



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

K KУРСОВОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

«Генератор трехмерного ландшафта»

Студент ИУ7-53Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Лысцев Н. Д.
(И. О. Фамилия)

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата)

Филиппов М. В.
(И. О. Фамилия)

2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1 Аналитический раздел | 6 |
| 1.1 Формализация объектов синтезируемой сцены | 6 |
| 1.2 Анализ способов представления данных о ландшафте | 6 |
| 1.2.1 Регулярная сетка | 6 |
| 1.2.2 Иррегулярная сетка | 7 |
| 1.2.3 Посегментная карта высот | 8 |
| 1.3 Анализ алгоритмов процедурной генерации ландшафта | 8 |
| 1.3.1 Алгоритм Diamond-Square | 8 |
| 1.3.2 Холмовой алгоритм | 9 |
| 1.3.3 Алгоритм шума Перлина | 10 |
| 1.4 Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей . | 12 |
| 1.4.1 Алгоритм Робертса | 12 |
| 1.4.2 Алгоритм, использующий Z-буфер | 12 |
| 1.4.3 Алгоритм обратной трассировки лучей | 13 |
| 1.5 Анализ моделей освещения | 14 |
| 1.5.1 Модель освещения Ламберта | 14 |
| 1.5.2 Модель освещения Фонга | 14 |
| 1.6 Анализ алгоритмов закраски | 14 |
| 1.6.1 Алгоритм простой закраски | 14 |
| 1.6.2 Алгоритм закраски по Гуро | 15 |
| 1.6.3 Алгоритм закраски по Фонгу | 15 |
| 2 Конструкторский раздел | 19 |
| 2.1 Требования к программному обеспечению | 19 |
| 2.2 Разработка алгоритмов | 19 |
| 2.2.1 Общий алгоритм построения изображения | 19 |
| 2.2.2 Алгоритм процедурной генерации ландшафта на основе шума Перлина | 21 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.2.3 | Афинные преобразования | 24 |
| 2.2.4 | Модель освещения Ламберта | 25 |
| 2.2.5 | Алгоритм, использующий Z-буфер | 26 |
| 2.2.6 | Алгоритм закраски по Гуро | 28 |
| 2.2.7 | Алгоритм, использующий Z-буфер, объединенный с закраской по Гуро | 29 |
| 2.2.8 | Выбор типов и структур данных | 30 |
| 2.2.9 | Описание структуры программного обеспечения | 30 |
| 3 | Технологический раздел | 33 |
| 3.1 | Средства реализации | 33 |
| 3.2 | Реализация алгоритмов | 34 |
| 3.3 | Интерфейс программы | 39 |
| 3.4 | Демонстрация работы программы | 40 |
| 4 | Исследовательский раздел | 43 |
| 4.1 | Технические характеристики | 43 |
| 4.2 | Проведение первого исследования | 43 |
| 4.2.1 | Цель первого исследования | 43 |
| 4.2.2 | Наборы варьируемых и фиксированных параметров | 44 |
| 4.2.3 | Результаты первого исследования | 45 |
| 4.3 | Проведение второго исследования | 47 |
| 4.3.1 | Цель второго исследования | 47 |
| 4.3.2 | Наборы варьируемых и фиксированных параметров | 47 |
| 4.3.3 | Результаты второго исследования | 48 |
| 4.4 | Вывод | 50 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | | 51 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | | 54 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | | 55 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологии трехмерной графики стремительно развиваются. Одним из направлений применения этих технологий является создание видеоигр. Наибольшую популярность набирают игры с так называемым открытым миром.

Основой для открытого мира служит трехмерный ландшафт значительных размеров, который для реалистичности должен быть разнообразным и детализированным. Традиционные методы ручного моделирования ландшафта являются крайне громоздкими, трудоемкими и ограниченными в своей вариативности.

Возникает потребность в создании программного обеспечения, которое бы позволяло автоматизировать процессы создания реалистичного ландшафта, чтобы ускорить разработку игр и обеспечить большую степень креативной свободы для разработчиков.

Целью работы является разработка и создание программного обеспечения для генерации и визуализации трехмерного ландшафта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выполнить формализацию объектов синтезируемой сцены;
- 2) провести анализ существующих алгоритмов создания ландшафта и визуализации сцены, выбрать подходящие и обосновать их выбор;
- 3) разработать ПО;
- 4) реализовать выбранные алгоритмы;
- 5) провести исследование временных характеристик разработанного ПО.

1 Аналитический раздел

В данном разделе дано формальное описание объектов синтезируемой сцены, проанализированы разные способы представления данных о ландшафте, рассмотрены алгоритмы процедурной генерации ландшафта, удаления невидимых линий и поверхностей, алгоритмы закраски и модели освещения.

1.1 Формализация объектов синтезируемой сцены

Сцена состоит из следующих объектов:

- ландшафт — трехмерная модель, описываемая полигональной сеткой [1];
- источник света — материальная точка, испускающая лучи света.

1.2 Анализ способов представления данных о ландшафте

Существует несколько основных принципов представления данных для хранения информации о ландшафте [2]:

- регулярная сетка высот (карта высот);
- иррегулярная сетка вершин и связей, их соединяющих;
- посегментная карта высот.

1.2.1 Регулярная сетка

Данные представлены в виде двумерного массива [3]. Каждый его элемент имеет свои индексы $[i, j]$, являющиеся координатами расположения точки на плоскости. Для каждой вершины с индексами $[i, j]$ в двумерном массиве определяется соответствующее значение высоты h_{ij} . На рисунке 1.1 показан пример представления данных о ландшафте с помощью карты высот.

