

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Институт прикладной математики и компьютерных наук

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ МОДЕЛЯМИ В ВИРТУАЛЬНОЙ  
РЕАЛЬНОСТИ

Баканов Егор Сергеевич

Руководитель  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ А. В. Приступа

подпись  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы  
Студент группы № 931907  
\_\_\_\_\_ Е.С. Баканов  
подпись

## **Реферат**

Курсовая работа 23 стр., 8 рис., 23 источника.

Ключевые слова: информационное моделирование, виртуальная реальность, 3D визуализация, автоматизация, Unity.

Целью работы: разработка приложения визуализации и манипуляции информационными моделями в среде виртуальной реальности.

Методы проведения работ: анализ требований, проектирование системы, разработка приложения.

Полученные результаты: разработан прототип приложения, позволяющего визуализировать информационные модели, производить базовые манипуляции с трехмерным представлением модели в виртуальной реальности; частично автоматизирован процесс экспорта исходных данных информационного моделирования в формат, используемый разработанным приложением.

# Содержание

<b>Глоссарий</b>	<b>3</b>
<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Аналитика</b>	<b>6</b>
1.1 Существующие решения . . . . .	6
1.2 Требования к системе . . . . .	7
<b>2 Проектирование</b>	<b>9</b>
2.1 Описание предметной области . . . . .	9
2.2 Описание структуры клиентской и серверной части . . . . .	11
2.3 Обзор оптимизационных подходов . . . . .	14
<b>3 Реализация</b>	<b>18</b>
3.1 Обзор инструментов . . . . .	18
3.2 Серверная часть . . . . .	20
3.3 Клиентская часть . . . . .	20
<b>Заключение</b>	<b>21</b>
<b>Список литературы</b>	<b>22</b>

## Глоссарий

**Меш или полигональная сетка** (*англ. polygon mesh*) – структура данных, содержащая набор вершин, ребер и граней, определяющих форму многогранного объекта.

**Рендеринг или отрисовка** (*англ. rendering*) – процесс получения изображения двумерной или трехмерной модели с помощью компьютерной программы.

**Фреймворк** (*англ. framework*) – переиспользуемая, "незавершенная" система, которая может использоваться для создания другой производной системы.[1; 2]

**Шейдер** (*англ. shader*) – разновидность компьютерных программ, запускаемых на графических процессорах, предназначенных для отрисовки изображений.

**BIM** (*англ. Building Information Model*) – цифровой проект здания или другого объекта инфраструктуры, сопровождаемый базой данных всех его физических и функциональных характеристик.[3]

**HTC Vive** – шлем виртуальной реальности, разрабатываемый компаниями HTC и Valve.

**Unity** – игровой фреймворк, используемый для трехмерной визуализации.[4]

# Введение

BIM – понятие, под которым подразумевают цифровой проект здания или другого объекта инфраструктуры, которая связана с базой данных всех его физических и функциональных характеристик, содержащей подробную информацию обо всех элементах модели: элемент может содержать информацию о габаритах, поставщике и даже серийном номере. Изменения в любом элементе системы здания способны повлечь автоматические изменения параметров и объектов, вплоть до изменения чертежей, визуализаций, спецификаций, календарного графика и сметы. BIM – это общий ресурс знаний для получения информации об объекте, который служит надежной основой для принятия решений в течение всего жизненного цикла начиная с самой ранней концепции до сноса.[3] 11 июня 2016 года был утвержден список поручений Правительству Российской Федерации, направленный на развитие правовой базы использования информационного моделирования в сфере строительства.[5]

Информационное моделирование является комплексным процессом, требующим определенной компетенцией в этой области. Для использования BIM-методологии необходимы навыки использования специализированного программного обеспечения, которых может быть лишена значительная часть проектной команды. Для обычных людей крайне сложно воспринимать весь объем информации, закладываемой в BIM.

В связи с развитием технологий в последнее десятилетие произошел стремительный рост популярности технологии виртуальной реальности.[6] Как показывают многочисленные исследования, использование технологий виртуальной и дополненной реальности может улучшить производительность при валидации и верификации разрабатываемой модели. Применение технологии VR способно значительно повысить презентационные качества модели, что усилит вовлеченность в проект участников, не имеющих специальных профильных навыков.[7] Исходя из этого было принято решение о разработке приложения, способного визуализировать трехмерную репрезентацию информационной модели в VR-среде.

**Цель работы** – разработать прототип приложения, позволяющего инспектировать BIM модели в виртуальной реальности.

## Задачи

1. реализовать извлечение атрибутивной информации модели;
2. реализовать серверную часть приложения, занимающуюся хостингом и предобработкой моделей;
3. автоматизировать перенос моделей из сред разработки в приложение.
4. реализовать модуль взаимодействия пользователя с моделью на клиентской части приложения;

Стоит отметить, что данный проект разрабатывается командой из нескольких человек, поэтому в ходе работы не будут представлены те части, в которых автор не принимал непосредственного участия при разработке.

На момент написания этого отчета разрабатываемый прототип не получил официального названия, которое могло бы использоваться при разработке или коммерческом продвижении. Поэтому вместо этого будет использоваться его неофициальное внутреннее название – **BIMExplorer**.

# Глава 1. Аналитика

Данный раздел содержит обзор существующих решений, направленных на визуализацию информационных моделей в виртуальной реальности. В ходе их анализа были выявлены функциональные и нефункциональные требования к реализации системы.

## 1.1 Существующие решения

В ходе изучения существующих решений был обнаружен ряд продуктов как в индустриальной, так и в академической среде. Ниже приведены несколько примеров, на основе которых были сформулированы требования к разрабатываемому прототипу.

