

## Адаптивный выбор глубины трассировки обратного луча в методе двунаправленной стохастической трассировки лучей\*

Д.Д. Жданов<sup>1</sup>, С.В. Ершов<sup>2</sup>, А.Г. Волобой<sup>2</sup>

ddzhdanov@mail.ru | measure@spp.keldysh.ru | voloboy@gin.keldysh.ru

Санкт-Петербург, Россия, <sup>1</sup>Университет ИТМО;

Москва, Россия, <sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Данная статья посвящена задаче ускорения сходимости физически корректной модели рендеринга сцен, содержащих объекты с «узконаправленными» двунаправленными функциями рассеивания (ДФР). В качестве базового подхода для решения уравнения рендеринга использовался метод двунаправленной стохастической трассировки лучей, основанный на фотонных картах «видимости» объектов сцены. Было показано, что вычисление вторичной яркости на поверхностях с узконаправленными ДФР, приводит к значительному шуму изображения, который остается видимым даже после трассировки миллиардов лучей. Для уменьшения шума на данных поверхностях были разработаны два решения, позволяющих сдвинуть точку интегрирования вторичной яркости на поверхность с более «гладким» ДФР. Приведенные примеры иллюстрируют возможность уменьшения шума изображения сцен, содержащих «узконаправленные» ДФР.

**Ключевые слова:** Двунаправленная стохастическая трассировка лучей, фотореалистичная визуализация, двунаправленная функция рассеивания, фотонные карты, вторичная яркость, первичная яркость, диффузная глубина трассировки лучей.

## Adaptive estimation of backward ray trace depth for the stochastic bi-directional ray trace method\*

D.D. Zhdanov<sup>1</sup>, S.V. Ershov<sup>2</sup>, A.G. Voloboy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation

The article is devoted the problem of acceleration of convergence of physically correct rendering model of scenes containing surfaces with narrow BSDF. As a base approach to solve the rendering equation the method of bidirectional stochastic ray tracing was applied. The method used stochastic backward ray tracing to calculate visibility maps as sources of indirect luminance integrations in these points. The article shows that secondary luminance calculations on the surfaces with narrow BSDF results in high noise, which remains visible, even after tracing of milliards of rays. To solve the problem of high noise two methods were developed. The methods allows moving the point of integration of secondary luminance to surfaces with more diffuse BSDF and therefore reduce noise of the secondary luminance. The examples illustrate how it is possible to reduce noise for scenes with narrow BSDF.

**Keywords:** Bidirectional stochastic ray tracing, photorealistic visualization, BSDF, photon maps, direct luminance, indirect luminance, ray tracing depth.

### Введение

Задача физически корректного моделирования и фотореалистичной визуализации оптически сложных сцен имеет большое значение для моделирования и проектирования оптически сложных материалов, используемых в условиях реального окружения. Изображения объектов, имеющих специальным образом обработанные поверхности или покрытия и используемых, например, для придания особого визуального эффекта или специального характера распространения света, должны рассчитываться исходя не только из условий прямого освещения, но и условий вторичного освещения,

создаваемого светом, переотраженным объектами сцены. Как правило, данные свойства поверхности описываются спектральной двунаправленной функцией рассеивания (ДФР), которая далека от равномерной ДФР. Физически корректный учет всех физических эффектов, включая рассеивание света на поверхностях с ДФР, заложен в решение уравнения рендеринга [1], которое представляет собой бесконечную сумму яркостей, и единственным физически корректным способом решения данного уравнения является метод «русской рулетки». Метод «русской рулетки» может быть использован для различных технологий трассировки лучей (прямой, когда изображение строится лучами, испущенными источниками света, обратной, когда изображение строится лучами, испущенными наблюдателем, и двунаправленной, когда яркость изображения вычисляется на пересечении трасс прямых и обратных лучей), однако для фотореалистичной визуализации

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), грантом РФФИ 13-01-00454, а также компанией Integra Inc. Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-20347

лизации наиболее подходящим является метод двунаправленной стохастической трассировки лучей. Метод двунаправленной стохастической трассировки лучей имеет большое количество алгоритмических модификаций [2-4], и основные вариации алгоритмов сводятся к порядку расчета трасс лучей, типам фотонных карт, которые сохраняются в результате расчета, и способу хранения и обработки фотонных карт. Алгоритмы также варьируются по возможности учета физических явлений, таких как спектральные и поляризационные характеристики источников света и оптические свойства объектов сцены.

