

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Щербаков Александр Станиславович

**Разработка и исследование методов вычисления глобального
освещения на графических процессорах**

Специальность 2.3.5 Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре интеллектуальных информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Фролов Владимир Александрович**,
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Михайлюк Михаил Васильевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
главный научный сотрудник Отдела программных средств визуализации

Турлапов Вадим Евгеньевич,
доктор технических наук, доцент,
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
профессор кафедры высокопроизводительных вычислений и системного программирования института информационных технологий, математики и механики

Сорокин Дмитрий Васильевич,
кандидат физико-математических наук,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Старший научный сотрудник лаборатории математических методов обработки изображений кафедры математической физики факультета вычислительной математики и кибернетики

Защита состоится «05» июня 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.012.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1 строение 52, факультет вычислительной математики и кибернетики, аудитория №238.

E-mail: ds012.2@cs.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д.27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3438>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года.

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета МГУ.012.2,
доктор технических наук

Н. В. Лукашевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одной из основных задач компьютерной графики является моделирование распространения света по сцене, то есть вычисление глобального освещения. Глобальное освещение разделяется на первичное и вторичное. Первичное освещение – это свет, падающий непосредственно из источника света на поверхность. Данный феномен достаточно хорошо изучен и в большинстве случаев может быть смоделирован несколькими проверками на видимость (за исключением источников света большой площади со сложной формой, для которых требуются специализированные подходы или Монте-Карло интегрирование с большим числом выборок). Вторичное освещение – это первичное освещение, многократно переотраженное поверхностями сцены. Вычисление этого феномена является гораздо более сложным, так как это вычисление многомерного интеграла, который необходимо оценивать численно для каждого пикселя изображения.

Выделим основные виды приложений, в которых существенным является быстрое и точное вычисление глобального освещения:

1. Приложения для архитектурного проектирования. Данные приложения требуют высокой точности вычисленного освещения, так как при моделировании зданий конкретные условия освещения могут быть существенны с точки зрения эстетики и эксплуатации помещений.
2. Симуляторы и тренажеры. Корректно вычисленное глобальное освещение позволяет сделать окружение в симуляторах и тренажерах максимально близким к реальности, что важно для схожести тренировочной среды с реальным миром. Так как в данных приложениях высок уровень интерактивности и пользователь может производить широкий ряд различных действий, достаточно высоки требования к производительности используемых алгоритмов.
3. Приложения, используемые при создании эффектов в кино и анимации. При финализации кинокартин вычисление освещения производится высокоточными методами. Однако, в процессе настройки и прототипирования визуальных эффектов важны быстрые итерации, поэтому скорость и точность освещения являются существенными в данных приложениях для экономии временных ресурсов.
4. Приложения виртуальной реальности. Требования к производительности для виртуальной реальности более жесткие, так как отрисовка производится на два экрана и требуемая частота кадров выше, чем для приложений на других платформах. Примеры аппаратной конфигурации: два экрана разрешением 3664×1920 с частотой обновления 90 Гц для Oculus Quest 2 256 Gb, два экрана разрешением 2000×2040 с частотой обновления 120 Гц для Sony Playstation VR2.
5. Приложения дополненной реальности, в которых корректное вычисление глобального освещения необходимо для получения естественного внешнего вида встраиваемых в реальное окружение объектов.

6. Компьютерные игры. В данных приложениях требования к реализму могут быть ниже, чем в остальных примерах и являются специфичными для проекта. Но, в то же время, производительность алгоритмов должна быть выше, так как, помимо отрисовки геометрии и вычисления освещения, вычислительные мощности аппаратуры расходуются на решение множества других задач компьютерной графики: вычисление коллизий, процедурная генерация окружения, вычисление экранных эффектов, моделирование поведения частиц, воспроизведение анимаций.
7. Приложения светотехники. Этот тип приложений требует высокой точности вычисления освещения для интерактивного редактирования освещения помещений, зданий и т.д.

