



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ «Информатика и системы управления»

---

КАФЕДРА «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

---

# РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

## *К КУРСОВОЙ РАБОТЕ*

### *НА ТЕМУ:*

*«Визуализация воды с использованием вокселей»*

Студент ИУ7-53Б  
(Группа)

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Виноградов И. А.  
(И. О. Фамилия)

Руководитель курсовой работы

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Волкова Л. Л  
(И. О. Фамилия)

*2023 г.*

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>5</b>
<b>1 Аналитический раздел</b>	<b>6</b>
1.1 Описание сцены . . . . .	6
1.2 Выбор оборудования . . . . .	6
1.3 Выбор алгоритма отрисовки . . . . .	7
1.3.1 Алгоритм, использующий z-буфер . . . . .	7
1.3.2 Алгоритм трассировки лучей . . . . .	8
1.4 Выбор алгоритма обхода воксельной сцены . . . . .	9
1.4.1 Алгоритм быстрого обхода вокселей для трассировки лучей	10
1.4.2 k-d дерево . . . . .	11
1.4.3 Разреженное воксельное октодерево . . . . .	12
1.5 Выбор модели освещения . . . . .	12
1.5.1 Модель освещения Ламберта . . . . .	13
1.5.2 Модель освещения Фонга . . . . .	13
1.5.3 Физически корректная модель . . . . .	14
<b>2 Конструкторский раздел</b>	<b>16</b>
2.1 Особенности написания программ для графических процессоров	16
2.2 Разработка алгоритмов . . . . .	16
2.2.1 Алгоритм трассировки лучей . . . . .	16
2.2.2 Алгоритм быстрого обхода вокселей для трассировки лучей	18
2.2.3 Алгоритм кеширования обратной репроекции . . . . .	19
2.3 Разработка материала воды . . . . .	20
2.4 Требования к программному обеспечению . . . . .	21
<b>3 Технологический раздел</b>	<b>22</b>
3.1 Средства реализации . . . . .	22
3.2 Реализации алгоритмов . . . . .	22
3.2.1 Реализация алгоритма быстрого обхода вокселей для трассировки лучей . . . . .	22
3.2.2 Реализация алгоритма трассировки лучей . . . . .	24
3.2.3 Реализация алгоритма кеширования обратной репроекции	25

3.3	Реализация материала воды . . . . .	26
3.4	Дополнительные алгоритмы . . . . .	26
3.5	Описание интерфейса программы . . . . .	27
3.6	Примеры работы программы . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Исследовательская часть</b>	<b>30</b>
4.1	Технические характеристики . . . . .	30
4.2	Постановка исследования . . . . .	30
4.3	Результат исследования . . . . .	31
4.4	Вывод . . . . .	32
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>33</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>36</b>

## Введение

Воксельная (англ. Voxel, Volumetric Pixel) графика используется для отрисовки трехмерных изображений.

Цель данной работы — реализовать программу для построения изображений трехмерных воксельных сцен в реальном времени с возможностью визуализации воды.

Чтобы достигнуть поставленной цели, требуется решить следующие задачи:

- выбрать алгоритмы компьютерной графики, позволяющие визуализировать трехмерную воксельную сцену в реальном времени;
- реализовать выбранные алгоритмы построения трехмерной сцены;
- исследовать зависимость времени отрисовки кадра от параметров алгоритма визуализации трехмерной сцены.

# 1 Аналитический раздел

В данном разделе будут рассмотрены возможности отрисовки трехмерных изображений в реальном времени, проанализированы особенности трехмерной воксельной графики; будет выбран метод решения поставленной задачи.

## 1.1 Описание сцены

Будет выполнена визуализация трехмерной сцены в воксельной графике. Согласно техническому заданию, будет визуализироваться движение воды. Будет синтезирована сцена, представляющая ландшафт с водоемом и источником воды. Подача воды из источника включается и выключается пользователем. Будет выполняться распространение воды.

Каждый из вокселей сцены обладает свойством одного материала. Необходимо определить три разных материала:

- материал воды,
- материал поверхности земли,
- материал воздуха.

## 1.2 Выбор оборудования

Построение трехмерных изображений — вычислительно сложная, и в то же время, чрезвычайно параллельная задача [1]. Такие особенности стали причиной появления специального оборудования для выполнения популярных задач компьютерной графики. Такие вычислительные устройства называются Графическими процессорами (англ. Graphics Processing Unit, GPU), хотя их применение не ограничивается вычислениями графических данных. Появление таких устройств вызвано ограничениями в разработке центральных процессоров. Они используются для последовательного выполнения кода с большим числом условных переходов. Особенностью графических процессоров является наличие большого числа ядер, способных эффективно выполнять множество вычислений параллельно [2].

Несмотря на большие возможности параллельного выполнения вычислительных задач, графические процессоры имеют органичные возможности

условного выполнения программ, в частности, рекурсивных, малую скорость памяти, и возможности взаимодействия с ней.

Такие особенности породили целый ряд алгоритмов, оптимизированных для выполнения на графических процессорах, которые отличаются от аналогичных для процессоров общего назначения. В частности, графические процессоры могут иметь специальные аппаратные блоки для ускоренного выполнения алгоритмов трассировки лучей, и все из них имеют аппаратное ускорение алгоритма  $z$ -буфера [3].

### 1.3 Выбор алгоритма отрисовки

При выборе алгоритма отрисовки должны быть учтены особенности поставленной задачи. Отрисовка будет выполняться в режиме реального времени. Этот факт предъявляет к реализации алгоритма требование ко времени отрисовки кадра: отрисовка кадра не должна занимать больше 100 миллисекунд. Также для визуализации воды следует учесть некоторые физические эффекты: отражение и преломление света. Выбираемый алгоритм отрисовки должен поддерживать визуализацию физических явлений.

Будут рассмотрены алгоритмы, эффективная по времени реализация которых может быть получена при использовании графических ускорителей.

#### 1.3.1 Алгоритм, использующий $z$ -буфер

$z$ -буфер является буфером глубины, используемым для хранения координат или глубины каждого видимого пикселя в пространстве изображения. При использовании глубина или значение  $z$  нового пикселя, который записывается в буфер кадра, сравнивается с глубиной этого пикселя, хранящейся в  $z$ -буфере. Если сравнение показывает, что новый пиксель находится перед пикселем, хранящимся в буфере кадра, то новый пиксель записывается в буфер кадра, а  $z$ -буфер обновляется новым значением  $z$ . В противном случае никаких действий не предпринимается. Концептуально алгоритм является поиском по  $x, y$  для нахождения наибольшего значения  $z(x, y)$  [4].

Аппаратные графические ускорители изначально были спроектированы для использования в мультимедийных приложениях, использующих алгоритм  $z$ -буфера. В силу этого почти все их конвейеры заточены специально под эффективную по времени реализацию этого алгоритма с некоторыми

расширениями.

Однако, алгоритм  $z$ -буфера плохо подходит для реализации физически корректного рендеринга. В частности, симуляция отражения или преломления требует множественной отрисовки сцены из разных точек, что замедляет общий процесс отрисовки [5]. Дополнительно, получаемые при отрисовке результаты оказываются менее физически точными, чем при использовании алгоритма трассировки лучей.

### 1.3.2 Алгоритм трассировки лучей

Почти все системы фотореалистичного рендеринга основаны на алгоритме трассировки лучей. Алгоритм трассировки лучей основан на отслеживании пути луча света через сцену, по мере его взаимодействия и отражения от объектов в окружающей среде. Несмотря на то, что существует множество способов реализовать алгоритм трассировки лучей, все такие системы должны включать в себя и симулировать следующие объекты и феномены.

- 1) Камера: Модель камеры определяет, как и откуда просматривается сцена, включая то, как изображение сцены записывается на сенсоре. Многие системы рендеринга генерируют оптические лучи, начинающиеся в камере, которые затем прослеживаются в сцене.
- 2) Пересечение лучей и объектов: необходимо точно определить, где заданный луч пересекает заданный геометрический объект. Кроме того, необходимо определить некоторые свойства объекта в точке пересечения, такие как нормаль поверхности или его материал.
- 3) Источники света: трассировщик лучей должен моделировать распределение света по всей сцене, включая не только местоположение самих источников света, но и способ, которым они распространяют свою энергию в пространстве.
- 4) Видимость: чтобы знать, может ли заданный источник света передавать энергию в точку поверхности, нужно знать, есть ли непрерывный путь от точки до источника света. Можно построить луч от поверхности до источника света, найти ближайшее пересечение луча с объектом и сравнить расстояние пересечения с расстоянием до источника света.

