УДК 378:004
DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-276-285

Расчетное ядро программы «Свет в ночи»: методы и сравнение с коммерческими аналогами

В. П. Будак[1,2], А. В. Гримайло[2], В. С. Желтов[2]
[1]НИУ «МЭИ», Москва, Россия
[2]Центр инновационных разработок МСК БЛ ГРУПП, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрена точность расчетного ядра САПР *«Свет в ночи»,* предназначенного для моделирования освещения как в помещениях, так и в наружных сценах. В ядре реализованы два метода расчета многократных отражений: фотонные карты и перспективный метод локальных оценок. Прямое освещение рассчитывается по закону обратных квадратов. Точность моделирования проверялась на двух задачах с известным аналитическим решением – задаче Соболева и расчете средней освещенности методом коэффициента использования. Результаты сопоставлялись с расчетами в DIALux и Lightscape. Показано, что при высоких коэффициентах отражения «Свет в ночи» демонстрирует значительно меньшие отклонения по сравнению с другими программами. В качестве направления развития авторы выделяют внедрение метода двойных локальных оценок, позволяющего напрямую вычислять яркость в произвольной точке сцены и направлении, а также разработку более точной модели отражения и применение методов машинного обучения.
***Ключевые слова*:** глобальное освещение, многократные отражения, фотонные карты, локальные оценки.

Computational Core of «Light in Night» Program: Methods and Comparison with Commercial Solutions

V. P. Budak[1,2], A. V. Grimailo[2], V. S. Zheltov[2]
[1]NRU «MPEI», Moscow, Russia
[2]Innovation Development Centre ILIC BL GROUP, Moscow, Russia

Abstract. This work examines the accuracy of the computational core of the CAD system Light-in-Night, designed for modelling lighting in both indoor and outdoor scenes. The core implements two methods for calculating multiple reflections: photon mapping and the progressive local illumination approach. Direct illumination is computed according to the inverse-square law. The accuracy of the modelling was verified using two test cases with known analytical solutions – Sobolev's problem and the calculation of average illuminance via the utilisation factor method. The results were compared with calculations performed in DIALux and Lightscape. It is demonstrated that for high reflectance coefficients, Light-in-Night exhibits significantly lower deviations compared to other software. As a direction for future development, the authors highlight the implementation of the double local estimation method, enabling direct computation of luminance at an arbitrary point and direction within the scene, alongside the development of a more accurate reflection model and the application of machine learning techniques.
***Keywords*:** global illumination, multiple reflections, photon maps, local estimations.

Введение

Программа автоматизированного проектирования *«Свет в ночи»* [1] сочетает развитый пользовательский интерфейс с гибкими средствами подготовки сцены: предусмотрена как интеграция с внешними редакторами (3ds max, Blender и др.), так и возможность создания сложной геометрии непосредственно во встроенном редакторе. Однако интерфейсные возможности служат лишь подготовительным этапом. Ключевое назначение системы – физически корректное моделирование глобального освещения, включая многократные отражения в сложных архитектурных и интерьерных сценах. В отличие от распространенных графических движков и визуализаторов, ориентированных преимущественно на реалистичную картинку, *«Свет в ночи»* разрабатывается как инженерный инструмент, обеспечивающий получение количественно точных результатов, пригодных для практического проектирования систем освещения.

Система автоматизированного проектирования *«Свет в ночи»* реализует физически корректное моделирование уравнения глобального освещения (УГО) [2]:

$$L(\mathbf{r},\hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r},\hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi}\int L(\mathbf{r},\hat{\mathbf{l}}')\sigma(\mathbf{r};\hat{\mathbf{l}},\hat{\mathbf{l}}')\,|(\hat{\mathbf{N}},\hat{\mathbf{l}}')|\,d\hat{\mathbf{l}}', \tag{1}$$

где $L(\mathbf{r},\hat{\mathbf{l}})$ – яркость светового поля в точке $\mathbf{r}$ по направлению $\hat{\mathbf{l}}$;

$\sigma(\mathbf{r};\hat{\mathbf{l}},\hat{\mathbf{l}}')$ – двунаправленная функция отражения или пропускания (BRDF или BTDF);

$L_0(\mathbf{r},\hat{\mathbf{l}})$ – яркость самосвечения;

$\hat{\mathbf{N}}$ – нормаль к элементу поверхности сцены в точке $\mathbf{r}$.

Как известно, данное уравнение не имеет аналитического решения, за исключением отдельных частных случаев в диффузном приближении, таких как фотометрическая сфера и задача Соболев [3]. Поэтому на практике применяются приближенные численные методы. Наиболее известные из них включают:

– метод конечных элементов (radiosity), реализованный в *Lightscape*, *DIALux* (версии 4.13), *Relux* [4];
– метод фотонных карт (photon maps) [5], лежащий в основе *DIALux evo*;

а также устаревшие инженерные подходы, такие как метод коэффициента использования.

