

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ФГУП «НИИАС»  
С.В.Хохлов  
21/3 марта 2026 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Шуткина Василия Николаевича**  
«Метод иерархических динамических уровней детализации для рендеринга  
больших трехмерных сцен с детерминированной динамикой»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение  
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей  
(физико-математические науки)

### 1. Актуальность темы диссертационной работы

Эффективный рендеринг сложных сцен является ключевой проблемой создания современных графических средств. От производительности рендеринга напрямую зависит комфорт пользователя при работе в интерактивных программных приложениях, в которых пользователь осуществляет перемещение по 3D сцене, рассматривает и выделяет объекты, просматривает их свойства и редактирует сами объекты. При этом амбиции пользователей в плане разработки детальных и сложных моделей превышают возможности современного оборудования. В инженерных приложениях требуются не просто модели, которые бы снаружи выглядели как настоящие, а, более того, модель должна содержать все внутренние детали и механизмы. Если в современных видеоиграх удаётся визуализировать модели зданий, которые снаружи выглядят правдоподобно, по сути, представляют собой лишь внешнюю оболочку с текстурой, то в инженерных приложениях требования гораздо выше: модель здания — это детальная архитектурная модель со всеми внешними и внутренними стенами, колоннами и перекрытиями, коммуникациями (электрика, сантехника, вентиляция и т.п.) и оборудованием (таким как лифты). Такая модель может содержать сотни тысяч отдельных объектов и суммарно насчитывать миллионы или даже миллиарды полигонов, что требует использования нетривиальных методов и алгоритмов для рендеринга модели с интерактивной частотой кадров. Наличие динамики в модели (например, при планировании строительства здания) создаёт дополнительные трудности, требующие разработки специализированных методов или адаптации существующих. Таким образом, диссертационная работа Шуткина В.И. посвящена разработке методов для решения актуальной задачи ускорения рендеринга больших динамических сцен.

## 2. Структура и основное содержание диссертационной работы

Диссертация имеет общий объём в количестве 161 страницы, включая 35 рисунков и 20 таблиц, и состоит из введения, семи глав, заключения и одного приложения. Список литературы насчитывает 135 источников.

Во введении приводится обоснование актуальности исследования, формулируются цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов, а также приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор современных подходов к рендерингу больших сцен. Основное внимание уделяется методу уровней детализации и связанным с ним методам упрощения полигональных представлений. Рассматриваются подходы к внешнему рендерингу больших сцен, не помещающихся в основной памяти, а также методы уровней детализации для динамических моделей и для моделей зданий и городов.

Вторая глава содержит описание главного результата работы — метода иерархических динамических уровней детализации HDLOD. Приводится формальное описание разработанного метода и обсуждаются основные принципы вычисления и рендеринга. Метод HDLOD — это представление сцены в виде иерархии кластеров, имеющих разные размеры и разную степень упрощения: от наиболее крупных и упрощённых в корне дерева к наиболее мелким и детальным в листовых узлах. Ключевой особенностью метода HDLOD является учёт динамического фактора: каждый кластер содержит не только геометрическую информацию, но и информацию о динамическом поведении. Присутствие и положение объектов в сцене (а также кластеров HDLOD) в работе предлагается задавать с помощью функций присутствия  $p(t)$  и положения  $m(t)$ . Помимо этих функций, у кластеров есть и другие параметры, зависящие от времени. Ключевым понятием является функция геометрической погрешности  $\delta(t)$ , которая определяет погрешность в геометрическом представлении кластера в различные моменты модельного времени, с учётом присутствия или отсутствия вошедших в него объектов. Дерево кластеров вычисляется путём объединения объектов сцены с учётом как пространственной близости объектов, так и схожести их динамического поведения (функций присутствия). Предварительно подготовленное дерево кластеров используется без изменений во время рендеринга динамической сцены. При рендеринге осуществляется обход дерева кластеров и выбор кластеров для отображения, которые удовлетворяют требованиям к погрешности и присутствуют в сцене в данный момент модельного времени, а также проходят проверку видимости. В этой главе также описывается многовариантная модификация метода HDLOD для отображения одной модели с различным динамическим поведением, или когда динамика часто меняется.