Как и любой метод стохастического моделирования, метод двунаправленной стохастической трассировки лучей формирует зашумленное изображение и, хотя в пределе данный метод должен сформировать изображение, свободное от шума, время для получения данного изображения может оказаться слишком большим. Поэтому на практике используются различные алгоритмы, позволяющие ускорить процесс сходимости вычисления яркости изображения и минимизации шума.

В рамках данной работы представляется один из методов ускорения сходимости процесса вычисления вторичной яркости в сценах, содержащих поверхности с узконаправленным ДФР.

### Источники шума на поверхностях с узконаправленным ДФР

Фотореалистичная визуализация оптически сложных сцен сводится к решению уравнения рендеринга для каждой точки изображения сцены. Для статических сцен видимая яркость световой компоненты  $s$  в точке  $\vec{p}$  и по направлению  $\vec{v}$  определяется следующим образом:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \left( \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + BPDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\omega \right) \quad (1)$$

где:  $L_0(\vec{p}, \vec{v}, c)$  – собственная яркость объекта в точке наблюдения,

$\vec{n}$  – нормаль к поверхности в точке наблюдения,

$\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$  – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения,

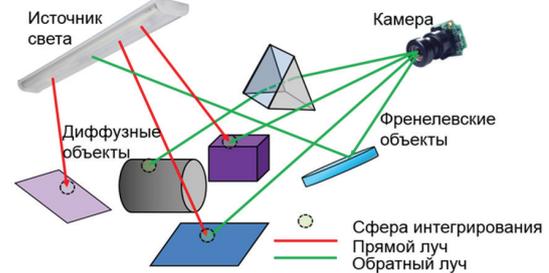
$BPDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$  – коэффициент яркости поверхности (или двунаправленная функция рассеивания (ДФР)) от источника освещения  $\vec{v}'$  в направлении  $\vec{v}$  на наблюдателя,

$L(\vec{p}, \vec{v}, c)$  – яркость внешнего (первичного или вторичного) освещения в телесном угле  $d\omega$  по направлению  $\vec{v}'$  на точку наблюдения  $\vec{p}$ .

Уравнение рендеринга (1) это уравнение с бесконечной рекурсией, и, если вклад вторичного излучения в суммарное значение видимой яркости значителен, то наиболее подходящим способом решения уравнения рендеринга является двунаправленная стохастическая трассировка лучей. Рисунок

1 схематично иллюстрирует разработанный алгоритм двунаправленной трассировки лучей.

### Обратная трассировка лучей, расчет вторичной яркости и формирование фотонных карт видимости



### Прямая трассировка лучей и расчет вторичной яркости

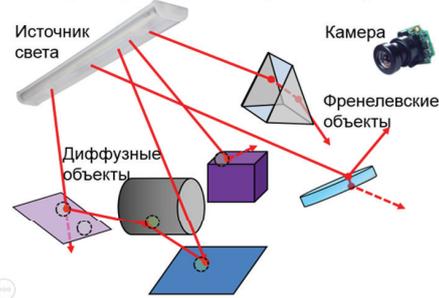


Рис. 1: Двунаправленная стохастическая трассировка лучей

Использование метода «русской рулетки» позволяет наиболее эффективно и физически корректно выполнить интегрирование бесконечной рекурсии. Для решения уравнения рендеринга авторами был разработан алгоритм двунаправленной стохастической трассировки лучей, в котором на первой стадии трассируются обратные лучи, вычисляется прямая яркость и сохраняются фотонные карты видимости сцены. На второй стадии трассируются прямые лучи, и в местах пересечения прямых лучей со сферами фотонных карт видимости сцены вычисляются вторичные и каустические яркости. Алгоритмы расчета каустического и вторичного освещения отличаются только параметром радиуса сферы интегрирования (для расчета каустического освещения используется меньший радиус, поскольку данное освещение создает больший контраст изображения).

