

DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-15



Особенности реализации алгоритмов и представления данных в системе оптического моделирования Lumicept в рамках верификации по тестовым сценариям CIE 171:2006

¹ М.С. Копылов, ORCID: 0000-0002-9526-0766 <kopylov@gin.keldysh.ru>

¹ Е.Д. Бирюков, ORCID: 0000-0003-4297-6813 <birukov@gin.keldysh.ru>

² И.С. Потемин, ORCID: 0000-0002-5785-7465 <ipotemin@yandex.ru>

¹ А.Г. Волобой, ORCID: 0000-0003-1252-8294 <voloboy@gin.keldysh.ru>

¹ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4.

² НИУ ИТМО,
Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Kronverskiy pr., д. 49.

Аннотация. Статья описывает функциональные особенности системы оптического моделирования Lumicept, которые являются значимыми для моделирования освещенности и верифицированы с использованием тестовых сценариев, разработанных Международной комиссией по освещению (CIE) в рамках стандарта CIE 171:2006. Вкратце описываются методы оптического моделирования, используемые в других программных комплексах, в частности, методы конечных элементов и обратной трассировки лучей. К числу особенностей системы Lumicept, влияющих на прохождение тестов, относятся как конкретные вычислительные алгоритмы оптического моделирования, используемые в тестовых сценариях, так и особенности представления данных сцены, которые влияют на работу вычислительных алгоритмов. В качестве вычислительных алгоритмов используется прямая Монте-Карло трассировка лучей, включая методы трассировки путей (Path Tracing), и специализированные методы, например, метод расчета годовой динамики освещенности (Daylight Autonomy). Особенности представления сцен включают способы задания оптических свойств поверхностей, моделирование точечных и протяженных источников света. Также отдельно затронута тема использования различных способов генерации случайных чисел, применяемых в стохастических методах трассировки лучей. Результаты тестирования системы Lumicept продемонстрировали корректное моделирование распространения света данной системой, при этом точность результатов сравнима с точностью результатов других популярных систем.

Ключевые слова: оптическое моделирование; моделирование освещенности; физически корректный рендеринг; трассировка лучей; верификация программного обеспечения; тесты оптического моделирования; Международная комиссия по освещению; CIE 171:2006.

Для цитирования: Копылов М.С., Бирюков Е.Д., Потемин И.С., Волобой А.Г. Особенности реализации алгоритмов и представления данных в системе оптического моделирования Lumicept в рамках верификации по тестовым сценариям CIE 171:2006. Труды ИСП РАН, том 38, вып. 3, часть 3, 2026 г., стр. 49–64. DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-35.

Particularity of algorithms and data representation in Lumicept lighting simulation system in scope of verification against CIE 171:2006 test cases

¹ M.S. Kopylov, ORCID: 0000-0002-9526-0766 <kopylov@gin.keldysh.ru>

¹ E.D. Birukov, ORCID: 0000-0003-4297-6813 <birukov@gin.keldysh.ru>

² I.S. Potemin, ORCID: 0000-0002-5785-7465 <ipotemin@yandex.ru>

¹ A.G. Voloboy, ORCID: 0000-0003-1252-8294 <voloboy@gin.keldysh.ru>

¹ The Keldysh Institute of the Applied Mathematics of RAS,
4, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia.

² ITMO University,
49, Kronverskiy av., Sankt-Petersburg, 197101, Russia.

Abstract. The paper describes functional particularity of the Lumicept lighting simulation system analyzed in the scope of verification against CIE 171:2006 test cases developed by International commission on Illumination (CIE). Methods used in Lumicept and other lighting simulation software are shortly described, in particular, a finite element method and a backward raytracing method. The Lumicept system particularity influenced testing procedure includes particular lighting simulation algorithms used in test cases, as well as scene data representation specifics. The simulation algorithms used are direct Monte Carlo ray tracing, including path tracing methods (Path Tracing), and specialized methods, such as the method for Daylight Autonomy calculation. Scene representation particularity includes setting the optical parameters of the surfaces and modeling of point and area light sources. Various random number generators used in stochastic ray tracing are also discussed. The results of testing the Lumicept system demonstrated that the system correctly simulates light propagation, and the accuracy of the results is comparable to the accuracy of results from other popular systems.

Keywords: optical modeling; lighting simulation; physically based rendering; ray tracing; software validation; lighting simulation test cases; International commission on Illumination; CIE 171:2006.

For citation: Kopylov M.S., Birukov E.D., Potemin I.S., Voloboy A.G. Particularity of algorithms and data representation in Lumicept lighting simulation system in scope of verification against CIE 171:2006 test cases. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 38, issue 3, part 3, 2026, pp. 49-64 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2026-38(3)-35.

1. Введение

Современное проектирование архитектурных объектов и световых приборов невозможно без использования систем компьютерного моделирования. Предварительный расчет позволяет обеспечить энергоэффективность зданий, комфорт и безопасность человека, а также проверить проект на соответствие международным экологическим стандартам, таким как LEED и BREEAM. Но для того, чтобы можно было прогнозировать освещенность, моделирование должно иметь высокую точность. В связи с этим к программному обеспечению для оптических расчетов предъявляются жесткие требования в отношении физической достоверности получаемых результатов.

Стандарт Международной комиссии по освещению CIE 171:2006 является признанным международным бенчмарком [1]. Он включает в себя набор сценариев, геометрические и фотометрические данные. Эталонные результаты этих сценариев базируются либо на точных аналитических решениях, либо на подтвержденных экспериментальных измерениях. Положительное тестирование программного комплекса согласно бенчмарку CIE 171:2006 является необходимым условием для признания его пригодным для прецизионных инженерных и научных расчетов.

В работе [2] были представлены результаты верификации системы оптического моделирования Lumiscept [3] по методике CIE 171:2006. Результаты продемонстрировали высокую сходимость с эталонными значениями, что подтвердило общую адекватность системы. Однако за рамками исследования остались технические аспекты реализации вычислительного ядра и структуры представления данных, которые непосредственно обеспечивают достигнутую точность.