Во всех упомянутых приложениях важна точность глобального освещения и скорость его вычисления. Алгоритмы, решающие задачу глобального освещения, разрабатываются на протяжении всего времени существования компьютерной графики. Их разработка не теряет актуальности, так как требования к скорости их работы растут в связи с увеличением разрешений экранов и ростом сложности и детализации 3D-сцен.

Современные экраны имеют разрешение, как правило, не ниже FullHD (1920 на 1080 пикселей). Всё большую популярность приобретают экраны с разрешением 4K и 8K, которые больше разрешения FullHD в 4 и 16 раз соответственно. Таким образом, задача глобального освещения должна быть решена для миллионов или даже десятков миллионов пикселей. Одновременно с этим, целевая частота кадров мониторов в последние годы становится выше: 120 Гц и 240 Гц, вместо 60 Гц ранее. Некоторые приложения могут допустить работу на частоте 60 Гц, но для приложений виртуальной и дополненной реальности такая частота неприемлема. В частности, компьютерные игры для некоторых VR платформ не могут пройти обязательную сертификацию без выполнения требований к частоте отрисовки кадра.

В глобальном освещении можно выделить два ключевых типа отражения света:

1. Спекулярные отражения — отражения близкие к зеркальным, вызванные влиянием высокочастотной (в значении «быстроменяющейся») компоненты Двухнаправленной Функции Отражения (ДФО, англ. BRDF) в интеграле освещённости.
2. Диффузные отражения — примерно равномерные отражения света во все стороны, вызванные влиянием низкочастотной компоненты ДФО в интеграле освещённости.

Задача моделирования спекулярных отражений на данный момент достаточно эффективно решается методами, использующими трассировку лучей. Особенно высокую производительность можно получить, используя видеокарты с аппаратной поддержкой трассировки лучей. При этом, чем более гладкая поверхность, тем ближе направления лучей. Трассировка пучка схожих лучей

является более эффективным паттерном для современных алгоритмов трассировки и требует меньшего количества лучей на пиксель.

Как было упомянуто ранее, для корректного моделирования многократного переотражения света необходимо вычислять многомерный интеграл освещённости, что является вычислительно-сложной задачей. Для точного рендеринга задача вычисления specularных отражений представляет отдельную сложность, ввиду нетривиальности поведения многократных отражений. В приложениях, требующих высокой производительности, моделирование такого рода эффектов чаще всего избыточно, и можно использовать методы достаточно простые в реализации и алгоритмически.

Таким образом, с учётом специфики современных приложений компьютерной графики можно выделить ключевые особенности, которые требуются для алгоритма глобального освещения, подходящего для перечисленных задач:

1. Точность вычисления выше, чем у аналогов, при той же скорости вычисления (приложения светотехники, приложения для архитектурного моделирования, симуляторы, инструменты для создания кино и анимации).
2. Поддержка динамических источников света (компьютерные игры, симуляторы). Источник света является динамическим, если для него предусмотрено интерактивное изменение позиции, направления, размера, яркости или цвета.
3. Использование этапа предобработки сцены для повышения производительности (приложения виртуальной и дополненной реальности, компьютерные игры, симуляторы).
4. Основной объём вычислений не должен зависеть от количества пикселей (приложения виртуальной и дополненной реальности, симуляторы).
5. Обработка геометрии произвольной сложности (приложения для архитектурного моделирования, компьютерные игры).

Методы глобального освещения можно разделить на две ключевые категории:

1. Полностью динамические методы. Они работают для произвольных сцен и условий освещения без какой-либо предварительной обработки. Данный тип алгоритмов имеет более высокую вычислительную сложность, так как методы, обрабатывающие геометрию сцены, могут быть вычислительно затратными.
2. Методы, использующие предобработку сцены. Данные алгоритмы позволяют перенести большую часть вычислений на этап предобработки, что важно, учитывая требования к производительности современных приложений. При этом они накладывают ограничения на изменение 3D-сцены. Некоторые из них не поддерживают динамические источники света.

Таким образом, актуальность данной работы заключается в необходимости разработки новых методов глобального освещения, превосходящих существующие методы в балансе скорости и точности вычисления, а так же

учитывающих требования аппаратного обеспечения и данных, визуализируемых приложениями.

