

Е.Н. САВКОВА,

к. т. н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» БНТУ

Н.Н. ГИЛЬ,

студентка кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» БНТУ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ОСВЕЩЕНИЯ



В последнее десятилетие стремительно развиваются технологии освещения: создаются новые источники света, светопропускающие и светораспределяющие средства и покрытия, обеспечивающие максимальный комфорт и энергосбережение. Расширяется строительство крупных торгово-развлекательных центров, предполагающих длительное пребывание в них людей, а также туннелей и других подземных объектов, постоянное освещение которых является необходимым условием. Интенсивнее применяются технологии светового дизайна. С одной стороны, многообразие современных световых приборов, материалов, технических и программных средств, встраиваемых в автоматизированные осветительные системы, предоставляет разработчикам широкие возможности, с другой стороны — обуславливает необходимость оптимизации выбора данных средств с учетом требований действующих ТНПА [1–5].

Одним из эффективных путей оптимизации световой среды является многопараметрическое компьютерное моделирование. Технологии компьютерного моделирования стремительно развиваются и уже находят применение в сфере дизайна помещений, оформительском деле, компьютерных играх (в виде реалистичных изображений). Светотехнические компании используют данные технологии в виде специальных программ при разработке проектов освещения. Однако существует ряд вопросов, касающихся достоверности результатов, остающихся в настоящее время не решенными. В частности, технологии компьютерного моделирования пока не обеспечивают доказательной основы сообщаемых значений световых параметров в различных точках пространства, следовательно, не могут использоваться разработчиками в качестве документированной информации при заключении договоров с заказчиками. Однако, учитывая постоянное совершенствование технических и программных средств, данное направление в будущем сможет существенно облегчить и ускорить процессы разработки внутреннего и наружного освещения.

Несмотря на то что программы компьютерного моделирования освещения достаточно просты в применении, алгоритмы, лежащие в их основе, предполагают знание принципов физической оптики, фотометрии, фотобиологических принципов зрительных и незрительных восприятий. Таким образом, отображение проектируемого пространства в виде «картинки» (цифрового изображения на видеотерминале) есть результат концентрированного опыта специалистов различных областей — светотехники, фотометрии, информационных технологий и измерительной техники.

В статье рассматриваются общие принципы проектирования световой среды на основе компьютерного моделирования, предложена обобщенная физическая модель освещения, приведены общие закономерности светотехнических расчетов и выделены вопросы, подлежащие дальнейшей разработке.

Освещаемое пространство как динамичная система. Оптимальное освещение воздействует на организм человека и эффективность выполнения производственных заданий, повышая производительность примерно на 15 % и снижая количество несчастных случаев. По мнению ведущих специалистов в области светотехники [6], наиболее комфортная световая среда для человека та, которая «не ощущается», то есть не доставляет дискомфорта в течение длительного пребывания в ней. Оптимальным решением является разработка адаптивных осветительных систем, которые бы учитывали особенности организма человека, управляя естественной и искусственной компонентами в течение дня. Современный уровень развития технических и программных средств позволяет проектировать и реализовывать такие системы. Последние научные открытия в области фотобиологии и медицины, касающиеся влияния света на незрительные (нейроповеденческие) функции организма человека, подтверждаемые результатами межлабораторных сравнительных экспериментов, дают основание говорить не просто о комбинированном управлении освещением и светозащитой, а о разработке «светотехнических сценариев», уже практикуемых ведущими мировыми специалистами.

При этом проектируемую сцену представляют в виде набора взаимодействующих переменных, объединенных в статичный и динамичный модули. К статичному модулю относят радиометрические показатели среды, определяемые структурой присутствующих материалов и покрытий — коэффициенты отражения, преломления, пропускания, яркости, блеск, колориметрические характеристики. Динамичный модуль представляет собой комбинацию показателей естественного и искусственного (общего и локального) освещения — сила света, освещенность, яркость, светимость и др. В свою очередь каждый показатель может быть разложен на составляющие. Например, естественное освещение внутри помещения зависит от географического пояса, времени суток, ориентации здания в пространстве, плотности застройки, светопроемов и т. д.

Для автоматизированного проектирования освещения с использова-

нием средств визуализации следует выделить все значимые факторы — переменные, относящиеся к статичному и динамичному модулям. Так, качество освещения рабочих мест определяется оптимальным комбинированием переменных во времени, отсутствием блескости и резких контрастов, достаточной и равномерно распределенной освещенности поверхности и окружающего пространства, отсутствием ослепляющего света, исключением резких и глубоких теней на освещаемых поверхностях.