### Индустриальная среда

Unity Reflect – приложение разрабатываемое компанией Unity Technologies, на основе их игрового фреймворка Unity.[8] Reflect обладает интеграцией с несколькими программами информационного моделирования, такими как Revit, Rhino и Sketchup. Reflect способен синхронизировать изменения информационной модели с ее VR отображением в реальном времени, а также извлекать атрибутивную информацию. К сожалению на момент разработки нашего решения и написания этой статьи Unity Reflect был не завершенным продуктом, находящимся в активной разработке.

Prospect – аналогичное приложение от компании IrisVR, поддерживающее информационные модели из Navisworks, Revit, Rhino, Sketchup, а также 3D форматы FBX и OBJ.[9] Prospect способен извлекать атрибутивную информацию, имеет достаточно высокую производительность, а также возможность проведения многопользовательских сессий.

Enscape – ещё одно приложение с интеграцией с Revit, Sketchup, Rhino, ArchiCAD и Vectorworks.[10] Enscape может синхронизировать изменения информационной модели в реальном времени и извлекать атрибутивную информацию. Из особенностей Enscape стоит отметить широкий набор настроек и эффектов отображения информационной модели.

### Академическая среда

В статье Джордана Дэвидсона и др. описана разработка прототипа приложения на основе Enscape расширения для Revit, описанного ранее.[11] Целью работы было расширение уже имеющихся возможностей Enscape для экспериментальной проверки пользовательского опыта при инспектировании модели. Приложение Дэвидсона отличается от предыдущих тем, что обладает обратной связью с отображаемой информационной моделью, позволяющей пользователю прямо внутри VR симуляции изменять окружение. В рамках прототипа эта особенность ограничивалась изменением внутреннего интерьера, мебели и характеристик окон. Как утверждает автор, данный подход

повышает вовлеченность клиента в проект на ранних стадиях разработки, повышает его осведомленность о решениях, принятых архитекторами, и снижает риск изменений в “последнюю минуту”, повышающих стоимость реализации проекта.

Ещё одно возможное решение задачи описал в своей работе Фарзад Пур Рахимян и др.[12] Помимо частичной обратной связи, аналогичной той, что представлена в работе Джордана Дэвидсона, прототип Рахимяна уникален использованием в качестве целевого формата информационных моделей Industry Foundation Classes – открытый, международный и независимый от других производителей стандарт, разработанный buildingSMART.[13] В работе также описана клиент-серверная архитектура решения: на клиентской части приложения происходит интерактивная демонстрация модели в виртуальной или дополненной реальности; сервер же является промежуточным слоем между исходной информационной моделью и визуализацией, отслеживающим изменения и производящим синхронизацию данных.

## 1.2 Требования к системе

Далее приведен формализованный список требований к разрабатываемому прототипу.

### Нефункциональные требования

- совместимость с форматом Revit, как наиболее распространенной системы информационного моделирования;
- разделение функциональности приложения на “серверную” и “клиентскую” для повышения гибкости системы к возможным дальнейшим расширениям и независимости пользователя от конкретных систем информационного моделирования;
- высокая производительность при инспектировании комплексных моделей;
- извлечение атрибутивной информации, закладываемой в модель.

Стоит отметить, что в рамках прототипа не производилась реализация полноценного удаленного сервера, а производилась эмуляция его работы локально.

### Функциональные требования

- выбор BIM модели из уже загруженных на сервер;
- изменение масштаба отображения модели между натуральной величиной и размерами настольного макета;
- управление отображением различных слоев модели, созданных на основе извлеченной атрибутивной информации;



Особенности реализации пользовательского интерфейса и функциональности навигации в виртуальном пространстве будут опущены, так как реализовывались другими членами команды разработки прототипа.

## Глава 2. Проектирование

Этот раздел содержит описание теоретических аспектов работы. В первую очередь здесь будет детально рассмотрена структура информационных моделей, используемых как источник исходных данных для визуализации. Далее идет описание клиентской и серверной части прототипа, описание проблем, которых это разделение призвано решить, а также описание функциональности, которую они будут предоставлять. Наконец, эта глава также содержит краткий обзор методик, используемых для повышения производительности визуализации.

### 2.1 Описание предметной области

Далее рассматривается структура информационной модели. В связи с тем, что в качестве целевого формата был выбран формат Revit, дальнейшее описание предметной области будет в первую очередь соответствовать стандартам Autodesk Revit. Различия с другими форматами, например Industry Foundation Classes (IFC-формат), [13] рассматриваться не будут.

