, что высокая степень точности прогноза времени моделирования возможна при значительном количестве протрассированных лучей ( $N$ ) лучей и невысокой погрешности вычислений ( $n \gg 1$ ).

Алгоритмы оценки точности и прогнозирования времени моделирования, основанные на выражениях (5), (9) и (10), не являются трудоемкими с точки зрения вычислительных ресурсов, поэтому оценка точности и прогноз могут вычисляться интерактивно, без видимой задержки времени моделирования.

Для интерактивной оценки точности и прогнозирования времени вычислений нами был разработан богатый графический интерфейс (рис. 7). Интерактивный анализ точности вычислений включает в себя график зависимости точности от времени вычислений (до настоящего времени это реальная зависимость, после настоящего времени – прогноз). На нем отображается значение текущей точности (цифра 2 на рис. 7), прошедшее время и количество протрассированных лучей (цифра 1), установленная пользователем желаемая точность (цифра 3) и прогнозируемое время для достижения заданной точности с прогнозируемым количеством лучей (цифра 4).

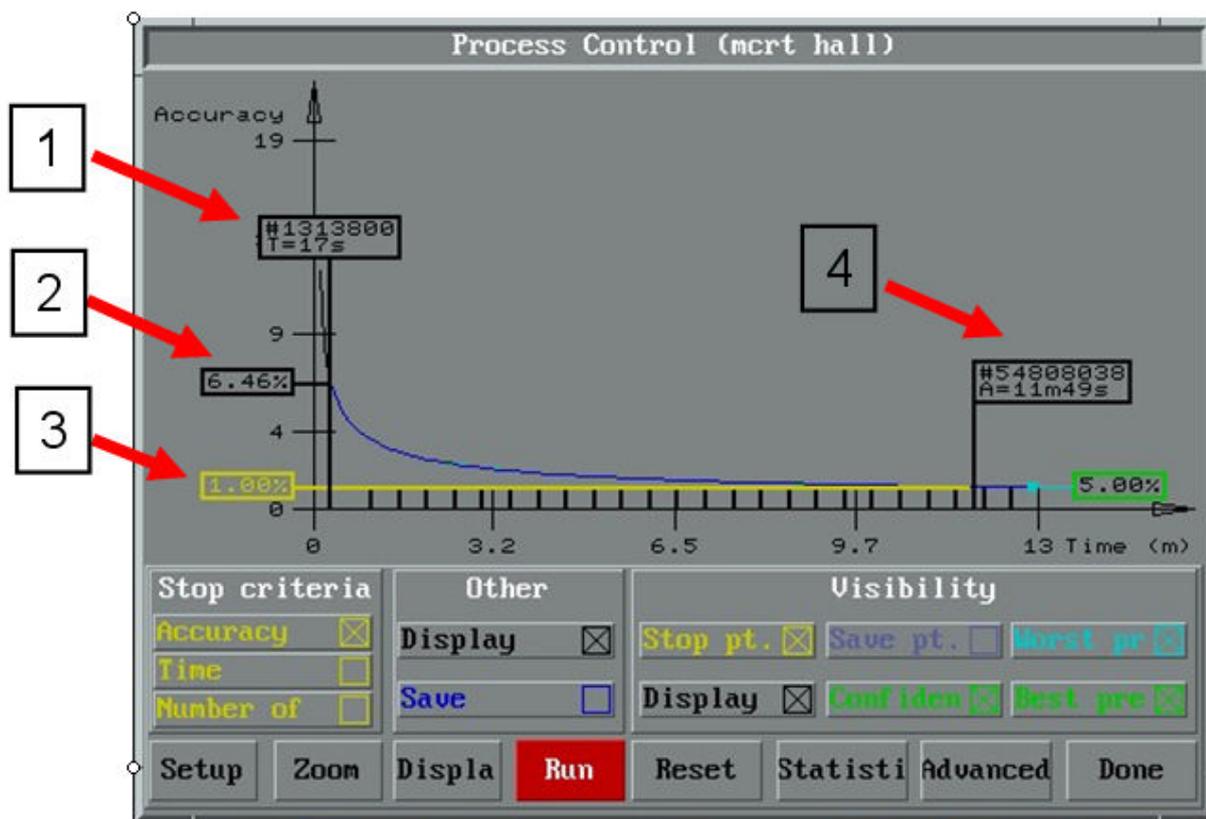


Рис. 7. График зависимости точности от времени вычислений с прогнозом необходимого времени для достижения заданной точности.