Затем необходимо установить степень изменчивости переменных с учетом действующих норм, оценить их ковариацию (взаимозависимость), а затем методом подстановок смоделировать изображение проектируемой сцены. Такие изображения в публикациях получили название «реалистичных», поскольку они не обеспечивают в необходимой достоверности результатов. Однако это направление является стремительно развивающимся и перспективным, и при условии выполнения метрологической прослеживаемости в дальнейшем, возможно, будет широко использоваться проектировщиками.

Обобщенная физическая модель освещения. В сущности любую технологию трехмерного моделирования объектов можно считать моделированием освещения, поскольку на изображениях всегда присутствуют светотеневые границы и переходы. Современные автоматизированные технологии предполагают использование фундаментальных основ квантовой механики, физической оптики и высшей математики, а также относительно новых направлений — дискретной геометрии, 3D, возникновение которых обусловлено развитием индустрии обработки цифровых изображений. Программные продукты, такие как, например, V-Ray, ICC DevCop '08, XLProfiler, предоставляют широкие возможности работы с изображениями и основываются на алгоритмах быстрых преобразований Фурье и статистических квантовых моделях распространения света в пространстве.

Сущность технологий моделирования освещения, несмотря на их разнообразие, заключается в следующем. Как предлагается в [7, 8], регистрируемую сцену представляют как совокупность элементарных участков, самостоятельно излучающих и отражающих световые потоки энергии, падающие от других участков. Тогда энергию излучения элемента сцен

ны можно выразить как функцию от собственной излучательности участка, коэффициента отражения и энергии излучения другим элементом сцены. Если на наблюдаемой сцене выделить «зону интереса», разбить ее на $N \times M$ фрагментов A_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$, то можно получить так называемое n -мерное подпространство излучательности i -го фрагмента. Сигнал $i = b(x, y)$, снимаемый с каждого пикселя цифрового изображения, трактуется как функция яркости в координатах $(x; y)$ по трем цветовым каналам и отображается как точка или вектор, что придает ему геометрический смысл [9, с. 74]. Каждая рассматриваемая сцена рассматривается как конечное число отсчетов яркости, соответствующих определенным точкам пространства. Следовательно, при выбранном масштабе W каждому выбранному участку зоны будет соответствовать определенная группа элементов (пикселей) изображения. Полученная совокупность отсчетов яркости и соответствующие им пространственные координаты точек образуют пространство образов, описывающее свойства объекта. В результате изучения последних опубликованных работ [10, 11] в области моделирования осветительных систем можно кратко сформулировать положения физической модели освещения, положенной в основу современных технологий (рисунок 1) [12]:

- 1) каждой единичной области проектируемого трехмерного пространства соответствует определенная, ограниченная размерностью $N \times M$ в зависимости от выбранного масштаба, область (полигон) элементов цифрового изображения;
- 2) каждая единичная область проектируемого пространства представляет собой вторичный равнояркий излучатель;
- 3) любой элемент, принадлежащий полигону $N \times M$ цифрового изображения, имеет фотометрические и колориметрические характеристики, аналогичные другим элементам, принадлежащим данному массиву; и в пределах выделенной области яркость и цветность представляют собой многократно воспроизводимые величины.

Данная модель является основой для решения двух взаимно дополняющих задач: измерения параметров освещения на основе обработки цифрового изображения сцены и моделирования.