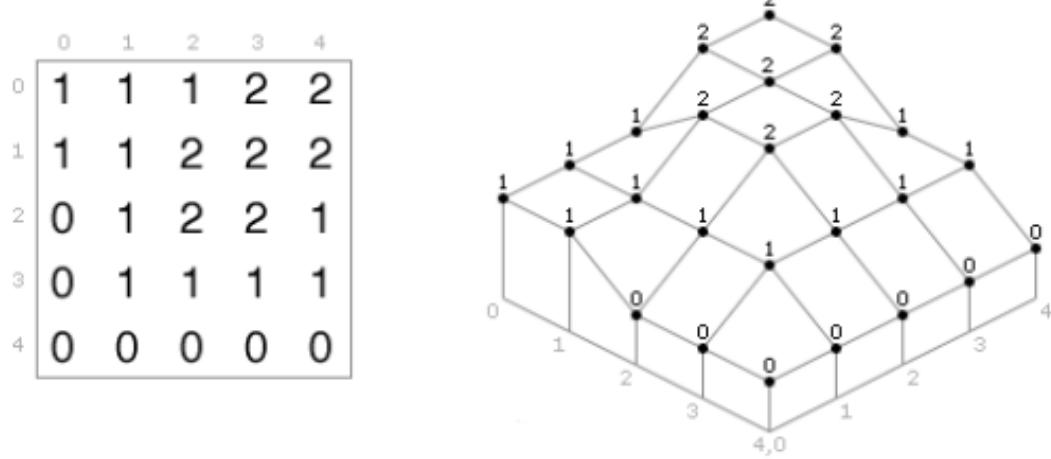


Рисунок 1.1 – Пример представления данных о ландшафте с помощью карты высот [3]

К преимуществам данного способа можно отнести наглядность и простоту изменения данных, легкость нахождения координат и высоты на карте, возможность более точно производить динамическое освещение. Однако, у такого метода есть один существенный недостаток — избыточность данных (например, при задании плоскости) [2].

1.2.2 Иррегулярная сетка

Иррегулярная сетка позволяет размещать точки или узлы в произвольных местах в зависимости от необходимости и особенностей ландшафта.

У такого метода есть несколько существенных недостатков [2]:

- многие алгоритмы построения ландшафтом предназначены для регулярных сеток высот, поэтому оптимизация этих алгоритмов под иррегулярную сетку потребует значительных усилий и времени;
- из-за неравномерного расположения вершинных точек друг к другу возникает сложность при создании динамического освещения;
- сложности при хранении, модификации и просмотре такого ландшафта.

К плюсам данного способа можно отнести использование меньшей информации для построения ландшафта [2].

1.2.3 Посегментная карта высот

Суть этого метода заключается в разделении изначальной области на небольшие участки (например, квадратной формы), и генерации высот на каждом участке отдельно [4].

К преимуществам данного способа можно отнести возможность представления больших открытых пространств, возможность хранения информации о других объектах (строения, пещеры, скалы), возможность создания нескольких вариантов одного и того же сегмента, но с разным уровнем детализации. К недостаткам можно отнести проблемустыковки разных сегментов, неочевидность представления и проблему модификации данных [2].

1.3 Анализ алгоритмов процедурной генерации ландшафта

Главным критерием выбора алгоритма будет качество получаемого ландшафта, поскольку для достижения цели необходимо создавать правдоподобный рельеф.

1.3.1 Алгоритм Diamond-Square

Данный алгоритм является расширением одномерного алгоритма *midpoint displacement* [5] на двумерную плоскость. Алгоритм *Diamond – Square* [6] выполняется рекурсивно и начинает работу с двумерного массива размера $2^n + 1$. В четырёх угловых точках массива устанавливаются начальные значения высот. Шаги *diamond* и *square* выполняются поочередно до тех пор, пока все значения массива не будут установлены.

- 1) Шаг *diamond* – для каждого квадрата в массиве, устанавливается срединная точка, которой присваивается среднее арифметическое из четырёх угловых точек плюс случайное значение.
- 2) Шаг *square* – берутся средние точки граней тех же квадратов, в которые устанавливается среднее значение от четырёх соседних с ними по осям точек плюс случайное значение.

На рисунке 1.2 показаны последовательность действий алгоритма *Diamond – Square* на примере массива 5x5.

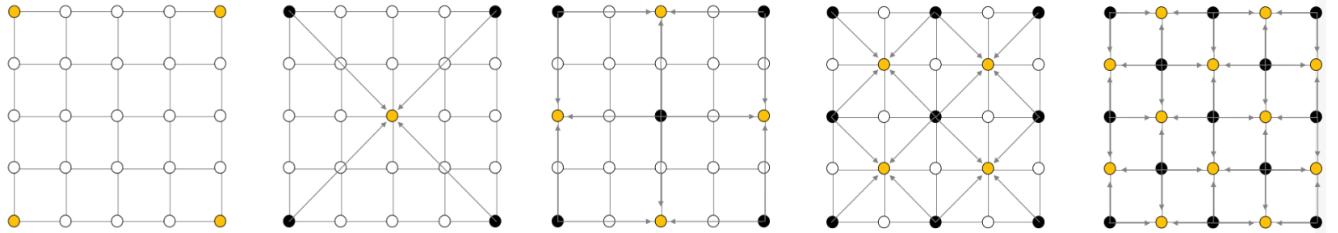


Рисунок 1.2 – Шаги, проходимые алгоритмом Diamond-Square на примере массива 5x5 [7]

К преимуществам данного алгоритма можно отнести простоту его реализации и возможность генерации различных ландшафтов с разнообразной детализацией.

К недостаткам можно отнести создание вертикальных и горизонтальных «складок» на краях карты из-за наибольшего значительного возмущения, происходящего в прямоугольной сетке [7], а также сложности с контролем получаемого ландшафта.

1.3.2 Холмовой алгоритм

Это простой итерационный алгоритм, основанный на нескольких входных параметрах. Алгоритм изложен в следующих шагах [8]:

- 1) создается двухмерный массив и инициализируется нулевым уровнем;
- 2) берется случайная точка на ландшафте или около его границ (за границами) и случайный радиус в заранее заданных пределах. Выбор этих пределов влияет на вид ландшафта – либо он будет пологим, либо скалистым;
- 3) в выбранной точке «поднимается» холм заданного радиуса;
- 4) выполнение пунктов 1) - 3) n раз, где n – выбранное количество шагов.
- 5) проводится нормализация ландшафта;
- 6) проводится «долинизация» ландшафта.

К преимуществам данного алгоритма можно отнести простоту его реализации, а также возможность контроля «гористости» ландшафта за счет этапов нормализации и долинизации.

Данный алгоритм имеет несколько недостатков:

- с помощью этого алгоритма тяжело смоделировать склон холма, или горы, так как в процессе генерации ландшафта используются только гладкие полусферы [9];
- этот алгоритм неприменим, когда требуется детализировано отобразить лишь часть всего ландшафта [9].

1.3.3 Алгоритм шума Перлина

Это математический алгоритм по генерированию процедурной текстуры псевдо-случайным методом [10]. Этот алгоритм может быть реализован для n -мерного пространства, но чаще его используют для одно-, двух-, трехмерного случая.