Целью данной работы является исследование и разработка метода вычисления глобального освещения, удовлетворяющего следующим требованиям:

1. Возможность поддерживать высокодетализированные сцены и сцены большого масштаба (включающие модели, состоящие из более 100000 треугольников).
2. Поддержка экранов высокого разрешения (4K и выше).
3. Поддержка произвольного количества отражений света (3 и более).
4. Возможность учитывать первичное освещение от динамических источников света.
5. Возможность равномерного распределения вычислительной нагрузки между кадрами без темпоральных (межкадровых) артефактов.
6. Точность вычисленного освещения выше, чем у аналогов, при той же скорости вычисления. Точность определяется сравнением с эталоном (полученным высокоточным рендерингом, например, трассировкой путей).
7. Сопоставимый или меньший уровень потребления памяти по сравнению с аналогами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие

задачи:

1. Разработать решение задачи глобального освещения, основанное на методе излучательности, для сцен различной конфигурации со следующими требованиями:
 - а) Поддержка произвольного количества отражений без дополнительных накладных расходов во время визуализации.
 - б) Поддержка сцен различного масштаба (размер различается более чем в 1000 раз).
 - в) Поддержка высокодетализированных моделей (более 100000 треугольников).
 - г) Возможность распределения вычислений между кадрами без артефактов.
2. Провести экспериментальное исследование предложенных методов.

Научная новизна: Получены следующие новые результаты в области вычисления глобального освещения на графических процессорах:

1. Предложен метод матрицы нескольких отражений, решающий проблему линейной зависимости сложности вычислений от количества переотражений света без увеличения потребления памяти на GPU.
2. Предложен метод локальной матрицы, решающий проблему сложности вычисления освещения для сцен произвольного размера путём схемы потоковой загрузки данных на видеокарту.
3. Предложен метод темпоральной излучательности, позволяющий распределять вычисления между кадрами без артефактов с сохранением и переиспользованием информации о предыдущем вычисленном освещении.

4. Предложен метод создания виртуальных площадок, позволяющий создавать прокси геометрию, используемую для вычисления освещения, которая требует меньшего количества памяти для 3D сцены (вместо 200000 треугольников используется 12000 виртуальных полигонов), чем методы с явной прокси геометрией. При этом, предложенный метод позволяет сохранить высокую точность вычисления освещения.

Суммарно данные методы позволяют достичь значительно более высокой скорости вычисления освещения (до 100 раз), чем базовый метод излучательности при сопоставимых точности (SSIM отличается не более чем на 0.04) и затратах памяти.

Практическая значимость. Разработанные алгоритмы могут быть разделены на две категории: предназначенные для предобработки сцены и используемые при визуализации. Утилиты, предобрабатывающие сцены, могут быть интегрированы в различные рабочие процессы с графическими движками и не требуют вмешательства пользователя после минимальной настройки. Таким образом, требования к трудозатратам для их использования минимальны. Алгоритмы реализации (для предобработки и для визуализации сцены) выполнены в виде вычислительных шейдеров, которые поддерживаются всеми актуальными программными и аппаратными средствами расчёта на графических процессорах. Результаты алгоритма могут быть представлены в виде различных 3D-структур. Это позволяет пользователю более эффективно контролировать потребление памяти приложением.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 4 разработанных метода позволяют ускорить вычисление глобального освещения на графических процессорах:
 - а) Разработанный метод матрицы нескольких отражений позволяет снизить вычислительную сложность решения уравнения излучательности, обеспечивая поддержку произвольного количества переотражений света без увеличения затрат на этапе визуализации. Предложенный алгоритм упаковки форм-факторов с блочным сжатием снижает потребление памяти до 10 раз. Метод частично перераспределяет вычислительные затраты на этап предобработки, увеличивая его время на 20–30%. Данный метод позволяет удовлетворить требование 3 (поддержка произвольного количества отражений света), так как сложность вычислений во время визуализации не зависит от количества переотражений света.
 - б) Разработанный метод локальной матрицы уменьшает количество полигонов, для которых требуется хранение матрицы форм-факторов в видеопамяти. Предложенный подход к обновлению данных матрицы при движении камеры сокращает объем вычислений в 6–15 раз. Алгоритм обеспечивает выполнение требования 1 (поддержка сцен большого масштаба) за счёт потоковой обработки удалённых от камеры участков сцены.