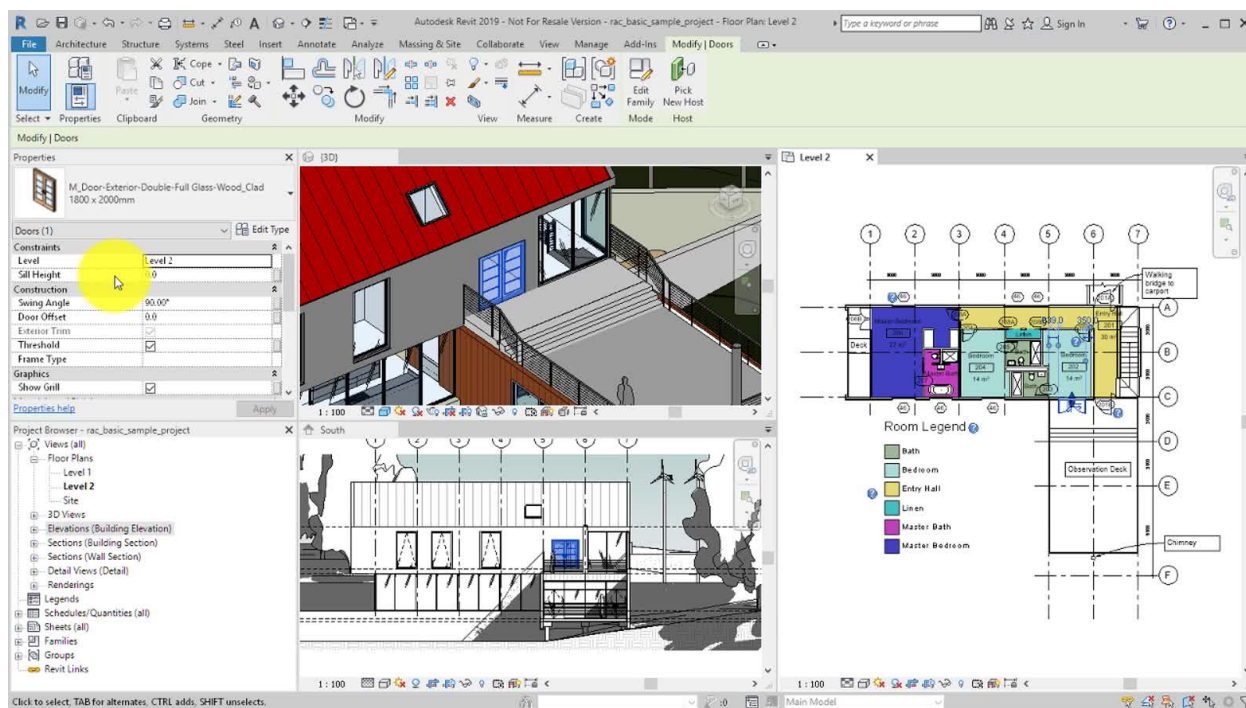


Рис. 1: Интерфейс редактора Revit

Для хранения данных Revit использует специальные проприетарные форматы RVT, RFA и RTE. Для отображения данных модели в виртуальной среде необходимо преобразовывать их в форматы трехмерной графики, например OBJ или FBX.

## Элементы информационной модели

Каждая сущность в проекте информационной модели называется элементом. Revit использует 3 типа элементов в проектах: элементы модели, опорные элементы и элементы, относящиеся к представлению. Элементы в Revit также часто называются семействами. Семейство содержит геометрическое определение элемента и параметры, используемые элементом. Каждый экземпляр элемента определяется и контролируется семейством.[14] Для создания визуализации нас в первую очередь интересуют именно элементы модели.

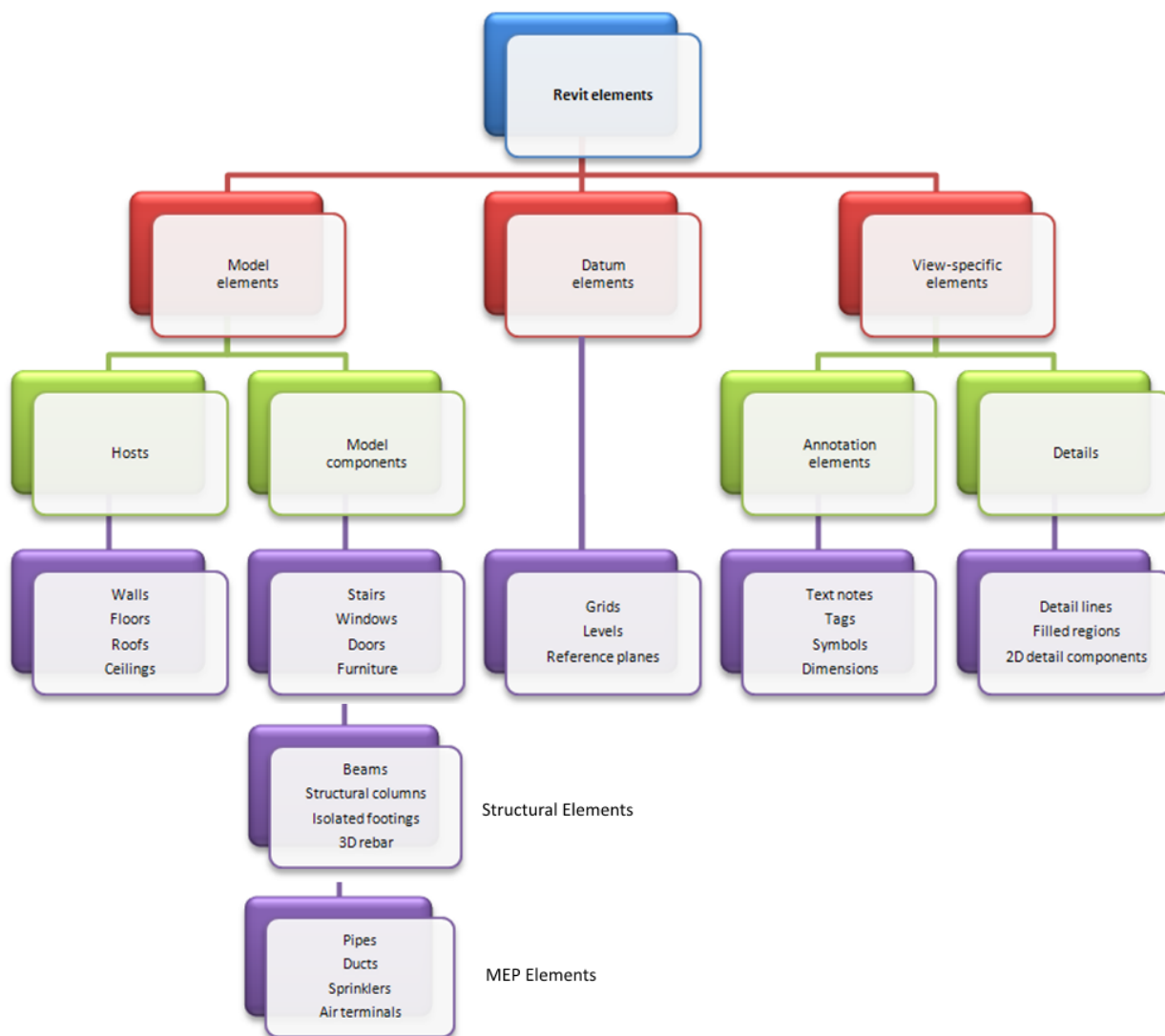


Рис. 2: Элементы информационной модели

**Элементы модели:** Элементы модели представляют фактическую трехмерную геометрию здания, например стены, окна, двери, пандусы, воздуховоды и электрические панели. Элементы модели делятся на хосты и компоненты модели. Хостами обычно являются элементы, которые возводятся непосредственно на строительной площадке, например стены и потолки. Компонентами модели являются все остальные типы

элементов модели.