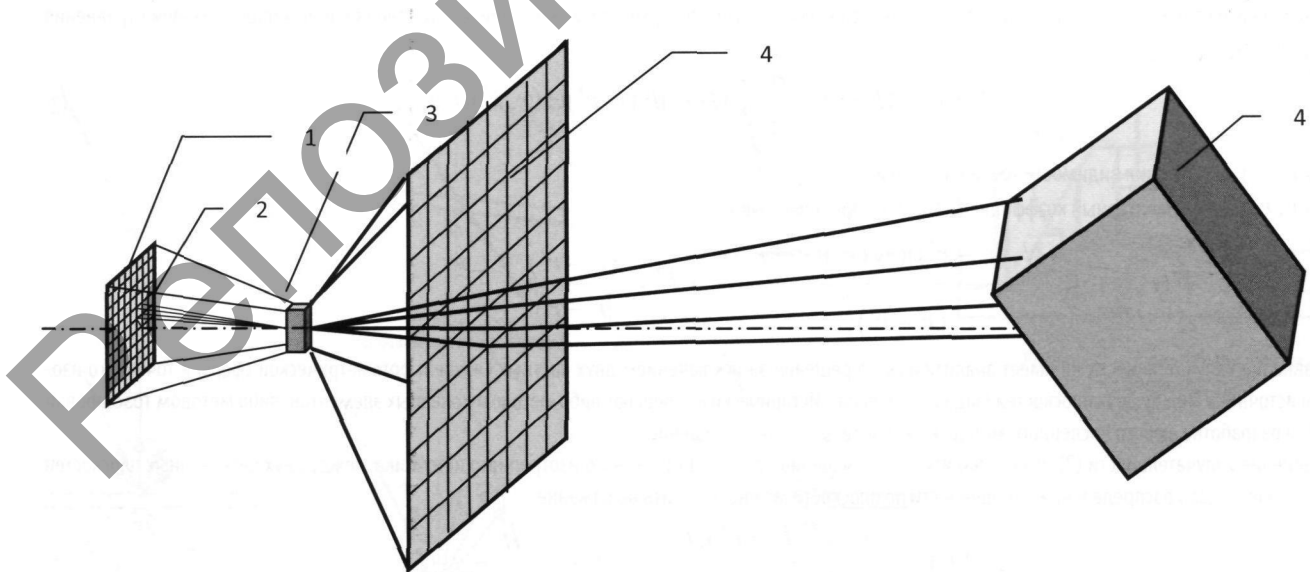


Рисунок 1 — Физическая модель формирования изображения трехмерного пространства на плоскости:

1 — плоскость цифрового изображения; 2 — полигон $N \times M$ пикселей цифрового изображения; 3 — фотоприемное устройство; 3 — подпространство образов; 4 — моделируемый трехмерный объект

Процесс создания реалистичных изображений объектов

основан на применении теории корпускулярно-волнового дуализма света. В работах, посвященных данной тематике, описываются методологии трассировки лучей (волновая теория) [13] и Монте-Карло (корпускулярная теория) [14], встречаются также синтезированные модели [15].

Укрупненно процесс создания реалистичных изображений объектов можно представить в виде следующей последовательности операций.

1. Выполнение геометрической «привязки» — приведение в соответствие пикселей цифрового изображения пространственным координатам.

С этой целью на изображении выделяют соответствующие полигоны пикселей, приписывая им определенные свойства, например, яркость, функцию изменения яркости и др. Для этого используют модели освещения и затенения Гуро, разработанные в 1971 году, которые позволяют представить на плоскости объект в трехмерном измерении (рисунок 2). Метод затенения по Гуро заключается в линейной интерполяции освещенности в пределах одного полигона, то есть участка поверхности, имеющего как минимум три вершины, лежащие в одной плоскости. Метод позволяет придать ощущение изогнутости для ровного полигона. Этот метод часто используется в различных дизайнерских решениях, направленных на зрительное зонирование и разделение пространства (рисунок 1) [13, 15].

2. Определение основных направлений лучей (рисунок 3) [16] — трассировка лучей с использованием законов линейной оптики. При

компьютерном моделировании используют «обратный» порядок хода лучей: они как бы исходят из объектива камеры к объекту.

3. Приписывание радиометрических свойств

поверхностям, присутствующих в перспективе сцены. Каждой поверхности присваивается совокупность коэффициентов поглощения, преломления и отражения, которые в дальнейшем будут использоваться как поправочные. При этом учитываются конкретные виды отражения, преломления и поглощения (диффузное, направленное, зеркальное и т. д.) (рисунок 4).

4. Приписывание излучательных свойств первичным источникам

(присутствующих в перспективе моделируемой сцены или вне ее). При этом используются их индикатрисы, как правило, приведенные в технической документации на конкретный тип источника света. Значения силы света в определенных направлениях будут использованы при моделировании как поправочные коэффициенты.

5. Построение фотонной карты освещаемой сцены.

Примеры фотонных карт приведены на рисунке 5 [16].

Фотонные карты строят на основе закона сохранения энергии и математической статистики, «бросая» определенные порции фотонов из источников по заданным направлениям трассировки лучей, как это, например, показано на рисунке 6 [15, 16].

6. Расчет интеграла освещенности

на основе уравнения глобального освещения, представляющего собой интегральное уравнение Фредгольма второго рода [11]:

$$L(r, \hat{I}) = L_0(r, \hat{I}) + \frac{1}{\pi} \int_{\Sigma} L'(r', \hat{I}') \sigma(r', \hat{I}, \hat{I}') F(r, r') \Theta(r, r') d^2 r', \quad (1)$$

где $L(r, \hat{I})$ — полная яркость поверхности с учетом ее отражения, пропускания и излучения;
 L_0 — яркость собственного излучения элемента поверхности (светильник);
 L' — яркость лучей падающего на поверхность излучения;
 $\sigma(r', \hat{I}, \hat{I}')$ — коэффициент яркости рассеяния света при направленном отражении.