Для алгоритма двунаправленной стохастической трассировки лучей, основанного на методе «русской рулетки», уравнение рендеринга (1) удобно представить в виде суммы трех независимых яркостей: во-первых, яркости прямого видения источников света, во-вторых, яркости, формируемой прямым освещением и, в-третьих, яркости, формируемой каустическим и диффузным освещением, –  $L^V(\vec{p}, \vec{v}, c)$ ,  $L^D(\vec{p}, \vec{v}, c)$ ,  $L^I(\vec{p}, \vec{v}, c)$  соответственно. Как правило, основной шум изображения формируется при вычислении первичной и вторич-

ной яркостей. Для подавления шума первичная яркость вычисляется как взвешенная сумма яркостей, рассчитанных методами “light sampling” (2)  $L_L^D(\vec{p}, \vec{v}, c)$  и “BDF sampling” (3)  $L_B^D(\vec{p}, \vec{v}, c)$  [5]:

$$L_L^D(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \sum_{m=1}^{M_i} \tau_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, c) \sum_{j=1}^{N_S} BSDF_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c) E_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)}{\pi \cdot N_B \cdot N_S} \quad (2)$$

$$L_B^D(\vec{p}, \vec{v}, c) = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \sum_{m=1}^{M_i} \tau_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, c) \sum_{j=1}^{N_S} L_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)}{N_B \cdot N_S} \quad (3)$$

где:  $M_i$  – количество сохраненных фотонов на поверхностях сцены для  $i$ -ой трассы луча;  
 $N_S$  – количество случайных попыток вычисления прямой освещенности  $E_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)$  для метода “light sampling” и яркости источников света  $L_j(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)$ , находящихся на трассе луча после рассеивания луча на  $j$ -ой поверхности для метода “BDF sampling”.

Метод “light sampling” позволяет уменьшить шум изображения при освещении сцены источниками света малого размера и на поверхностях с ДФР близкими к Ламбертовым. С другой стороны метод “BDF sampling” улучшает качество изображения для сцен, освещенных протяженными источниками света и на поверхностях с узконаправленным ДФР. В результате, взвешенная сумма двух методов позволяет уменьшить шум изображения как вблизи областей резкого перепада яркости, так и в областях ее плавного изменения и не создает источника повышенного шума даже для поверхностей с узконаправленным ДФР.

Вторичная яркость вычисляется следующим образом:

$$L^I(\vec{p}, \vec{v}, c) = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{m=1}^{M_i} \tau_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, c) \frac{\sum_{j=1}^{N_S} BSDF_{im}(\vec{p}_{im}, \vec{v}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c) F_{Rj}(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)}{\pi^2 N_B N_F r_{im}^2} \quad (4)$$

где:  $N_F$  – количество лучей, испущенных источниками света;

$N_R$  – количество фотонов, попавших в  $m$ -ую сферу интегрирования (фотонную карту) на трассе  $i$ -го луча;

$r_{im}$  – радиусы сфер интегрирования вторичной яркости для  $i$ -го луча на  $m$ -ой поверхности наблюдения соответственно;

$F_{Rj}(\vec{p}_{im}, \vec{v}'_{imj}, c)$  – спектральный поток, переносимый  $j$ -ым фотоном в точке  $\vec{p}_{im}$  по направлению  $\vec{v}'_{imj}$  и попавший в сферу интегрирования фотонной карты видимости.

Поскольку световой поток, переносимый фотоном, есть величина, как правило, постоянная, то основным фактором, влияющим на шум, возникающий при расчете вторичной яркости на поверхностях сцены – это ДФР. Если ДФР близка к Ламбертовой, то вариация яркости от фотонов, приходящих в точку наблюдения с различных направлений, будет минимальна. Однако, если ДФР имеет узкона-

правленный характер, то вариация яркости может достигать нескольких порядков, что приводит к появлению ярких точек на изображении, на устранение которых необходимо затратить на порядки больше времени, чем в случае Ламбертового рассеивания. Поэтому для минимизации шума, возникающего при расчете вторичной яркости необходимо устанавливать точку расчета вторичной яркости на поверхностях с максимально диффузными свойствами.