Фотонные карты (ФК) представляют собой, по существу, один из вариантов прямого метода Монте-Карло, основанного преимущественно на умозрительных заключениях. Такой подход страдает от двух фундаментальных недостатков:

1) медленной сходимости;
2) усреднения результата по ячейке сетки, что ограничивает точность оценки в конкретной точке.

Эти особенности обусловливают постоянный интерес к совершенствованию методов Монте-Карло, и за последние десятилетия предложено множество модификаций, направленных на повышение их эффективности [6].

Одной из наиболее перспективных и строго обоснованных альтернатив, по мнению авторов, являются локальные оценки (ЛО) Монте-Карло, введенные в оригинальной работе [7]. В отличие от классических схем, они позволяют строить алгоритм, основанный на математически строгом решении УГО и обеспечивают:

– получение оценки яркости (а также любой интегральной характеристики светового поля) в конкретной точке сцены;
– учет вклада каждого первичного луча в итоговую оценку.

Это особенно важно для решения задач, требующих высокой точности и физической интерпретируемости результата.

Следует отметить ряд особенностей, характерных для большинства современных систем светотехнического проектирования.

Во-первых, хотя уравнение глобального освещения формулируется для яркости, нормировка этой величины практически применяется лишь в ограниченном числе прикладных сценариев, например в задачах дорожного или архитектурного освещения, где вклад многократных отражений невелик и может быть проигнорирован. Напротив, в задачах, где такие отражения критичны, нормируются уже интегральные величины, такие как освещенность.

Во-вторых, в большинстве существующих решений используется диффузная модель отражения. В случае radiosity это оправдано самой природой метода, поскольку он базируется на уравнении излучательности, полученном в диффузном приближении. Однако в системах вроде *DIALux evo* использование упрощенной модели, вероятно, связано с общепринятыми инженерными традициями, а не с ограничениями метода.

Заметим также, что уравнение (1) допускает выделение прямой компоненты освещения, которая может быть рассчитана независимо.

В рамках расчетного ядра *«Свет в ночи»* реализована гибридная схема:

– прямое освещение рассчитывается на основе закона обратных квадратов;
– учет многократных отражений может выполняться одним из двух методов:
  - фотонные карты с финальным сбором;
  - локальные оценки.

При этом у пользователя имеется возможность выбирать метод в зависимости от требований к точности и ресурсоемкости задачи.

Дальнейшие разделы настоящей работы посвящены описанию математических и алгоритмических решений, реализованных в расчетном ядре программы *«Свет в ночи»*, а также анализу результатов,

полученных с его помощью, в сравнении с существующими коммерческими средствами моделирования освещения.

Расчетное ядро

1. Расчет прямого освещения

Для расчета прямого освещения от источников в ядре применяется классическая модель, основанная на законе обратных квадратов:

$$E(\mathbf{r}) = \frac{I(\hat{\mathbf{l}})}{l^2} |(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}})| \tag{2}$$

где $E(\mathbf{r})$ – освещенность в точке $\mathbf{r}$;

$I(\hat{\mathbf{l}})$ – сила света источника в направлении $\hat{\mathbf{l}}$ расчетной точки $\mathbf{r}$;

$|(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}})|$ – косинус угла между нормалью к поверхности в точке $\mathbf{r}$ и направлением $\hat{\mathbf{l}}$.

Поскольку формула (2) предполагает точечную природу источника, в расчетном ядре реализована проверка ее применимости: если расстояние до источника оказывается меньше пятикратного размера самого источника, он автоматически разбивается на совокупность элементарных излучателей. Такое приближение позволяет корректно учитывать пространственную протяженность источника, в том числе при визуализации мягких теней.

2. Фотонные карты и финальный сбор

Одним из компонентов расчетного ядра является реализация метода фотонных карт – варианта прямого метода Монте-Карло для численного решения уравнения глобального освещения. В рамках этого подхода производится эмиссия фотонов от источников света с использованием выборки по значимости (importance sampling) [8], основанной на распределении силы света. Далее каждый фотон последовательно распространяется по сцене, отражаясь, преломляясь или поглощаясь в точках взаимодействия с поверхностями – выбор дальнейшего события осуществляется по методу русской рулетки (Russian roulette). Для отражения также применяется выборка по значимости.

В текущей версии ядра реализована диффузная модель отражения, однако архитектура алгоритма позволяет использовать произвольные BRDF, что делает подход потенциально расширяемым на более сложные материалы и сценарии.