Целью данной работы является детальный анализ функциональных и алгоритмических решений, реализованных в системе Lumiscept, наиболее значимых в контексте прохождения верификационных сценариев. В то время как многие коммерческие пакеты используют гибридные или упрощенные подходы для ускорения визуализации, вычислительное ядро Lumiscept основано на методах стохастической (Монте-Карло) трассировки лучей (Monte Carlo Ray Tracing, MCRT) и трассировки путей (Path Tracing). Это позволяет достичь высокой физической достоверности моделирования, масштабируемой в зависимости от продолжительности расчета и числа трассируемых лучей. В статье также рассматривается метод динамического анализа естественного освещения (Daylight Autonomy). Особое внимание уделено математическим моделям представления сцены: заданию оптических свойств поверхностей, моделированию различных типов источников света и влиянию методов генерации псевдослучайных чисел на сходимость результатов в стохастических расчетах. Понимание этих внутренних механизмов позволяет не только интерпретировать результаты тестов CIE, но и определить границы применимости программного комплекса в сложных светотехнических задачах.

2. Существующие методы и решения

Моделирование глобальной освещенности является критически важным этапом светотехнического анализа. Оно позволяет воспроизвести физически достоверное распределение света в трехмерной сцене, учитывая как прямое излучение от источников, так и его многократные отражения от поверхностей. Разнообразие физических явлений, возникающих при переносе излучения, предопределило появление нескольких фундаментальных подходов к моделированию, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Существующие методы расчета глобальной освещенности можно условно разделить на две основные категории, базирующиеся на различных математических принципах: методы, основанные на трассировке лучей, и методы, использующие аппарат конечных элементов.

2.1 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов, главным представителем которого в задачах освещения является метод излучательности (Radiosity) [4], рассматривает перенос световой энергии как процесс обмена излучением между дискретизированными участками поверхностей сцены. Поверхности разбиваются на малые элементы (площадки или патчи), и для каждого из них составляется уравнение энергетического баланса, учитывающее как собственное, так и отраженное излучение. Этот подход особенно эффективен для моделирования многократных диффузных взаимных отражений, так как позволяет получить распределение яркости, не зависящее от точки обзора. Решение системы уравнений метода Radiosity дает стационарное распределение освещенности, что обеспечивает быструю визуализацию сцены с различных ракурсов после однократно выполненного расчета. Основными ограничениями данного подхода являются его применимость преимущественно к идеально диффузным (ламбертовским) поверхностям и высокая ресурсоемкость, а также сложность построения сетки разбиения для сцен со сложной геометрией или зеркальными свойствами поверхностей [5].

2.2 Методы, основанные на стохастической трассировке лучей

В основе этой парадигмы лежит моделирование путей распространения световых лучей, исходящих либо от источников света, либо от камеры, через сцену. Данный подход позволяет эффективно моделировать широкий спектр оптических явлений, включая зеркальные отражения, преломления, каустики, дисперсию и спектральные эффекты. Различные варианты трассировки лучей, такие как прямая трассировка (Forward (Monte Carlo Ray Tracing, FMCRT)), обратная (Backward Ray Tracing или Path Tracing) и двунаправленная (Bidirectional Path Tracing) [6], отличаются способом генерации и отслеживания траекторий распространения света. Все методы объединяет то, что они базируются на решении интегрального уравнения переноса излучения путем статистического формирования множества путей света [7, 8]. Это уравнение, также известное как уравнение рендеринга имеет вид:

$$L_0(x, \omega, \lambda) = L_e(x, \omega, \lambda) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega', \omega, \lambda) L_i(x, \omega', \lambda) (-\omega' \cdot n) d\omega', \quad (1)$$

где λ – длина волны света, $L_0(x, \omega, \lambda)$ – количество излучения с длиной волны λ , выпущенного из точки x вдоль направления ω , $\int_{\Omega} f_r(x, \omega', \omega, \lambda) L_i(x, \omega', \lambda) (-\omega' \cdot n) d\omega'$ – интеграл по полусфере входящего излучения, $f_r(x, \omega', \omega, \lambda)$ – двулучевая функция отражения (ДФО), описывающая характеристики процесса отражения света от поверхности, $L_i(x, \omega', \lambda)$ – сумма входящего излучения, зависящая от длины волны λ излучения, выпущенного в точку x по направлению ω' , $(-\omega' \cdot n)$ – скалярное произведение $-\omega'$ и нормали к поверхности n , характеризующее поглощение излучения при отражении.

Преимуществом трассировки лучей является ее способность к достижению высокого уровня физической корректности и универсальность в отношении типов материалов и геометрии сцены, вплоть до моделирования сложных оптических эффектов без необходимости предварительной дискретизации поверхностей. Однако высокая вычислительная сложность и статистический шум, возникающий вследствие стохастической природы метода, требуют значительных временных затрат и увеличения количества выборок для достижения требуемой точности.

3. Существующие программы моделирования освещенности

Существует множество программных решений для моделирования освещения, которые реализуют различные теоретические подходы, ориентируясь на специфические задачи и области применения. Среди инструментов, ориентированных на научные исследования и прецизионный анализ, выделяется Radiance [9]. Этот пакет является одним из самых влиятельных в области физически корректного моделирования; он использует метод обратной трассировки лучей и кэширование освещенности. На его основе реализованы специализированные системы, такие как DAYSIM [10], сфокусированная на анализе дневного света, и Evalglare [11], предназначенная для расчета показателей ослепленности. Эти программы часто используются в связке, предоставляют мощный инструментальный для комплексного светотехнического анализа, требуя при этом высокой квалификации оператора и значительных вычислительных ресурсов.

Коммерческие пакеты, такие как DIALux [12], ориентированы на более широкую инженерную аудиторию. DIALux использует гибридный подход [13], сочетающий модифицированный метод Radiosity для быстрых расчетов общего освещения с элементами трассировки лучей для финальной фотореалистичной визуализации. Такой подход обеспечивает приемлемое сочетание скорости и качества для типовых задач проектирования. Специализированные решения также играют важную роль. Velux Daylight Visualizer применяет многофакторный метод, включающий двунаправленную трассировку лучей и фотонные карты [14], для детального анализа естественного освещения в архитектурных

пространствах, особенно при моделировании проникновения света через окна. В то же время, инструменты, подобные VISSLA [15], фокусируются на более узких задачах, моделируя восприятие освещения людьми с нарушениями зрения, учитывая аберрации и рассеяние.

Каждая из существующих систем обладает своими сильными и слабыми сторонами, что определяет их применимость в конкретных задачах. Для задач, требующих высокой точности воспроизведения сложных оптических эффектов, и при строгой верификации соответствия физическим законам, как, например, при тестировании по стандартам CIE 171:2006, методы, основанные на стохастической трассировке лучей, часто демонстрируют большую достоверность по сравнению с упрощениями, присущими методу конечных элементов. Далее в статье будут подробно рассмотрены особенности системы Lumiscept, включая ее базовый вычислительный метод FMCRT, гибридные алгоритмы расчета естественного освещения, а также методику верификации ее работы в соответствии с требованиями стандарта CIE 171:2006.