Уравнение (1) не имеет аналитического решения. На практике для его решения делается допущение о том, что все элементы в сцене диффузны, тогда можно перейти от яркости к светимости и после перехода к интегралу по поверхности можно записать уравнение, получившее название уравнения излучательности:

$$M(r) = M_0(r) + \frac{\sigma}{\pi} \int_{\Sigma} M(r') F(r, r') \Theta(r, r') d^2 r', \quad (2)$$

где $\Theta(r, r')$ — функция видимости точки r' из точки r ;
 $F(r, r')$ — элементарный коэффициент формы, определяемый как:

$$F(r, r') = \frac{|(\hat{N}, (r - r'))(\hat{N}(r')(r - r'))|}{(r - r')^4}, \text{ а } \hat{I}' = \frac{(r - r')}{|r - r'|}.$$

Уравнение излучательности не имеет аналитического решения за исключением двух частных случаев: фотометрической сферы и точечного изотропного источника между двух плоскостей (задача Соболева). Исторически его решают либо методом конечных элементов, либо методом трассировки лучей. При разработке любого численного метода важно иметь эталонное решение.

Уравнение излучательности (2) имеет аналитическое решение для случая точечного изотропного источника между двух бесконечных плоскостей (задача Соболева). Для распределения освещенности по плоскости можно получить выражение:

$$E_1(r) = \frac{\rho_2}{\pi} \int \frac{E_2(r') d^2 r'}{(1 + (r - r')^2)^2} + \frac{h_1}{(h_1^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

где $E_1(r)$ — освещенность i -й плоскости в точке r ;
 h_1 — расстояние от источника до i -й плоскости;
 r — радиус-вектор точки плоскости из точки основания перпендикуляра, опущенного на плоскость из точки источника.

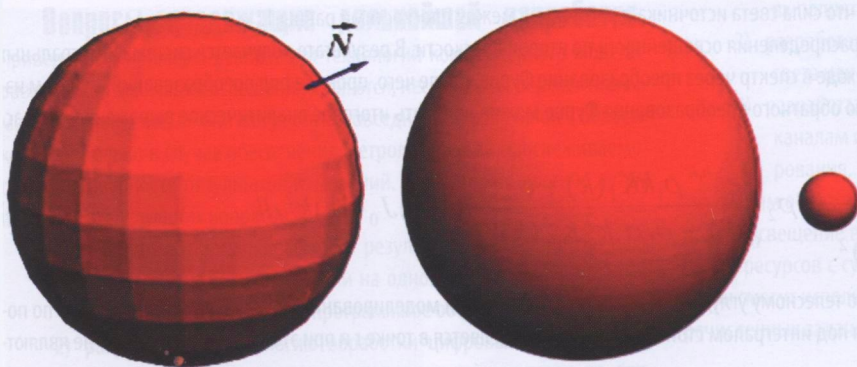


Рисунок 2 — Использование метода затенения по Гуро для зрительного получения объемного объекта