- 5) Рассеяние на поверхности: каждый объект должен предоставить описание своего вида, включая информацию о том, как свет взаимодействует с поверхностью объекта, а также о характере перераспределенного (или рассеянного) света. Модели рассеивания на поверхности обычно параметризуются таким образом, чтобы можно было смоделировать разнообразные внешние виды.
- 6) Непрямое распространение света: поскольку свет может достигать поверхности после отражения от других поверхностей или прохождения через них, обычно необходимо проследить дополнительные лучи, исходящие из поверхности, чтобы полностью учесть этот эффект [6].

Характеристики алгоритма:

- поддержка физически корректной отрисовки не требует больших модификаций алгоритма, дополнительных затрат памяти;
- физически корректная отрисовка работает для большинства физических эффектов, исключая некоторые специфичные (к примеру, каустики);
- слабая аппаратная поддержка (только некоторые новые графические ускорители, и только некоторые графические API);
- большие вычислительные затраты.

## 1.4 Выбор алгоритма обхода воксельной сцены

Воксель (англ. Voxel, Volumetric pixel) — способ представления геометрии, альтернативный полигональному. Воксель представляет собой некоторое значение на регулярной решетке в трехмерном пространстве. Воксели часто используются при анализе медицинских и научных данных. Воксельная графика позволяет достигать большей детализации, чем возможно при использовании полигонов.

Главная проблема воксельной графики — большое число затрачиваемой памяти и медленный доступ к ней. Поэтому все воксельные алгоритмы фокусируются на ускорении доступа к индивидуальным вокселям, для использования в алгоритмах отрисовки. Рассмотрим и выберем алгоритм обхода воксельной сцены и структуру данных хранения вокселей.



### 1.4.1 Алгоритм быстрого обхода вокселей для трассировки лучей

Рассматриваемый алгоритм описан в [7]. Он разработан графических ускорителей и повсеместного использования трассировки лучей. В ней формализован и описан несложный алгоритм обхода воксельной трехмерной сетки с константным масштабом. На рисунке 1 представлена иллюстрация работы алгоритма быстрого обхода вокселей. На рисунке «Grid» означает воксельную сетку карты, а «Ray» — трассируемый луч.

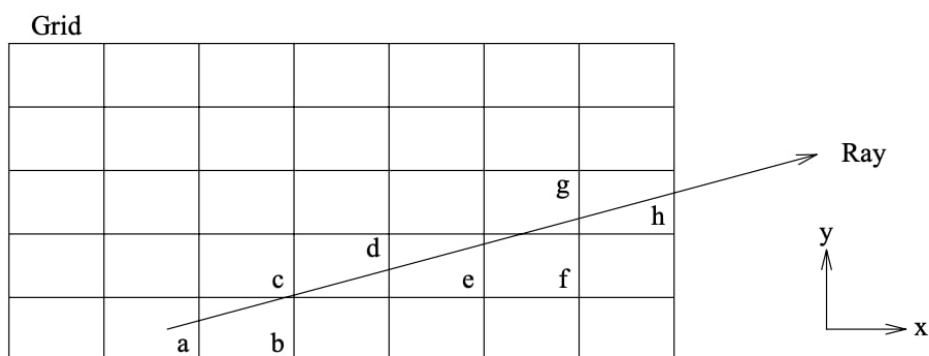


Рисунок 1 – Иллюстрация работы алгоритма быстрого обхода вокселей [7]

Переход от одного вокселя к его соседу требует только двух сравнений чисел с плавающей запятой одного сложения чисел с плавающей запятой. Кроме того, исключаются множественные пересечения лучей с объектами, находящимися в более чем одном вокселе [7].

Авторами отмечается один существенный недостаток: высокие вычислительные затраты. Для решения этой проблемы они предлагают вводить оптимизационные структуры, к примеру, BVH (англ. Bounding Volume Hierarchy — иерархия ограничивающих объемов). Такие структуры должны разделять пространство мира и проверять луч на столкновение только с его частью, вместо всего пространства. Проблема такого подхода заключается в том, что BVH требует больших вычислительных затрат на построение, и само построение — NP-полная задача. Это делает рассматриваемый алгоритм малоприменимым во всех нетривиальных случаях.

### 1.4.2 k-d дерево

k-d дерево (сокращение от k-мерного дерева) — это структура данных для разделения пространства, предназначенная для организации точек в k-мерном пространстве. k-d деревья являются полезной структурой данных для нескольких приложений, таких как поиск с использованием многомерного ключа поиска (например, поиск по диапазону и поиск ближайшего соседа) и создание облаков точек. k-d деревья являются особым случаем деревьев бинарного разделения пространства. k-d дерево — это бинарное дерево, где каждая вершина — это точка в k-мерном пространстве. Каждая вершина, не являющаяся листом может быть представлена как неявная гиперплоскость, разделяющая пространство на две части. Точки в каждой из частей представлены соответствующими поддеревьями. На рисунке 2 приведен пример двумерного k-d дерева.

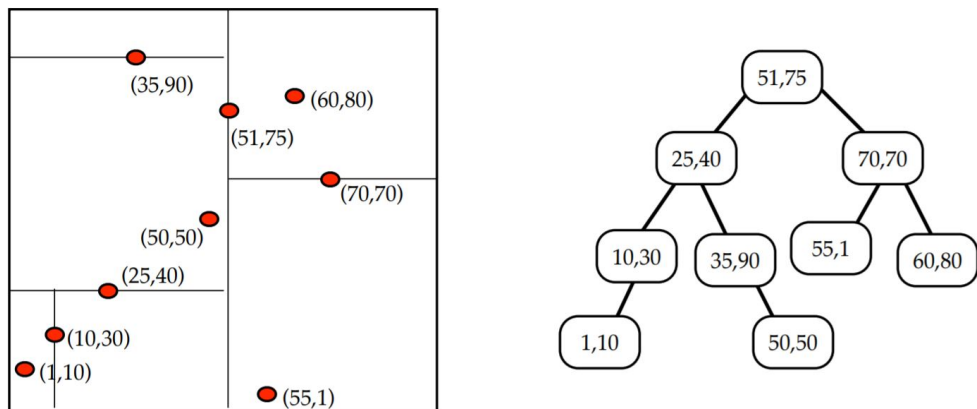


Рисунок 2 – Пример двумерного k-d дерева [8]

k-d дерево стало популярным как основная оптимизационная структура в трассировщиках лучей. Были предложены алгоритмы оптимизации структуры для графических ускорителей. Результаты замеров показывают, что скорость отрисовки сцены с использованием k-d дерева как минимум на порядок больше, чем скорость отрисовки в сетке с константным размером сетки.

k-d дерево можно использовать для отрисовки сцен с геометрией, хранимой в произвольном формате. Вариант k-d дерева, используемый при воксельной отрисовке — октодерево. Это k-d дерево в трехмерном пространстве, где у каждой родительской вершины 8 детей [9].

### 1.4.3 Разреженное воксельное октодерево

Проблема обычного октодерева — это то, что оно хранит данные для каждого из элементов пространства. Обычно сцены являются разреженными, что делает плотное хранение данных избыточным по памяти, и менее производительным. Поэтому чаще всего при отрисовке воксельных сцен в качестве оптимизационной структуры данных применяется разреженное воксельное октодерево. На рисунке 3 приведен пример октодерева.