4. Особенности системы оптического моделирования Lumiscept

4.1 Представление геометрии и пространственных структур ускорения

Геометрия сцены в системе Lumiscept [3] представлена в виде дискретных треугольных сеток. В отличие от систем, использующих аналитическое описание поверхностей, работа с треугольными сетками позволяет унифицировать алгоритмы пересечения лучей с объектами любой сложности. Для минимизации вычислительных затрат при обработке импортированных CAD-данных (из сред AutoCAD, Open Cascade и др.) на стадии загрузки производится адаптивная тесселяция. При необходимости аппроксимации гладких поверхностей система поддерживает дополнительное разбиение треугольников с интерполяцией координат промежуточных вершин.

Для обеспечения высокой скорости трассировки в Lumiscept реализована двухуровневая иерархическая структура ускорения на основе BSP деревьев [16]. Это критически важно при проведении верификационных тестов, требующих трассировки большого числа лучей (10^9 и более) для минимизации стохастического шума.

Архитектура трассировщика реализована на двух уровнях, что обеспечивает гибкость и масштабируемость для различных сценариев моделирования:

- **Верхний уровень (Top-level tracer):** На этом уровне BSP-дерево строится для ограничивающих объемов (AABB) отдельных объектов сцены. Это позволяет быстро отсекал пустые области пространства и определять с какими объектами сцены луч потенциально может пересечься.
- **Нижний уровень (Mesh-level tracer):** Внутри каждого отдельного геометрического объекта BSP-дерево строится для отдельных треугольников его сетки. Это позволяет эффективно находить точное место пересечения луча с поверхностью объекта.

Такое иерархическое разбиение пространства позволяет эффективно обрабатывать сцены как с малым, так и с экстремально большим количеством полигонов, оптимизируя поиск пересечений как на уровне крупных структур, так и на уровне их внутренней геометрии. Процесс трассировки луча включает эффективный обход BSP-дерева, при котором луч последовательно проверяется на пересечение с узлами разделения пространства. На конечном этапе происходит вычисление точного пересечения луча с треугольником, причем для повышения производительности применяются техники кэширования и оптимизации на уровне примитивов.

Использование тщательно спроектированного BSP-трассировщика является фундаментальным для достижения высокой скорости расчетов в методе FMCRT,

обеспечивая при этом необходимую точность для прохождения строгих тестов CIE, а также для сложных геометрических сцен, содержащих миллиарды треугольников.

4.2 Оптические параметры объектов в Lumiscept

Система оптического моделирования Lumiscept предоставляет возможности для задания самых разных оптических параметров источников освещения и объектов сцены, с которыми взаимодействуют лучи света. При этом следует заметить, что сцены из тестовых наборов CIE 171:2006 требуют очень ограниченный набор параметров. В частности, в сценах для тестов группы IV [1] предполагается только задание гониометрических диаграмм для источников освещения, и коэффициентов отражения поверхностей.

Параметры поверхности в системе Lumiscept позволяют задать коэффициенты отражения и преломления либо как заданные таблицами двунаправленные функции, которые представляют собой зависимости оптических свойств от угла падения луча света и угла наблюдения, либо интегральными значениями. В обоих случаях отдельно задаются коэффициенты для диффузной (рассеянной) и зеркальной (specular) компоненты отражения и преломления. Кроме этого, доступны также коэффициенты для дополнительных моделей отражения/преломления, например, модели Варда.

При подготовке расчетных моделей для верификации следует учитывать специфику описания материалов в различных разделах стандарта. В частности, в тестовых сценариях IV группы CIE 171:2006 параметры материалов характеризуются единственным коэффициентом отражения для каждой поверхности без уточнения вида функции распределения. В связи с этим, при адаптации сцен для этих сценариев, отражения принимались как исключительно диффузные. Для тестов из других групп набора CIE 171:2006, где компонентов указаны явно, такие допущения не требуются.

Источник света в системе Lumiscept может быть точечным, «прожектором», параллельным, площадным в виде поверхности определенной геометрической формы, либо заданным с помощью материала со свойством самосвечения, назначенного на ту или иную поверхность. Кроме этого, можно отдельно настроить дневное освещение. Для всех типов источников, кроме параллельного, возможно задать гониометрическую диаграмму, которая определяет угловое распределение светового потока. Мощность источника определяется либо через полный световой поток, либо через действительный радиометрический поток энергии (в ваттах), либо с помощью интенсивности света (для всех типов, кроме параллельного). Изменение любого из указанных параметров автоматически пересчитывает остальные параметры. Для материалов с самосвечением задается яркость или полный световой поток, который будет определяться с учетом всей площади поверхности данного материала.

В тесте 5.3 из набора CIE 171:2006 источник света указан в виде плоского прямоугольника. В системе Lumiscept его можно задать либо как собственно источник света прямоугольной формы, либо как прямоугольный геометрический объект с самосвечением. Мы тестировали оба варианта, при этом результаты тестирования оказались практически одинаковыми.

5. Особенности вычислительных методов, применяемых для расчетов в тестовых сценариях

Все вычислительные методы, применяемые в системе оптического моделирования Lumiscept, основаны на трассировке лучей с использованием стохастического выбора траектории луча. В процессе тестирования нами были испробованы несколько их разновидностей.

5.1 Прямая трассировка FMCRT и управление расчетом в Lumiscept

Основным вычислительным методом системы Lumiscept является метод прямой Монте-Карло трассировки лучей (FMCRT). Этот метод позволяет статистически воспроизводить

физический процесс переноса излучения, начиная от генерации света источниками, проходя через многочисленные взаимодействия (отражения, преломления, рассеивания) с объектами сцены и заканчивая регистрацией или поглощением. Исходные параметры лучей, такие как положение и направление, определяются стохастически в соответствии с характеристиками излучателей. Энергия фотонов уменьшается вдоль их траектории, что позволяет моделировать сложные оптические эффекты, включая каустику, диффузное переотражение и растекание цвета (color bleeding). Важно отметить, что протяженные источники света обрабатываются полностью методом Монте-Карло без их принудительного разбиения на набор точечных, что обеспечивает физическую корректность теней и освещенности.