Результаты трассировки фотонов сохраняются в структуре данных на основе kd-дерева. Для оценки освещенности $E(\mathbf{r})$ или яркости $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$ в произвольной точке сцены используется накопленная энергия фотонов, попавших в заданную окрестность этой точки:

$$E(\mathbf{r}) \approx \sum_{i=1}^{N} \frac{\Delta\Phi_i(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}')}{\Delta A}, \tag{3}$$

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) \approx \sum_{i=0}^{N} \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') \frac{\Delta\Phi_i(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}')}{\Delta A}, \tag{4}$$

где $\Delta\Phi_i(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}')$ – мощность *i*-го фотона, попавшего в (сферическую) окрестность исследуемой точки $\mathbf{r}$;

ΔA – площадь проекции окрестности на плоскость, касательную к поверхности сцены в точке $\mathbf{r}$;

$\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}')$ – двунаправленная функция отражения (коэффициент яркости).

Возможны две стратегии отбора фотонов: либо по фиксированному радиусу (что может привести к чрезмерному числу фотонов и замедлению), либо по фиксированному количеству (в этом случае радиус может вырасти и снизить точность в областях с низкой плотностью фотонов).

Такая чувствительность метода фотонных карт к плотности распределения фотонов в сцене делает актуальным применение техники финального сбора (final gathering), которая может быть использована в сочетании с любым методом расчета многократных отражений, основанным на решении уравнения глобального освещения.

Суть финального сбора заключается в дополнительной численной аппроксимации интегрального слагаемого уравнения (1) – синтетической итерации [9] – в заданной точке наблюдения. Так, если требуется определить яркость $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$, то на заключительном этапе вычисляется определенный интеграл по телесному углу:

$$\int L(\mathbf{r},\hat{\mathbf{l}})\,|(\hat{\mathbf{N}},\hat{\mathbf{l}})|\,d\hat{\mathbf{l}}. \tag{5}$$

Реализация этого интегрирования не представляет принципиальных трудностей: в точке $\mathbf{r}$ строится полусфера, ориентированная по нормали $\hat{\mathbf{N}}$, и разбивается на равные телесные элементы, вдоль осей которых испускаются вспомогательные лучи. В местах их пересечения с поверхностью сцены выполняется оценка яркости, основанная на данных фотонной карты.

Характерной особенностью метода в контексте его использования в ядре *«Свет в ночи»* является включение в фотонную карту как отраженных, так и первичных фотонов. Это позволяет учитывать вклад прямого света в рамках единой схемы и повысить эффективность сбора. Хотя прямой свет в принципе может быть рассчитан отдельно и явно учтен в процессе финального сбора, такой подход требует дополнительных ресурсов и снижает производительность. Использование фотонной карты для включения прямого освещения оказывается в данном случае предпочтительным с точки зрения баланса между точностью и скоростью расчета.

Метод фотонных карт отличается сравнительно высокой вычислительной затратностью. Для достижения удовлетворительной точности требуется генерация большого числа фотонов, что ограничивает его применимость в контексте практических задач, где важна скорость получения результата. Именно это обстоятельство обусловливает актуальность поиска альтернативных и более эффективных стратегий расчета глобального освещения, таких как метод локальных оценок, описанный далее.

1. Локальные оценки

В отличие от фотонных карт, метод локальных оценок основан на *строгом* решении уравнения глобального освещения (УГО) методом статистических испытаний. Такой подход позволяет получать оценку яркости непосредственно в заданной точке сцены, что существенно повышает эффективность вычислений при необходимости быстрого получения локальной информации о распределении характеристик светового поля.

Для корректного вывода расчетных формул необходимо несколько изменить исходную запись уравнения (1). Заметим, что выбор точек $\mathbf{r}_s$ и $\mathbf{r}'_s$ на поверхности сцены однозначно определяет направление луча $\hat{\mathbf{l}}'$ и, наоборот, направление луча из $\mathbf{r}'_s$ однозначно определяет точку пересечения $\mathbf{r}_s$. Учесть эту взаимосвязь можно, введя под интеграл δ-функцию и выполнив формальный переход от интегрирования по поверхности к интегрированию по объему. В результате уравнение (1) принимает вид [10]:

$$L(\mathbf{r}_s,\hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r}_s,\hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi}\int_{(V)} L(\mathbf{r}'_s,\hat{\mathbf{l}}')\,\sigma(\mathbf{r}_s;\hat{\mathbf{l}},\hat{\mathbf{l}}')G_s(\mathbf{r}_s,\mathbf{r}'_s)\,d^3r'_s, \tag{6}$$

где V – пространство сцены освещения;