Рассмотрим версию этого алгоритма для двумерного случая:

Для карты высот создается сетка точек и в каждой точке сетки генерируется псевдослучайный единичный вектор-направления градиента. Для каждой точки с координатами (x, y) из карты высот определяется, в какой ячейке сетки находится точка, генерируются вектора, идущие от точек ячейки сетки до этой точки. На рисунке 1.3 показан пример векторов для точки (x, y) .

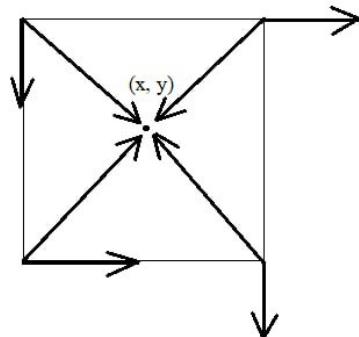


Рисунок 1.3 – Пример сгенерированных векторов для точки (x, y)

Вычисляются четыре скалярных произведения векторов-направлений градиента и вектора, идущего от связанной с ним точки сетки к точке с координатами (x, y) .

Далее, чтобы получить значение высоты z в точке (x, y) , необходимо провести двумерную интерполяцию на основе полученных скалярных произведений. Для создания плавного перехода между значениями предварительно производятся вычисления весов измерений по x и по y . Веса определяются функцией

$$\text{smootherstep}(t) = 6t^5 - 15t^4 + 10t^3 \quad (1.1)$$

где вместо t подставляются значения x и y . Далее, используя метод последовательной интерполяции по каждому измерению, получаем значения двух одномерных линейных интерполяций с использованием веса по x , и в конце проводим одну одномерную линейную интерполяцию с этими вычисленными значениями, но уже по весу измерения y . Полученное значение и будет высотой в данной точке (x, y) карты высот [11].

Чтобы контролировать генерацию шума, существует набор параметров:

- число октав — количество уровней детализации шума;
- лакунарность — множитель, который определяет изменение частоты с ростом октавы;
- стойкость — множитель, который определяет изменение амплитуды с ростом октавы.

Для достижения качественного детализированного ландшафта можно смешивать шумы разных частот и амплитуд.

Преимущества:

- комбинация различных октав в алгоритме шума Перлина позволяет добавлять дополнительные уровни детализации к сгенерированному шуму, тем самым повышая реалистичность и детализацию ландшафта;
- зная лишь параметры генерации, можно получить высоту в любой точке карты без необходимости знания высот в соседних точках карты.

Недостатком является низкая детализация и реалистичность сгенерированного ландшафта без использования механизма комбинации октав.

1.4 Анализ алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей

Главным требованием при выборе алгоритма будут высокая скорость работы, чтобы пользователю не приходилось ждать долгой загрузки изображения.

1.4.1 Алгоритм Робертса

Алгоритм Робертса работает в объектном пространстве только с выпуклыми телами. Если тело не является выпуклым, то его предварительно нужно разбить на выпуклые составляющие [12].

Этот алгоритм выполняется в 4 этапа:

- 1) подготовка исходных данных – составление матрицы тела для каждого тела сцены;
- 2) удаление ребер, экранируемых самим телом;
- 3) удаление ребер, экранируемых другими телами;
- 4) удаление линий пересечения тел, экранируемых самими телами и другими телами, связанными отношением протыкания.

Алгоритм работает только с выпуклыми телами, что является недостатком данного алгоритма. Также к недостатку можно отнести то, что вычислительная сложность теоретически растет как квадрат числа объектов. К преимуществам можно отнести высокую точность вычислений.

1.4.2 Алгоритм, использующий Z-буфер

Это один из простейших алгоритмов удаления невидимых поверхностей. Работает этот алгоритм в пространстве изображения[12].

В данном алгоритме используется два буфера: буфер кадра и z-буфер. Буфер кадра используется для заполнения атрибутов (интенсивности) каждого

пикселя в пространстве изображения. Z-буфер – отдельный буфер глубины, используемый для запоминания координаты z или глубины каждого видимого пикселя в пространстве изображения [12].

Вначале в z-буфер заносятся минимально возможные значения z , а буфер кадра заполняется заполняются фоновым значением интенсивности или цвета. Затем каждый многоугольник преобразовывается в растровую форму. Суть работы алгоритма заключается в следующем: в процессе работы глубина (значение координаты z) каждого нового пикселя, который надо занести в буфер кадра сравнивается с глубиной того пикселя, который уже есть в z-буфере. Если новый пиксель оказывается расположен ближе к наблюдателю, то новый пиксель заносится в буфер кадра. При этом в z-буфер заносится глубина нового пикселя. Если сравнение дало противоположный результат, то никаких действий не производится.

К преимуществам данного алгоритма относится простота его реализации, возможность работы со сценами любой сложности, отсутствие необходимости в сортировке по приоритету глубины.

К недостаткам можно отнести большой объем требуемой памяти, трудоемкость и высокая стоимость устранения лестничного эффекта, а также реализации эффектов прозрачности и просвечивания [12].

1.4.3 Алгоритм обратной трассировки лучей

Наблюдатель видит объект посредством испускаемого источником света, который падает на этот объект и согласно законам оптики некоторым путем доходит до глаза наблюдателя. Алгоритм имеет такое название, потому что эффективнее с точки зрения вычислений отслеживать пути лучей в обратном направлении, то есть от наблюдателя к объекту [12].

Преимуществами данного алгоритма являются возможность его использования в параллельных вычислительных системах и высокая реалистичность получаемого изображения, а недостатком – большое количество вычислений и медленная работа алгоритма.

1.5 Анализ моделей освещения

В данном разделе будут рассмотрены две модели освещения: модель Ламберта и модель Фонга.

1.5.1 Модель освещения Ламберта

Модель Ламберта моделирует идеальное диффузное освещение. Считается, что свет при попадании на поверхность рассеивается равномерно во все стороны. При расчете такого освещения учитывается только ориентация поверхности (нормаль N) и направление на источник света (вектор L). Рассеянная составляющая рассчитывается по закону косинусов (закон Ламберта) [13].

1.5.2 Модель освещения Фонга

Модель Фонга – классическая модель освещения. Модель представляет собой комбинацию диффузной составляющей (модели Ламберта) и зеркальной составляющей и работает таким образом, что кроме равномерного освещения на материале может еще появляться блик. Местонахождение блика на объекте, освещенном по модели Фонга, определяется из закона равенства углов падения и отражения. Если наблюдатель находится вблизи углов отражения, яркость соответствующей точки повышается [13].