Для получения значений освещенности в конкретных точках пространства в системе Lumiscept проще всего использовать так называемые виртуальные измерительные приборы. Они представляют собой поверхности различной формы и регистрируют лучи, пересекающие их. Поскольку с помощью стохастической трассировки невозможно получить точное значение освещенности в конкретной точке пространства за конечное время, то использовались прямоугольные виртуальные измерительные приборы. Их размеры были существенно меньше расстояния между соседними приборами.

На рис. 1 приведена визуализация сцены тестов IV группы из набора CIE 171:2006 в системе Lumiscept. Геометрия объектов во всех примерах этой группы одинаковая, а отличия сводятся только к параметрам поверхностей, а также к параметрам и положению источников света. На рис. 1 видна сетка из виртуальных измерительных приборов, используемых для регистрации лучей света.

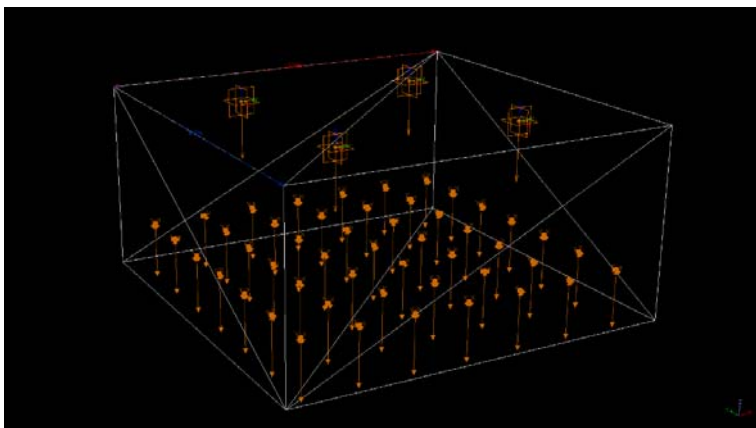


Рис. 1. Представление сцены для тестов IV группы в системе Lumiscept.
Fig. 1. Representation of scene for test cases of IV group in Lumiscept system.

5.2 Использование методов рендеринга для вычисления освещенности

Метод обратной трассировки лучей (Backward Ray Tracing, BRT), в том числе с использованием карт освещенности (Illumination maps), а также метод трассировки путей (Path tracing), как правило, используются не для вычисления значений освещенности в определенных точках, а для построения фотореалистичных изображений. Однако такие методы также можно использовать и при оптических расчетах. В этом случае в качестве сенсора используется изображение с виртуальной камеры с заранее настроенными параметрами. Для камеры, используемой в качестве сенсора, необходимо установить ортогональную проекцию. Она подразумевает, что угол обзора камеры определяет апертуру

как область, видимую перспективной камерой с тем же углом обзора и соотношением сторон видимой области в плоскости целевой точки. В случае ортогональной проекции наблюдатель находится на бесконечном расстоянии, а угловое разрешение, определяющее «пирамидальную» апертуру камеры, в отличие от перспективной проекции, здесь не имеет смысла. Угол обзора в случае ортогональной проекции используется только для определения пространственной апертуры (размеров изображения с камеры). Расстояние между целевой и начальной точками является фактическим и влияет на апертуру камеры.

Если все точки, в которых необходимо произвести измерение освещенности, находятся на одной плоскости (что справедливо для тестов IV группы CIE 171:2006), то рендеринг проводится единственный раз. Точку «положения камеры» и параметр «угла обзора», смысл которого для ортогональной камеры был объяснен выше, задают таким образом, чтобы все точки, для которых необходимо произвести измерения освещенности, помещались бы в область видимости камеры. Затем на изображении, полученном в результате рендеринга, выбираются пиксели, соответствующие искомым точкам. Благодаря использованию ортогональной проекции камеры, координаты пикселей на построенном изображении пропорциональны требуемым координатам точек измерения освещенности.

При получении освещенности в точке может быть использовано значение единственного пикселя. Однако для снижения влияния зашумленности построенного изображения может использоваться простая фильтрация, вычисляющая среднее значение нескольких пикселей вокруг требуемой точки. Практика показала, что достаточен размер окна фильтрации в 3-5 пикселей. На рис. 2 представлено изображение, полученное в результате рендеринга по методу трассировки путей, и использованное для получения значений освещенности в заданных точках.

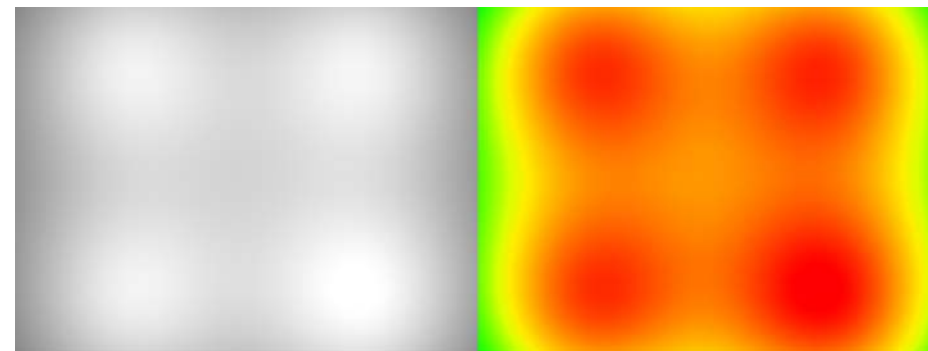


Рис. 2. Результат рендеринга, используемый для получения значений освещенности (справа – в режиме искусственных цветов).
Fig. 2. Rendering result used for obtaining illuminance values (right – in false colors).

После выполнения тестов оказалось, что при задании достаточной точности вычислений результаты для всех трех использованных методов примерно одинаковые и укладываются в требуемые диапазоны.

5.3 Параметры метода Монте-Карло трассировки лучей

В системе Lumiscept реализован гибридный режим расчета для карт освещенности и виртуальных измерительных приборов. В этом режиме прямая компонента (в частности, прямой солнечный свет) вычисляется аналитически для каждой вершины расчетной сетки или пикселя текстуры. Это исключает статистический шум на границах теней и гарантирует их четкость с последующим применением специализированного алгоритма теневого объема.

Непрямая же (отраженная) освещенность рассчитывается методом Монте-Карло трассировки лучей.