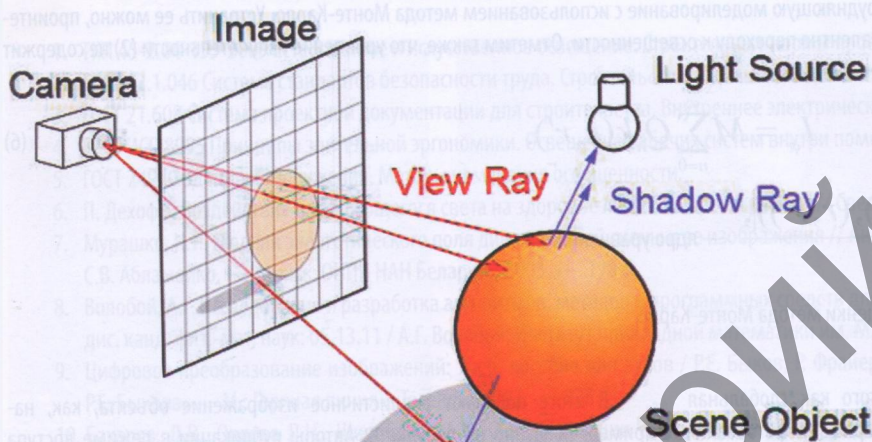


Рисунок 3 — Трассировка лучей

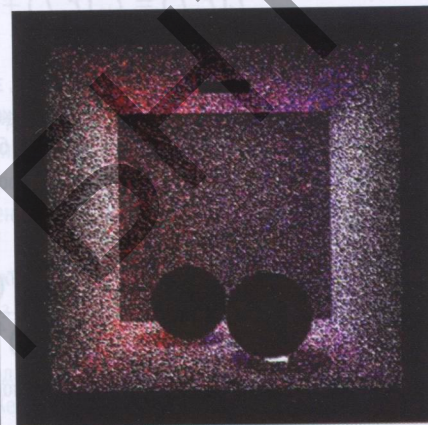
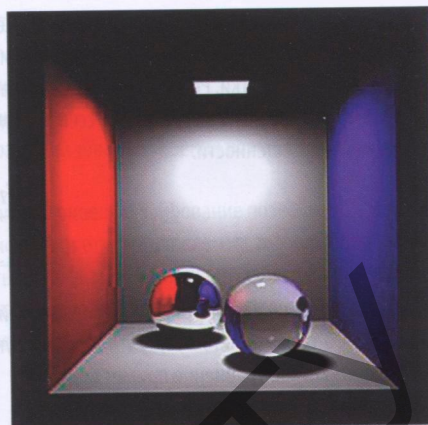


Рисунок 5 — Фотонные карты освещения

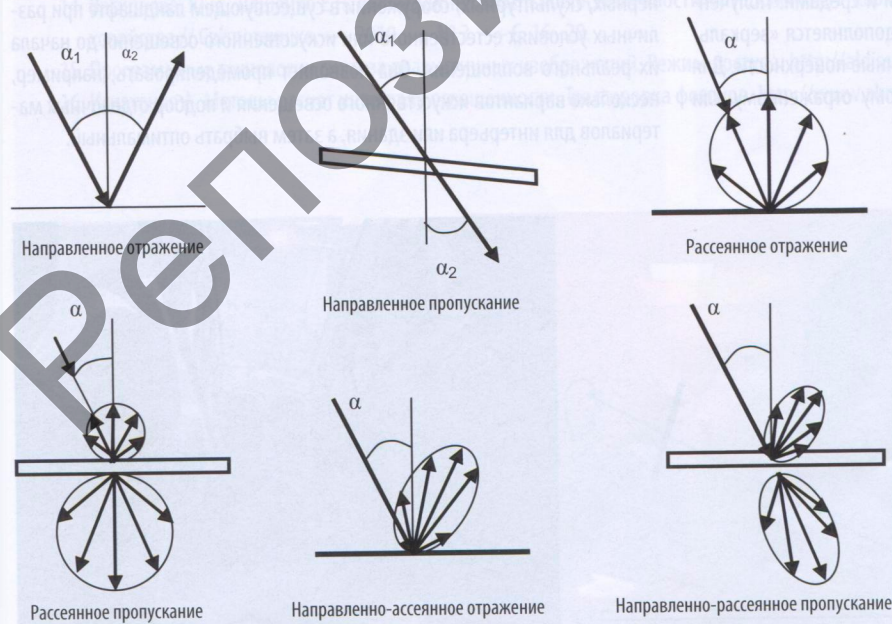


Рисунок 4 — Виды отражения, пропускания и поглощения

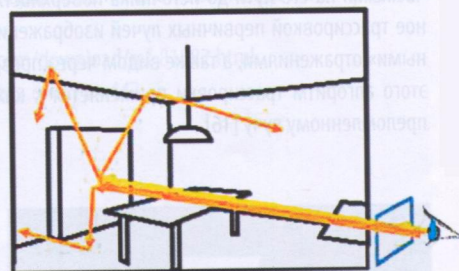


Рисунок 6 — Принцип построения фотонной карты

Выражение записано на основе предположения, что сила света источника и расстояние между плоскостями равны 1.

Аналогичное выражение можно получить и для распределения освещенности по второй плоскости. В результате получается система интегральных уравнений типа свертки. Решение их основано на переходе в спектр через преобразование Фурье. После чего, проведя ряд преобразований, с учетом известных соотношений для функций Бесселя с помощью обратного преобразования Фурье можно получить итоговое аналитическое выражение для распределения освещенности:

$$E_1(r) = \frac{h_1}{(h_1^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} + \rho_2 \int_0^{\infty} \frac{e^{-h_1 k} \rho_1 k K_1(k) + e^{-h_2 k}}{1 - \rho_1 \rho_2 k^2 K_1^2(k)} K_1(k) J_0(kr) k^2 dk. \quad (4)$$

В уравнении (1) интегрирование производится по телесному углу, что не является удобным при моделировании. Тогда, перейдя к интегралу по поверхности, а также с учетом того, что искомая функция под интегралом стоит в точке r' , а определяется в точке r и при этом переменные r' и r не являются независимыми, уравнение примет вид:

$$L(r, \hat{I}) = L_0(r, \hat{I}) + \frac{1}{\pi} \int L'(r', \hat{I}') \sigma(r', \hat{I}, \hat{I}') \delta(\hat{I}' - \frac{r - r'}{|r - r'|}) \frac{|(\hat{N}, \hat{I})| |(\hat{N}', \hat{I}')|}{(r - r')^2} d^2 r'. \quad (5)$$

Уравнение (5) содержит в себе δ -функцию, затрудняющую моделирование с использованием метода Монте-Карло. Устранить ее можно, проинтегрировав по поверхности, что физически будет эквивалентно переходу к освещенности. Отметим также, что уравнение излучательности (2) не содержит особенности. Соответственно, локальная оценка будет иметь вид:

$$I_{\varphi} = M \sum_{n=0}^{\infty} Q_n k(r, r'), \quad (6)$$

где $k(r, r') = \frac{|(N(r), (r, r'))| |(N(r), (r, r'))|}{(r - r')^4}$ — ядро уравнения.