- в) Разработанный метод виртуальных площадок обеспечивает применение метода излучательности и его вариаций к 3D-моделям с высокой детализацией. Алгоритм генерирует матрицу форм-факторов и другие данные для вычисления освещения без создания прокси-геометрии, что повышает точность освещения по сравнению с вокселизацией. Предложенный метод удовлетворяет требованию 1 (поддержка сцен высокой детализации).
 - г) Разработанный метод темпоральной излучательности позволяет распределить вычислительную нагрузку между несколькими кадрами без видимых темпоральных артефактов. Алгоритм обеспечивает ускорение вычислений в 10–100 раз по сравнению с классическим методом излучательности без значительных потерь точности освещения. Предложенный метод удовлетворяет требованию 5 (распределение вычислений между кадрами без темпоральных артефактов).
2. Проведенное экспериментальное исследование предложенных методов на сценах различной сложности показывает, что предложенные методы обеспечивают более высокую точность при лучшей производительности, чем метод RTXGI (ведущий метод вычисления глобального освещения на основе полей освещенности).

Использование метода излучательности в качестве базового метода позволяет удовлетворить требования 2 (поддержка экранов высокого разрешения) и 4 (поддержка динамических источников света), так как данный метод позволяет проводить вычисления независимо от количества пикселей на экране и конфигурации первичного освещения. Сравнение предложенных методов с RTXGI показало, что предложенные подходы обеспечивают более высокую точность при лучшей производительности. Из проведенного сравнения следует, что комбинация предложенных методов позволяет удовлетворить требования 6 (точность освещения выше, чем у аналогов) и 7 (сопоставимое с аналогами потребление памяти). Сравнения проводились на сценах Crytek Sponza и Cornell Box, используемых в качестве тестовых сцен для алгоритмов глобального освещения производителями GPU.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- 1. Международная конференция WSCG'2023 (Чехия, Пльзень).
- 2. Открытая конференция ИСП РАН 2021 (Москва).
- 3. 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон-2021 (Нижний Новгород, НГТУ).
- 4. Международная конференция WSCG'2019 (Чехия, Пльзень).
- 5. Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon'2019 (Брянск, БГТУ).
- 6. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов 2019” (Москва).

7. Семинар “Программирование“ им. М. Р. Шура-Бура (2023, Москва).

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, представленные на защиту, отражают личный вклад автора в проведенных исследованиях. В ходе подготовки результатов к публикации было выполнено совместное взаимодействие с соавторами, однако, следует подчеркнуть, что определяющий вклад в исследования принадлежит диссертанту. Все представленные в диссертации результаты были получены исключительно автором самостоятельно. В работах [A.1, A.2] В. А. Фролову принадлежит постановка задачи и консультирование. В работах [A.3] вклад В. А. Фролова и В. А. Галактионова заключается в постановке задачи, консультировании и подготовке тестовых данных. В работе [A.4] все результаты получены автором самостоятельно.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 публикациях, изданных в рецензируемых научных изданиях, определенных в п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 81 страницу, включая 31 рисунок и 3 таблицы. Список литературы содержит 77 наименования.

Содержание работы

Во **введении** данной диссертационной работы обоснована актуальность исследования, определена цель работы, обоснована научная новизна полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту научные положения и их практическая значимость.

В **первой главе** производится введение в предметную область и проводится анализ основных литературных источников, посвященных проблеме глобального освещения. В данной главе также представлены определения ключевых терминов и понятий, а также введены основные математические модели и рассмотрена базовая классификация алгоритмов вычисления глобального освещения.

Во **второй главе** представлен подробный анализ существующих литературных источников, посвященных теме исследования, и освещается текущее состояние разработок в области методов расчета освещения на графических процессорах.