1.6 Анализ алгоритмов закраски

Методы закраски используются для затенения полигонов модели в условиях некоторой сцены, имеющей источники освещения. Существует три основных алгоритма, позволяющих закрасить полигональную модель.

1.6.1 Алгоритм простой закраски

Суть данного алгоритма заключается в том, что для каждой грани объекта находится вектор нормали, и с его помощью в соответствии с выбранной моделью освещения вычисляется значение интенсивности, с которой закрашивается вся грань. При данной закраске все плоскости (в том числе и те, что аппроксимируют фигуры вращения), будут закрашены однотонно, что в случае с фигурами

вращения будет давать ложные ребра [12].

К преимуществам можно отнести простоту реализации алгоритма и его быстродействие. В качестве недостатков можно выделить нереалистичность результата.

1.6.2 Алгоритм закраски по Гуро

Данный алгоритм позволяет получить более сглаженное изображение. Это достигается благодаря тому, что разные точки грани закрашиваются разным значением интенсивности.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1) вычисление векторов нормалей к каждой грани;
- 2) вычисление векторов нормали к каждой вершине грани путем усреднения нормалей примыкающих граней;
- 3) вычисление интенсивности в вершинах грани в соответствии с выбранной моделью освещения;
- 4) выполнение линейной интерполяции интенсивности вдоль ребер;
- 5) выполнение линейной интерполяции вдоль сканирующей строки.

Преимуществами данного алгоритма являются хорошее сочетание с моделью освещения с диффузным отражением, а также более высокая, по сравнению с алгоритмом простой закраски, реалистичность получаемого изображения.

К недостаткам можно отнести отсутствие учета кривизны поверхности [12].

1.6.3 Алгоритм закраски по Фонгу

В алгоритме закраски по Фонгу используется билинейная интерполяция не интенсивностей в вершинах полигона, а билинейная интерполяция векторов нормалей. Благодаря такому подходу изображение получается более реалистичным. Однако для достижения такого результата требуется больше вычислительных затрат [12].

Данный алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1) вычисление векторов нормалей к каждой грани;
- 2) вычисление векторов нормали к каждой вершине грани путем усреднения нормалей примыкающих граней;
- 3) выполнение линейной интерполяции нормалей вдоль ребер;
- 4) выполнение линейной интерполяции нормалей вдоль сканирующей строки.
- 5) вычисление интенсивности в каждой вершине

Вывод

Таблица 1.1 – Сравнение способов представления данных о ландшафте

| Способ | Наглядность представления данных | Сложность модификации данных |
|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Регулярная сетка | Высокая | Низкая |
| Иррегулярная сетка | Высокая | Средняя |
| Посегментная карта высот | Средняя | Высокая |

Таблица 1.2 – Сравнение алгоритмов процедурной генерации ландшафта

| Алгоритм | Качество ландшафта | Отсутствие артефактов | Контроль ландшафта |
|-------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Diamond-Square | Среднее | – | Низкая |
| Холмовой алгоритм | Среднее | + | Средний |
| Шум Перлина | Высокое | + | Высокая |

Таблица 1.3 – Сравнение алгоритмов удаления невидимых линий и поверхностей

| Алгоритм | Сложность алгоритма | Скорость работы | Типы объектов |
|--|---------------------|-----------------|------------------------|
| Алгоритм Робертса | $O(n^2)$ | Средняя | Выпуклые многогранники |
| Алгоритм с Z -буфером | $O(np)$ | Высокая | Произвольные |
| Алгоритм с обратной трассировкой лучей | $O(np)$ | Низкая | Произвольные |

Таблица 1.4 – Сравнение моделей освещения

| Модель освещения | Реалистичность изображения | Объем вычислений |
|------------------|----------------------------|------------------|
| Модель Ламберта | Средняя | Средний |
| Модель Фонга | Высокая | Большой |

Таблица 1.5 – Сравнение алгоритмов закраски

| Алгоритм закраски | Скорость работы | Реалистичность изображения | Сочетание с диффузным отражением |
|-------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------------|
| Простая закраска | Высокая | Низкая | Высокое |
| Закраска по Гуро | Средняя | Средняя | Высокое |
| Закраска по Фонгу | Низкая | Высокая | Средняя |

В данном разделе была проведена формализация объектов синтезируемой сцены, рассмотрены существующие алгоритмы для построения и визуализации трехмерного ландшафта. Согласно с оценками, представленными в таблицах 1.1 – 1.5, были выбраны следующие алгоритмы:

- в качестве способа представления данных о ландшафте была выбрана регулярная сетка высот;
- в качестве алгоритма генерации карты высот был выбран алгоритм шума Перлина;

- в качестве алгоритма удаления невидимых линий и поверхностей был выбран алгоритм, использующий Z-буфер;
- в качестве модели освещения и алгоритма закраски были выбраны модель Ламберта и алгоритм закраски по Гуро.

2 Конструкторский раздел

В данном разделе будет приведены требования к разрабатываемому ПО, будет приведено формальное описание алгоритмов построения и визуализации ландшафта, будет приведена структура разрабатываемого ПО.

2.1 Требования к программному обеспечению

Разрабатываемое программное обеспечение должно предоставлять пользователю следующую функциональность:

- изменение параметров алгоритма шума Перлина для генерации ландшафта;
- изменение параметров и положения источника света;
- возможность управления положением модели (перемещение, масштабирование, поворот);
- задание и изменение уровня моря в интерактивном режиме;

При этом разрабатываемая программа должна удовлетворять следующим требованиям:

- время отклика программы должно быть менее 1 секунды для корректной работы в интерактивном режиме;
- программа должна корректно реагировать на любые действия пользователя.

2.2 Разработка алгоритмов

2.2.1 Общий алгоритм построения изображения

На рисунке 2.1 представлена схема алгоритма построения одного кадра изображения.