В третьей главе подробно рассматриваются аспекты, связанные с вычислением HDLOD. В частности, приводится общий алгоритм вычисления и задействованные в нём под-алгоритмы: алгоритм вычисления дерева кластеров,

алгоритм кластеризации, алгоритм упрощения полигональной сетки. Для алгоритмов приводятся доказательства корректности и оценки сложности. Также, в главе рассматриваются вопросы инкрементального обновления HDL.O.D в случае изменений в сцене, принципы построения атласов текстур при работе с текстурированными моделями и такая оптимизация упрощения геометрических представлений, как удаление внутренних граней.

Четвёртая глава посвящена вопросам рендеринга HDL.O.D во внешней памяти. Описывается представление для внешнего рендеринга, когда в основной памяти находится только скелет дерева, а геометрия располагается во внешней памяти и загружается в основную по мере необходимости. Приводятся описания и псевдокоды алгоритмов консервативного рендеринга (гарантирующего заданную предельную погрешность) и интерактивного рендеринга (который может превышать погрешность для того, чтобы не допустить резких падений производительности), оценки сложности алгоритмов выбора кластеров при консервативном и интерактивном рендеринге, а также оценка времени рендеринга кадра.

Пятая глава посвящена разработанной программной реализации, выполненной на языке C++ с использованием API OpenGL. Приведено описание модулей программной реализации, перечень использованных сторонних библиотек, а также описание основных структур данных и функций. Описание интерфейсов модулей вынесено в приложение в конце работы.

В шестой главе приводятся результаты вычислительных экспериментов. В экспериментах исследуются параметры метода HDL.O.D, приводится сравнение производительности рендеринга с использованием HDL.O.D и без использования уровней детализации. Следует отметить большой набор моделей, использованных в экспериментах и многообещающие результаты в плане ускорения рендеринга, которые метод HDL.O.D демонстрирует как для статических, так и для динамических сцен. Также, приводится сравнение с коммерческим решением для генерации иерархических уровней детализации Cesium Ion, в котором метод HDL.O.D демонстрирует преимущество в самых больших сценах.

В седьмой главе обсуждаются приложения, в которых был применён метод HDL.O.D. Два из них — это веб-приложения (сервис управления замечаниями в архитектурно-строительной отрасли и система градостроительного планирования) и одно десктопное приложение (система визуального пространственно-временного моделирования).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

### **3. Основные результаты работы**

В диссертационной работе В.Н. Шуткина получены следующие основные результаты:

1. Исследованы существующие подходы к рендерингу больших сцен и определены возможности обобщения методов уровней детализации на класс псевдо-динамических сцен.

2. Предложен метод иерархических динамических уровней детализации HDLOD.

3. Разработаны алгоритмы для вычисления уровней детализации HDLOD.

4. Разработаны алгоритмы консервативного (гарантирующего не превышение заданной погрешности) и интерактивного (способного превысить заданную погрешность, чтобы не допустить падения производительности) рендеринга HDLOD во внешней памяти (когда данные не помещаются целиком в основную память).

5. Разработана многовариантная модификация HDLOD метода для приложений, в которых происходят частые изменения динамического поведения или требуется одновременное отображение модели с разным динамическим поведением в нескольких окнах.

6. Осуществлена программная реализация метода HDLOD.

7. Проведена серия вычислительных экспериментов на синтетических и реальных промышленных сценах, результаты которых подтверждают высокую эффективность разработанного метода.

8. Разработанный метод нашел применение в ряде прикладных проектов.

#### **4. Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы В.Н. Шуткина заключается в том, что в ней выделяется класс полигональных сцен с детерминированным дискретно-непрерывным характером динамики, допускающий конструктивное обобщение методов уровней детализации и имеющий важные промышленные приложения, и для данного класса сцен предлагается новаторский метод иерархических динамических уровней детализации, использующий информацию о динамическом поведении объектов сцены для подготовки иерархии упрощенных представлений, содержащей как пространственную, так и временную информацию и предлагающий возможности вычисления, консервативного и интерактивного рендеринга во внешней памяти.

