

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Щербакова Александра Станиславовича
на тему «Разработка и исследование методов вычисления глобального освещения
на графических процессорах»
по специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

Актуальность работы

Диссертационное исследование А. С. Щербакова посвящено актуальной проблеме вычисления глобального освещения для современных графических приложений, таких как виртуальная и дополненная реальность, компьютерные игры, архитектурное проектирование и симуляторы. Актуальность темы обусловлена растущими требованиями к визуальному реализму и производительности, особенно в условиях увеличения разрешения экранов (4K, 8K) и частоты кадров (до 120 Гц и выше). Существующие методы глобального освещения, включая трассировку лучей и методы на основе воксельных сеток, часто сталкиваются с проблемами высокой вычислительной сложности, ограниченной динамичности и артефактами, что делает разработку новых эффективных алгоритмов крайне востребованной.

Обзор содержания

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

- **Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.
- **Глава 1** посвящена анализу предметной области, публикаций и классификации методов глобального освещения. Введены также ключевые математические модели глобального освещения.
- **Глава 2** содержит детальный обзор существующих решений, включая полностью динамические методы (трассировка лучей, мгновенная излучательность) и методы с предобработкой сцены (карты освещенности, сферические гармоники). Обосновывается выбор метода излучательности в качестве базового.
- **Глава 3** посвящена **методу матрицы нескольких отражений**. Автор предлагает инновационный подход к предварительной обработке сцены, заключающийся в вычислении матрицы форм-факторов, учитывающей многократные переотражения света. Ключевым достижением является преобразование исходной матрицы в полиномиальную форму, что позволяет заменить итеративное вычисление освещения на однократное умножение матрицы на вектор. Для оптимизации памяти предложен оригинальный алгоритм сжатия данных с использованием DXT-формата и пересортировки строк/столбцов матрицы, уменьшающий объем хранимой информации в 3 раза. Экспериментально подтверждено, что метод обеспечивает ускорение

вычислений в 10 раз для 3 отражений при сохранении точности (SSIM 0.743 против 0.762 у классического метода).

- В Главе 4 разработан метод локальной матрицы, решающий проблему масштабируемости для сцен большого размера. В отличие от традиционных кластерных подходов, автор предлагает динамически обновлять подмножество форм-факторов только для полигонов, находящихся вблизи камеры. Детально проработаны:

- Механизм потоковой загрузки данных на GPU;
- Алгоритм пересчета матрицы при движении камеры с сохранением учета многократных отражений;
- Оптимизация через выборку видимых и освещенных полигонов.

Результаты показывают сокращение вычислений в 6–15 раз для сцен с 10K+ полигонов без потери качества (SSIM 0.87).

- Глава 5 вводит метод виртуальных площадок – принципиально новый способ представления прокси-геометрии для высокодетализированных моделей. Вместо явного упрощения сетки автор генерирует "площадки" – абстрактные элементы, содержащие только необходимые для освещения данные (нормали, цвета, форм-факторы). Алгоритм включает:

- Вокселизацию сцены и трассировку лучей для выборки точек;
- Иерархическую кластеризацию с жадным слиянием площадок;
- Трилинейную фильтрацию для устранения граничных артефактов.

Метод позволяет сократить количество элементов с 200K до 2K при сохранении точности освещения (MSE на 30% ниже, чем у вокселизации).

- Глава 6 представляет метод темпоральной излучательности, направленный на распределение вычислений между кадрами. Основные инновации:

- Интерпретация форм-факторов как плотностей вероятности;
- Использование алиас-таблиц для стохастической выборки;
- Темпоральное накопление освещения с весовыми коэффициентами.

Решение демонстрирует 100-кратное ускорение для 10K полигонов (0.08 мс/кадр) и значительно превосходит RTXGI SDK по точности (SSIM 0.73 против 0.66 и PSNR 23.5 против 19.3 dB).

Каждая глава содержит строгое математическое обоснование, схемы алгоритмов и сравнительный анализ с аналогами, что подтверждает глубину проработки темы.

Научная новизна

Автором получены следующие новые результаты:

1. **Метод матрицы нескольких отражений**, позволяющий учитывать произвольное количество переотражений света без увеличения вычислительной нагрузки во время визуализации.
2. **Метод локальной матрицы**, обеспечивающий поддержку сцен большого масштаба за счет потоковой обработки данных.
3. **Метод виртуальных площадок**, исключаяющий необходимость явного создания упрощенной геометрии и сокращающий объем используемой памяти.
4. **Метод темпоральной излучательности**, распределяющий вычисления между кадрами без видимых артефактов.

Совокупность этих методов обеспечивает существенное ускорение вычислений по сравнению с классической излучательностью при сохранении высокой точности ($SSIM \geq 0.73$).

Обоснование достоверности

Достоверность результатов подтверждена:

- Теоретическим обоснованием предложенных методов, включая математические выкладки и алгоритмические решения.
- Экспериментальными исследованиями на тестовых сценах (Crytek Sponza, Cornell Box), демонстрирующими превосходство предложенных методов над аналогами (RTXGI SDK) по точности и скорости.

Практическая значимость

Разработанные методы:

- Поддерживают высокодетализированные сцены и динамические источники света, что критично для современных приложений.
- Позволяют достичь высокой точности освещения ($SSIM$ до 0.87) при частоте кадров, достаточной для VR (90–120 Гц).
- Реализованы в виде вычислительных шейдеров, совместимых с актуальными графическими API (Vulkan, DirectX).
- Могут быть интегрированы в существующие графические движки без значительных изменений архитектуры.

Недостатки работы

1. В качестве базового фреймворка для сравнения выбран RTXGI SDK как ведущий продукт NVIDIA, однако для полноты понимания значения работы были бы интересны и детали, отличающие степень и эффективность использования метода излучательности в RTXGI SDK и в данной работе. Был бы полезен и такой же сравнительный анализ возможностей с существующими методами на основе полей освещенности (LPV, DDGI, VXGI и др.).
2. В главе 5, о виртуальных площадках, не указаны критерии остановки для иерархической кластеризации и их связь с размером вокселей. Возможно было бы полезно связать виртуальные площадки с методами подразбиения поверхностей при рендеринге.
3. Экспериментальные оценки качества были ли бы еще более убедительны, если бы оценки $SSIM$ каждый раз сопровождалась бы и оценками PSNR. Не понятно считает ли автор оценку $SSIM$ 0.87 пределом возможностей и если нет, то как ее повышение скажется на производительности.

Указанные недостатки не умаляют значимости работы.

Заключение

Диссертационная работа Щербакова Александра Станиславовича отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание работы соответствует специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных

систем, комплексов и компьютерных сетей (по физико-математическим наукам) и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Щербаков Александр Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент

профессор кафедры высокопроизводительных вычислений и
системного программирования

института информационных технологий математики и механики

Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

Турлапов Вадим Евгеньевич

«28» мая 2025 г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (831) 462-33-56 email: vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация:
05.01.01 Инженерная геометрия и компьютерная графика

Адрес места работы: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, кор. 2, комн. 312.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского.

Тел.: +7 (831) 462-33-56 email: vadim.turlapov@itmm.unn.ru