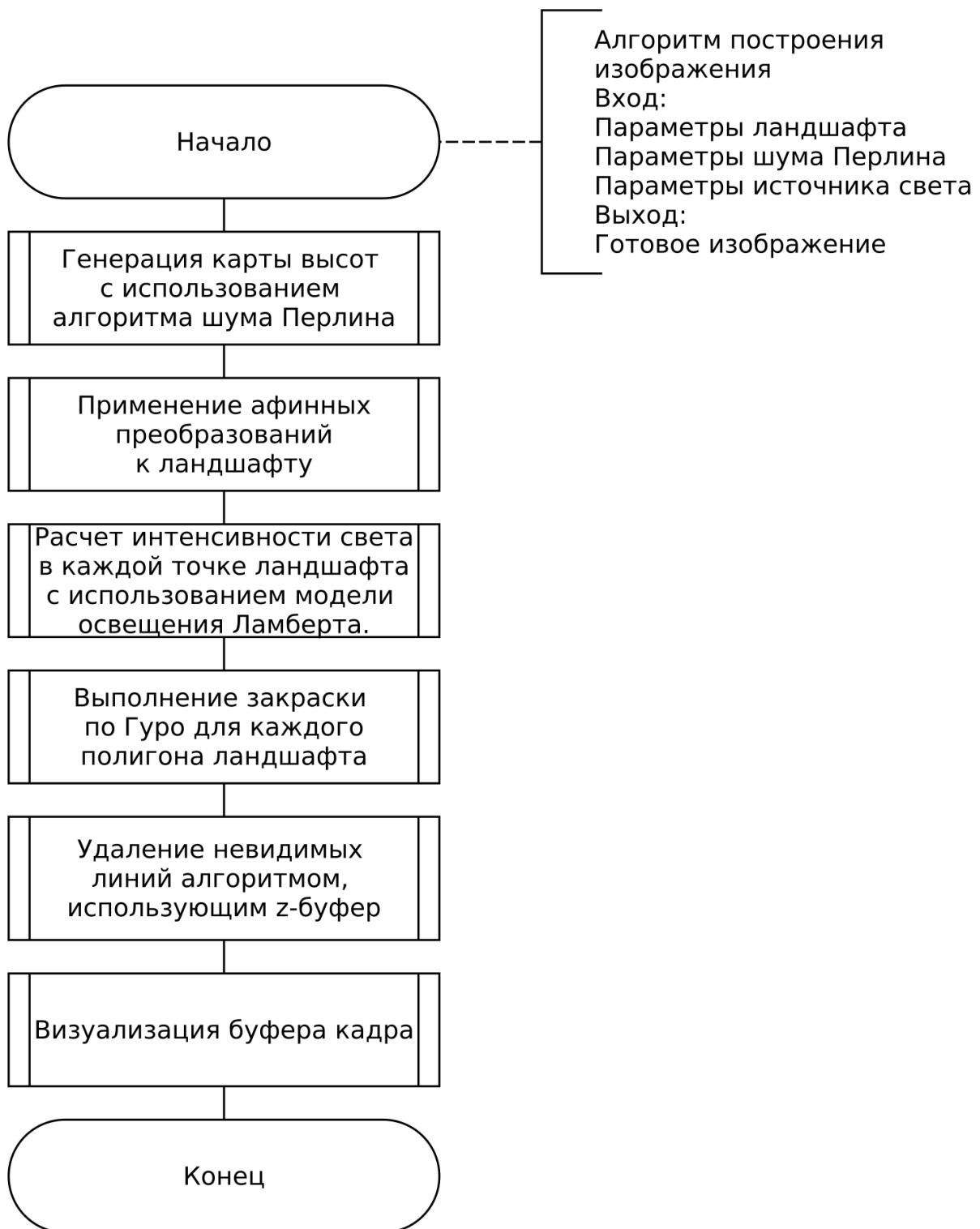


Рисунок 2.1 – Схема алгоритма построения одного кадра изображения

2.2.2 Алгоритм процедурной генерации ландшафта на основе шума Перлина

На рисунке 2.2 представлена схема алгоритма генерации карты высот на основе шума Перлина.