## Метод адаптивного выбора глубины трассы обратного луча

Как было отмечено выше, основной путь снижения шума, возникающего при расчете вторичной яркости, это выбор точки на трассе обратного луча, в которой оптические свойства поверхности имеют наиболее диффузный характер. Для выбора оптимальной точки, во-первых, необходимо осуществить трассировку луча на максимально возможную глубину и, во-вторых, произвести анализ оптических свойств всех поверхностей сцены на трассе луча. Данная последовательность действий несколько меняет алгоритм обратной трассировки луча и приводит к тому, что трасса луча сначала сохраняется полностью, а затем, после анализа на неоднородность оптических свойств, переводится в фотонную карту видимости до точки с максимально однородными свойствами.

Для анализа оптических свойств поверхностей был реализован специальный метод, вычисляющий коэффициент неоднородности для данного направления наблюдения (отношение максимальной яркости к средней яркости для выбранного направления наблюдения). Оптимальная глубина трассировки лучей выбирается для каждого направления луча наблюдения (точки изображения). Кроме того, если глубина трассировки обратного луча больше нуля, то для одного направления наблюдения может существовать множество «оптимальных» глубин трассировки луча, которые зависят от того, какую трассу выбрал конкретный стохастический луч. Однако, изменение глубины диффузной трассировки луча в процессе накопления вторичной яркости (т.е. для каждого луча свое оптимальное количество диффузных рассеиваний) приводит к некорректному решению уравнения рендеринга (4). Для минимизации случайных флуктуаций глубины диффузной трассировки луча в уравнении (4) полный расчет вторичной яркости разбивается на итерации, в каждой из которых глубина трассировки луча выбирается исходя из оптимальной глубины трассы первого луча в каждой точке изображения сцены и накопленной статистики оптимальных глубин. Финальное изображение есть усредненный результат всех выполненных итераций.

Рисунок 2 демонстрирует результат применения метода выбора оптимальной глубины трассировки лучей к расчету изображения стеклянной пластины, лежащей на диффузной подложке. Торцевые поверхности пластины гладкие и прозрачные, верхняя поверхность пластины имеет острую ДФР, а нижняя поверхность – широкую. В результате оптимальная глубина трассировки лучей на верхней пластине равна единице (второе диффузное рассеивание), а на прозрачном торце – нулю (первое диффузное рассеивание).

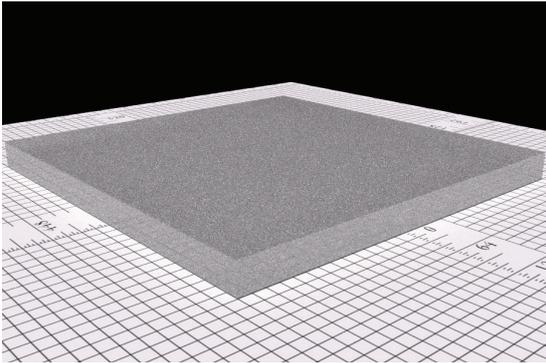


Рис. 2: Изображение, построенное методом выбора оптимальной глубины диффузной трассы луча

В данном случае шум распределен достаточно равномерно по изображению верхней и торцевым поверхностям пластины. Если глубину диффузной трассировки установить равной нулю для всей сцены, то шум на изображении верхней пластины возрастет, а при единичной глубине – шум возрастет на изображении торцевой поверхности пластины. Рисунки 3 и 4 демонстрируют данные случаи соответственно.

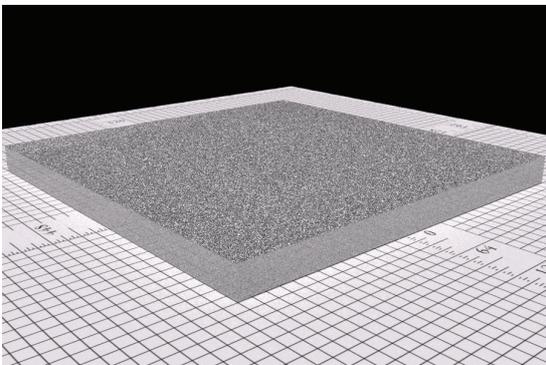


Рис. 3: Изображение, построенное при глубине диффузной трассы луча равной нулю

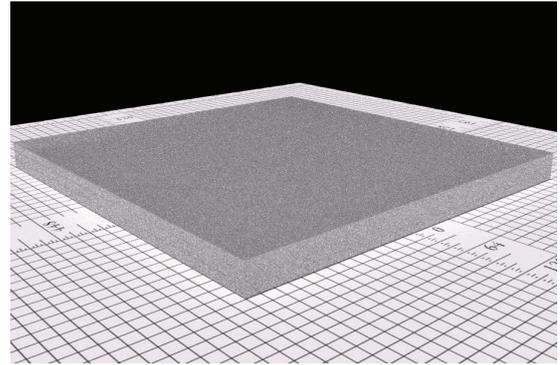


Рис. 4: Изображение, построенное при глубине диффузной трассы луча равной единице