Статистическая природа FMCRT неизбежно приводит к появлению высокочастотного шума на результирующих картах освещенности, особенно в областях с недостаточным количеством зарегистрированных лучей. Для уменьшения этого эффекта в Lumisert можно регулировать уровень фильтрации результатов, который динамически подбирает параметры для разных областей изображения, а также выбирать алгоритм адаптивной пространственной фильтрации. Он работает путем динамического изменения радиуса сбора данных: если количество лучей, попавших в расчетную вершину, недостаточно для достижения заданного уровня точности, алгоритм анализирует соседние вершины в расширяющемся радиусе до тех пор, пока суммарный объем данных не достигнет статистического порога. После этого выполняется сглаживание освещенности по смежным треугольникам. Важно отметить, что данный метод фильтрации, эффективно подавляя визуальный шум, может приводить к сглаживанию локальных пиков освещенности. В связи с этим, при проведении верификационных тестов CIE, требующих фиксации экстремальных значений, уровень фильтрации был минимизирован, а требуемая точность достигалась за счет увеличения числа трассируемых лучей. Для настройки процесса расчета FMCRT и управления выходными данными в Lumisert предусмотрен диалог «Illumination Maps Calculation» показанный на рис. 3. Он предоставляет детальный контроль над моделированием, позволяя достичь необходимого баланса между скоростью вычислений и качеством получаемых карт освещенности.

Управление процессом расчета FMCRT осуществляется через ряд ключевых параметров. Пользователь может гибко задавать критерии остановки расчета, которые включают достижение определенного уровня запрашиваемой точности, лимиты по времени или по количеству выпущенных лучей. Также существует возможность остановки по соотношению не прямых попаданий, что позволяет прекратить вычисления при достижении неэффективности дальнейшего сбора данных. В процессе расчета отображается достигнутая точность и соответствующий график, отражающий сходимость решения. Система предоставляет обширную статистику по трассировке, включая количество выпущенных лучей, число попаданий и процент "убитых" лучей.

Результаты моделирования могут быть получены как в виде карт освещенности (illumination maps), так и с использованием виртуальных измерительных приборов (Observers), которые регистрируют суммарный световой поток в произвольных точках.

Гибкое управление всеми этими параметрами FMCRT, от настройки критериев остановки до уровней фильтрации и типа выходных данных, позволяет пользователям Lumisert адаптировать метод к требованиям различных задач, от быстрых предварительных расчетов до высокоточных симуляций, необходимых для научных исследований и верификации, включая строгие тесты CIE.

5.4 Статистическая достоверность и выбор генератора случайных чисел

Одной из ключевых задач тестов группы VI набора CIE 171:2006 является проверка статистической изотропности алгоритмов оптического моделирования через симметричность результатов. Под «симметричностью» в данном контексте понимается получение эквивалентных результатов (в пределах статистической погрешности) в сценах, содержащих повторяющиеся фрагменты геометрии, идентичные источники света и параметры материалов.

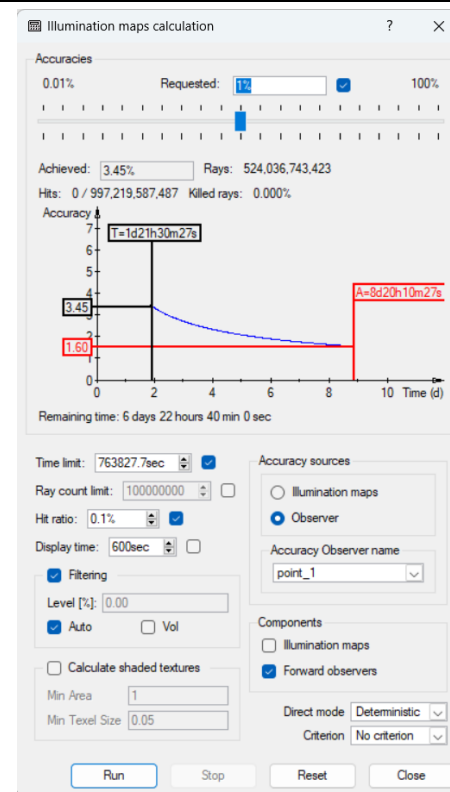


Рис. 3. Диалог параметров моделирования методом Монте-Карло.
Fig. 3. Monte-Carlo simulation parameters dialog.

Поскольку метод прямой трассировки Монте-Карло (FMCRT) опирается на стохастическое интегрирование, качество генератора случайных чисел напрямую влияет на равномерность распределения лучей и, как следствие, на сходимость результатов в симметричных зонах расчетной плоскости. Для обеспечения физической достоверности требуется, чтобы используемые последовательности обладали высокой степенью статистической независимости и периодом, исключающим циклическое повторение выборок в рамках одного расчетного цикла.

В системе Lumisert реализован программный алгоритм псевдослучайных последовательностей на базе метода Вихмана-Хилла [17, 18]. Данный алгоритм представляет собой комбинированный линейный конгруэнтный генератор, использующий три независимых модуля: 30269, 30307 и 30323. Такая реализация обеспечивает период последовательности порядка 6.95×10^{12} , что является достаточным для проведения высокоточных светотехнических расчетов.

В процессе верификации по тестам VI группы набора CIE 171:2006 был проведен сравнительный анализ эффективности использования аппаратных генераторов случайных чисел. В частности, рассматривалось использование инструкции RDRAND [19] для процессоров архитектуры x86-64, которая извлекает случайные значения непосредственно из

энтропийного источника внутри кристалла процессора. В ходе экспериментов были выявлены следующие критические недостатки аппаратного подхода:

- Вычислительная избыточность: Время выполнения инструкции RDRAND существенно превышает время выполнения программного алгоритма. В задачах трассировки миллиардов лучей обращение к аппаратному генератору становится «узким местом», значительно снижая общую производительность системы.
- Отсутствие детерминизма: Для этапа отладки алгоритмов и верификации по эталонным тестам CIE критически важна воспроизводимость результатов. Аппаратный генератор исключает возможность повторения идентичного расчета, что затрудняет поиск ошибок и анализ сходимости.
- Стабильность характеристик: Теоретически, физические процессы в полупроводниках (тепловой шум), используемые в HWRNG, могут коррелировать с изменением внешних условий, таких как температура процессора или напряжение питания. Хотя современные процессоры применяют постобработку для выравнивания распределения, программный алгоритм Вихмана-Хилла гарантирует строгое соблюдение математической равномерности вне зависимости от состояния аппаратной среды.