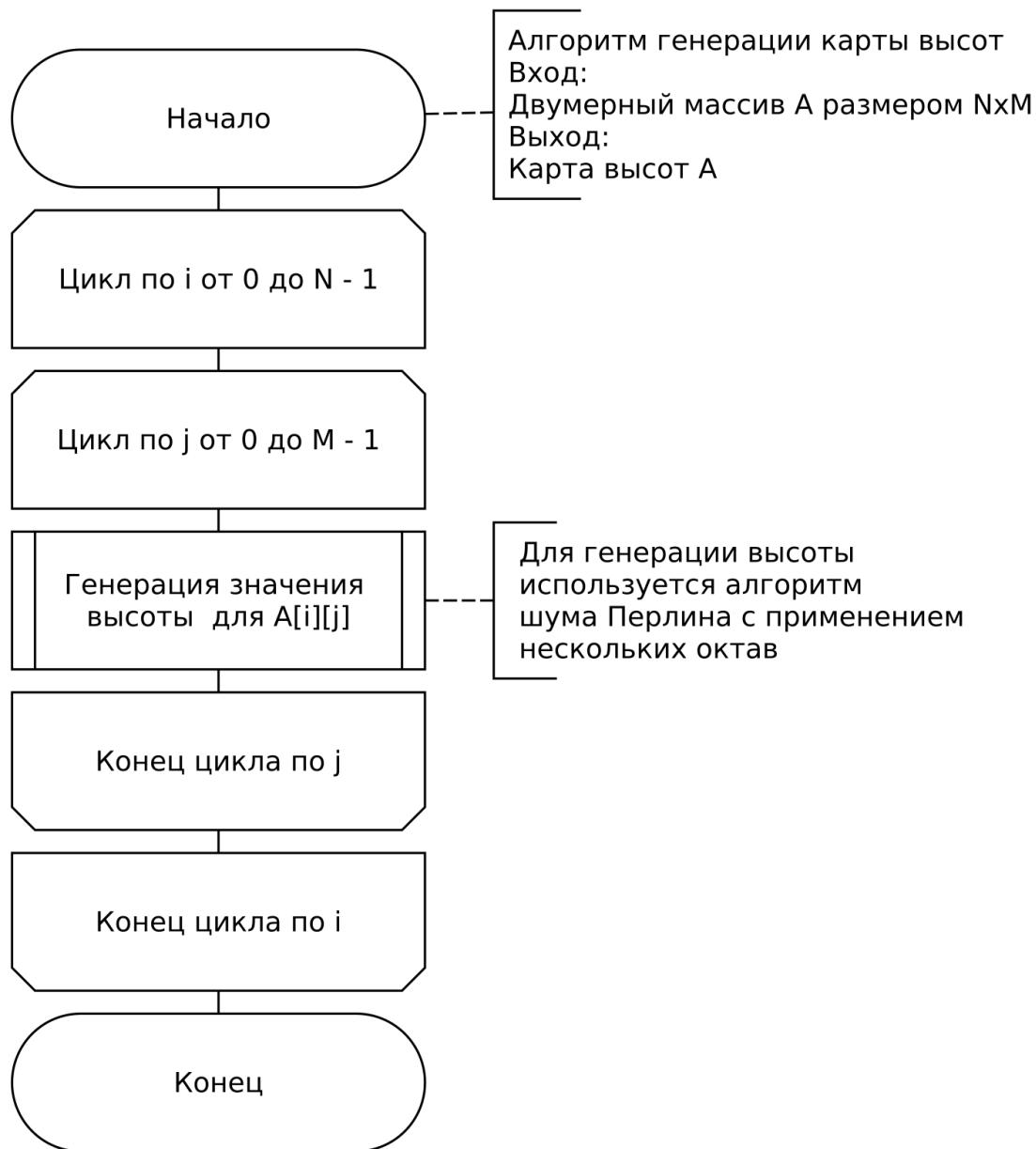


Рисунок 2.2 – Схема алгоритма генерации карты высот на основе шума Перлина

На рисунке 2.3 представлена схема алгоритма шума Перлина с применением нескольких октав.

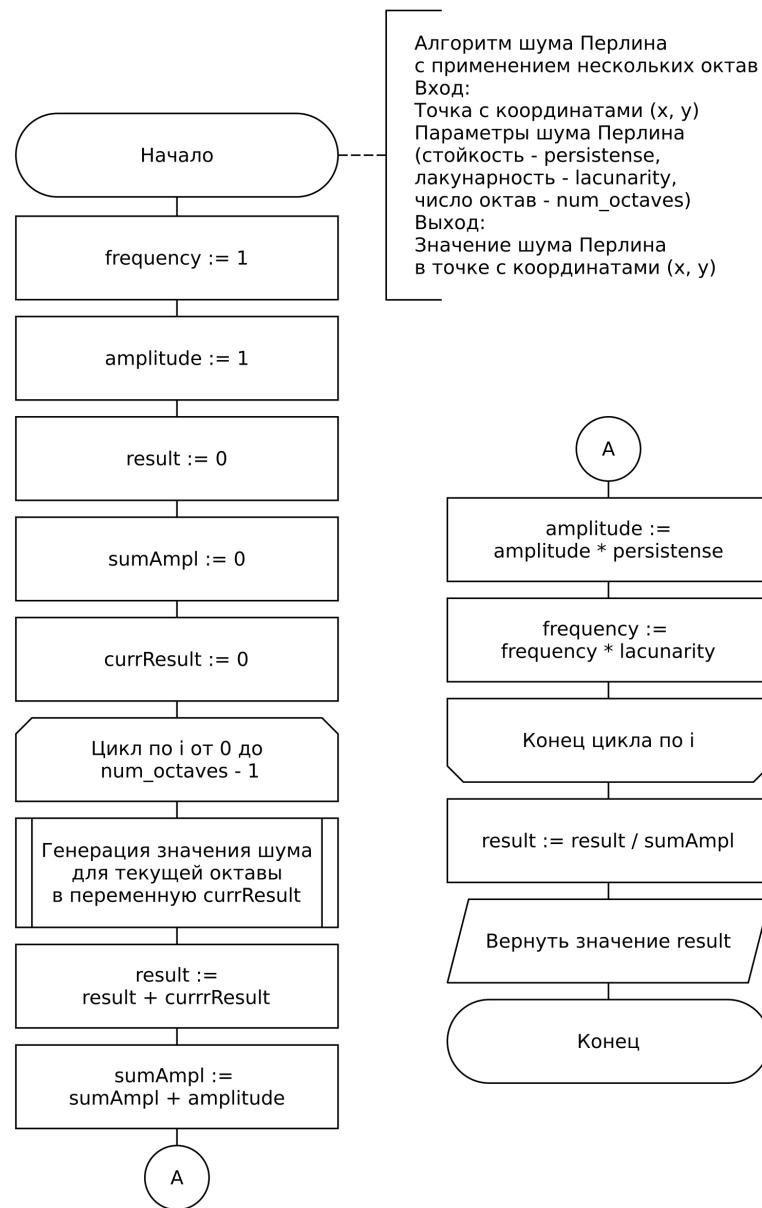


Рисунок 2.3 – Схема алгоритма шума Перлина с применением нескольких октав

На рисунке 2.4 представлена схема алгоритма шума Перлина.

