

ОТЗЫВ

официального оппонента Фролова Владимира Александровича
на диссертационную работу Шуткина Василия Николаевича

«Метод иерархических динамических уровней детализации для рендеринга больших трёхмерных сцен с детерминированной динамикой», 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 и новизна темы диссертации. Диссертационная работа В.Н. Шуткина посвящена проблеме рендеринга больших трёхмерных сцен, которая остаётся одной из фундаментальных в компьютерной графике. С ростом сложности цифровых моделей в таких областях, как проектирование (CAD), строительство (BIM), градостроительное планирование и индустриальные цифровые двойники, требования к производительности визуализации постоянно возрастают. Существующие решения визуализации на базе игровых рендер-систем (движков) не подходят для подобных задач, т. к. в играх 3D контент подготавливается и оптимизируется заранее, причём с довольно большими затратами 3D художников в человеко-часах. В инженерных приложениях рендер-система обязана уметь рендерить то что есть в проекте полностью автоматически, без предварительной ручной обработки и оптимизации.

В то же самое время существующие методы, такие как иерархические уровни детализации (HLOD), отлично зарекомендовали себя для сцен со статической (неизменяемой) геометрией, однако их применение к сценам с изменяющейся геометрией фундаментально-трудно из-за высокой вычислительной стоимости обновления структур данных. Формализация класса сцен с *детерминированной дискретно-непрерывной динамикой* (появление/исчезновение объектов по заданному закону, перемещение по заданным траекториям) и разработка методов оптимизации рендеринга специально для этого класса сцен позволяет обойти упомянутую проблему, предоставляя возможность для разработки целого класса новых решений, ориентированных на системы информационного моделирования объектов строительства (BIM-системы) и их аналоги. Таким образом выбранное направление исследований является новым и актуальным.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

- **Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость.
- **В первой главе** проведён глубокий анализ современных работ в области рендеринга сложных сцен, упрощения геометрии и алгоритмов рендеринга сцен во внешней памяти, называемых иначе out-of-core алгоритмы.
- **Вторая глава** содержит формальную постановку задачи. Автор вводит математическое описание сцены с детерминированной динамикой (функции присутствия и положения) и предлагает структуру данных — дерево иерархических динамических уровней детализации (HDLOD). Важным элементом новизны работы

является введение функции геометрической погрешности кластера, зависящей от времени.

- **Третья глава** посвящена алгоритмам предвычисления HDLOD. Ключевыми здесь являются алгоритмы пространственно-временной кластеризации (с учётом не только близости объектов, но и схожести их поведения во времени) и полигонального упрощения с контролем погрешности по метрике Хаусдорфа.
- **В четвертой главе** описываются алгоритмы рендеринга во внешней памяти. Предложены два режима: консервативный (гарантирующий заданную точность) и интерактивный (обеспечивающий высокую частоту кадров за счёт ограничения загрузки данных). Предложены теоретические оценки времени кадра.
- **Пятая и шестая главы** описывают программную реализацию (расширение формата 3D Tiles, библиотека на C++/OpenGL) и результаты вычислительных экспериментов. Эксперименты проведены на широком наборе данных — от синтетических сцен до реальных индустриальных моделей (стадион, электростанция, модели городов).
- **В седьмой главе** приведены примеры внедрения результатов в существующие программные продукты, что подтверждает практическую ценность работы.

Научная новизна и теоретическая значимость. В диссертационной работе введён класс сцен с *детерминированной дискретно-непрерывной динамикой*, что позволило обобщить методы HLOD на сцены с частичной поддержкой динамической геометрии. Для этого класса сцен предложен новый метод представления и рендеринга сцены, интегрирующий геометрические упрощения и упрощения динамического поведения (функции присутствия) в единой иерархической структуре. Введена функция погрешности кластера, зависящая от времени, разработаны алгоритмы, учитывающие как пространственную близость, так и временную когерентность (функцию временного расхождения) объектов.

Практическая значимость. Результаты работы имеют высокую практическую ценность, что подтверждается успешной апробацией на индустриальных сценах большого объёма и внедрением результатов в прикладные проекты для визуального моделирования строительства и градостроительного планирования. Кроме того, сравнение с коммерческим аналогом (Cesium Ion) показало преимущество предложенного метода в производительности на массивных моделях.

Достоверность и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается строгим математическим обоснованием, корректным использованием аппарата вычислительной геометрии и подтверждается результатами экспериментальных исследований. Основные положения работы докладывались на авторитетных международных и всероссийских конференциях (CGVCVIP, ISTE, Graphicon). По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, и индексируемых в Web of Science и Scopus. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.5 в части разработки математического и программного обеспечения вычислительных систем и методов визуализации.

Замечания. Для данной работы было бы полезно провести сравнение по скорости визуализации и потреблению памяти с открытыми игровыми рендер-системами, построенными на базе существующих методов программных систем, например, с Unreal Engine. Такое сравнение позволило бы продемонстрировать на практике преимущества разработанного метода HDLOD к инженерным приложениям, что, к сожалению, далеко не всегда очевидно для неспециалиста.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация Шуткина Василия Николаевича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи — разработка метода эффективного рендеринга больших динамических трёхмерных сцен, имеющей существенное значение для развития программного обеспечения компьютерной графики.

Работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Шуткин Василий Николаевич, 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:

Фролов Владимир Александрович

04. марта, 2026

Кандидат физико-математических наук. Научная специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей старший научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики

Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Адрес: 125047, Москва, Миусская пл., 4, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Телефон организации: +7 499 978-13-14

E-mail и официальный сайт организации: office@keldysh.ru; <https://keldysh.ru/>

Подпись Фролова Владимира Александровича удостоверяю.

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

к.ф.-м.н.

А.А. Давыдов