Выражение (6) получило название локальной оценки метода Монте-Карло.

7. Обратная трассировка лучей. После того как глобальная освещенность сцены рассчитана методом Монте-Карло, ее фотореалистичное изображение можно построить с помощью детерминистического алгоритма обратной трассировки лучей. Алгоритм состоит в испускании в сцену через пиксели экрана одного или нескольких (первичных) лучей (рисунок 7). Если найдено пересечение луча с объектом сцены, то из точки пересечения в направлении каждого источника света испускаются лучи, отслеживающие затенение. Для незатененной области рассчитывается суммарный коэффициент поглощения света при взаимодействии с встречаемыми на его пути до источника поверхностями и средами. Полученное трассировкой первичных лучей изображение дополняется «зеркальными» отражениями, а также видом через прозрачные поверхности. Для этого алгоритм трассировки применяется к каждому отраженному или преломленному лучу [16].

В итоге получают реалистичное изображение объекта, как, например, показано на рисунке 8. Авторы публикации в режиме доступа <http://www.abronova.com/?p=442> продемонстрировали возможности программы моделирования V-Ray.

Создаваемые на основе этой методики программные комплексы нашли применение в сфере проектирования систем освещения зданий и других объектов городского строительства. Графическая система позволяет при разработке архитектурных и светотехнических решений увидеть, как будет выглядеть интерьер, здание или комплекс архитектурных (инженерных, скульптурных) сооружений в существующем ландшафте при различных условиях естественного или искусственного освещения до начала их реального воплощения. Она позволяет промоделировать, например, несколько вариантов искусственного освещения и подбор отделочных материалов для интерьера или здания, а затем выбрать оптимальный.

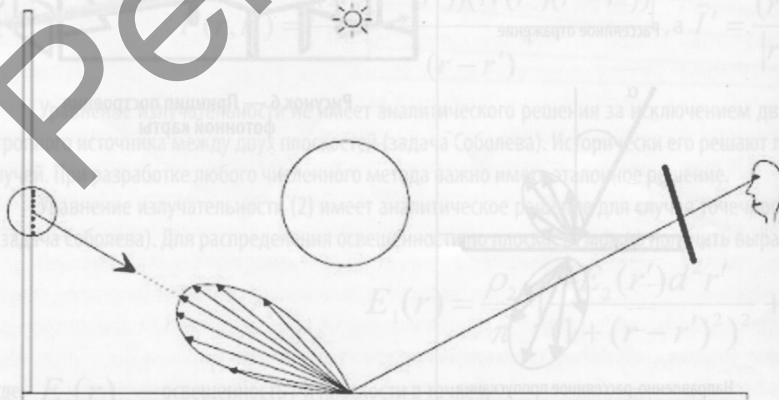


Рисунок 7 — Принцип обратной трассировки лучей



Рисунок 8 — Обратная трассировка лучей через глаз наблюдателя

Вопросы, подлежащие дальнейшей разработке.

Приведенные примеры реализации технологий компьютерного моделирования и оптимизации освещения являются, несомненно, перспективными направлениями, но они могут стать повседневной практикой в области контроля только в случае обеспечения метрологической прослеживаемости и достоверности результатов измерений. Этого можно достичь путем проработки следующих вопросов:

- 1) установить прослеживаемость результатов измерений до единиц системы СИ путем ссылки на однозначные или многозначные меры, встроенные в программное обеспечение;
- 2) разработать методологию обработки цифровых изображений, позволяющую расширять их динамический диапазон, то есть

выполнять экстраполяцию градаций яркости;

- 3) разработать условные шкалы, хранящие единицу яркости (силы света или освещенности);
- 4) разработать технологию пересчета яркости по трем цветовым каналам изображений для расширения возможностей моделирования.