### Метод «квази-зеркальной» трассировки обратного луча

Сдвиг точки интегрирования вторичной яркости на трассе обратного луча может идти не только по пути выбора поверхности с максимально однородным рассеиванием, но и посредством применения метода «квази-зеркального» рассеивания света. Основная идея метода аналогична предыдущему решению – расчет вторичной яркости на поверхностях с узконаправленным ДФР является нецелесообразным. Однако реализация метода принципиально отлична от предыдущей и заключается в том, что рассеивание света на поверхностях сцены рассматривается как «квази-зеркальное» событие, т.е. событие, не добавляющее вторичной яркости, если рассеивание света осуществляется в некотором заданном конусе относительно направления «зеркального» луча, т.е. луча, претерпевшего зеркальное отражение или преломление по закону Снеллиуса. В результате трасса луча будет продолжаться до тех пор, пока направление рассеянного луча не выйдет из заданного конуса углов относительно «зеркального» направления. Естественно, если поверхность имеет узконаправленный ДФР, то большинство лучей, рассеянных на поверхности, будет иметь «квази-зеркальный» характер распространения и точка интегрирования вторичной яркости будет сдвинута. Если же поверхность имеет диффузный характер рассеивания, то при незначительной величине допустимого конуса рассеивания (до  $10^\circ$ ) доля «квази-зеркальных» лучей будет крайне мала и не окажет значительного влияния на качество изображения за счет неоптимального переноса точки интегрирования.

Корректное решение уравнения рендеринга (2, 4), использующее метод «квази-зеркальной» трассировки лучей, требует дополнительной модификации алгоритма расчета первичной и вторичной яркостей. Во-первых, для поверхности, наблюдаемой после диффузного рассеивания, первичная яркость

не должна приходить от источников света внутри допустимого конуса рассеивания лучей, а, во-вторых, при расчете вторичной яркости диффузное освещение так же должно приходить на поверхность вне допустимого конуса рассеивания лучей, т.е. все освещение, приходящее внутри допустимого конуса рассеивания, должно обнулено. Рисунок 5 иллюстрирует метод «квази-зеркальной» трассировки обратного луча и соответствующие методы вычисления яркостей первичного и вторичного освещения.

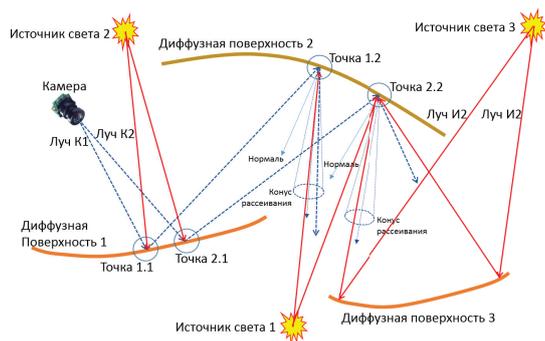


Рис. 5: Метод «квази-зеркальной» трассировки обратного луча

В качестве примера рассматривается длина трассы обратного луча, содержащая одно диффузное рассеивание. Первый луч, испущенный камерой, рассеивается на второй диффузной поверхности внутри конуса и продолжает распространение, сдвигая точку интегрирования яркости вторичного освещения на следующие поверхности сцены. Второй луч, испущенный камерой, рассеивается на второй диффузной поверхности вне заданного конуса, и поэтому точка рассеивания является центром области потенциального расчета вторичной яркости для данного направления наблюдения.

Рассмотрим методику расчета яркости первичного освещения. Если точки наблюдаются непосредственно (или после ряда «зеркальных» или «квази-зеркальных» преобразований), то осуществляется расчет яркости первичного освещения. Так второй источник света формирует первичную яркость в точках 1.1 и 2.1. В случае наблюдения после диффузного рассеивания яркость первичного освещения вычисляется только, если освещение происходит вне конуса рассеивания. Так первый источник света формирует первичную яркость в точке 2.2 и не добавляет яркость в точке 1.2.