В **третьей главе** рассматривается предложенный новый метод матрицы нескольких отражений. Суть метода заключается в изменении процесса предобработки сцены. Вместо обычной матрицы форм-факторов, свойственной методу излучательности, предлагается вычислить матрицу форм-факторов с учётом цветовых каналов: $F_{color} = C \circ F$, где C – вектор цветов полигонов (площадок), а F – матрица форм-факторов. На основе данной матрицы, вычисляется матрица нескольких отражений $F_{multibounce} = \sum_{i=1}^K F_{color}^i$, где K – количество отражений света. При вычислении освещения, достаточно вычисления одного

умножения матрицы $F_{multibounce}$ на вектор первичного освещения для получения освещения с учётом K отражений.

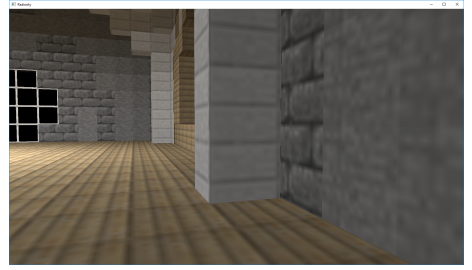
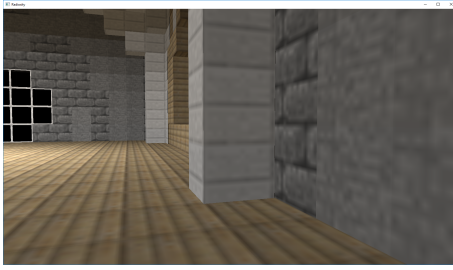
Традиционный алгоритм излучательности имеет сложность, пропорциональную количеству отражений, участвующих в вычислении. Предложенный метод решает эту проблему, ускоряя вычисления кратно количеству отражений. При этом требуется хранить 3 матрицы форм-факторов, по одной для каждого цветового канала. Для решения проблемы возросшего потребления памяти предлагается метод переупорядочивания площадок и компрессии матрицы, который снижает требуемое количество памяти в 3 раза, дополнительно ускоряя метод излучательности за счёт меньшего количества читаемой памяти. Суммарно данный метод ускоряет вычисление освещения на порядок для 3 учитываемых переотражений. При увеличении количества переотражений, увеличивается и ускорение вычислений.

В четвертой главе предлагается новый метод эффективного пересчёта данных матрицы форм-факторов метода излучательности при движении камеры (метод локальной матрицы). Метод реализуется двумя операциями: удаление и добавление площадок в матрицу форм-факторов. Первая операция представляет из себя простое зануление строки и столбца матрицы форм-факторов, с пометкой площадки как удалённой. Для добавления площадки в матрицу форм-факторов, с сохранением инварианта учета нескольких отражений, предлагается схема подготовки строк и столбцов матрицы форм-факторов, которая учитывает переотражения света между добавляемой площадкой и другими площадками. Помимо добавления строки и столбца необходимо также обновить существующие форм-факторы:

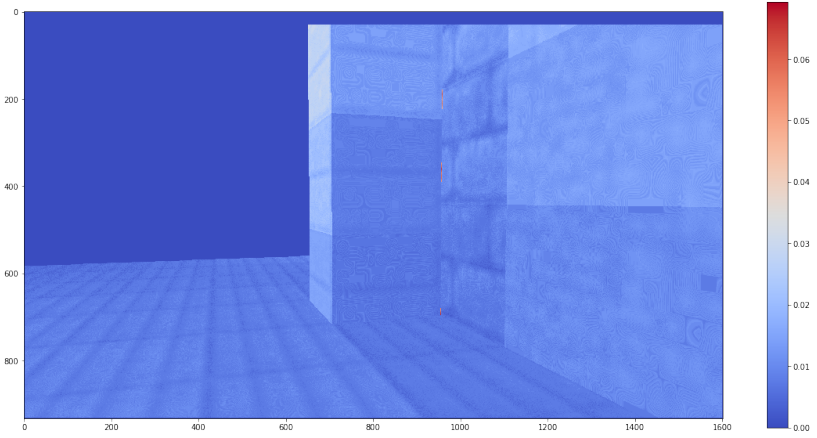
$$F'_{multibounce} = F_{multibounce} + (C \circ g^c)g^{rT},$$

Такой подход позволяет добавлять и удалять площадки в матрицу форм-факторов при движении камеры, что позволяет значительно сократить количество площадок (полигонов), участвующих в вычислениях и существенно сократить время вычисления освещения. Данный метод частично решает одну из ключевых проблем метода излучательности, связанную с квадратичной зависимостью сложности алгоритма от количества площадок.