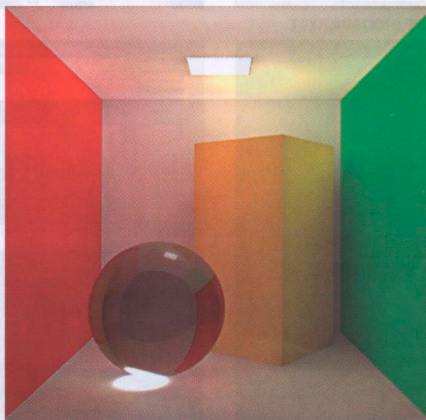
Таким образом, компьютерное моделирование позволяет оптимизировать освещение в зависимости от предъявляемых требований и имеющихся ресурсов с существенной экономией затрат. Однако данные технологии смогут использоваться в области контроля при условии решения перечисленных задач метрологического характера.

Библиография

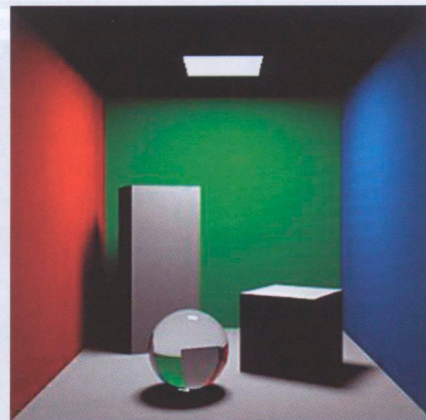
1. ТКП 45-2.04-153-2009 Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования.
2. ГОСТ 12.1.046 Система стандартов безопасности труда. Строительство. Нормы освещения строительных площадок.
3. ГОСТ 21.608 Система проектной документации для строительства. Внутреннее электрическое освещение. Рабочие чертежи.
4. ГОСТ ИСО 8995 Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений.
5. ГОСТ 24940 Здания и сооружения. Методы измерения освещенности.
6. П. Дехофф. Воздействие изменяющегося света на здоровье людей во время работы // Светотехника, 2006. — № 3. — С. 54–56.
7. Мурашко, Н.И. Модели энергетического поля динамической сцены и ее изображения // Анализ цифровых изображений: сб. научн. тр. / Под ред. С.В. Абламейко. — Минск: ОНПИ НАН Беларуси, 2003. — 198 с.
8. Волобой, А.Г. Исследование и разработка алгоритмов, методов и программных средств для задач синтеза реалистичных изображений: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / А.Г. Волобой; Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. — М. — 28 с.
9. Цифровое преобразование изображений: Учеб. пособие для вузов / Р.Е. Быков, Р. Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцветов; Под. ред. профессора Р.Е. Быкова. — М.: Горячая линия – Телеком, 2003. — 228 с.
10. Бахарев, Д.В., Орлова Л.Н., Широбоков А.Ф. О визуализации спектральной модели безоблачного неба и солнца // Светотехника, 2000. — № 4. — С. 30–34.
11. Макаров, Д.Н. Методы компьютерного моделирования осветительных установок. Автореферат диссертации. М., 2007.
12. Зуйков, И.Е., Савкова, Е.Н. Физическая и математическая модели измерения при автоматизированном контроле колориметрических характеристик объектов. Контроль, диагностика. — Москва: Изд-во «Спектр», 2010. — № 1. — С. 39–45.
13. A. Khodulev, E. Kopylov. Physically accurate lighting simulation in computer graphics software/Proc. GraphiCon'96 — The 6-th International conference on Computer Graphics and Visualization, St.Petersburg, 1996.
14. Васильева, Ю.О., Ляшенко Е.Н. Вычисление глобальной освещенности методом Монте-Карло. Харьковская национальная академия городского хозяйства // Світлотехніка. — 2010. — № 3. — С. 16–20.
15. Программные технологии синтеза реалистичных изображений. Режим доступа: <http://aldisser.com/download/ref-81582.html>.
16. Игнатенко А. Методы расчет интеграла освещенности. Трассировка фотонов. <http://www.abronova.com/?p=442>.



Полутоновое изображение смоделированного пространства методом Монте-Карло



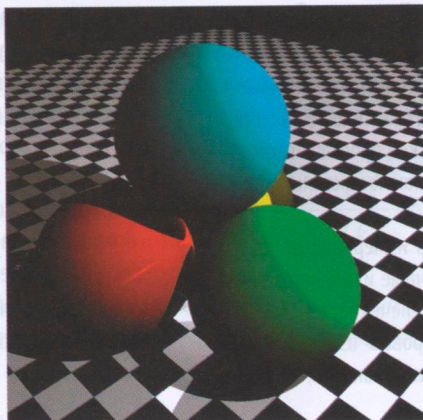
Виртуальные объекты, построенные с помощью компьютерной программы на основе модели освещения Гуро