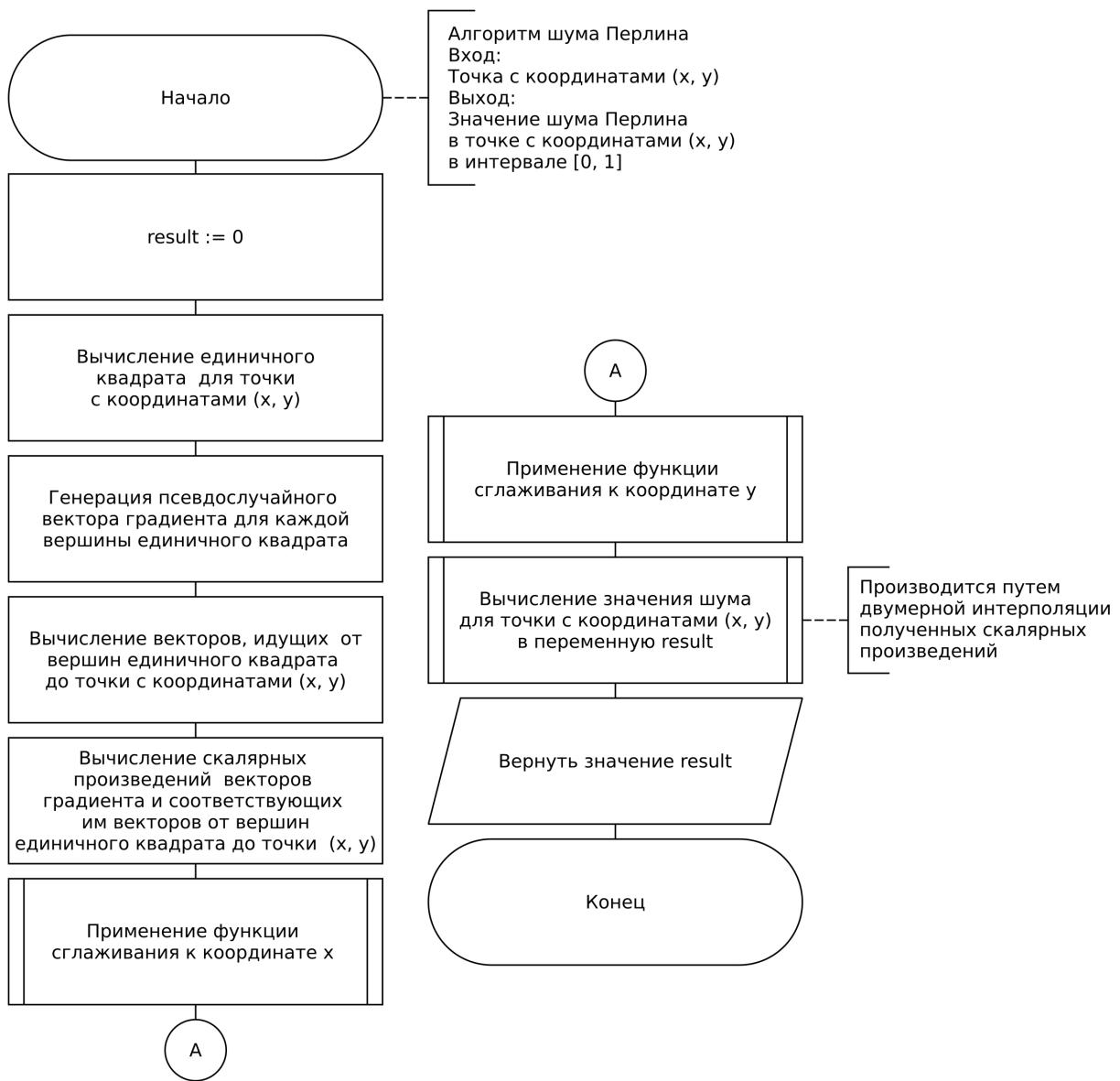


Рисунок 2.4 – Схема алгоритма шума Перлина

2.2.3 Афинные преобразования

Для осуществления управлением положения модели используются афинные преобразования [14], задающиеся матрицами. Изменение положения точки трехмерного пространства в результате применение одного из афинных преобразований задается формулой 2.1.

$$(x', y', z', 1) = (x, y, z, 1) \cdot M \quad (2.1)$$

где x, y, z – старые координаты точки, x', y', z' – новые координаты точки, M – матрица афинного преобразования (формулы 2.2 - 2.6).

Поворот вокруг одной из осей координат задается углом вращения α и осуществляется с помощью соответствующей матрицы поворота (формулы 2.2 - 2.4).

Матрица поворота вокруг оси ОХ:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Матрица поворота вокруг оси ОY:

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Матрица поворота вокруг оси ОZ:

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Перенос в трехмерном пространстве задается значениями смещения положения точки вдоль координатных осей $OX, OY, OZ - dx, dy, dz$ соответственно.

Матрица переноса имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ dx & dy & dz & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Масштабирование задается значениями коэффициентов масштабирования по каждому из направлений $OX, OY, OZ - kx, ky, kz$.

Матрица масштабирования имеет вид:

$$\begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

2.2.4 Модель освещения Ламберта

Согласно общему алгоритму построения изображения (рисунок 2.1) третьим шагом является вычисление интенсивности в каждой точке ландшафта с использованием модели освещения Ламберта.

Модель Ламберта основана на законе Ламберта [15], утверждающем, что интенсивность отраженного света пропорциональна косинусу угла между нормалью поверхности и вектором направления от точки до источника. Это означает, что поверхности, обращенные к источнику света, будут ярче, а те, что обращены в сторону — менее освещены (см. рисунок 2.5 для иллюстрации векторов N и L).

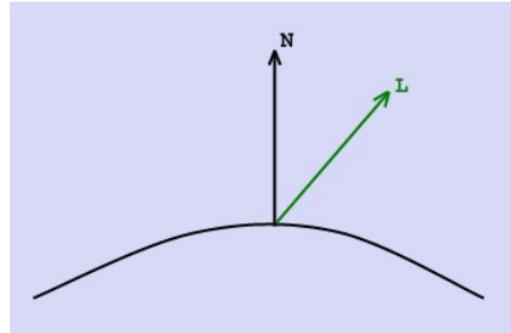


Рисунок 2.5 – Пример расположения векторов N и L в модели освещения Ламберта [13]

Пусть:

- \vec{L} — единичный вектор направления от точки до источника;
- \vec{N} — единичный вектор нормали;
- I — результирующая интенсивность света в точке;
- I_0 — интенсивность источника света;
- K_d — коэффициент диффузного освещения.

Формула расчета интенсивности имеет следующий вид:

$$I = I_0 \cdot K_d \cdot \cos(\vec{L}, \vec{N}) \cdot I_d = I_0 \cdot K_d \cdot (\vec{L}, \vec{N}) \quad (2.7)$$

2.2.5 Алгоритм, использующий Z-буфер

На рисунке 2.6 представлена схема алгоритма, использующего Z-буфер.