**Опорные элементы:** Опорные элементы помогают определить контекст проекта. К ним относятся опорные плоскости, уровни и сетки.

**Элементы представления:** Элементы представления это элементы, отображаемые только в каком-то определенном режиме представления проекта. Они помогают описывать или документировать модель.

### **Свойства элементов**

Каждый размещаемый элемент является экземпляром семейства. Элементы имеют 2 набора свойств, управляющих их внешним видом и поведением: свойства типа и свойства экземпляра.[14]

**Свойства типа:** Один и тот же набор свойств типа является общим для всех элементов семейства, и каждое свойство имеет одинаковое значение для всех экземпляров определенного типа семейства. Изменение значения свойства типа влияет на все текущие и будущие экземпляры этого семейства.

**Свойства экземпляра:** Общий набор свойств экземпляра также применяется ко всем элементам, принадлежащим к определенному типу семейства, но значения этих свойств могут различаться. Например, размеры окна являются свойствами типа, а его высота расположения над уровнем пола является свойством экземпляра.

## **2.2 Описание структуры клиентской и серверной части**

Теперь можно поподробнее рассмотреть архитектуру прототипа. Как было сказано ранее, основное предназначение приложения – презентация информационной модели участникам проекта, не имеющим навыков моделирования, например заказчикам, спонсорам или непосредственным пользователям здания. Такая презентация поможет успешнее вносить корректировки в проект еще на самых ранних стадиях, что снизит финальные затраты на реализацию проекта.[11]

Исходя из описанных требований можно сделать вывод о том, что конечные пользователи приложения не станут использовать программное обеспечение информационного моделирования. Для них имеют значение только финальные или промежуточные результаты работы. Поэтому было принято решение отделить функциональность приложения, взаимодействующую с исходными данными модели. Клиентская часть может не зависеть от конкретной системы информационного моделирования, что упростит расширение системы в дальнейшем. Так же это может повысить производительность визуализации в клиентской части, так как все трудоемкие вычисления, проводимые над исходными данными, можно проводить на серверной части.

## Функциональность серверной части

Далее представлена основная функциональность реализуемая прототипом на "сервере".

1. Хранение исходной информационной модели. Сервер должен хранить исходную модель, а также распознавать ее изменения для повторного преобразования.
2. Конвертация формата RVT в формат FBX. Поскольку формат данных информационной модели отличается от представления классических форматов трехмерной графики и не поддерживается большинством фреймворков создания интерактивных графических приложений вроде Unity и Unreal, необходимо производить преобразование формата.
3. Предоптимизация модели. Из-за сложности трехмерных моделей, получаемых после конвертации, необходимо проводить их дополнительную оптимизацию. Подробнее это будет рассмотрено в следующем разделе.
4. Упаковка моделей. Оптимизированные модели должны упаковываться для загрузки в клиентской части приложения.

## Функциональность клиентской части

Далее описана функциональность клиентской части приложения вместе с необходимыми схемами. Функциональность, реализуемая не автором отчета, а другими членами команды разработки, была опущена.

1. Загрузка готовой модели. Приложение должно загружать выбранную упакованную модель. Так как в рамках прототипа не производится реализация удаленного сервера, загрузка будет происходить локально, как показано на рисунке 3.

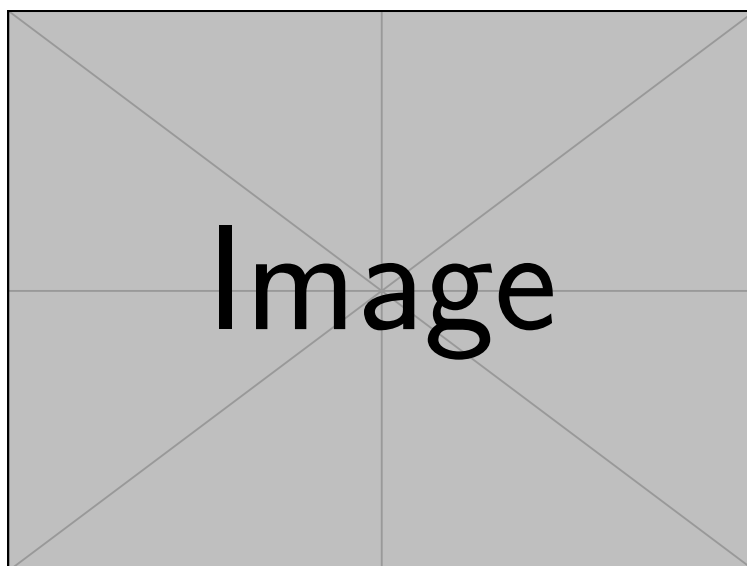


Рис. 3: Загрузчик моделей

*Описание UML-схемы...*

2. Размещение модели в виртуальной среде. После загрузки модель должна размещаться в виртуальной сцене. Для визуализации будет использоваться виртуальный стол, на который будет проецироваться модель здания в уменьшенном масштабе согласно схеме на рисунке 4.