В пятой главе описывается новый алгоритм генерации виртуальной прокси геометрии (виртуальные площадки) и вычисления форм-факторов для метода излучательности. В силу сложности современных 3D-сцен, которые могут состоять из десятков миллионов полигонов, метод излучательности становится неприменим для таких сценариев. На практике приходится тратить значительные трудовые ресурсы на создание упрощенной прокси геометрии, содержащей меньшее количество полигонов. Альтернативой является автоматическое упрощение, которое может приводить к артефактам. Для решения этой проблемы предлагается проводить выборку точек на поверхности полигонов и использовать данные точки в качестве виртуальных площадок. Количество виртуальных



а) Метод излучательности (SSIM: 0.87). б) Предложенный метод (SSIM: 0.87).



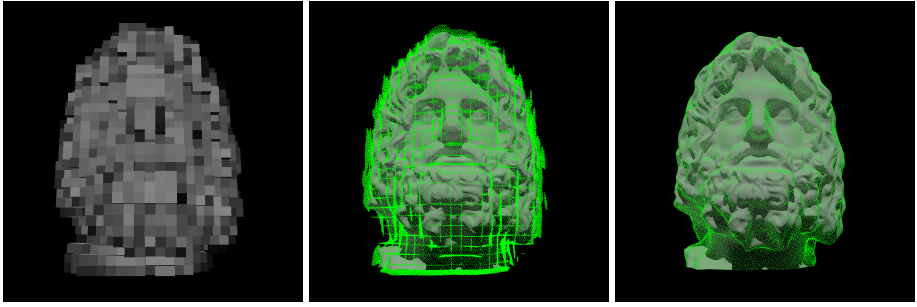
в) Разница между предложенным методом и методом излучательности.

Рис. 1 — Сравнение освещения, полученного методом излучательности и предложенным методом динамической излучательности.

площадок менее исходного количества полигонов достигается за счёт кластеризации точек с использованием метрики близости, которая учитывает, цвет, нормаль и форм-факторы для виртуальной площадки:

$$M(i, j) = (1 + |c_i - c_j|_2) (2 - (\vec{n}_i, \vec{n}_j)) \left(1 + \sqrt{\sum_{k=1}^N (F_{ik} - F_{jk})^2 + (F_{ki} - F_{kj})^2} \right)$$

Так как в ходе кластеризации в одну виртуальную площадку могут попасть точки разных полигонов, полученные площадки не имеют представления в виде полигональной сетки. При этом имеющихся данных достаточно для вычисления освещения.



а) Вокселизация геометрии

б) Генерация точек на поверхностях вокселей

в) Виртуальные площадки на исходной геометрии

Рис. 2 — Этапы построения виртуальных площадок.

Данный метод позволяет сократить количество площадок на 1-2 порядка, что существенно ускоряет вычисление освещения. Таким образом решается проблема высоких вычислительных затрат метода излучательности на сценах высокой детализации.

В шестой главе рассматривается предложенный новый метод темпоральной излучательности, который амортизирует проблему квадратичной сложности для вычисления освещения в алгоритме излучательности, распределяя вычисления на несколько кадров. Каждая строка форм-факторов рассматривается как плотность вероятности отражения света от одной площадки к другой. Такая интерпретация позволяет преобразовать вычисление освещения одной площадки в виде скалярного произведения векторов