5.5 Особенности расчетов естественного освещения

Важной функциональной особенностью системы Lumiscept является возможность проведения комплексного анализа естественного освещения зданий [3, 20]. Система поддерживает расчет ключевых фотометрических метрик, таких как пространственная автономия дневного света (sDA) и годовая экспозиция солнечного света (ASE), определенных в стандарте IES LM-83-12 и являющихся базовыми для сертификации зданий по системе LEED [21]. Моделирование освещенности в данном контексте требует анализа состояния сцены для каждого часа в течение года (свыше 4000 расчетных моментов), что накладывает экстремальные требования к производительности вычислительного ядра.

Прямое использование метода трассировки лучей Монте-Карло (FMCRT) для каждого временного шага обеспечивает высокую точность, однако является вычислительно избыточным: полное годовое моделирование типового помещения может занимать более 30 часов процессорного времени. Для решения этой проблемы в Lumiscept реализован оптимизированный гибридный алгоритм, основанный на декомпозиции светового потока на три независимых компонента, каждая из которых обрабатывается с использованием специализированных математических подходов [22].

- Прямой солнечный свет. Данный компонент критически важен для расчета метрики ASE, так как он определяет зоны прямого освещения и потенциального визуального дискомфорта. В Lumiscept прямое освещение рассчитывается методом FMCRT для каждого положения солнца путем трассировки луча от измерительной точки непосредственно к источнику, что вычисляется достаточно быстро. Высокая точность данного расчета обеспечивается за счет отсутствия временной интерполяции: значения определяются для каждого требуемого момента времени без аппроксимаций.
- Косвенный солнечный свет. Отраженная компонента солнечного света менее чувствительна к малым изменениям положения источника. Для её ускорения используется сетка Клемса, разделяющая небесную полусферу на примерно 1000 равных участков (ячеек). Расчет освещенности производится только для вершин сетки, после чего для каждого из 4000 временных моментов итоговое значение

получается путем билинейной интерполяции между четырьмя ближайшими вершинами, умноженной на актуальный поток.

- Диффузное излучение небосвода. Для расчета вклада небосвода используется модель неба Переса. Благодаря линейности уравнения переноса излучения, освещенность в расчетной точке представляется как линейный функционал над гониограммой неба. В Lumiscept строится матрица отклика для разреженной сетки Клемса (~150 направлений). После однократного вычисления матрицы методом FMCRT, расчет освещенности для любого состояния неба сводится к суммированию произведений элементов матрицы на значения яркости неба в соответствующих узлах, что выполняется за миллисекунды.

Вопрос достоверности предложенного ускоренного метода решается в Lumiscept через иерархическую верификацию. На первом этапе верифицируется само вычислительное ядро FMCRT с использованием пакета тестов CIE 171:2006. В частности, сценарий 5.11, моделирующий освещенность внутри помещения от диффузного неба через оконный проем, рассчитывается в Lumiscept с применением полного метода Монте-Карло без использования сеток Клемса и аппроксимаций. Результаты показывают, что отклонение от аналитических эталонов CIE по точкам на полу, стенах и потолке составляет не более 1–2% (таблицы 8-10 в [22]), что подтверждает отсутствие алгоритмических ошибок в базовом алгоритме.

На втором этапе верифицируется точность самого гибридного метода (с использованием сеток Клемса и матриц отклика) путем его сравнения с результатами полного FMCRT на длительных периодах. Сравнительный анализ, проведенный для различных сезонов (зима, весна, лето, осень), показал, что расхождение в итоговых метриках sDA и ASE не превышает 1,4% при ускорении процесса расчетов более чем в 60 раз (с 30 часов до 30 минут для годового цикла).

Таким образом, высокая степень корреляции базового FMCRT с тестами CIE 171:2006 в сочетании с высокой сходимостью ускоренного метода с базовым FMCRT позволяет утверждать, что реализованный в Lumiscept алгоритм расчета естественного освещения является физически достоверным и корректным инструментом для фотометрического анализа.

6. Результаты тестирования

Корректная работа генератора случайных чисел проверялась в тестах 6.10 и 6.11 из набора CIE 171:2006. Данные тесты работают следующим образом. Тест 6.10 представляет собой простейшую комнату в форме куба со стороной 4 метра. Точечный источник света расположен в центре куба. У данного источника отсутствует гониометрическая диаграмма, и, таким образом, его световой поток равномерно распределен по всем направлениям. Соответственно, при работе алгоритма прямой трассировки лучей по методу Монте-Карло распределение вероятности направления луча для всех углов должно быть равномерным. Для регистрации освещенности вдоль каждой из граней куба были размещены виртуальные измерительные приборы, составляющие (для данной грани) сетку размерностью 10 на 10 приборов с одинаковым шагом. Результаты тестирования по данному сценарию в системе Lumiscept показали значения, соответствующие ожидаемым (отклонение не превысило 1%), как при отсутствии вторичных отражений (если материал всех граней полностью поглощает свет), так и при наличии вторичных отражений (в этом случае материал всех граней имеет коэффициент диффузного отражения, равный 0.5).

Тест 6.11 является более сложным. В данном тесте источник света расположен в центре потолка (на расстоянии 0.0001 от него) в комнате, имеющей форму параллелепипеда с размерами по 4 метра в горизонтальной плоскости и высотой 3 метра. Источник может содержать одну из трех гониометрических диаграмм: с осевой симметрией, с двусторонней

и с четырехсторонней симметрией. Таким образом, функция распределения вероятности лучей в зависимости от угла падения также должна иметь соответствующую симметрию. Результаты тестирования, пример которых показан на рис. 4 в виде изолиний освещенности, продемонстрировали корректную симметрию значений с отклонением не более 2%.

Во всех вышеописанных сценариях использовался программный генератор псевдослучайных чисел по алгоритму Вихмана-Хилла. Сравнительное тестирование показало, что использование этого алгоритма обеспечивает прохождение тестов на симметрию с точностью, не уступающей аппаратному источнику энтропии. С учетом значительно более высокой скорости работы и обеспечения повторяемости вычислений, использование аппаратного генератора RDRAND в ядре системы Lumiscept было признано нецелесообразным.