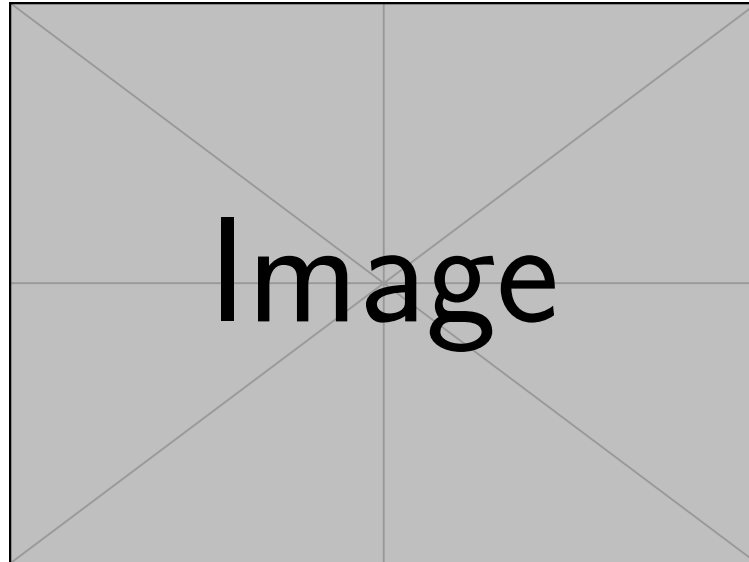


Рис. 4: Размещение модели

*Описание UML-схемы...*

3. Взаимодействие с элементами модели. После размещения модель будет разбивать на слои, представляющие отдельные структурные элементы здания, например стены, лестницы или двери. На каждый отдельный слой может накладываться эффект, изменяющий его отображение. На рисунке 5 показана структура системы слоев.

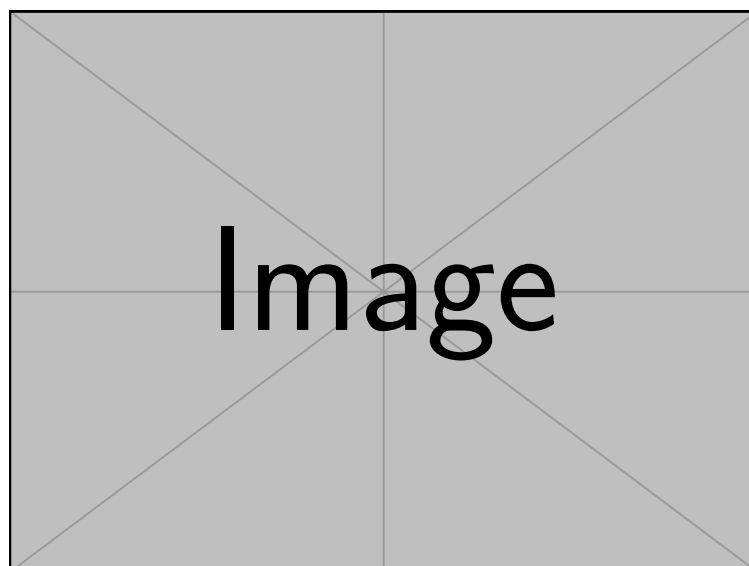


Рис. 5: Система слоев

## 2.3 Обзор оптимизационных подходов

Теперь можно рассмотреть подходы повышения производительности визуализации. Важность этого аспекта была выявлена ещё на самых ранних стадиях разработки прототипа. Информационные модели зачастую обладают очень комплексной геометрией. Более того, визуализация в виртуальной реальности накладывает дополнительные ограничения, так как изображение проходит двукратную отрисовку из-за наличия двух глаз с разной перспективой. В добавок к этому низкая частота кадров в виртуальной реальности может вызывать плохое самочувствие у пользователя.[15]

### Вспомогательные понятия

Для начала введем несколько вспомогательных терминов:

**Графический материал** – набор данных, ассоциируемый с моделью и определяющий то, как будет отрисована ее поверхность в зависимости от выбранного шейдера.

**Меш или полигональная сетка** (*англ. polygon mesh*) – структура данных, содержащая набор вершин, ребер и граней, определяющих форму многогранного объекта.

**Шейдер** (*англ. shader*) – разновидность компьютерных программ, запускаемых на графических процессорах, предназначенных для отрисовки изображений.

**Draw call** (*рус. Вызов отрисовки*) – команда отрисовки полигональной сетки, отдаваемая центральным процессором графическому.

### Распространенные причины проблем с производительностью

1. Сложная геометрия модели. Под сложной геометрией понимается большое количество полигонов (граней) в полигональной сетке модели.
2. Большое количество draw call'ов. Выполнение запроса на отрисовку выполняется центральным процессором и является достаточно трудоемкой операцией. За один вызов может быть обработана только одна полигональная сетка. Вполне возможна ситуация, при которой центральный процессор тратит больше времени, чтобы инициировать отрисовку, чем графический процессор будет ее исполнять.
3. Трудоемкие шейдеры. Алгоритм шейдера может иметь высокую вычислительную сложность (например использовать долговычисляемые тригонометрические функции) или иметь неподходящую структуру для запуска на графическом процессоре (например содержать многочисленные ветвления). Помимо этого работа шейдера может предполагать неоднократную отрисовку объекта для достижения определенного результата.

## Существующие подходы

### 1. Visibility culling (Отбор видимых полигонов).

Visibility culling – это семейство алгоритмов, нацеленное на предотвращение вызовов отрисовки для объектов невидимых в кадре.[16] Пример различных техник отбора видимых полигонов показан на рисунке 6. Подобные алгоритмы являются очень эффективными, когда количество объектов одновременно видимых в виртуальной сцене значительно меньше их общего количества, например в замкнутых помещениях внутри крупного здания.