Рис. 7-9 демонстрируют прогресс вычисления глобальной освещенности интерьерной сцены (аналогичный прогрессивный анализ точности вычисления может быть применен к любому приемнику излучения). График прогнозируемого времени вычислений обновляется каждый раз по мере накопления новой порции данных. Начальный прогноз, сделанный через 17 секунд расчета (показанный на рис. 7), хотя и не является абсолютно точным (однопроцентное значение ошибки, показанное на рис. 9, достигается через 11 минут и 49 секунд, а не через 12 минут и 5 секунд), он достаточно достоверен.



Рис. 8. Результаты моделирования, оценка точности и график прогнозируемого времени расчета через 3 минуты и 26 секунд расчета.

Надо отметить, что прогноз времени вычисления достаточно точен с первых секунд расчета (он находится в пределах 2-3% от общего времени расчета), и по мере продолжения вычислений прогноз становится более достоверным. Так, требуемое однопроцентное значение ошибки достигается в практически правильно предсказанное время, показанное на рис. 8 (примерно через три с половиной минуты расчета).

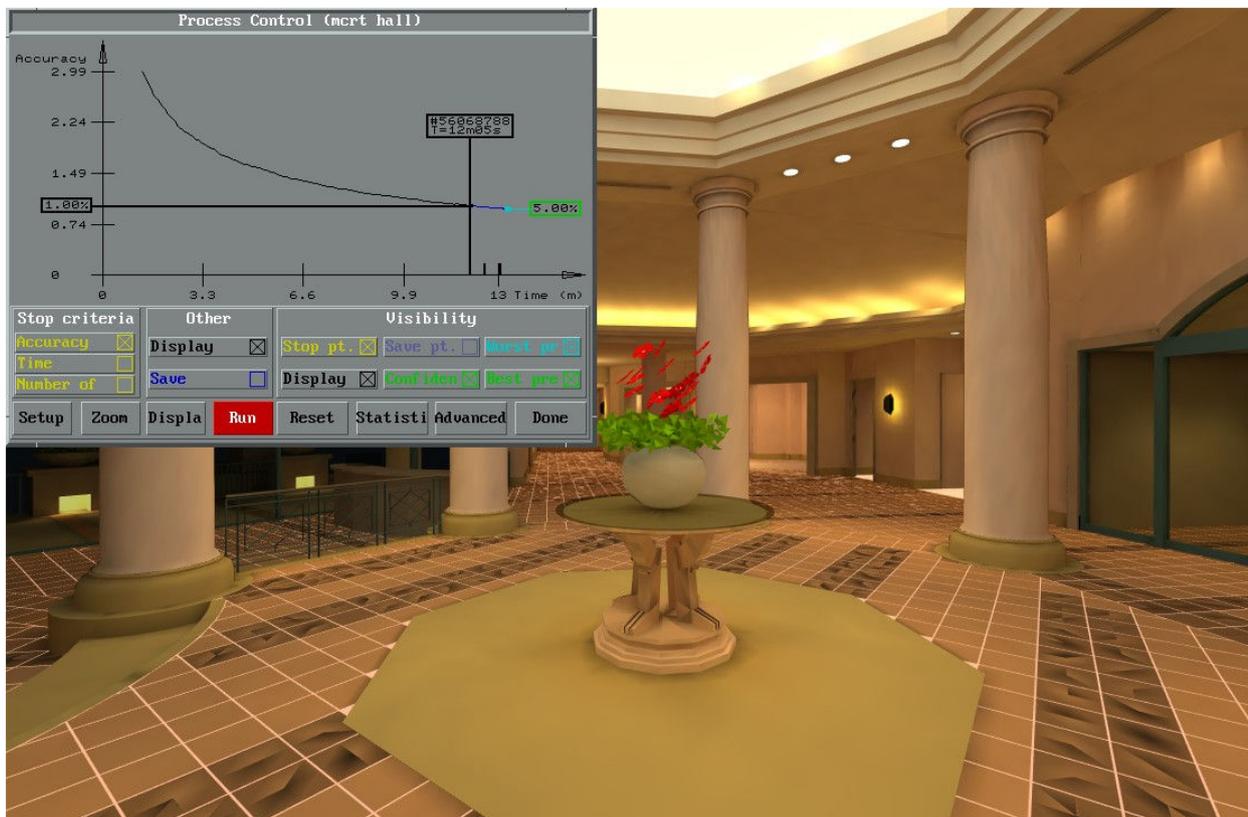


Рис. 9. Результаты моделирования, оценка точности и график прогнозируемого времени после окончания расчета.

Поскольку точность моделирования может оцениваться интерактивно, возможно использовать широкий спектр критериев окончания моделирования. В общем случае время моделирования может быть установлено не только явным образом, но и по количеству лучей, принятых выбранным приемником излучения (или выбранными ячейками приемника излучения). Кроме того, критерий окончания моделирования может быть установлен по достижению заданной точности вычисления глобальной освещенности или точности на заданном приемнике излучения (выбранных ячеек приемника излучения), при этом точность может оцениваться как в абсолютных, так и в относительных величинах.