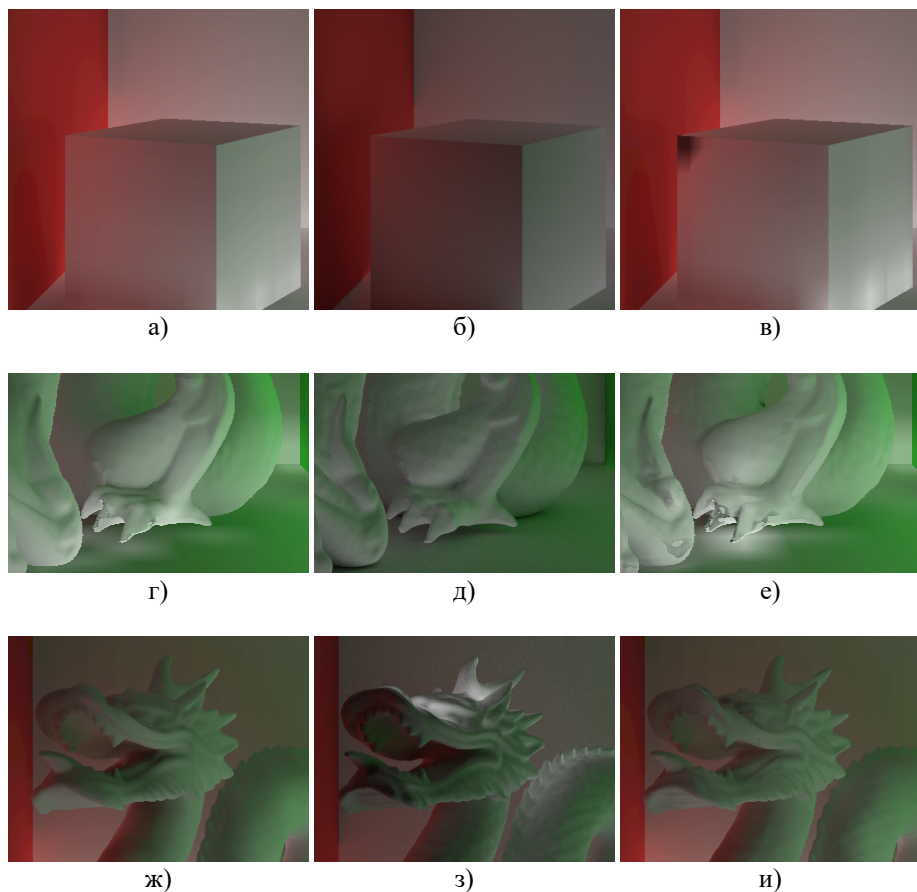
$$B_i = \sum_{j=0}^N F_{ij} E_j$$

в виде вычисления математического ожидания случайной величины с плотностью вероятности F_i :

$$B_i = \mathbb{E}E$$

Для эффективного вычисления данной величины предлагается преобразовать каждую строку матрицы форм-факторов в алиас-таблицу, которая позволяет эффективно проводить выборку случайной величины на видеокarte. За один кадр производится выборка 10-200 площадок и полученный результат добавляется к освещению, вычисленному на предыдущем кадре:

$$B_i = B_i^{previous} w + B_i^{current} (1 - w).$$



Левая колонка — предложенный метод. Средняя колонка — эталонные изображения, полученные трассировкой путей. Правая колонка — упрощенная геометрия, полученная вокселизацией.

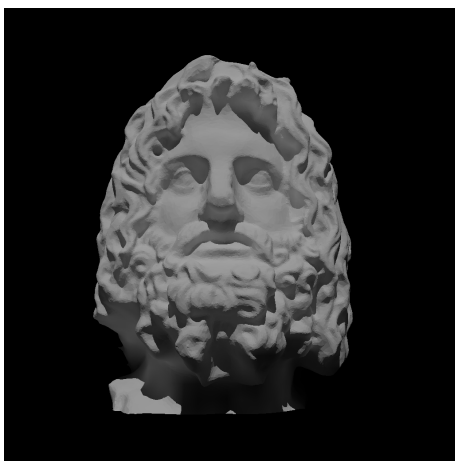
Рис. 3 — Сравнение результатов метода виртуальных площадок.

За счёт такого подхода, получается решить проблему возникновения визуальных артефактов, связанных с разницей в вычисленном освещении между кадрами.