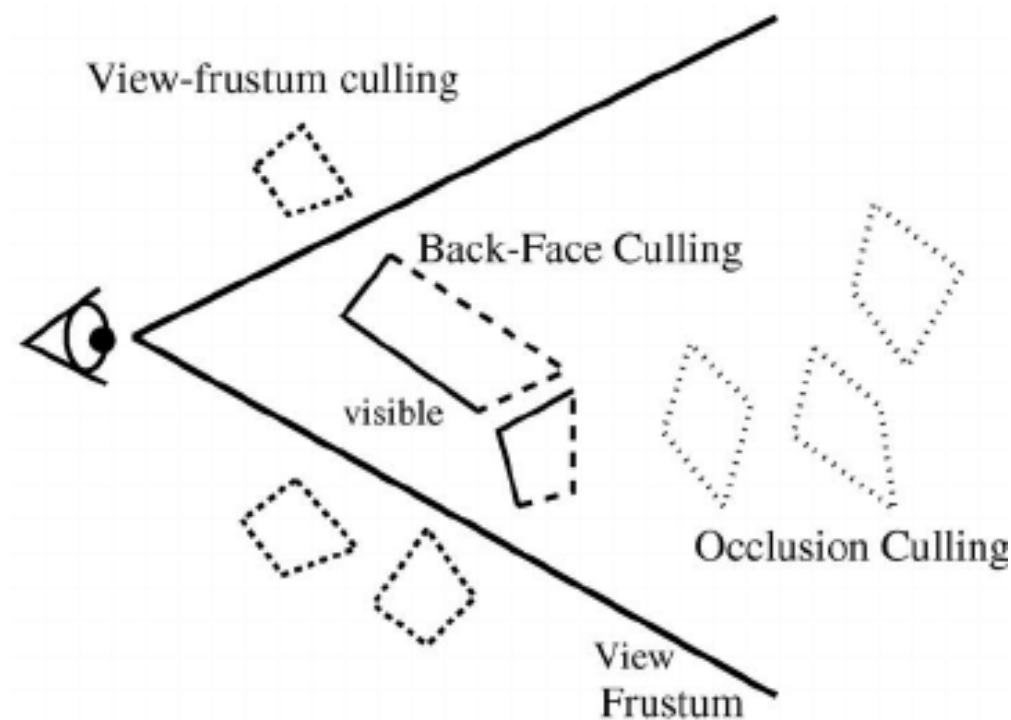


Рис. 6: Техники отбора видимых полигонов.[16]

- (a) View-frustum culling – это техника отбора, отсекающая отрисовку объектов, находящихся за границами поля зрения виртуальной камеры.
- (b) Back-face culling – это техника отбора, позволяющая избежать отрисовку геометрии, направленной в противоположную сторону от виртуальной камеры.
- (c) Occlusion culling – это техника отбора, предотвращающая отрисовку геометрии, скрытой за другими объектами виртуальной сцены.

### 2. LOD (англ. Level of detail – уровень детализации).

LOD – это оптимизационная техника, нацеленная на снижение используемого количества полигонов модели при ее удалении от виртуальной камеры. Для работы метода требуется создать несколько версий одной и той же модели с разным уровнем детализации (количеством полигонов), как это показано на рисунке 7.



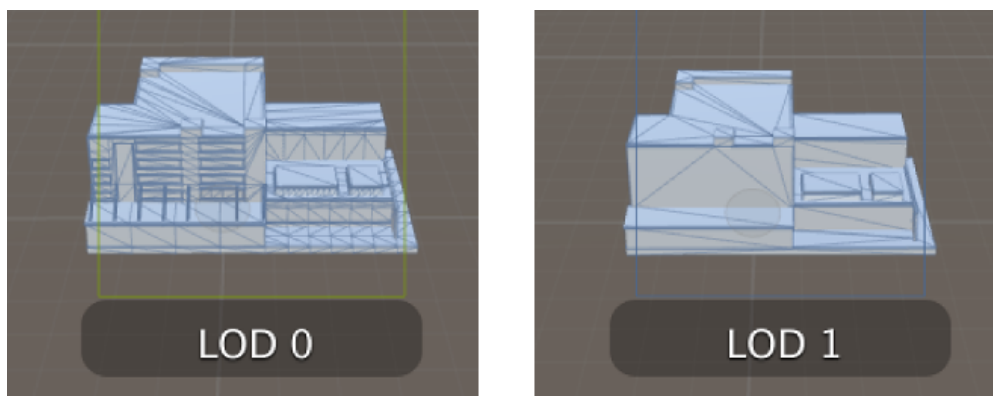


Рис. 7: Разные уровни детализации.[4]

Перед вызовом запроса отрисовки производится выбор необходимой модели, то есть вблизи от виртуальной камеры будут отрисовываться детализированные модели (LOD0), а вдали упрощенные (LOD1-LOD3).

### 3. Batching.

Батчинг – это оптимизационная техника, предназначенная для снижения количества запросов отрисовки за счет группировки нескольких полигональных сеток.

- (a) Батчинг может происходить динамически, если группируется множество простых объектов, с одинаковыми графическими материалами и текстурами (чего можно добиться с помощью создания атласа текстур). За счет этого можно отрисовывать несколько движущихся объектов за один вызов отрисовки, что имеет смысл, если продолжительность группировки меньше, чем затраты на многочисленные вызовы отрисовки.
- (b) С другой стороны батчинг может быть статическим, то есть происходить однократно и объединять неизменяемую геометрию в одну полигональную сетку, позволяя достичь ещё большей производительности, чем при динамической группировке. Стоит отметить, что подобная группировка снижает эффективность отбора видимых полигонов, так как сгруппированные объекты начнут восприниматься как один.

### 4. Geometry instancing (Дублирование геометрии).

Geometry instancing – это методика, позволяющая одновременно рендерить несколько объектов, имеющих одинаковую полигональную сетку. Такой подход в основном используется для отрисовки повторяющихся фоновых объектов, таких как растительность или здания. Объекты могут иметь разное положение в пространстве, размеры, отличающиеся графические материалы. Дублирование геометрии значительно снижает количество запросов на отрисовку.

## **Выбранный подход**

При разработке прототипа было принято решение использовать вариацию статического батчинга, при котором полигональные сетки всех объектов одного слоя (описано в предыдущем разделе) объединяются в одну на одном из этапов конвертации исходной информационной модели. В дальнейшем этот подход может быть пересмотрен, так как несмотря на продемонстрированную эффективность он обладает рядом недостатков, а именно пропадает возможность взаимодействия с отдельными объектами слоя, а также теряется значительная часть атрибутивной информации.