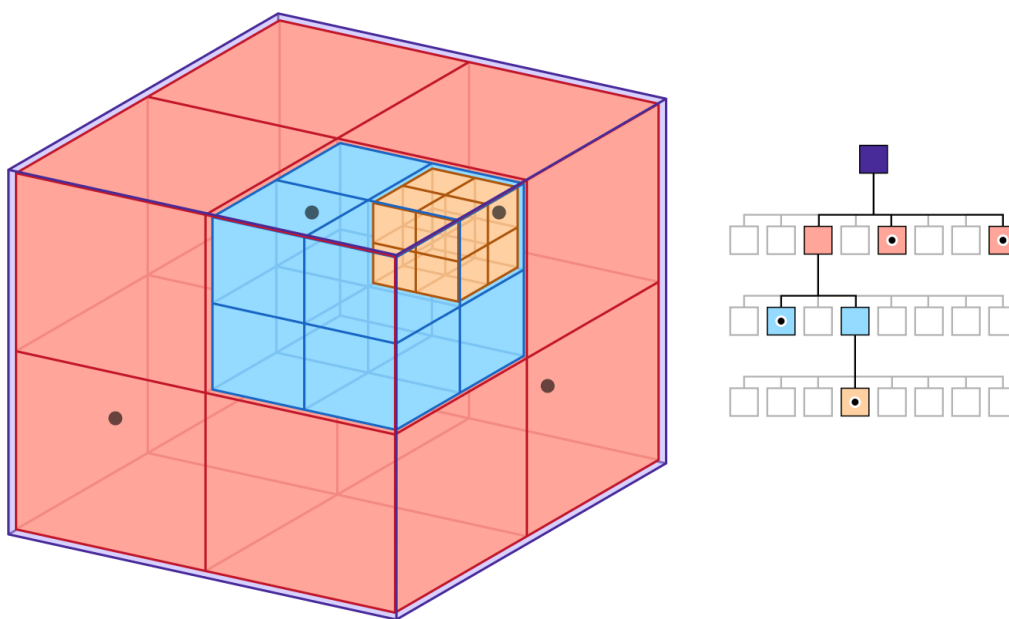


Рисунок 3 – Пример октодерева [10]

Такая структура данных имеет как отличные временные характеристики, так и малые затраты памяти. Основная сложность заключается в организации данных в оперативной памяти, на диске, и в памяти графического ускорителя [11].

### 1.5 Выбор модели освещения

Модель освещения в случае трассировки лучей — это фундаментальная характеристика программы-отрисовщика. Это связано с тем, что трассировка лучей полагается на выбранную модель освещения при построении изображения, и от выбранной модели зависят не только детали картинки, как в случае с  $z$ -буфером, но качества результата в целом.

### 1.5.1 Модель освещения Ламберта

Самая простая модель затенения основана на наблюдении, сделанном Ламбертом в 18 веке: количество энергии от источника света, которое падает на поверхность, зависит от угла поверхности к свету. Поверхность, направленная прямо на свет, получает максимальное освещение; поверхность, касательная к направлению света (или обращенная к свету), не получает освещение; и между ними освещение пропорционально косинусу угла  $\theta$  между нормалью поверхности  $n$  и источником света  $l$ . Это приводит к модели освещения Ламберта:

$$L = k_d \cdot I \cdot \max(0, n \cdot l), \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность источника света. Поскольку  $n$  и  $l$  — единичные векторы, мы можем использовать  $n \cdot l$  как удобное сокращение для  $\cos(\theta)$ . Вектор  $l$  вычисляется путем вычитания точки пересечения луча и поверхности из положения источника света [5].

### 1.5.2 Модель освещения Фонга

Модель освещения Ламберта не зависит от точки обзора: цвет поверхности не зависит от направления, с которого на нее смотреть. Многие реальные поверхности обладают определенной степенью блеска, создающего мерцание или зеркальные отражения, которые кажутся перемещающимися при изменении точки обзора. Ламбертово освещение не создает мерцания и создает матовый вид объекта, и множество моделей освещения добавляют зеркальную составляющую к ламбертовому освещению; ламбертова часть в таком случае является диффузной составляющей.

Очень простая и широко используемая модель для зеркальных мерцаний была предложена Фонгом, а позже обновлена Блинном до формы, которая наиболее распространена сегодня. Идея заключается в создании отражения, которое ярче всего, когда векторы  $v$  и  $l$  симметрично расположены относительно нормали поверхности, то есть, когда происходит зеркальное отражение; отражение затем постепенно уменьшается, по мере того, как векторы отдаляются от зеркальной конфигурации. Таким образом, формула модели

освещения Фонга имеет следующий вид:

$$h = \frac{v + 1}{||v + 1||}, \quad (2)$$

$$L = k_d I_{\max}(0, n \cdot l) + k_s I_{\max}(0, n \cdot h)^2, \quad (3)$$

где  $h$  — биссектриса угла между  $v$  и  $l$ ;  $p$  — экспонента Фонга;  $k_s$  — коэффициент зеркальности [12][5].

### 1.5.3 Физически корректная модель

Модели Ламберта и Фонга просты, и поэтому их использование не требует больших вычислительных затрат. Но в то же время, они лишь пытаются построить упрощенную модель освещения пространства, в то время как может быть построена более общая симуляция физических явлений.

Подход, в котором для построения изображений используется симуляция физических явлений, а не ее приближение, называется физически корректной моделью освещения. Реализация алгоритмов такого подхода построена на Методе Монте-Карло. Производится отрисовка сцены с множеством переменных параметров, к примеру, направлению лучей, или распределению света по пространству, которые имеют заранее известные характеристики вероятностного распределения.

Задача построения изображения в физически корректной модели — задача интеграции уравнения рендеринга [13]. Для интеграции используется статистический анализ распределения значений двулучевой функции отражательной способности [6].

### Микрогранные модели

Многие подходы к моделированию отражения и пропускания поверхности, основанные на геометрической оптике, основаны на идее того, что шероховатые поверхности могут быть представлены в виде набора маленьких граней. Микрогрании часто моделируются в виде поверхностей с высотой, где распределение ориентации граней описывается статистически. На рисунке 4 приведена иллюстрация принципа работы микрогранных моделей.

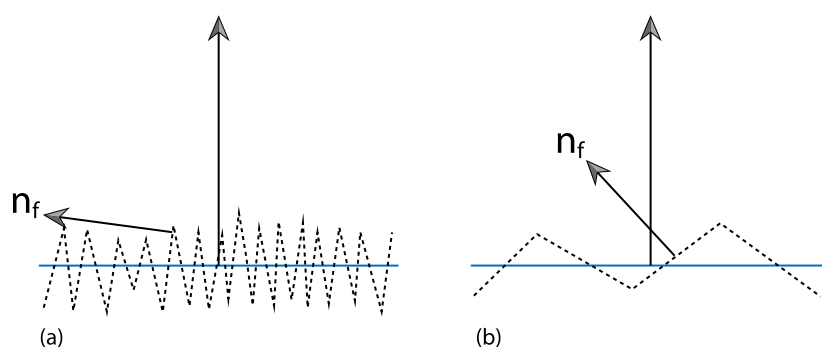


Рисунок 4 – Иллюстрация работы микрогранных моделей [6]

Модели отражения, основанные на микрогранях, которые проявляют идеальное зеркальное отражение и пропускание, успешно используются для моделирования рассеяния света от различных гляцевых материалов, включая металлы, пластик и матовое стекло. Одной из важных характеристик поверхности микрограни является функция распределения, которая показывает дифференциальную площадь микрограней с нормалью поверхности. Две самые популярные модели микрограней — основанная на модели Бекерманна, и основанная на модели GGX. Их разница заключается в различных радиометрических свойствах, которые неважны для непрофессионального разработчика трассировщиков. Однако на практике, модель GGX показывает лучшие результаты при одинаковом количестве вычислений [6][14].

## Вывод

Было принято решение выполнять разработку для выполнения на графическом процессоре, поскольку это позволяет выполнять отрисовку в реальном времени. В качестве алгоритма отрисовки был выбран алгоритм трассировки лучей. В качестве алгоритма обхода сцены был выбран алгоритм быстрого обхода вокселей. В качестве модели освещения была выбрана физически корректная модель с использованием микрограней с моделью GGX, поскольку такой вариант предоставляет лучший вариант получения реалистичных изображений [14].

## 2 Конструкторский раздел

В данном разделе будут описаны особенности написания программ для графических процессоров, будут разработаны алгоритмы, выбранные для решения поставленной задачи.

