

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Щербакова Александра Станиславовича
"Разработка и исследование методов вычисления глобального освещения
на графических процессорах",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности

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

Актуальность представленного исследования обусловлена стремительным развитием интерактивных графических технологий и постоянно растущими требованиями к визуальному реализму в различных прикладных областях. В последние годы наблюдается взрывной рост популярности приложений виртуальной и дополненной реальности, где корректное моделирование глобального освещения является критически важным для создания эффекта погружения. Одновременно с этим современные компьютерные игры и системы архитектурной визуализации требуют все более точного воспроизведения световых эффектов при сохранении высокой частоты кадров.

Особую остроту проблеме придает революционное повышение разрешения дисплеев — переход от FullHD к 4K и 8K форматам увеличивает количество обрабатываемых пикселей в 4-16 раз. При этом частота обновления экранов также растет, достигая 120-240 Гц в современных VR-системах. Эти технологические изменения создают беспрецедентную нагрузку на алгоритмы рендеринга, делая традиционные методы вычисления глобального освещения неприемлемо медленными.

Существующие решения, такие как трассировка лучей или воксельные методы, сталкиваются с фундаментальными ограничениями. Они либо требуют огромных вычислительных ресурсов, либо приводят к появлению визуальных артефактов, либо не поддерживают динамические сцены. Особенно проблематичными являются случаи сложной геометрии с множественными переотражениями света, где современные алгоритмы часто демонстрируют неудовлетворительное качество или производительность.

В этом контексте разработка новых методов вычисления глобального освещения, сочетающих точность расчёта глобального освещения с высокой производительностью, представляется

исключительно важной научной задачей. Предложенные в диссертации подходы непосредственно отвечают на эти технологические вызовы, предлагая инновационные решения для одного из самых ресурсоемких этапов рендеринга. Их практическая значимость подтверждается широким спектром потенциальных применений — от игровой индустрии до систем проектирования и тренажеров виртуальной реальности.

Введение диссертационной работы выполняет свои основные функции: в нём последовательно раскрывается актуальность исследования, связанная с необходимостью разработки эффективных методов глобального освещения для современных графических приложений. Автор чётко формулирует цель работы — создание новых алгоритмов вычисления освещения на графических процессорах, а также конкретизирует перечень задач, необходимых для достижения этой цели. В разделе отдельно выделены элементы научной новизны предлагаемых методов и обоснована их практическая значимость для различных областей компьютерной графики.

Глава 1 диссертации представляет собой глубокий и систематизированный анализ предметной области. В ней не только даются четкие определения ключевых понятий, таких как первичное и вторичное освещение, диффузные и спекулярные отражения, но и проводится детальный разбор физических основ глобального освещения через призму уравнения рендеринга.

Глава 2 работы посвящена обзору существующих решений в области глобального освещения. Автор проводит их системную классификацию, разделяя на полностью динамические и использующие предобработку сцены. Обзор содержит сравнительный анализ таких технологий, как трассировка лучей, мгновенная излучательность и метод отражающих карт теней, где автор указывает на их принципиальные ограничения в контексте современных требований к производительности и качеству изображения.

Глава 3 содержит первое из четырех основных авторских решений — метод матрицы нескольких отражений. Разработанный, математически обоснованный, подход позволяет преобразовать итеративный процесс вычисления освещения в однократное матричное умножение. Предложенный автором алгоритм сжатия данных не только сокращает

объем требуемой памяти втрое, но и минимизирует потери точности за счет пересортировки элементов матрицы. Экспериментальные результаты демонстрируют ускорение вычислений в несколько раз при сохранении визуального качества.

Глава 4 представляет метод локальной матрицы, решающий критически важную проблему масштабируемости для больших сцен. Автор предлагает инновационный механизм динамического обновления подмножества форм-факторов, актуальных для текущего положения камеры. Детально проработанные алгоритмы потоковой загрузки данных и обновления матрицы позволяют добиться 6-15-кратного ускорения обработки сложных сцен без заметной потери точности освещения.

Глава 5 вводит концепцию виртуальных площадок - принципиально новый подход к представлению прокси-геометрии. В отличие от традиционных методов упрощения сетки, автор предлагает работать с абстрактными элементами, содержащими только необходимые для расчета освещения данные. Разработанный алгоритм автоматической генерации таких площадок через вокселизацию и иерархическую кластеризацию позволяет сократить количество обрабатываемых элементов на два порядка при сохранении высокого качества освещения.

Глава 6 завершает цикл авторских разработок методом темпоральной излучательности. Предложенная интерпретация форм-факторов как плотностей вероятности и использование алиас-таблиц для стохастической выборки позволяют распределить вычислительную нагрузку между кадрами. Такой подход позволяет получить значительное ускорение вычислений при одновременном превосходстве над промышленным решением RTXGI как по скорости, так и по точности.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке новых методов вычисления глобального освещения, преодолевающих ключевые ограничения существующих подходов. Впервые предложена комплексная методика преобразования классического алгоритма излучательности, позволяющая адаптировать его к требованиям современных графических приложений.

Достоверность полученных результатов подтверждается благодаря комплексной проверке: каждое из предложенных решений имеет строгое математическое обоснование, подтвержденное экспериментами на

тестовых сценах. Автор демонстрирует глубокое понимание предметной области, что проявляется в тщательном анализе границ применимости каждого метода и их сравнении с современными аналогами.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанные методы позволяют реализовать реалистичное глобальное освещение в широком спектре приложений — от компьютерных игр и VR/AR до архитектурной визуализации и кинопроизводства. Алгоритмы оптимизированы для работы на стандартном графическом оборудовании без специализированных ускорителей, обеспечивая высокую производительность даже на мобильных платформах и консолях. Также ценность представляет возможность интеграции в популярные движки (Unreal Engine, Unity) без существенной модификации их архитектуры.

К содержанию работы имеется ряд замечаний:

1. В работе основное внимание уделено тестированию производительности на GPU для персональных компьютеров, при этом было бы полезным дополнить исследования замерами на мобильных платформах.
2. В разделе о темпоральной излучательности недостаточно подробно описано влияние подхода со случайной выборкой значений из алиас-таблиц на доступ к памяти GPU, так как указанный паттерн работы с памятью может приводить к частым промахам кеша.
3. В работе недостаточно обоснован выбор формата DXT-5 для сжатия матрицы форм-факторов в методе локальной матрицы, отсутствует сравнительный анализ с альтернативными методами компрессии (BC6H/BC7).

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы.

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 физико-математических наук, профессор

главный научный сотрудник

отдела программных средств визуализации

Федерального научного центра

Научно-исследовательский институт системных исследований

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Михайлюк Михаил Васильевич

«28» мая 2025 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(499)129-28-30 email: mix@niisi.ras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация: 05.13.16 Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях

Адрес места работы: 117218, Москва, Нахимовский просп., 36, к.1. Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Тел.: +7(499)129-28-30 email: mix@niisi.ras.ru