## Глава 3. Реализация

Данная глава содержит детали технической реализации прототипа. В первую очередь будет приведен перечень инструментов, используемых при реализации. Затем идет описание реализации серверной и клиентской части прототипа.

### 3.1 Обзор инструментов

#### Unity

В качестве фреймворка для выполнения проекта был выбран Unity. Unity – это фреймворк, предназначенный для разработки интерактивных графических приложений.[4] Первая версия фреймворка была выпущена в 2005 году и с тех пор продолжает активно развиваться. Для создания приложений Unity поддерживает более 20 платформ, включающих персональные компьютеры, мобильные устройства, игровые консоли и др. Фреймворк может быть использован для создания приложений с двумерной или трехмерной графикой, а также приложений в виртуальной или дополненной реальности.

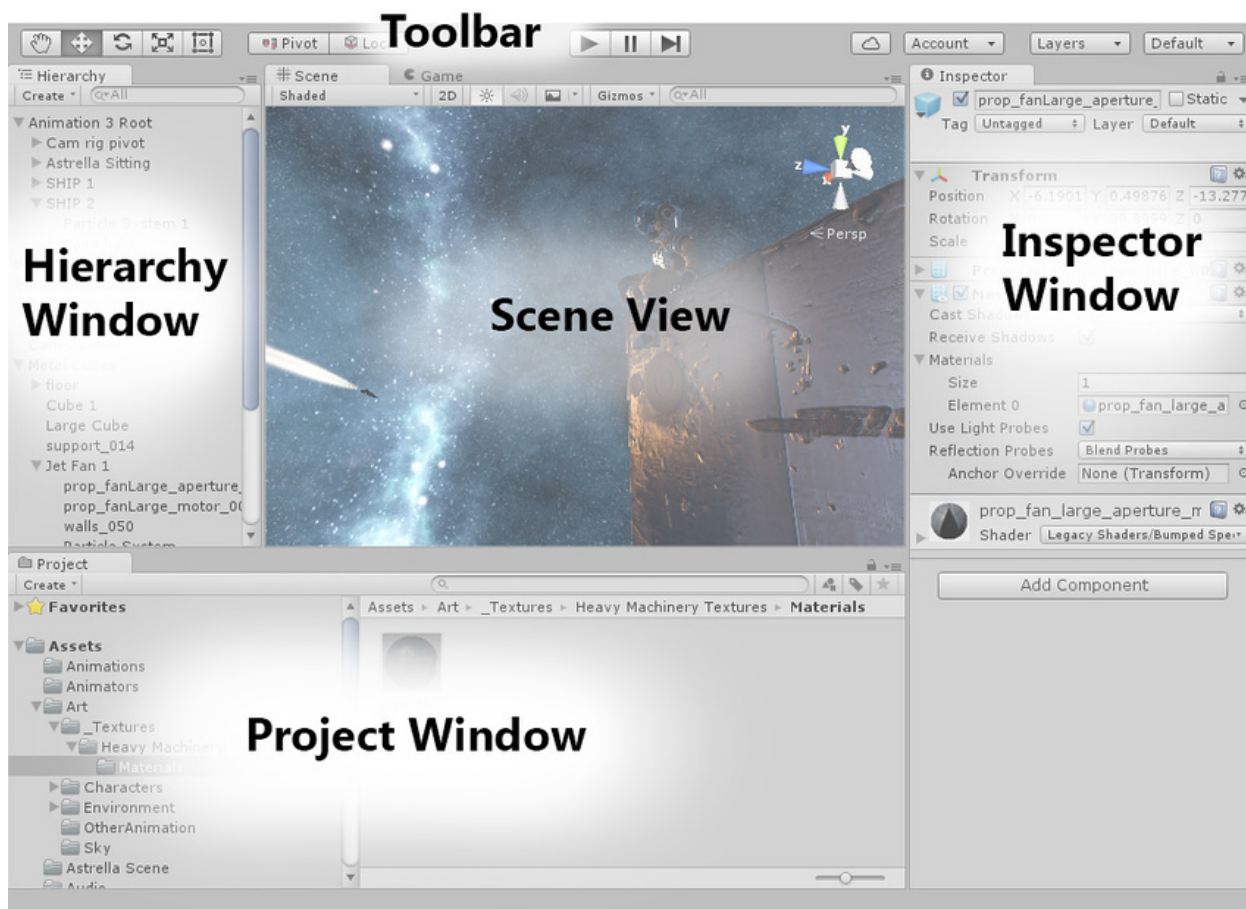


Рис. 8: Графический интерфейс редактора Unity

Unity имеет встроенные модули для работы с графикой, пользовательским вводом, физикой, пользовательским интерфейсом и сетевым взаимодействием. Компонент-

ная архитектура фреймворка позволяет легко расширять уже существующую функциональность.

Основное направление использования Unity – это разработка игр, тем не менее Unity также успешно применяется в киноиндустрии,[17] архитектуре, автомобилестроении,[18] разработке виртуальных тренажеров, а также в обучении искусственного интеллекта.[19]

## **C#**

C# – высокоуровневый мультипарадигменный язык общего назначения, разработанный компанией Microsoft в 1998-2001 годах в рамках платформы .NET Framework. C# относится к семье языков с C-подобным синтаксисом и используется для написания веб-приложений, приложений для персональных компьютеров и мобильных устройств. [20] C# является основным скриптовым языком фреймворка Unity, тем самым он используется для написания всей клиентской и серверной логики разрабатываемого прототипа.

## **SteamVR**

SteamVR – это инструмент, унифицирующий работу с различными устройствами виртуальной реальности, разработанный компанией Valve Corporation.[21] SteamVR обладает плагинами для фреймворков Unity и Unreal Engine, что позволяет интегрировать его в разрабатываемый прототип.

## **HTC Vive**

HTC Vive – это шлем виртуальной реальности, разрабатываемый компаниями HTC и Valve Corporation.[22] HTC Vive используется во время тестирования прототипа.