### 2.1 Особенности написания программ для графических процессоров

Написание программ для графических процессоров имеет следующие особенности:

- получение входных данных в виде последовательности графических примитивов;
- разделение программы на несколько этапов;
- использование специального языка программирования;
- отсутствие прямого доступа к памяти;
- высокая вычислительная стоимость условных переходов.

Входными данными являются треугольники. При отрисовке сцены используется два треугольника, определяющих прямоугольник видимости экрана. Программы, называемые шейдерами (англ. Shader), конвейера (англ. Pipeline) графического процессора делятся на несколько этапов. Двумя основными этапами, без которых отрисовка не может быть выполнена, являются этапы выполнения вершинного (англ. Vertex) и фрагментного (англ. Fragment) шейдеров. Вершинный шейдер выполняется для каждой из вершин один раз, и его результаты линейно интерполируются. Фрагментный шейдер выполняется для каждого пикселя экрана и выполняет подсчет цвета этого пикселя.

### 2.2 Разработка алгоритмов

#### 2.2.1 Алгоритм трассировки лучей

На рисунке 5 приведена схема алгоритма работы программы. `MAX_BOUNCE_COUNT` — это целочисленная константа, обозначающая максималь-

ное число отскоков одного луча. Под цветом понимается трехмерный вектор в формате RGB в диапазоне  $[0, 1)$ .  $rgb(0, 0, 0)$  — функция черного цвета.

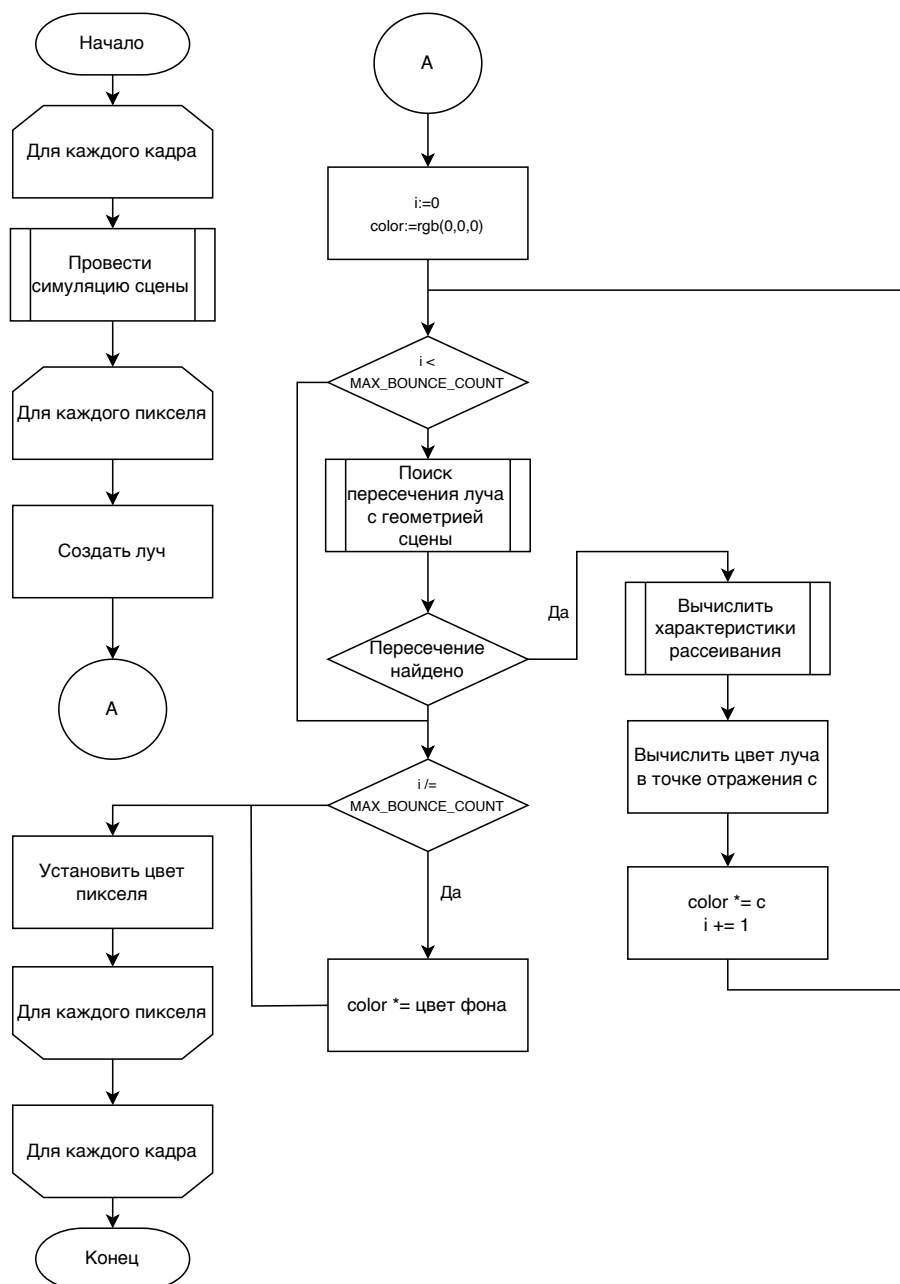


Рисунок 5 – Схема алгоритма отрисовки

Алгоритм трассировки лучей реализуется в фрагментном шейдере. Вычисление вектора направления луча производится в вершинном шейдере и линейно интерполируется между всеми пикселями. В силу этого в фрагментных шейдерах необходимо произвести нормализацию вектора направления луча перед его использованием.

Для передачи информации о камере используются две квадратных матрицы размерности 4: матрица проекции камеры и матрица вида камеры. Мат-



рица вида камеры содержит информацию о том, как точка из пространства сцены преобразуется в пространство камеры. Матрица проекции содержит информацию о том, как точка из пространства камеры преобразуется в пространство изображения. Разделения преобразования на две части позволяет уменьшить число вычислений в случаях, когда вид меняется, а проекция остается неизменной.

В листинге 1 приведен псевдокод вершинного шейдера, выполняющий вычисление координаты начала луча и вектора его направления.

Листинг 1 – Вычисление координаты начала луча и вектора его направления

```
vec4 t1 = inverse(projection_matrix) * vec4f(position, -1.0,
    1.0);
vec4 t2 = view_matrix * vec4f(t1.xyz, 0.0);
vec3 ray_direction = t2.xyz;
vec3 ray_origin = vec3(view_matrix[3][0], view_matrix[3][1],
    view_matrix[3][2]);
```

## 2.2.2 Алгоритм быстрого обхода вокселей для трассировки лучей

На рисунке 6 представлена схема алгоритма быстрого обхода вокселей для трассировки лучей. Числовая константа `MAX_DISTANCE` означает максимальную дальность видимости.