#### **5. Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы В.Н. Шуткина определяется выполненной в ней формализацией класса полигональных сцен с детерминированным дискретно-непрерывным характером динамики, введенными функциями близости объектов, необходимыми для пространственно-временной кластеризации сцен, предложенным обобщением метода иерархических уровней детализации на класс динамических полигональных сцен в виде метода HDLOD, формально описанными алгоритмами вычисления и рендеринга уровней детализации HDLOD с введенной функцией визуального качества (погрешности), а также полученными теоретическими оценками вычислительной сложности предложенных алгоритмов.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного В.И. Шуткиным метода HDLOD при разработке средств визуализации в различных инженерных приложениях. В частности, метод уже был успешно применён в системе визуального пространственно-временного моделирования индустриальных проектов, системе градостроительного планирования, а также в веб-сервисе управления требованиями и замечаниями в архитектурно-строительной отрасли.

## **6. Достоверность и обоснованность результатов**

Работа имеет логичную структуру, терминология выдержана, отсутствуют двоякие толкования излагаемых тезисов. Аргументация автора убедительна и последовательна. Математический аппарат применяется корректно. Достоверность результатов работы подтверждается многочисленными вычислительными экспериментами и теоретическими оценками. Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на конференциях и научных мероприятиях всероссийского и международного уровней. По теме диссертации в рецензируемых изданиях опубликовано 11 статей (2 статьи опубликованы в журналах перечня ВАК, 2 статьи индексированы в Web of Science, 5 — в Scopus). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## **7. Замечания**

В качестве замечаний следует отметить:

1. В работе приводятся результаты большого числа экспериментов, направленных, в первую очередь, на исследование и оптимизацию предложенного метода и разработанных алгоритмов. Хотелось бы увидеть больше результатов сравнительного анализа с аналогичными графическими средствами, например, с игровыми движками Unreal Engine, Unity. И хотя постановка подобных экспериментов может быть довольно условной с учетом различий в представлении сцен, пространственно-временной когерентности, критериях контроля точности, это бы усилило значимость полученных результатов.

2. Применение метода HDLOD для рендеринга на web выглядит вполне убедительным и проведенное сравнение с наиболее популярным решением Cesium 3D подтверждает это. Однако рендеринг на десктопе допускает реализации, эффективно использующие возможности современных графических процессоров (технология Nanite от Epic Games, демонстратор vk\_lod\_clusters от Nvidia). Хотелось бы в работе получить ответ на вопрос об эффективной реализации метода с учетом этих возможностей. Возможно, это замечание следует рассматривать как предложение для дальнейших исследований.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

## **8. Выводы**

Диссертационная работа Шуткина Василия Николаевича «Метод иерархических динамических уровней детализации для рендеринга больших трехмерных сцен с детерминированной динамикой», представленная на соискание

учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей, является самостоятельной завершённой научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и имеющей теоретическую и практическую значимость. Основные положения диссертации представлены в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК, а также апробированы на всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание работы и оформлен надлежащим образом.

Несмотря на отмеченные замечания, работа Шуткина Василия Николаевича по своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов полностью соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" (с изменениями и дополнениями) в редакции от 16 октября 2024 г., предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Шуткин Василий Николаевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5 — Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании секции научно-технического совета подразделения 3000 ФАУ «ГосНИИАС» протокол №2 от 11.03.2026 г.

Начальник подразделения 3000  
ФАУ «ГосНИИАС»,  
д.ф.-м.н., профессор РАН

Визильтер Юрий Валентинович

Заместитель начальника подразделения  
по НИОКР, д.т.н.

Блохинов Юрий Борисович

**Почтовый адрес:** 125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7, к.2

**Телефон:** +7 (499) 157-70-47.

**Адрес электронной почты:** [info@gosniias.ru](mailto:info@gosniias.ru)

**Организация:** Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», подразделение Системы технического зрения

**Web-сайт организации:** <https://www.gosniias.ru>