## **3ds Max**

3ds Max – профессиональное программное обеспечение для 3D-моделирования, разрабатываемое компанией Autodesk. 3ds Max является расширяемым инструментом, что позволяет автоматизировать часть процессов через создание дополнительных плагинов.[23] 3ds Max используется в процессе преобразования информационной модели из rvt-формата в формат fbx.

## **3.2 Серверная часть**

Конвертация информационной модели в FBX-формат

Загрузка модели в промежуточный проект

Упаковка моделей

## **3.3 Клиентская часть**

Загрузка модели

Размещение модели

Слои модели

Режим слоя: срезка

abc

## Заключение

В ходе выполнения работы был разработан прототип приложения, позволяющего инспектировать информационные модели в среде виртуальной реальности. Все задачи проекта были выполнены, а именно:

1. реализован процесс извлечения атрибутивной информации модели на уровне категорий объектов, задаваемых в Revit;
2. реализованна автоматическая конверсия информационной модели из формата редактора Revit в пакет, загружаемый на клиентской части приложения;
3. реализована возможность манипулирования представлением информационной модели в клиентской части приложения.

Разработанный прототип в дальнейшем может быть модернизирован или полностью пересмотрен для добавления новой функциональности. На данный момент рассматривается возможность синхронизации изменений информационной модели в реальном времени без повторного конвертирования, что потребует значительного пересмотра работы серверной части приложения. Помимо этого проводятся исследования по повышению качества извлечения атрибутивной информации модели.

## Список литературы

1. *Johnson R., Foote B.* Designing Reusable Classes // Journal of Object-Oriented Programming. — 1988. — июнь. — т. 1. — с. 22—35.
2. *Schmidt D.* Applying Design Patterns and Frameworks to Develop Object-Oriented Communication Software. — 2000. — апр.
3. *National Institute of Building Sciences.* Frequently asked questions about the National BIM Standard - United States. — URL: <https://www.nationalbimstandard.org/faqs> (дата обр. 01.02.2020).
4. *Unity Technologies.* Unity User Manual. — URL: <http://docs.unity3d.com> (дата обр. 05.04.2020).
5. *Путин В.* Перечень поручений Президента Российской Федерации по итогам заседания Государственного совета Российской Федерации 17 мая 2016 г. Пр-1138 ГС. — URL: <https://tomsk.gov.ru/uploads/ckfinder/userfiles/files/%D0%9F%D1%80-1138%D0%B3%D1%81.PDF> (дата обр. 08.04.2020).
6. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature / P. Cipresso [и др.] // Frontiers in Psychology. — 2018. — нояб. — т. 9.
7. *Akpan I. J., Shanker M.* A comparative evaluation of the effectiveness of virtual reality, 3D visualization and 2D visual interactive simulation: an exploratory meta-analysis // SIMULATION. — 2018. — февр. — т. 95, № 2. — с. 145—170.
8. *Unity Technologies.* Unity Reflect. — URL: <https://unity.com/products/reflect> (дата обр. 15.02.2020).
9. *IrisVR.* VR for Architecture, Engineering, and Construction. — URL: <https://irisvr.com/> (дата обр. 17.02.2020).
10. *Enscape.* Enscape - Architectural Visualization Software for Revit, SketchUp, Rhino & ArchiCad. — URL: <https://enscape3d.com/> (дата обр. 17.02.2020).
11. Integration of VR with BIM to facilitate real-time creation of bill of quantities during the design phase: a proof of concept study / J. Davidson [и др.] // Frontiers of Engineering Management. — 2019. — июнь.
12. OpenBIM-Tango integrated virtual showroom for offsite manufactured production of self-build housing / F. P. Rahimian [и др.] // Automation in Construction. — 2019. — т. 102. — с. 1—16. — ISSN 0926-5805.
13. *BuildingSmart.* Industry Foundation Classes (IFC). — URL: <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> (дата обр. 16.04.2020).
14. *Autodesk Inc.* Welcome to Revit 2019 Learning. — URL: <http://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ENU/> (дата обр. 20.01.2020).

15. *Weech S., Kenny S., Barnett-Cowan M.* Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review // *Frontiers in Psychology*. — 2019. — февр. — т. 10.
16. *Cohen-Or D., Chrysanthou Y., Silva C.* A Survey of Visibility for Walkthrough Applications // *Proceedings of SIGGRAPH*. — 2001. — янв.
17. *Liptak A.* How Neill Blomkamp and Unity are shaping the future of filmmaking with Adam: The Mirror. — URL: <https://www.theverge.com/2017/10/4/16409734/unity-neill-blomkamp-oats-studios-mirror-cinemachine-short-film> (дата обр. 15.04.2020).
18. *Edelstein S.* How gaming company Unity is driving automakers toward virtual reality. — URL: <https://www.digitaltrends.com/cars/unity-automotive-virtual-reality-and-hmi/> (дата обр. 15.04.2020).
19. *Captain S.* How Google's DeepMind will train its AI inside Unity's video game worlds. — URL: <https://www.fastcompany.com/90240010/deepminds-ai-will-learn-inside-unitys-video-game-worlds> (дата обр. 15.04.2020).
20. *Microsoft.* C# documentation. — URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/> (дата обр. 07.03.2020).
21. *Valve Corporation.* SteamVR Unity Plugin. — URL: [https://valvesoftware.github.io/steamvr\\_unity\\_plugin/](https://valvesoftware.github.io/steamvr_unity_plugin/) (дата обр. 03.12.2019).
22. *Wikipedia, the free encyclopedia.* HTC Vive. — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/HTC\\_Vive](https://en.wikipedia.org/wiki/HTC_Vive) (дата обр. 03.02.2020).
23. *Autodesk Inc.* 3ds Max Learning Center. — URL: <https://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2019/ENU/> (дата обр. 07.03.2020).