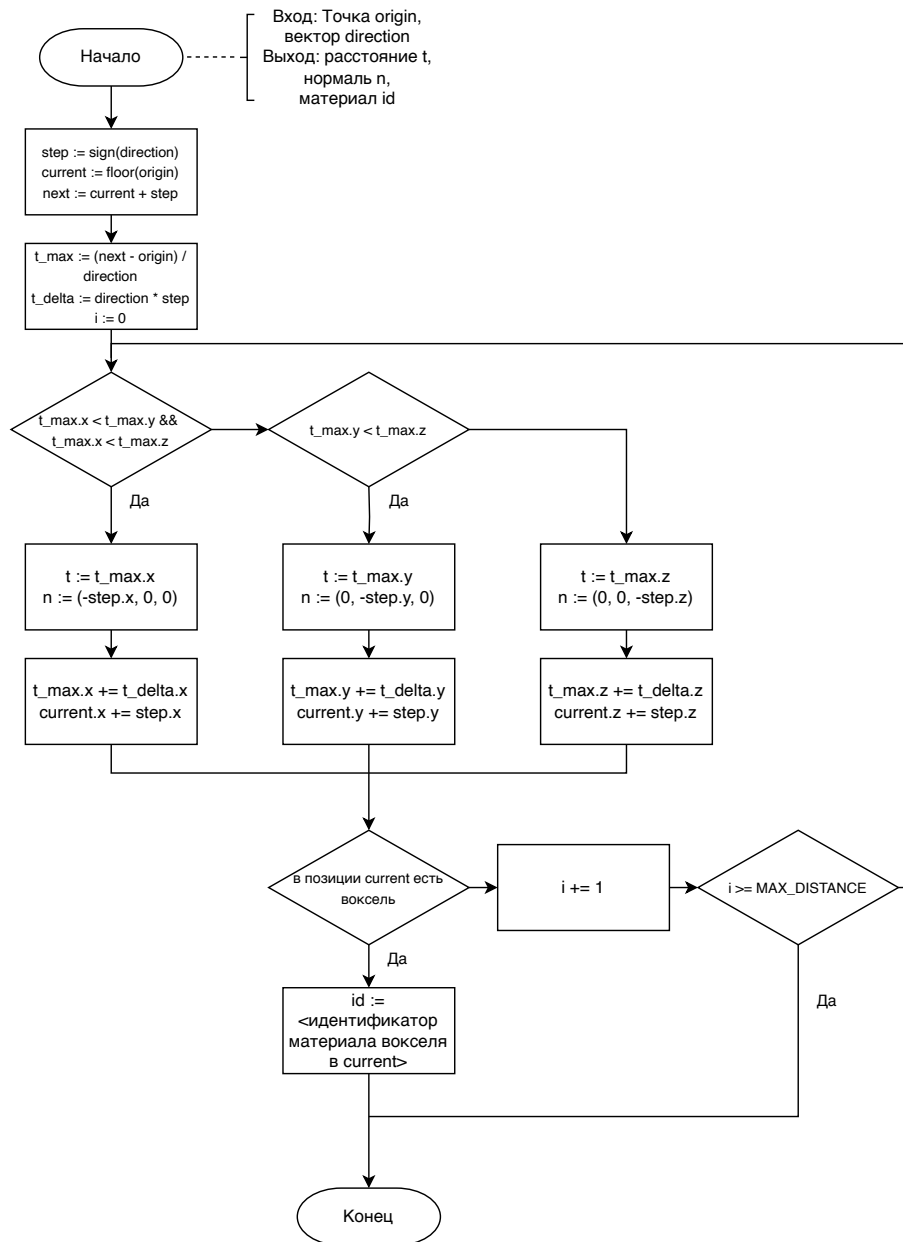


Рисунок 6 – Алгоритм быстрого обхода вокселей для трассировки лучей

### 2.2.3 Алгоритм кеширования обратной репроекции

Временная обратная репроекция — это процесс отображения ранее сгенерированного кадра на текущий кадр. Это позволяет повторно использовать информацию или, в случае трассировки лучей, накапливать семплы для получения более четкого изображения даже при движении [15].

На рисунке 7 представлена схема алгоритма кеширования обратной репроекции.



Рисунок 7 – Схема алгоритма кеширования обратной репроекции

В листинге 2 приведен псевдокод проецирования точки в пространстве текущего кадра на пространство другого кадра.

Листинг 2 – Проецирование одного кадра на другой

```

vec4 p = projection_matrix * inverse(previous_view_matrix) *
    vec4(position, 1.0);
p = p.xyz / p.w;
vec2 previous_uv = vec2((p.x / 2.0) + 0.5, (p.y / 2.0) + 0.5);
  
```

## 2.3 Разработка материала воды

В алгоритм трассировки лучей, при своей работе, может учитывать свойства материалов поверхностей, с которыми происходит столкновение трассируемого луча. Для получения качественного изображения воды требуется выбрать и реализовать модель, с использованием которой будет выполняться отрисовка поверхностей воды.

В [16] описан материал, называемый диэлектриком, и указано, что чистая вода является идеальным диэлектриком. Было принято решение использовать данный материал в качестве модели воды. При столкновении с поверхностью,

обладающей свойствами данного материала, луч с определяемой вероятностью может либо быть преломлен согласно закону Снеллиуса, либо отражен согласно закону полного внутреннего отражения. В формуле 4 приведена формула закона Снеллиуса:

$$\eta_1 * \sin(\theta_1) = \eta_2 * \sin(\theta_2), \quad (4)$$

где  $\eta$  — коэффициент преломления среды, а  $\theta$  — угол падения.

В качестве параметров материала вводятся коэффициент преломления, численно равный отношению скорости света в воздухе к скорости света в диэлектрике, и цвет.

## 2.4 Требования к программному обеспечению

Программа должна предоставлять следующий функциональность:

- получение изображения сцены с учетом материалов объектов сцены и освещения;
- интерактивное управление камерой;
- время отрисовки одного кадра не больше 100 мс;
- симуляция распространения воксельных частиц воды;
- функциональность управления источником воды.

Программа должна корректно и оперативно реагировать на все действия пользователя.

## Вывод

В данном разделе были описаны особенности алгоритмов для выполнения на графических процессорах, алгоритмы и структуры данных, выбранные и разработанные для решения поставленной задачи. Предъявлены требования к программному обеспечению.

## **3 Технологический раздел**

В данном разделе будут рассмотрены особенности реализации программного обеспечения (ПО), разработанного в конструкторской части работы, и приведены примеры работы программы.

### **3.1 Средства реализации**

В качестве графического API для реализации разработанного ПО был выбран WebGPU [17] — современный переносимый графический API. Он может быть использованным при разработке на любой из платформ, поддерживающих популярные API: Direct3D [18], Metal [19], Vulkan [20], OpenGL ES [21], WebGL [22] и другие.

В качестве языка программирования для реализации ПО был выбран Rust — статически типизированный компилируемый язык программирования общего назначения [23]. Данный выбор обусловлен наличием возможностей компиляции на множественное число платформ, в том числе на WASM [24], наличием библиотек с поддержкой WebGPU, линейной алгебры.

Для реализации графического интерфейса была выбрана библиотека Dear ImGui [25]. Она реализует графический интерфейс в режиме ImGui (англ. immediate mode GUI). Библиотека написана для использования с любым графическим API и представляет способ динамического программирования интерфейсов.

ПО реализовано для платформы WASM и нативных MacOS, Linux, Windows. Алгоритм отрисовки реализован в вершинном и фрагментном шейдерах на языке WGSL [26].

### **3.2 Реализации алгоритмов**

#### **3.2.1 Реализация алгоритма быстрого обхода вокселей для трассировки лучей**

В листинге 1 приведена реализация алгоритма быстрого обхода вокселей для трассировки лучей.

Листинг 1 – Реализация алгоритма быстрого обхода вокселей для трассировки лучей

```
fn voxel_traverse(ray: Ray) -> HitRecord {
    var record: HitRecord;
    let origin = ray.origin;
    let direction = normalize(ray.direction);
    let step = vec3f(sign(direction.x), sign(direction.y),
        sign(direction.z));
    var current_voxel = vec3i(floor(origin));
    let next_bound = vec3f(current_voxel + (step + vec3i(1)) /
        2);
    var t_max = (next_bound - origin) / direction;
    let t_delta = direction * step;
    for (var i: i32 = 0; i<MAXIMUM_TRAVERSAL_DISTANCE; i+=1) {
        if t_max.x < t_max.y && t_max.x < t_max.z {
            record.offset_id = current_voxel.x;
            record.t = t_max.x;
            record.normal = vec3f(-step.x, 0.0, 0.0);
            t_max.x += t_delta.x;
            current_voxel.x += step.x;
        } else if t_max.y < t_max.z {
            record.offset_id = current_voxel.y;
            record.t = t_max.y;
            record.normal = vec3f(0.0, -step.y, 0.0);
            t_max.y += t_delta.y;
            current_voxel.y += step.y;
        } else {
            record.offset_id = current_voxel.z;
            record.t = t_max.z;
            record.normal = vec3f(0.0, 0.0, -step.z);
            t_max.z += t_delta.z;
            current_voxel.z += step.z;
        }
        record.id = textureLoad(voxel_data, current_voxel, 0).r;
        if record.id != 0u {
            record.pos = ray_at(ray, record.t + 0.001);
            break;
        }
    }
    return record;
}
```

### 3.2.2 Реализация алгоритма трассировки лучей

В листинге 2 приведена реализация алгоритма трассировки лучей. Функция `scatter` выполняет расчет цвета и направления отражения луча.