## 5. Заключение

Алгоритмические и программные решения оценки и прогнозирования точности компьютерного оптического моделирования были интегрированы в программный комплекс Specter [9].

В рамках программной системы физически аккуратного моделирования освещения сложных сцен Specter был разработан ряд методов оценки точности моделирования. Разработанные методы имеют дифференцированный подход к типу объекта, на котором оценивается точность моделирования. На основе разработанных методов были реализованы высокоэффективные алгоритмы и программные решения, которые позволяют интерактивно производить оценку точности и осуществлять необходимый для достижения заданной точности прогноз времени расчета практически без какого-либо замедления работы основной части программы. Кроме того, разработанные программные решения имеют богатый графический интерфейс пользователя, что позволяет интерактивно оценивать как глобальные характеристики точности моделирования, так и локальные характеристики в заданных областях сцены. Все это положительным образом отличает разработанные методы,

алгоритмы и программные решения от решений, предлагаемых другими системами оптического моделирования.

Программный комплекс Specter более пятнадцати лет применяется для моделирования промышленных моделей светопроводящих систем и больших (несколько миллионов объектов) архитектурных сцен. За этот период были проведены тысячи моделирований, в каждом из которых использовался механизм оценки точности и прогнозирования времени окончания вычислений. Он показал себя достаточно надежным и удобным средством управления процессом вычислений.

Работа поддержана грантами РФФИ № 07-01-00450, № 08-01-00649, а также фирмой Integra Inc. (Япония).

Электронный вариант статьи с цветными иллюстрациями размещен на сайте [http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd\\_publ.htm](http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm).

## Список литературы

- [1] J.T.Kajiya. The rendering equation. In Computer Graphics (SIGGRAPH'86 Proceedings), 1986, pp. 143-150.
- [2] Goral C.M., Torrance K.E., Greenberg D.P., Battaile B. Modelling the interaction of light between diffuse surfaces / ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '84), Vol. 18, № 3, 1984, pp. 213-222.
- [3] Cohen M.F., Greenberg D.P., Immel D.S., Brock P.J. An efficient radiosity approach for realistic image synthesis // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 6, № 2, 1986.
- [4] Schmitt A., Muller H., Leister W. Ray tracing algorithms – Theory and practice. Theoretical foundations of Computer graphics and CAD. Edited by R.A. Earnshaw, NATO ASI Series, Vol. 40, 1988, pp. 997-1029.
- [5] M.Pharr, G.Humphreys Physically Based Rendering. From theory to implementation // Morgan Kaufmann, 2004.
- [6] E.P.Lafortune, Y.D.Willems. Bidirectional path tracing. Computer Graphics Proceedings, Alvor, Portugal, 1993, pp. 145-153.
- [7] E.Veach, L.J.Guibas. Optimally combining sampling techniques for Monte Carlo rendering. SIGGRAPH 95 Proceedings. Addison-Wesley, 1995, pp. 419-428.
- [8] S.N.Pattanaik, S.P.Mudur. Adjoint equations and random walks for illumination computation, ACM Transactions on Graphics, Vol. 14, 1995, pp. 77-102.
- [9] SPECTER – Computer-Based Optical Modeling and Design System. <http://www.integra.jp/eng/products/specter/index.htm>

### Об авторах

**Волобой Алексей Геннадьевич.** Родился в 1966 г. Окончил МГУ им. М.В.Ломоносова в 1988 г. Кандидат физико-математических наук, доцент. Автор более 50 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика. Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

**Галактионов Владимир Александрович.** Родился в 1952 г. Окончил Московский физико-технический институт в 1976 г. Доктор физико-математических наук. Автор более 100 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, компьютерная лингвистика. Заведующий отделом компьютерной графики и вычислительной оптики Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

**Ершов Сергей Валентинович.** Родился в 1965г. Окончил МГУ им. М.В.Ломоносова в 1987 г. Кандидат физико-математических наук, доцент. Автор более 40 научных работ. Область

научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, эргодическая теория, геофизика. Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

**Жданов Дмитрий Дмитриевич.** Родился в 1961 г. Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики в 1984 г. Кандидат физико-математических наук. Автор более 15 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика. Научный сотрудник Государственного Оптического Института им. С.И. Вавилова.

**Потемин Игорь Станиславович.** Родился в 1961 г. Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики в 1984 г. Автор более 10 научных работ. Область научных интересов: вычислительная оптика, оптические измерения, осветительные системы. Научный сотрудник Научно-технического вычислительного центра ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Шапиро Лев Залманович.** Родился в 1945 г. Окончил Московский физико-технический институт в 1970 г. Кандидат технических наук. Автор более 40 научных работ. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика. Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.