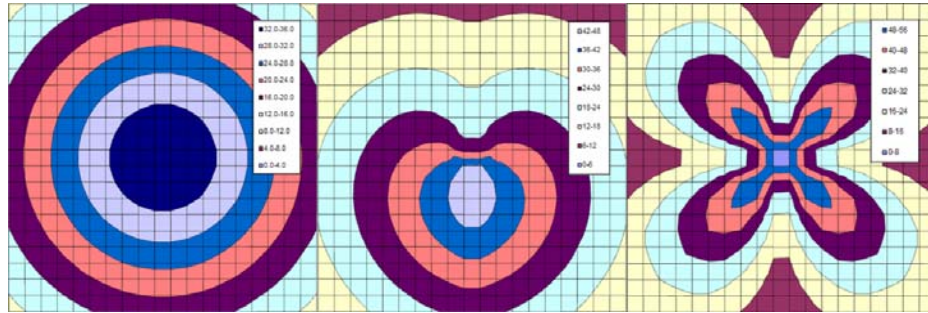


Рис. 4. Результаты тестов на симметричность вычислений (изолинии освещенности).
Fig. 4. Results of calculational symmetry testing with usage of random numbers generator.

На рис. 5 приведены графики результатов тестирования для теста 4.1 из набора CIE 171:2006. Сенсоры расположены в узлах сетки размером 7 на 7. Семь отдельных графиков представляют результаты для 7 сенсоров, находящихся на одной прямой. Цветными линиями представлены результаты моделирования в системе Lumiscept различными методами: зеленой линией – FMCRT с регистрацией света на виртуальных измерительных приборах, красной – FMCRT для расчета карт освещенности и BRT для использования камеры в качестве сенсора, синей – Path Tracing. Черные сплошные линии показывают максимально возможные верхнюю (самая верхняя линия) и нижнюю (самая нижняя линия) границы допустимых значений с учетом полной возможной погрешности, а черные пунктирные – верхнюю (вторая сверху) и нижнюю (вторая снизу) границы допустимых значений с учетом только измерительных ошибок.

На рис. 6 показано по одному графику (для одной линии из 7 сенсоров) для остальных сцен из IV группы. Так же, как и на рис. 5, цветными линиями представлены результаты моделирования в системе Lumiscept различными методами, а черные сплошные и пунктирные линии показывают границы допустимых значений.

На графиках рис. 5 и 6 цветные линии, соответствующие различным методам, практически сливаются в одну линию, что показывают схожесть результатов. Следует обратить внимание на то, что время выполнения до достижения заданной точности для всех описанных методов было примерно одинаковым. При этом результаты моделирования находятся в пределах допустимой ошибки (черные сплошные линии) и в границах измеренных данных (черные пунктирные линии). В табл. 1 приведены значения освещенности, рассчитанные в системе Lumiscept и усредненные по всем 49 точкам, а также усредненные верхний и нижний пределы допустимых значений. Видно, что вычисленные значения находятся в допустимых рамках.

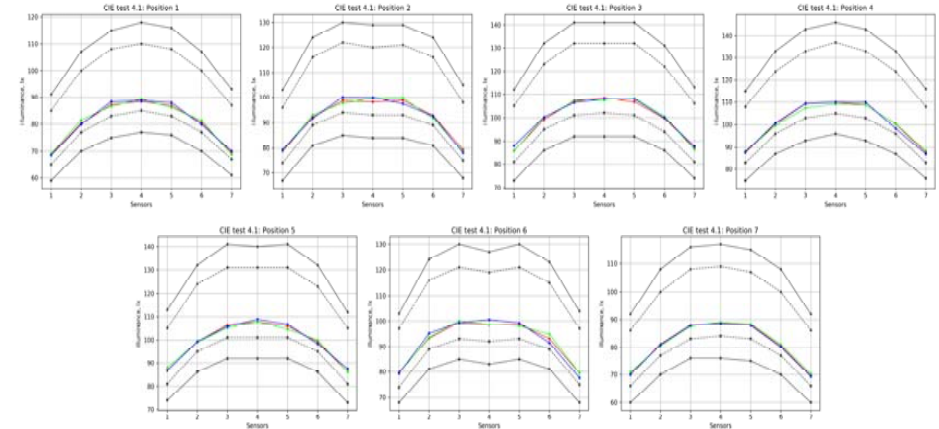


Рис. 5. Полные сравнительные результаты тестов всех методов для теста 4.1.
Fig. 5. Complete comparative testing results of all methods for 4.1 test case.

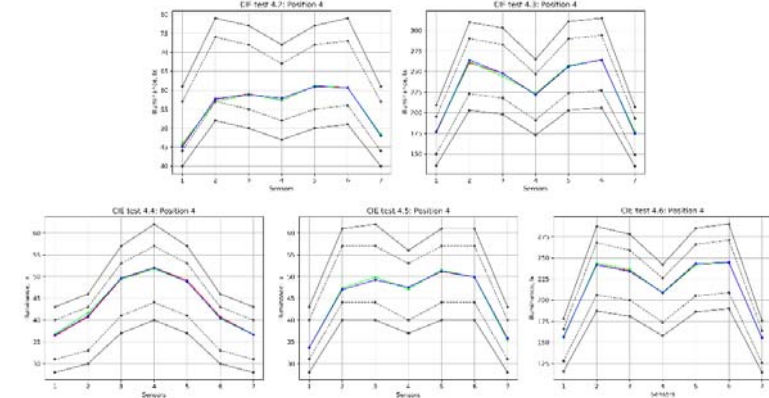


Рис. 6. Частичные сравнительные результаты тестов всех методов для тестов IV группы.
Fig. 6. Partial comparative testing results of all methods for the test cases of IV group.

Табл. 1. Усредненные значения для тестов IV группы.
Table 1. Averaged illuminance for the test cases of IV group.

Номер теста	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Верхний предел допустимых значений	112.0	67.5	254.2	37.5	51.1	228.5
Вычисленная средняя освещенность	91.3	65.5	234.8	36.0	43.1	212.7
Нижний предел допустимых значений	88.0	53.1	199.8	29.5	40.1	179.5

7. Заключение

Результаты тестирования для системы оптического моделирования Lumiscept, в целом, продемонстрировали корректное моделирование распространения света, при этом их точность не уступала результатам, полученным для других популярных систем. Из всех тестов только в 2% случаев ошибка превысила рубеж в 10%, который считается максимально приемлемым в инженерных расчетах. Следует также обратить внимание на сравнение результатов, полученных в системе Lumiscept для одних и тех же тестовых сценариев, но при использовании различных методов симуляции. Расчеты проводились прямой Монте-Карло трассировкой лучей с использованием виртуальных измерительных приборов, прямой Монте-Карло трассировкой лучей с использованием карт освещенности (с генерацией финального изображения при помощи обратной детерминистической трассировки лучей), а также трассировкой путей. Тестирование показало, что в целом результаты, полученные перечисленными способами, очень близки друг к другу. Незначительная разница в некоторых точках, по всей видимости, объясняется только стохастическим шумом и не выходит за допустимые пределы.