Листинг 2 – Реализация алгоритма трассировки лучей

```
fn trace(ray_: Ray) -> TraceResult {
    var result: TraceResult;
    result.color = vec3f(1.0);
    var ray = ray_;
    let hrec = voxel_traverse(ray);
    if hrec.id == 0u {
        result.color = vec3f(0.5);
        return result;
    }
    let srec = scatter(ray, hrec);
    result.color *= srec.attenuation;
    ray.origin = hrec.pos;
    ray.direction = normalize(srec.direction);
    result.pos = hrec.pos;
    result.id = hrec.id;
    result.normal = hrec.normal;
    result.offset_id = hrec.offset_id;
    var i: i32 = 1;
    for (; i < MAX_BOUNCE_COUNT; i += 1) {
        let hrec = voxel_traverse(ray);
        if hrec.id == 0u {
            break;
        }
        let srec = scatter(ray, hrec);
        result.color *= srec.attenuation;
        ray.origin = hrec.pos;
        ray.direction = normalize(srec.direction);
    }
    return result;
}
```

### 3.2.3 Реализация алгоритма кеширования обратной репроекции

В листинге 3 приведена реализация алгоритма кеширования обратной репроекции.

Листинг 3 – Реализация алгоритма кеширования обратной репроекции

```
let point = projection_matrix * prev_view_matrix * vec4f(pos,
    1.0);
let p = point.xyz / point.w;
let puv1 = (p.xy + vec2f(1.0)) * 0.5;
let puv = vec2f(puv1.x, 1.0 - puv1.y);
let prev_normal = textureSample(prev_normal_tex,
    prev_tex_sampler, puv).rgb;
let prev_offset_id = textureSample(prev_offset_tex,
    prev_tex_sampler, puv).r;
let prev_mat_id = textureSample(prev_mat_tex, prev_tex_sampler,
    puv).r;
let prev_cache_tail = textureSample(prev_cache_tail_tex,
    prev_tex_sampler, puv).r;
let prev_color = textureSample(prev_color_tex, prev_tex_sampler,
    puv).rgb;
if result.material_id != 0.0 {
    if puv.x > 0.0 && puv.x < 1.0 &&
        puv.y > 0.0 && puv.y < 1.0 &&
        result.material_id == prev_mat_id &&
        distance(result.normal.xyz, prev_normal) < 0.1 &&
        result.offset_id == prev_offset_id
    {
        result.cache_tail = (1.0 - ALPHA) * prev_cache_tail;
        result.color = vec4f((ALPHA * result.color.xyz) + (1.0 -
            ALPHA) * prev_color, 1.0);
    } else {
        result.cache_tail = 1.0;
    }
}
```

Каждый кадр использует 4 буфера, содержащих следующую информацию о каждом пикселе:

— цвет,



- вектор нормали,
- координаты первого столкновения луча при трассировке,
- идентификатор материала.

В ходе отрисовки каждого кадра имеется доступ к буферам прошлого кадра, что позволяет выполнять обратную репроекцию.

### 3.3 Реализация материала воды

В листинге 4 приведена реализация материала воды. Также в программе реализованы материалы матовой поверхности и поверхности металла аналогично тем, что описаны в [16]. Функция `schlick` выполняет аппроксимацию Шлика коэффициента вклада фактора Френеля в зеркальное отражение.

Листинг 4 – Реализация материала воды

```
var refraction_ratio = material.refractive_index;
let rn = dot(ray.direction, hrec.normal);
if rn <= 0.0 {
    refraction_ratio = 1.0 / refraction_ratio;
}
let cos_theta = min(-rn, 1.0);
let sin_theta = sqrt(1.0 - cos_theta * cos_theta);

if refraction_ratio * sin_theta > 1.0 ||
    schlick(cos_theta, refraction_ratio) > random_f32() {
    srec.direction = reflect(ray.direction, hrec.normal);
    srec.attenuation = vec3f(1.0);
} else {
    srec.direction = refract(ray.direction, hrec.normal,
                            refraction_ratio);
    srec.attenuation = material.albedo;
}
```

### 3.4 Дополнительные алгоритмы

При реализации программы также были реализованы дополнительные алгоритмы, рассмотрение которых выходит за рамки данной работы. Список алгоритмов и их назначения:

- `xorshift32` [27] — алгоритм генерации случайных чисел, используемый в шейдерах;
- шум Перлина [28] — используется для генерации ландшафта;
- размытие по Гауссу — используется для уменьшения количества шума на изображении;
- алгоритм симуляции распространения воды.

### 3.5 Описание интерфейса программы

На рисунке 8 представлен интерфейс реализованной программы.

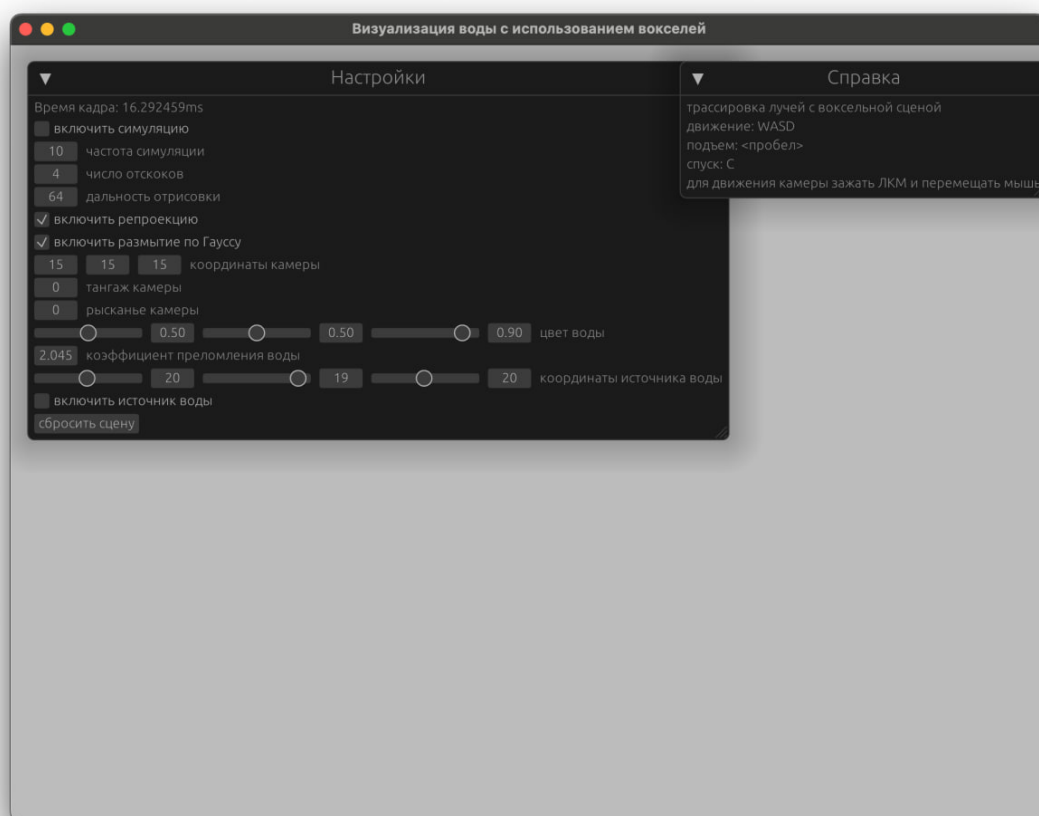


Рисунок 8 – Интерфейс реализованной программы

Интерфейс программы реализован в виде двух плавающих окон внутри окна приложения. В окне «Справка» указаны параметры управления, использующие клавиатуру и мышь. В окне «Настройки» приведены параметры сцены и отображения с возможностью их изменения.

Программа позволяет изменять следующие параметры сцены и ее отображения:

- параметры симуляции воды;
- параметр алгоритма трассировки — максимальное число отскоков луча;
- параметр алгоритма проверки столкновений — максимальная дальность видимости;
- перемещения камеры и ее поворот, выраженный в углах рысканья и тангажа;
- параметры воды — коэффициент преломления света и цвет.

### 3.6 Примеры работы программы

На рисунке 9 приведен пример работы программы, показывающий отрисованную сцену ландшафта. Можно заметить изменение цвета поверхности воды в зависимости от угла наблюдения и наличие отражений.