Яркость вторичного освещения вычисляется в конце пути трассы обратного луча (окончание трассы определяется ее глубиной и рассеиванием луча вне допустимого конуса). Шанс на исключение яркости вторичного освещения появляется в случае,

когда на трассе обратного луча происходили события диффузного рассеивания или на трассе луча от источника света происходили события диффузного или «квази-зеркального» рассеивания. Достаточным условием того, чтобы исключить компоненту яркости вторичного освещения, является тот факт, что освещение происходит вне конуса рассеивания обратного луча и добавляет вторичную яркость, в то время как второй луч, прошедший по аналогичной траектории, не добавляет вторичной яркости, поскольку освещает поверхность внутри конуса рассеивания.

Метод «квази-зеркальной» трассировки обратного луча может быть совмещен с методом адаптивного выбора глубины обратного луча. Совмещение двух методов позволяет не только понизить шум изображения, но и повысить качество моделирования ряда «тонких» визуальных эффектов, например, вторичных бликов, т.е. бликов, наблюдаемых от бликующих поверхностей. На рисунке 6 показано изображение элемента подсветки заднего фонаря автомобиля. Элемент растрового световода имеет узконаправленную ДФР, что позволяет сдвинуть точку расчета вторичной яркости в область, близкую к источнику света, и тем самым повысить качество изображения.

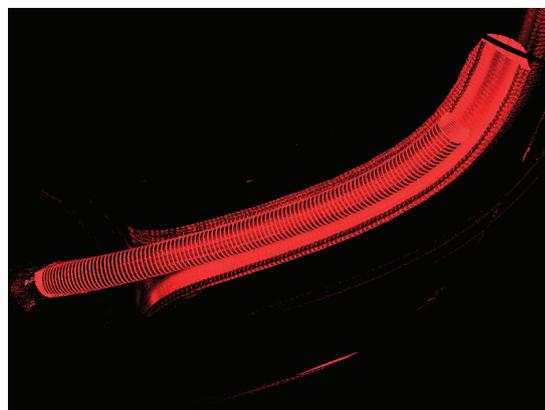


Рис. 6: Изображение элемента подсветки заднего фонаря автомобиля

## Заключение

В рамках программного комплекса Lumiscept [6] были реализованы два физически корректных программных подхода, позволяющих ускорить сходимость расчета вторичной яркости методом двунаправленной стохастической трассировки лучей. Разработанные программные решения позволяют ускорить процесс получения изображения с допустимым уровнем шума, а в ряде случаев, возникаю-

щих при проектировании оптически сложных осветительных систем, содержащих поверхности, имеющие узконаправленный характер ДФР, являются единственным способом получения фотореалистичного изображения за ограниченное время вычислений.

Анализ неоднородности свойств оптических материалов был реализован в спектральном пространстве и учитывал спектральные свойства наблюдателя до поверхности наблюдения и спектральные свойства самой наблюдаемой поверхности.

## Литература

- [1] J. T. Kajiya. The rendering equation // Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings), 1986, vol. 20, pp.143-150.
- [2] Jensen Henrik Wann, Christensen Per. High quality rendering using ray tracing and photon mapping // ACM SIGGRAPH 2007 courses. SIGGRAPH'07, New York, NY, USA, ACM, URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1281500.1281593>, 2007.
- [3] Pharr Matt, Humphreys Greg. Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation. 2nd edition. // San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2010, 1200p.
- [4] Hachisuka Toshiya, Jensen Henrik Wann. Stochastic progressive photon mapping // ACM Trans. Graph. 2010. – dec. Vol. 28, no. 5. p. 141:1–141:8. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1618452.1618487>, 2009.
- [5] Eric Veach. A dissertation: Robust Monte-Carlo methods for light transport simulation, URL: [http://graphics.stanford.edu/papers/veach\\_thesis/thesis.pdf](http://graphics.stanford.edu/papers/veach_thesis/thesis.pdf), 1997.
- [6] Intgera Inc., Lumicept, URL: <http://www.integra.jp/en>, 2015.