$G_s(\mathbf{r}_s,\mathbf{r}'_s)$ – геометрический фактор яркости на поверхности:

$$G_s(\mathbf{r}_s,\mathbf{r}'_s) \equiv \frac{|\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_s)\cdot\hat{\mathbf{l}}'|}{(\mathbf{r}_s-\mathbf{r}'_s)^2}\,\Theta(\mathbf{r}_s,\mathbf{r}'_s)\,\delta\left(\hat{\mathbf{l}}' - \frac{\mathbf{r}_s-\mathbf{r}'_s}{|\mathbf{r}_s-\mathbf{r}'_s|}\right). \tag{7}$$

В этой форме УГО связывает пары точек $\mathbf{r}_s$ и $\mathbf{r}'_s$ с направлением луча $\hat{\mathbf{l}}'$, что позволяет применять методы решения интегральных уравнений, разработанные в рамках теории статистических испытаний. Следуя [10, с. 169–174], уравнение удобно записать в операторной форме:

$$L = L_0 + KL\,, \tag{8}$$

где K – интегральный оператор с ядром

$$k(\mathbf{x}'\to\mathbf{x}) = \frac{1}{\pi}\sigma(\mathbf{r}_s;\hat{\mathbf{l}},\hat{\mathbf{l}}')G_s(\mathbf{r}_s,\mathbf{r}'_s). \tag{9}$$

Для численного решения методом Монте-Карло вводится цепь Маркова с начальной плотностью $\pi(\mathbf{x})$ и переходной плотностью $p(\mathbf{x}'\to\mathbf{x})$. В процессе построения траекторий определяются вспомогательные веса:

$$Q_0 = \frac{L_0(\mathbf{x}_0)}{\pi(\mathbf{x}_0)}, \quad Q_i = Q_{i-1}\frac{k(\mathbf{x}_{i-1} \to \mathbf{x}_i)}{p(\mathbf{x}_{i-1} \to \mathbf{x}_i)}. \tag{10}$$

Основная оценка решения в виде функционала

$$I_h = (L,h) = \int L(\mathbf{x})h(\mathbf{x})\, d\mathbf{x} \tag{11}$$

получается как математическое ожидание по траекториям цепи:

$$I_h = (L,h) = \mathsf{M}\xi = \mathsf{M}\sum_{i=0}^{T} Q_i h(\mathbf{x}_i), \tag{12}$$

где M – оператор математического ожидания;

T – случайный номер последнего состояния.

Подробное описание практического алгоритма расчета методом локальных оценок приведено в работе [10].

Особенность метода локальных оценок заключается в возможности непосредственно вычислять яркость в интересующей точке сцены. Для этого достаточно положить $h_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}') = k(\mathbf{x}' \to \mathbf{x})$, где нижний индекс подчеркивает зависимость функции не только от переменной $\mathbf{x}'$, но и от фиксированной точки $\mathbf{x}$. В результате получаем локальную оценку:

$$L(\mathbf{x}) = \mathsf{M}[\sum_{i=0}^{T} Q_i k(\mathbf{x}_i \to \mathbf{x})] + L_0(\mathbf{x}). \tag{13}$$

Заметим, что ядро $k(\mathbf{x}' \to \mathbf{x})$ содержит δ-функцию. Однако это не препятствует применению метода, поскольку можно показать, что аналогичные δ-функции содержатся и в плотностях $\pi(\mathbf{x})$ и $p(\mathbf{x}' \to \mathbf{x})$.

Возникающие из-за наличия в ядре УГО сингулярности вида $1/(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_s')^2$ последствия могут быть устранены путем [12] усреднения искомой величины в окрестности исследуемой точки $\mathbf{r}_s^* = \{\mathbf{r}_s : |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_s'| < \varepsilon\}$. При этом усреднение выполняется лишь тогда, когда расстояние между текущей точкой столкновения и исследуемой точкой $|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_s'|$ оказывается меньше заданного порогового значения. Такой подход позволяет избежать нежелательных артефактов, вызванных сингулярностью, и при этом не нарушает ключевого достоинства метода – возможности вычислять требуемую величину непосредственно в указанных точках сцены.

В отличие от фотонных карт, где требуется поиск ближайших фотонов в специализированной структуре данных, метод локальных оценок не использует подобных процедур. Вместо этого результаты трассировки хранятся в виде списка всех точек соударения лучей. Основным фактором, увеличивающим время счета, становится необходимость проверять видимость расчетной точки относительно всех сохраненных точек соударения лучей со сценой. Тем не менее возможность напрямую получать значение искомой величины в заданных точках без дополнительной аппроксимации делает локальные оценки предпочтительными в задачах, где важна высокая точность локальных расчетов.