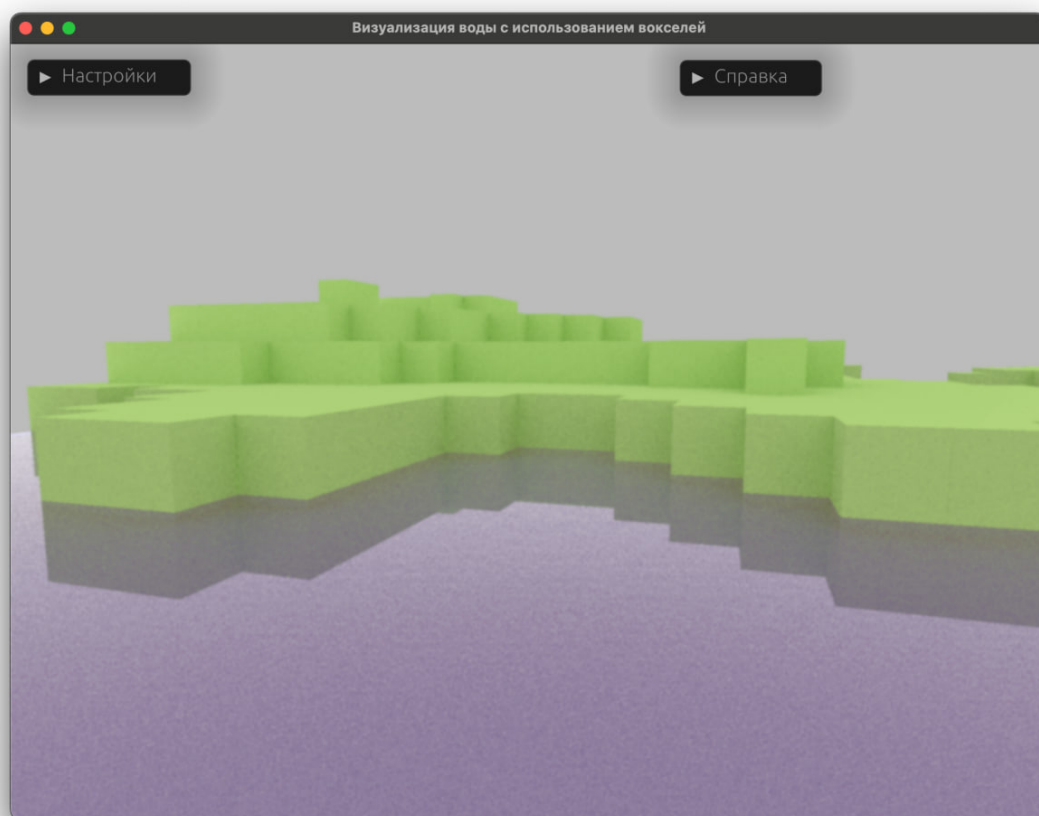


Рисунок 9 – Пример 1

На рисунке 10 приведен пример работы программы, показывающий отрисованную сцену ландшафта с водопадом. Можно заметить наличие как преломления света, так и отражения света в изображениях столба воды и ее поверхности соответственно.

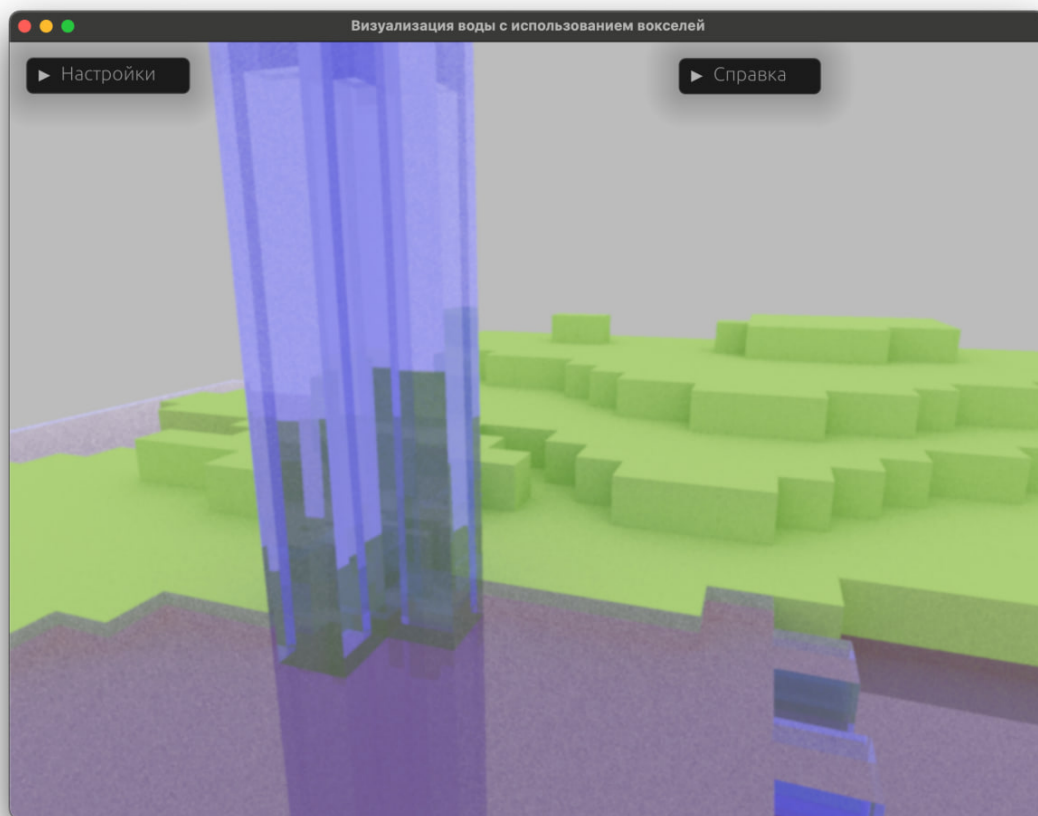


Рисунок 10 – Пример 2

## Вывод

В данном разделе были описаны детали реализации разработанной программы. Также был рассмотрен процесс взаимодействия пользователя с программой. Были приведены примеры использования программы.

## 4 Исследовательская часть

### 4.1 Технические характеристики

Технические характеристики устройства, на котором выполнялось исследование:

- операционная система MacOS Ventura 13.2.1 (22D68);
- 16 ГБ оперативной памяти;
- центральный процессор Apple M1 [29];
- графический процессор Apple M1 [29].

Графический процессор имеет 8 ядер, каждое из которых имеет 16 модулей исполнения. Каждый из модулей исполнения содержит 8 АЛУ. Таким образом, одновременно могут исполняться 24576 потоков и максимальная вычислительная мощность равняется 2.4 TFLOPS.

### 4.2 Постановка исследования

Целью исследования является определение времени отрисовки кадра от дальности отрисовки и максимального числа отскоков луча в алгоритме трассировки.

Параметр дальности отрисовки варьируются от 1 до 128. Параметр числа отскоков варьируется от 1 до 8.

Исследование проводится с целью сравнения влияния параметров реализаций двух основных алгоритмов в процессе отрисовки на время отрисовки с целью определения более предпочтительного из двух для изменения или оптимизации.

Временем отрисовки кадра является разность значения процессорного времени на момент начала отрисовки кадра с аналогичным значением прошлого кадра. При замерах сцена остается неизменной, что минимизирует число накладных расходов. В качестве времени кадра берется среднее значение за отрисовку 1000 кадров одной сцены.

Возможности параллельного исполнения графического процессора используются для параллелизации отрисовки каждого из пикселей экрана.

Замеры проводились на ноутбуке, включенном в сеть электропитания. Во время замеров ноутбук был нагружен только встроенными приложениями окружения, окружением, а также непосредственно тестируемой программой.

### 4.3 Результат исследования

Исследования проводились для сцены, представленной на рисунке 9. На рисунке 11 приведена зависимость времени отрисовки кадра от максимального числа отскоков и дальности отрисовки. В таблице 1 представлены результаты замеров.