Таким образом, метод позволяет существенно ускорить вычисление освещения, добавляя некоторую задержку вторичного освещения, свойственную всем темпоральным методам. Сравнение предложенных методов с методом RTXGI показывает их превосходство по времени вычисления и точности освещения.



а) Вторичное освещение



б) Глобальное освещение

Рис. 4 — Освещение, посчитанное методом темпоральной излучательности.



а) Метод
излучательности.
SSIM: 0.8354



б) Метод темпоральной
излучательности.
SSIM: 0.8323



в) Разница между методом
темпоральной
излучательности и
классическим методом
излучательности. Яркость
увеличена в 25 раз.

Рис. 5 — Сравнение результатов метода темпоральной излучательности.

В заклучении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Предложен новый метод матрицы нескольких отражений, позволяющий сократить время вычисления освещения на порядок для трёх учитываемых переотражений света. Также данный метод уменьшает потребление памяти метода излучательности в 3 раза.

2. Предложен новый метод локальной матрицы, позволяющий учитывать влияние отражений света от близко расположенных объектов и эффективно обновлять содержимое матрицы форм-факторов при движении камеры. Данный метод решает проблему сложности вычисления освещения алгоритмом излучательности на сценах большого масштаба.
3. Предложен метод создания виртуальных площадок, позволяющий создавать прокси-геометрию, используемую для вычисления освещения, не имеющую представления в 3D-пространстве. При этом количество используемых элементов геометрии сокращается до 2 порядков (с 200000 треугольников до 2000 виртуальных площадок).
4. Предложен новый метод темпоральной излучательности, позволяющий распределить вычислительную нагрузку на несколько кадров без добавления темпоральных артефактов.

В совокупности предложенные методы существенно сокращают время вычисления освещения (ускорение до 100 раз при использовании методов матрицы нескольких отражений, локальной матрицы и темпоральной излучательности). Помимо этого сложность решения уравнения излучательности на один кадр сведена к $O(NQ)$, где $Q \ll N$ ($Q \approx 10 - 200$, $N \approx 2000 - 12000$). Данные результаты позволяют использовать разработанные алгоритмы на сложных сценах на различных устройствах.

Публикации автора по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах Scopus, WoS, RSCI

- A.1 A. S. Shcherbakov, V. A. Frolov Matrix Transformations for Effective Implementation of Radiosity Algorithm Using Graphic Processors // *Light and Engineering*. — Russian Federation, 2019. — Vol. 27, № 2. — P. 105—110. — (Scopus Q3, SJR: 0.297) [0.375/0.3125]
Автором был самостоятельно разработан метод матрицы нескольких отражений и проведено экспериментальное исследование предложенного метода. Задача была поставлена В. А. Фроловым.
- A.2 A. S. Shcherbakov, V. A. Frolov Dynamic Radiosity // *Computer Science Research Notes*. — Pilsen, Czech Republic, 2019. — № 2901. — P. 83—90. — (Scopus Q4, SJR: 0.108) [0.5/0.375]
Автором был самостоятельно разработан метод локальной матрицы и проведено экспериментальное исследование предложенного метода. Задача была поставлена В. А. Фроловым.
- A.3 Щербakov А. С., Фролов В. А., Галактионов В. А. Виртуальные площадки в алгоритме излучательности // *Труды Института системного программирования РАН (электронный журнал)*. — 2022. — Т. 34, № 3. — С. 47—60. (RSCI, ИФ РИНЦ: 0.367) [0.875/0.75]

Автором был самостоятельно разработан метод виртуальных площадок и проведено экспериментальное исследование предложенного метода. Задача была поставлена В. А. Галактионовым. Эталонные данные были подготовлены В. А. Фроловым.

- А.4 Щербаков А. С. Адаптация методов вычисления глобального освещения на основе алгоритма излучательности к архитектуре кадрового графа // Вычислительные методы и программирование. 2025. – Т. 26, № 2. С. 99–110. (RSCI, ИФ РИНЦ: 0.576) [0.75/0.75]

Работа полностью выполнена автором.

Щербаков Александр Станиславович

Разработка и исследование методов вычисления глобального освещения на графических процессорах

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