Сравнение с аналогами

Для объективной оценки точности моделирования светораспределения необходимо использовать задачи, для которых существует точное аналитическое решение. В контексте уравнения глобального освещения таких задач крайне мало: это фотометрическая сфера и задача Соболева. Первая ввиду полной симметрии малоинформативна при анализе пространственного распределения освещенности и подходит лишь для проверки корректности реализации базовых физических законов. Тем не менее с рядом оговорок, о которых будет сказано далее, к числу эталонных можно отнести также задачу по расчету средней освещенности поверхности параллелепипеда методом коэффициента использования.

1. Задача Соболева

Задача Соболева традиционно рассматривается в светотехнике и компьютерной графике как один из наиболее строгих тестов корректности учета многократных отражений. В ней моделируется точечный изотропный источник света, расположенный между двумя бесконечными параллельными диффузными плоскостями. Для этой конфигурации существует точное аналитическое решение в виде распределения освещенности на каждой из плоскостей:

$$E_1(r) = \frac{h_1}{(h_1^2 + r^2)^{3/2}} + \rho_2 \int_0^\infty \frac{e^{-h_1 k} \rho_1 k\ K_1(k) + e^{-h_2 k}}{1 - \rho_1 \rho_2 k^2\ K_1^2(k)} K_1(k) J_0(kr) k^2\ dk, \tag{14}$$

где $E_i(r)$ – освещенность *i*-й плоскости на расстоянии r от источника;

ρ_i – коэффициент отражения *i*-й плоскости;

h_i – расстояние от *i*-й плоскости до источника;

$K_1(k)$ – модифицированная функция Бесселя чисто мнимого аргумента (функция Макдональда первого порядка);

$J_0(k)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Первое слагаемое в этой формуле описывает прямую составляющую освещенности, второе – вклад многократно отраженного света.

Для оценки точности расчетов задача Соболева была смоделирована в программах *DIALux evo* и «*Свет в ночи*». Результаты были сопоставлены с аналитическим решением, а также с данными программы *Lightscape 3.2*, которая, несмотря на прекращение развития в начале 2000-х годов, до сих пор рассматривается как один из эталонов точности [13]. На рисунке 1 представлены графики распределения освещенности, полученные всеми тремя программами, в сравнении с аналитическим решением; там же указано время счета для каждой программы.

Параметры расчета в программе *«Свет в ночи»* были выбраны таким образом, чтобы длительность вычислений совпадала с временем выполнения в *DIALux evo*, где отсутствует возможность управлять настройками точности. В случае *Lightscape*, реализующей иной метод (radiosity), параметры выбирались с ориентацией на достижение сопоставимой точности с результатами «Свет в ночи». Для количественной оценки точности моделирования в задаче Соболева были рассчитаны три статистических показателя: средняя относительная погрешность среднее квадратическое отклонение σ и коэффициент корреляции Пирсона r. Расчеты выполнялись по пяти контрольным точкам, показанными на графиках рисунка 1. Итоговые значения перечисленных показателей для всех рассматриваемых программ сведены в таблицу 1.

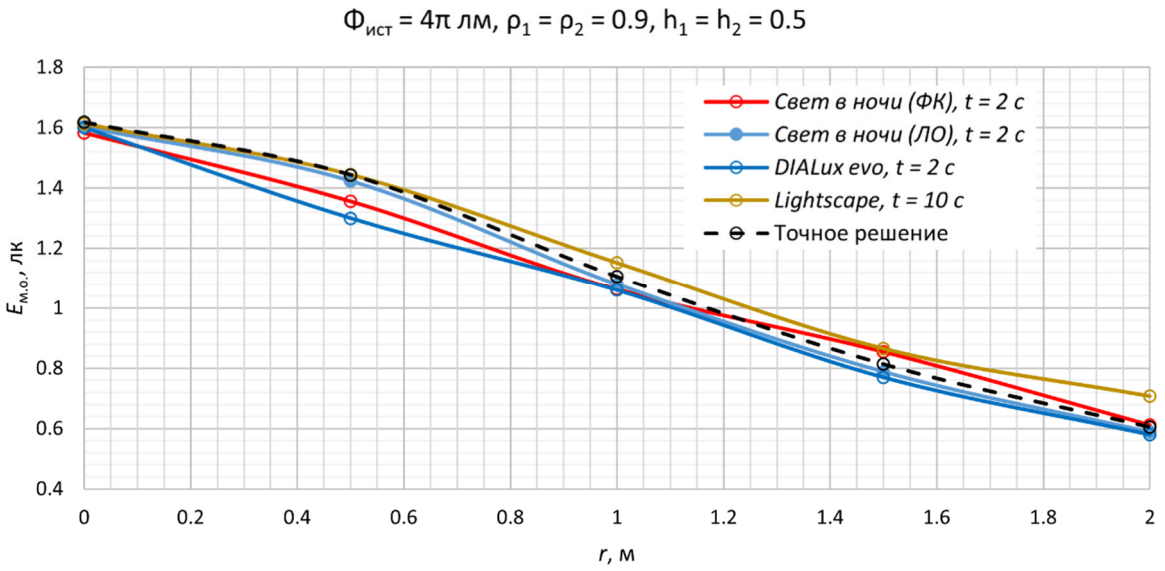

Рисунок 1. Распределение освещенности в задаче Соболева

Таблица 1. **Сравнение точности решения задачи Соболева в *«Свет в ночи»*, *DIALux* и *Lightscape***