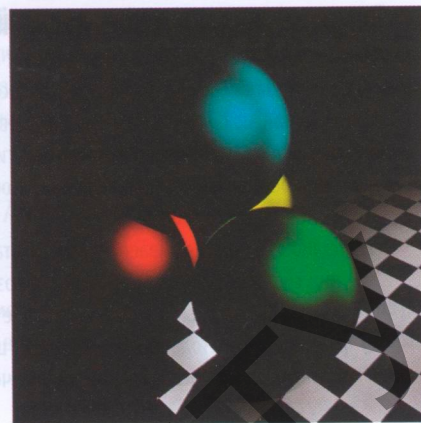
Виртуальные объекты, построенные с помощью компьютерной программы на основе модели затемнения Гуро



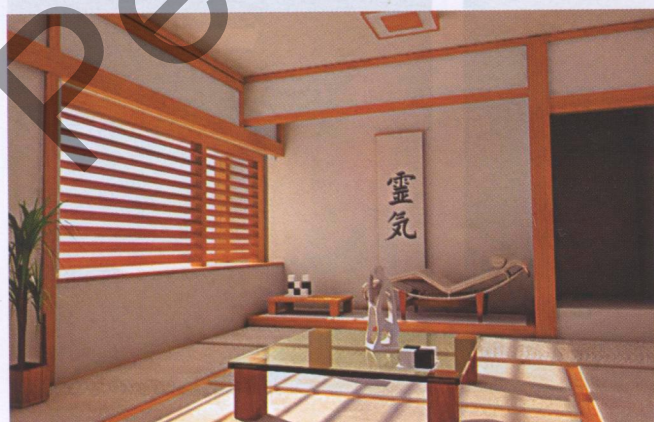
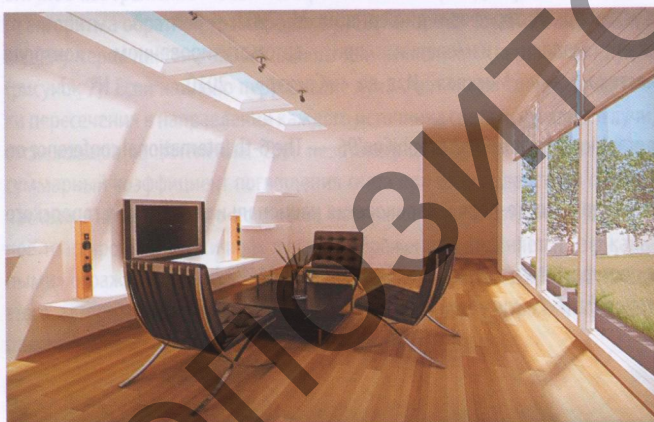
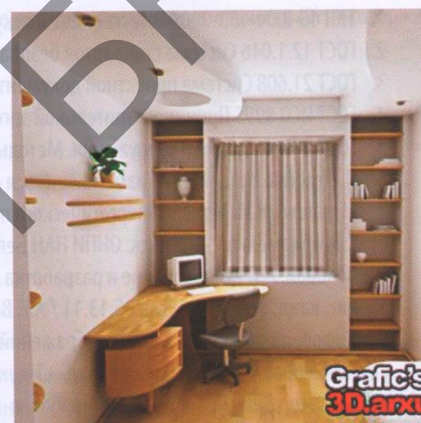
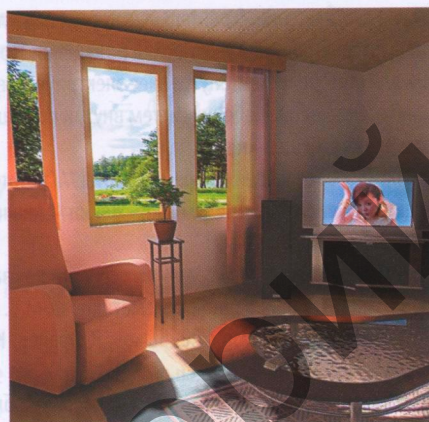
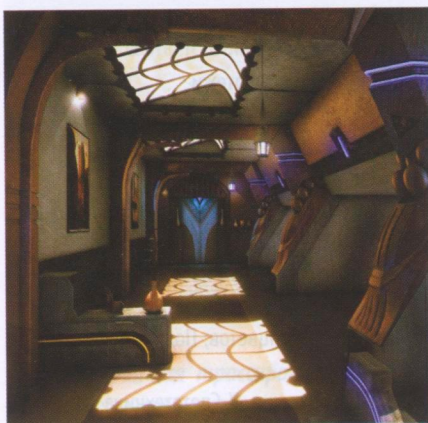
фотонные карты объектов, построенные для одного источника света



Модель объекта, построенная на основе закона распределения света Ламберта



Виртуальные объекты, построенные на основе модели Фонга



Примеры пространства с освещением, смоделированного с помощью компьютерных программ