В целом, результаты тестирования доказывают, что все вычислительные методы системы Lumiscept обеспечивают физически корректное моделирование освещенности. Некоторые отдельные отклонения от допустимых значений (например, в тестах 4.2 и 4.6, подробно рассмотренные в работе [2]) будут являться предметом дальнейших исследований.

Список литературы / References

- [1]. Maamari F. et al. Reliable datasets for lighting programs validation – benchmark results. *Solar Energy*, 2005, vol. 79, no. 2, pp. 213-215. DOI: 10.1016/j.solener.2004.12.003.
- [2]. Бирюков Е.Д. и др. Верификация системы оптического моделирования Lumiscept по тестовым сценариям CIE 171: 2006. DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-305-318.
- [3]. Lumiscept – Hybrid Light Simulation Software. Available at: <http://www.integra.jp/en>, accessed 15.01.2026.
- [4]. Cohen M.F., Wallace J.R. Radiosity and realistic image synthesis. Morgan Kaufmann, 1993.
- [5]. Rushmeier H.E., Torrance K.E. Extending the radiosity method to include specularly reflecting and translucent materials. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 1990, vol. 9, no. 1, pp. 1-27. DOI: 10.1145/77635.77636.
- [6]. Frolov V.A. et al. Light transport in realistic rendering: state-of-the-art simulation methods // *Programming and Computer Software*, 2021, vol. 47, no. 4, pp. 298–326. DOI: 10.1134/S0361768821040034.
- [7]. Veach E. Robust Monte Carlo methods for light transport simulation. Stanford University, 1998.
- [8]. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically based rendering: From theory to implementation. MIT Press, 2023.
- [9]. Geisler-Moroder D., Dür A. Validation of radiance against CIE171: 2006 and improved adaptive subdivision of circular light sources. *Proceedings 7th International RADIANCE workshop*, Fribourg, 2008.
- [10]. Reinhart C., Breton P. F. Experimental validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and DAYSIM 3.0. *Leukos*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 7-35. DOI: 10.1582/LEUKOS.2009.06.01001.
- [11]. Pierson C., Wienold J., Bodart M. Daylight discomfort glare evaluation with Evalglare: influence of parameters and methods on the accuracy of discomfort glare prediction. *Buildings*, 2018, vol. 8, no. 8, pp. 94. DOI: 10.3390/buildings8080094.
- [12]. Mangkuto R.A. Validation of DIALux 4.12 and DIALux evo 4.1 against the Analytical Test Cases of CIE 171: 2006. *Leukos*, 2016, vol. 12, no. 3, pp. 139-150. DOI: 10.1080/15502724.2015.1061438.
- [13]. Kralikova R. et al. Design of Illumination and Lighting Visualization by Simulation Methods // *Dynamical Systems Theory and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 229-239. DOI: 10.1007/978-3-319-96601-4_21.
- [14]. Davoodi A., Johansson P., Enger J. Comparison of lighting simulation tools with focus on lighting quality. *Improving Energy Efficiency in Commercial Building Conference (IEECB'14)*, 2014, p. 15.
- [15]. Thaug J. et al. Visualization tool for increased quality of vision. *Proc. of ARCH12*. 2012.

- [16]. Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Галактионов В.А., Шапиро Л.З. Двухуровневая трассировка лучей и ее применение для интерактивной визуализации и оптического моделирования. *Информационные технологии в проектировании и производстве*, 2008, № 4, с. 81-88.
- [17]. Wichmann B.A., Hill I.D. Generating good pseudo-random numbers. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2006, vol. 51, no. 3, pp. 1614-1622. DOI: 10.1016/j.csda.2006.05.019.
- [18]. Сесин И.Ю., Нечаев В.В. Сравнительный анализ генераторов псевдослучайных чисел для решения задач рендеринга методом Монте-Карло. *International Journal of Open Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 10, pp. 34-40 (in Russian).
- [19]. Hamburg M., Kocher P., Marson M. E. Analysis of Intel's Ivy Bridge digital random number generator. 2012. Available at: https://cdn.atraining.ru/docs/Intel_TRNG_Report_20120312.pdf, accessed 25.03.2026.
- [20]. Barladian B.K., Voloboy A.G., Galaktionov V.A., Shapiro L.Z., Integration of realistic computer graphics into computer-aided design and product lifecycle management systems. *Programming and Computer Software*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 225-232. DOI: 10.1134/S0361768818040047.
- [21]. U.S. Green Building Council (USGBC). LEED v4.1 Building Design + Construction Guide, EQ Credit: Daylight. Available at: <https://www.usgbc.org/leed/v41>, accessed on 15.01.2026.
- [22]. Ershov S. et al. Virtual Light Sensing Technology for Fast Calculation of Daylight Autonomy Metrics. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 4, p. 2255. DOI: 10.3390/s23042255.

Информация об авторах / Information about authors

Михаил Сергеевич КОПЫЛОВ – младший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Сфера научных интересов: языки программирования, компьютерная графика, вычислительная оптика, трассировка лучей.

Mikhail Sergeevich KOPYLOV – junior researcher of Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS. Research interests: programming languages, computer graphics, computational optics, ray tracing techniques.

Елисей Дмитриевич БИРЮКОВ – младший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: физически точная и фотореалистичная компьютерная графика, трассировка лучей, лучевая оптика и программирование.

Elissey Dmitrievich BIRUKOV – junior researcher of Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS. Research interests: physically based, realistic computer graphics, ray optics, ray tracing techniques, programming.

Игорь Станиславович ПОТЕМИН – кандидат технических наук, ординарный доцент НИУ ИТМО. Область научных интересов: прикладная оптика, автоматизация проектирования оптических систем, расчет оптических систем, оптическое моделирование, системы дополненной и виртуальной реальности, оптические измерения.

Igor Stanislavovich POTEVIN – Cand. Sci. (Tech.), associate professor of ITMO University. Research interests: applied optics, automation of optical systems design, optical design, optical modelling, augmented and virtual reality systems, optical measurements.

Алексей Геннадьевич ВОЛОБОЙ – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, трассировка лучей, моделирование освещенности.

Alexey Gennadievich VOLOBOY – Dr. Sci. (Phys.-Math.), leading researcher of Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS. Research interests: realistic computer graphics, computational optics, ray tracing techniques, lighting simulation.