Программа	*Свет в ночи* (ФК)	*Свет в ночи* (ЛО)	*DIALux*	*Lightscape*
$\bar{\delta}$, %	3.64	2.14	4.97	5.55
σ, лк	0.0496	0.0214	0.0717	0.0552
r	0.9963	0.9999	0.9931	0.9995

Как видно из приведенных данных, все три программы продемонстрировали сопоставимый уровень точности при решении задачи Соболева: коэффициент корреляции Пирсона во всех случаях близок к единице, а средняя относительная погрешность не превышает 6 %. Тем не менее *Lightscape* потребовалось примерно в пять раз больше времени на расчеты по сравнению с *DIALux evo* и *«Свет в ночи»*. Кроме того, при одинаковых временных затратах *«Свет в ночи»* показала несколько лучшие значения статистических показателей, чем *DIALux evo*, что делает ее более предпочтительной в практическом применении для подобных задач.

2. Аналитическое решение УГО для параллелепипеда

До широкого распространения специализированного программного обеспечения, учитывающего многократные отражения, расчет освещенности в помещениях выполнялся с использованием упрощенных инженерных методов. Наиболее известным из них был метод коэффициента использования, в рамках которого освещенность определялась через коэффициент u, равный отношению светового потока, падающего на расчетную поверхность, к полному потоку осветительного прибора. При этом помещение представлялось в виде прямоугольного параллелепипеда с диффузными стенами, потолком и расчетной поверхностью, которая в частном случае совпадала с полом. Такая постановка задачи имеет точное аналитическое решение, приведенное, в частности, в [14]. Следовательно, расчет средней освещенности на одной из граней параллелепипеда (как правило, на расчетной поверхности) может рассматриваться как еще один пример аналитического решения уравнения глобального освещения. Для наглядности ниже кратко изложены основные этапы этого решения.

Световой поток на каждой из поверхностей параллелепипеда складывается из прямой компоненты, поступающей от светильников, и отраженной, приходящей от остальных поверхностей. Математически это выражается как

$$\Phi_i = \Phi'_i + \sum_{k=1}^{6} \Phi_k \rho_k u_{ki}, \tag{15}$$

где Φ'_i – прямая составляющая светового потока, падающего на грань i;

Φ_i – световой поток, установившийся на гранях в результате многократных отражений;

ρ_k – коэффициент отражения грани k;

u_{ki} – коэффициент использования светового потока, определяющий долю потока грани k, падающего на грань i.

Для упрощения расчетов стены можно рассматривать как одну обобщенную отражающую поверхность с коэффициентом отражения $\rho_с$. При этом необходимо учитывать потери светового потока, возникающие при переотражении внутри этой поверхности. Эти потери описываются с помощью коэффициента многократных отражений:

$$\gamma_с = \frac{1}{1 - \rho_с (1 - u_{с.п.} - u_{с.р.})}, \tag{16}$$

где $\rho_с$ – коэффициент отражения стен;

$u_{с.п.}$ – коэффициент использования светового потока стен относительно потолка;

$u_{с.р.}$ – коэффициент использования потока стен относительно расчетной плоскости.

С целью дальнейшего упрощения расчета вогнутую поверхность, образованную потолком и участками стен выше плоскости световых центров осветительных приборов, заменим на эквивалентную плоскую поверхность с аналогичными отражающими свойствами. Ее эффективный коэффициент отражения можно выразить следующим образом:

$$\rho_ф = \frac{\rho_{ср} u_ф}{1 - \rho_{ср}(1 - u_ф)}, \tag{17}$$

где $\rho_{ср}$ – средневзвешенный по площади коэффициент отражения вогнутой поверхности;

$u_ф$ – коэффициент использования светового потока рассматриваемой поверхности относительно выходного отверстия.

Установившиеся световые потоки на каждой из поверхностей параллелепипеда описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_ф = \Phi'_ф + \Phi_с \rho_с u_{с.ф.} + \Phi_р \rho_р u_{р.ф.}, \\ \Phi_с = \gamma_с (\Phi'_с + \Phi_ф \rho_ф u_{ф.с.} + \Phi_р \rho_р u_{р.с.}), \\ \Phi_р = \Phi'_р + \Phi_ф \rho_ф u_{ф.р.} + \Phi_с \rho_с u_{с.р.}, \end{cases} \quad (18)$$

где $\Phi'_ф, \Phi'_с, \Phi'_р$ – прямой световой поток от ОП, падающий соответственно на фиктивную плоскость, стены и расчетную плоскость;

$\Phi_ф, \Phi_с, \Phi_р$ – световые потоки, установившиеся в результате многократных отражений.