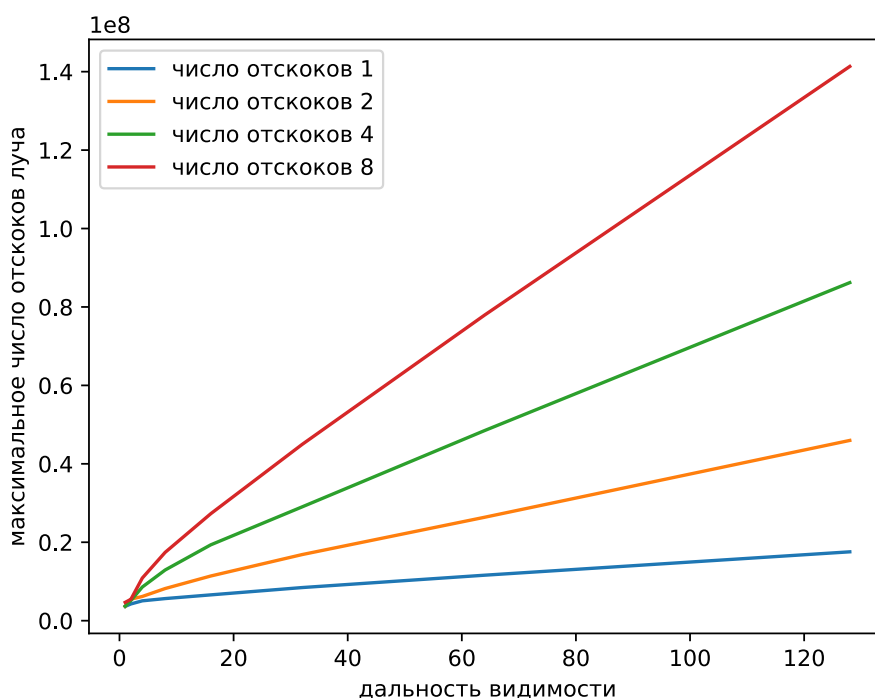


Рисунок 11 – Зависимость времени отрисовки кадра от максимального числа отскоков и дальности отрисовки

Таблица 1 – Зависимость времени отрисовки кадра от максимального числа отскоков и дальности отрисовки

Дальность отрисовки	Время, мс			
	Максимальное число отскоков			
	1	2	4	8
1	3.641	3.660	3.688	4.670
2	4.265	5.490	5.152	5.459
4	5.060	6.175	8.581	10.872
8	5.635	8.197	12.921	17.419
16	6.583	11.393	19.344	27.282
32	8.445	16.853	29.014	44.934
64	11.598	26.373	48.483	77.935
128	17.558	45.966	86.207	141.334

## 4.4 Вывод

Время отрисовки кадра зависит линейно как от дальности видимости, так и от максимального числа отскоков луча в алгоритме трассировки. Использование оптимизационных структур для проверки столкновений, или замена алгоритма проверки столкновений с простого на, к примеру, kd-дерево повлечет уменьшение времени отрисовки за счет уменьшения асимптотической сложности алгоритма.

В то же время, небольшие значения параметров в рамках рассматриваемых диапазонов позволяют получать изображение за время, достаточное для отрисовки в реальном времени на небольших сценах.

## Заключение

В ходе выполнения курсовой работы была достигнута поставленная цель: была реализована программа для построения изображений трехмерных воксельных сцен в реальном времени с возможностью визуализации воды.

Были решены все задачи:

- были выбраны алгоритмы компьютерной графики, позволяющие визуализировать трехмерную воксельную сцену в реальном времени;
- были реализованы выбранные алгоритмы построения трехмерной сцены;
- была исследована зависимость времени отрисовки кадра от параметров алгоритма визуализации трехмерной сцены.

Реализованную программу можно совершенствовать, добавив большее число материалов, ускоряя и оптимизируя алгоритм проверки столкновений для уменьшения времени отрисовки кадра.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Foster I.* Designing and Building Parallel Programs: Concepts and Tools for Parallel Software Engineering. — 75 Arlington Street, Suite 300 Boston, MA United States : Addison-Wesley Longman Publishing Co., 01.1995.
2. A Closer Look at GPUs [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://graphics.stanford.edu/~kayvonf/papers/fatahalianCACM.pdf> (дата обращения: 15.12.2023).
3. Ray Tracing In Vulkan [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.khronos.org/blog/ray-tracing-in-vulkan> (дата обращения: 15.12.2023).
4. *Rogers D. F.* Procedural Elements for Computer Graphics (2nd Ed.) — USA : McGraw-Hill, Inc., 1997.
5. *Shirley P., Marschner S.* Fundamentals of Computer Graphics. — 3rd. — USA : A. K. Peters, Ltd., 2009.
6. *Pharr M., Jakob W., Humphreys G.* Physically Based Rendering: From Theory to Implementation (3rd ed.) — 3rd. — San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 10.2016.
7. *Amanatides J., Woo A.* A Fast Voxel Traversal Algorithm for Ray Tracing // Proceedings of EuroGraphics. — 1987. — Авг. — Т. 87.
8. kd-Trees [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.cs.cmu.edu/~ckingsf/bioinfo-lectures/kdtrees.pdf> (дата обращения: 15.12.2023).
9. *Foley T., Sugerman J.* KD-Tree Acceleration Structures for a GPU Raytracer // Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware. — Los Angeles, California : Association for Computing Machinery, 2005. — С. 15—22. — (HWWS '05).
10. Octree [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://developer.apple.com/documentation/gameplaykit/gkoc-tree> (дата обращения: 15.12.2023).

11. *Laine S., Karras T.* Efficient Sparse Voxel Octrees – Analysis, Extensions, and Implementation : NVIDIA Technical Report / NVIDIA Corporation. — 02.2010. — NVR-2010—001.
12. *Phong B. T.* Illumination for Computer Generated Pictures // Commun. ACM. — New York, NY, USA, 1975. — ИЮНЬ. — Т. 18, № 6. — С. 311—317.
13. *Kajiya J. T.* The Rendering Equation // SIGGRAPH Comput. Graph. — New York, NY, USA, 1986. — АВГ. — Т. 20, № 4. — С. 143—150.
14. *Walter B.* Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces // Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques. — Grenoble, France : Eurographics Association, 2007. — С. 195—206. — (EGSR'07).
15. *Nehab D.* Accelerating Real-Time Shading with Reverse Reprojection Caching // Proceedings of the 22nd ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Symposium on Graphics Hardware. — San Diego, California : Eurographics Association, 2007. — С. 25—35. — (GH '07).
16. *Peter Shirley Trevor David Black S. H.* Ray Tracing in One Weekend [Электронный ресурс]. — 08.2023. — Режим доступа: <https://raytracing.github.io/books/RayTracingInOneWeekend.html> (дата обращения: 15.12.2023).
17. WebGPU working draft [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/webgpu/> (дата обращения: 15.12.2023).
18. DirectX12 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.nvidia.com/en-gb/geforce/technologies/dx12/> (дата обращения: 15.12.2023).
19. Metal [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://developer.apple.com/metal/> (дата обращения: 15.12.2023).
20. Vulkan® 1.3.264 - A Specification (with all registered Vulkan extensions) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://registry.khronos.org/vulkan/specs/1.3-extensions/html/index.html> (дата обращения: 15.12.2023).
21. OpenGL ES 3.2 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.khronos.org/opengles/> (дата обращения: 15.12.2023).

22. WebGL [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.khronos.org/webgl/> (дата обращения: 15.12.2023).
23. *Klabnik S., Nichols C.* The Rust Programming Language. — USA : No Starch Press, 2018.
24. WebAssembly Specification [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://webassembly.github.io/spec/core/> (дата обращения: 15.12.2023).
25. Dear ImGui [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/ocornut/imgui> (дата обращения: 15.12.2023).
26. WebGPU Shading Language working draft [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/WGSL/> (дата обращения: 15.12.2023).
27. *Marsaglia G.* Xorshift RNGs // Journal of Statistical Software. — 2003. — Т. 8, № 14. — С. 1—6.
28. *Perlin K.* Improving Noise. — 2002. — Июль.
29. Apple M1 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20201110184757/https://www.apple.com/mac/m1/> (дата обращения: 18.9.2023).