Разрешая эту систему уравнений относительно $\Phi_р$, получаем выражение для светового потока, установившегося на расчетной плоскости:

$$\Phi_р = A\Phi'_ф + B\Phi'_с + C\Phi'_р, \quad (19)$$

где

$$A = \rho_ф [u_{ф.р.} + \gamma_с \rho_с (1 - u_{ф.р.})^2 \varphi / 2] / D, \quad (20)$$

$$B = [\gamma_с \rho_с (1 - u_{ф.р.})(1 + \rho_ф u_{ф.р.}) \varphi / 2] / D, \quad (21)$$

$$C = [1 - \gamma_с \rho_ф \rho_с (1 - u_{ф.р.})^2 \varphi / 2] / D, \quad (22)$$

$$D = 1 - [\rho_ф \rho_р u^2_{ф.р.} \rho_с + \gamma_с (1 - u_{ф.р.})^2 (2\rho_ф \rho_р u_{ф.р.} + \rho_ф + \rho_р) \varphi / 2]. \quad (23)$$

Прямые световые потоки могут быть рассчитаны с помощью различных методик [14]. В данной работе для аналитического расчета применялся метод зональных множителей Джонса и Нейдхарта.

3. Средняя освещенность основания параллелепипеда

Рассмотрим прямоугольное помещение размерами 10×10 м и высотой 4 м. Все внутренние поверхности считаются диффузными и обладают одинаковым коэффициентом отражения ρ. На потолке с равномерным шагом размещено 100 светильников, каждый из которых имеет световой поток 1800 лм и распределение силы света, представленное на рисунке 2.

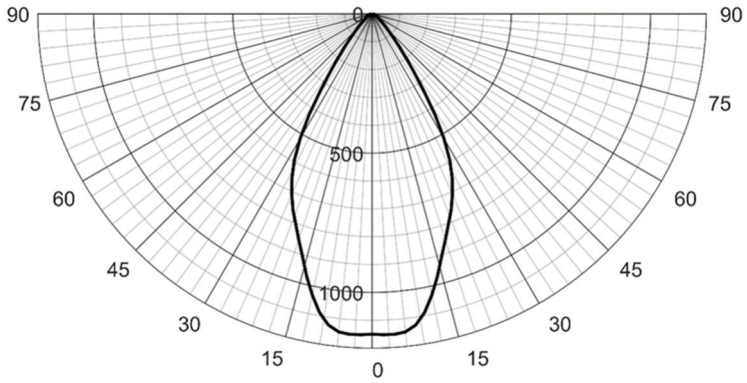

Рисунок 2. Кривая силы света светильника в рассматриваемой сцене

Сцену воспроизвели в программах *«Свет в ночи»*, *DIALux* и *Lightscape* для моделирования многократных отражений и вычисления средней освещенности $\bar{E}$ пола (основания параллелепипеда) при разных значениях коэффициента отражения поверхностей ρ. Результаты приведены в таблице 2, где также указано относительное отклонение δ от ранее описанного аналитического решения, которое принимается авторами за эталон.

Таблица 2. **Расчетные и аналитические значения средней освещенности основания**

ρ	*«Свет в ночи»* (ФК)		*«Свет в ночи»* (ЛО)		*DIALux*		*Lightscape*		Аналит. решение
	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк

0.9	5777	2.78	5610	0.196	4272	24.0	3870	31.2	5621
0.8	3222	2.61	3141	0.0318	2803	10.7	2707	13.8	3140
0.7	2372	1.98	2331	0.215	2203	5.29	2169	6.75	2326

Окончание таблицы 2

ρ	*«Свет в ночи»* (ФК)		*«Свет в ночи»* (ЛО)		*DIALux*		*Lightscape*		Аналит. решение
	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк	δ, %	$\bar{E}$, лк
0.6	1964	1.71	1945	0.725	1881	2.59	1867	3.31	1931
0.5	1728	1.41	1715	0.646	1688	0.939	1680	1.41	1704
0.4	1580	1.22	1571	0.641	1555	0.384	1555	0.384	1561
0.3	1483	0.953	1474	0.340	1470	0.0681	1470	0.0681	1469
0.2	1419	0.781	1413	0.355	1411	0.213	1413	0.355	1408
0.1	1379	0.657	1378	0.584	1374	0.292	1375	0.365	1370
0.0	1356	0.593	1356	0.593	1353	0.371	1353	0.371	1348

Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что при значениях коэффициента отражения ρ от 0.0 до 0.5 все три программы обеспечивают близкие к аналитическому решению значения средней освещенности. Однако при $\rho > 0.5$ погрешность в *DIALux* и *Lightscape* существенно возрастает, достигая 24.0 и 31.2 % соответственно при $\rho = 0.9$. Особенно ярко это проявляется при анализе только отраженной доли светового потока: в этом случае отклонения составляют 31.7 % для *DIALux* и 41.1 % для *Lightscape*. Хотя точная природа этих расхождений остается неясной, вероятной причиной авторы считают особенности реализации алгоритмов photon mapping (в *DIALux*) и radiosity (в *Lightscape*). В частности, в последнем случае ошибка в конкретном тесте может быть связана не с принципиальными ограничениями алгоритма, а с ограничениями по памяти и, как следствие, неоптимальной настройкой сетки. На этом фоне программа *«Свет в ночи»* демонстрирует заметно более точные результаты: отклонения остаются невысокими вплоть до максимальных значений ρ, что подтверждает корректность и устойчивость вычислений.

Заключение

В работе проанализировано расчетное ядро САПР *«Свет в ночи»*, в котором реализованы два метода моделирования многократных отражений: фотонные карты и перспективный метод локальных оценок. Прямое освещение рассчитывается по закону обратных квадратов. Для оценки точности применяемых алгоритмов были рассмотрены две тестовые задачи с известными аналитическими решениями: задача Соболева и расчет средней освещенности основания параллелепипеда.

На последнем примере показано, что *«Свет в ночи»* демонстрирует стабильную и высокую точность расчетов в широком диапазоне коэффициентов отражения – при максимальном отклонении от аналитического решения не более 2.78 %. При тех же условиях *DIALux* и *Lightscape* дают значительно большие отклонения, достигающие 24.0 и 32.1 % соответственно.

В дальнейшем планируется развитие метода двойных локальных оценок, позволяющего напрямую рассчитывать яркость в произвольной точке объема сцены в заданном направлении. Также рассматриваются внедрение более физически обоснованных моделей отражения и интеграция с методами машинного обучения для автоматического подбора параметров моделирования.

Таким образом, САПР *«Свет в ночи»* представляет собой надежный и точный инструмент для проектирования освещения, сочетающий физическую корректность с практической эффективностью. Будущие улучшения направлены на расширение возможностей ядра и его адаптацию к современным задачам светотехники и компьютерной графики.

Список литературы

1. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023685592 Российская Федерация. LiN.Calculate.light версия 1.0: № 2023685508: заявл. 28.11.2023: опубл. (зарег.): 28.11.2023 / В. П. Будак [и др.]; заявитель ООО «Центр инновационных разработок МСК БЛ Групп». URL: https://www.l-i-n.ru/

2. Kajiya J.T. The rendering equation // Proc. 13th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech. SIGGRAPH 1986. 1986. P. 143–150.

3. Соболев В.В. Точечный источник света между параллельными плоскостями // Доклады Академии наук СССР. 1944. Т. XLII, № 4. С. 175–176.

4. Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces / Goral C.M., et al. // Comput. Graph. 1984. Vol. 18, no. 3. P. 213–222.

5. Jensen H.W. Global Illumination using Photon Maps // In Rendering Techniques'96. Springer-Verlag, 1996. P. 21–30.

6. The current state of the methods for calculating global illumination in tasks of realistic computer graphics / Frolov V., et al. // Proc. Inst. Syst. Program. RAS. 2021. Vol. 33, no. 2. P. 7–48.

7. Kalos M.H. On the Estimation of Flux at a Point by Monte Carlo // Nucl. Sci. Eng. 1963. Vol. 16, no. 1. P. 111–117.

8. Соболь И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 312 с.

9. Adams M.L., Larsen E.W. Fast iterative methods for discrete-ordinates particle transport calculations // Prog. Nucl. Energy. 2002. Vol. 40, no. 1. P. 3–159.

10. Budak V.P., Zheltov V.S., Kalakutsky T.K. Local estimations of Monte Carlo method with the object spectral representation in the solution of global illumination // Comput. Res. Model. 2012. Vol. 4, no. 1. P. 75–84.

11. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. 320 с.

12. Practical Application of Local Estimations: Singularity Removal in the Solution of the Global Illumination Equation / Budak V.P., et al. // 33rd Int. Conf. Comput. Graph. Vis. 2023. P. 108–115.

13. Макаров Д.Н. Методы компьютерного моделирования осветительных установок: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.09.07 / Макаров Денис Николаевич. М., 2007. 19 с.

14. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки: учебное пособие для вузов. М.: Энергия, 1972. 360 с.