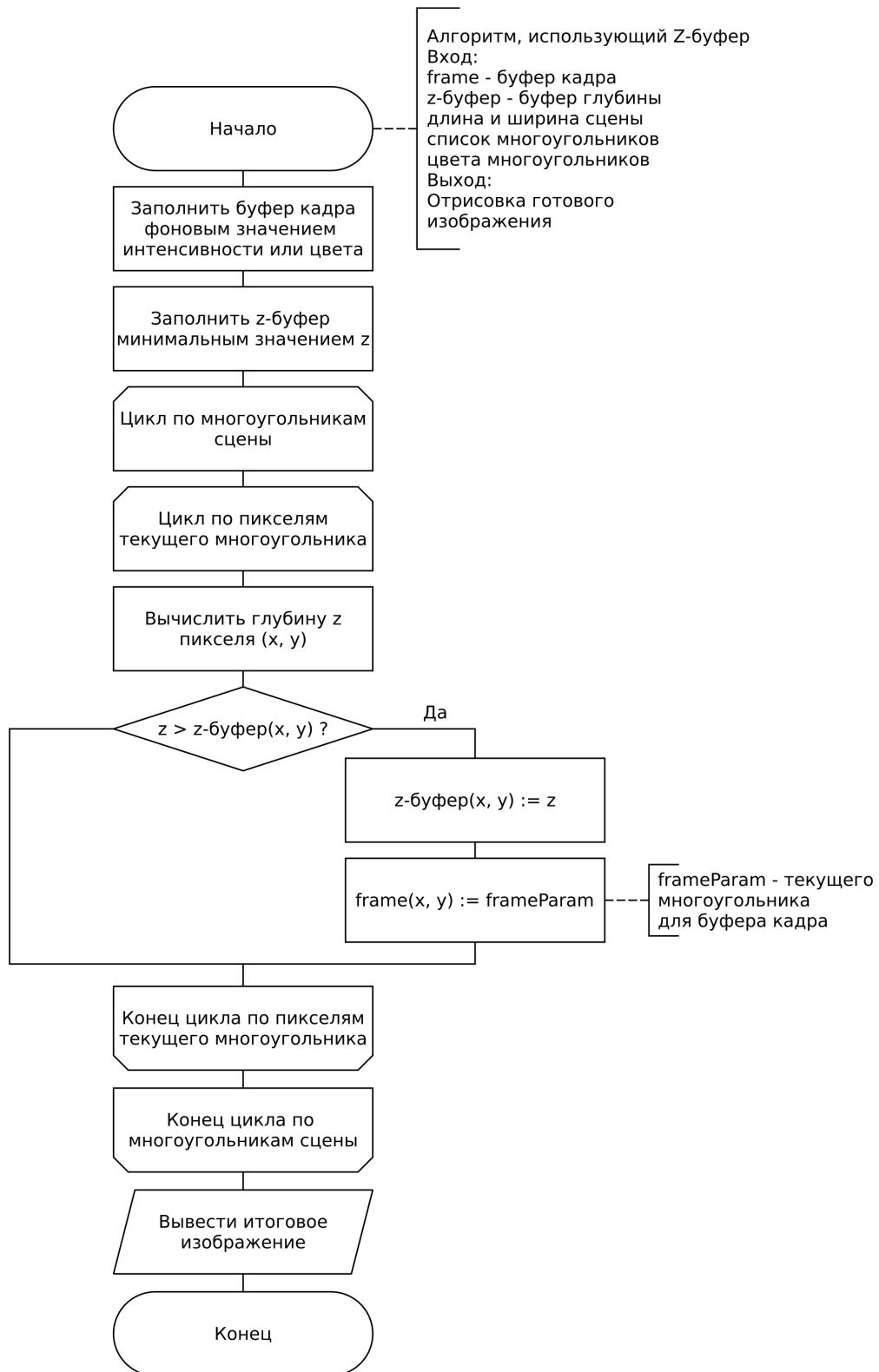


Рисунок 2.6 – Схема алгоритма, использующего Z-буфер

2.2.6 Алгоритм закраски по Гуро

На рисунке 2.7 представлена схема алгоритма закраски по Гуро.

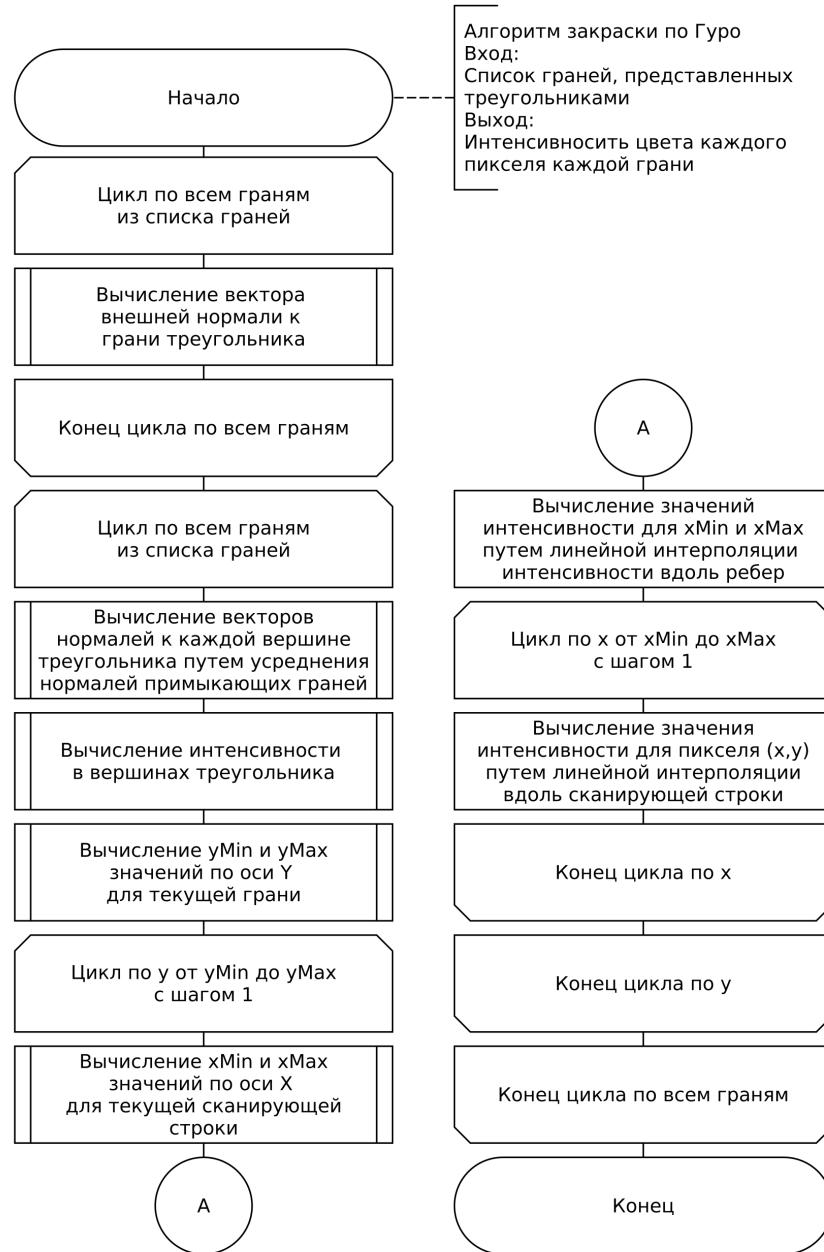


Рисунок 2.7 – Схема алгоритма закраски по Гуро

2.2.7 Алгоритм, использующий Z-буфер, объединенный с закраской по Гуро

На рисунке 2.8 представлена схема алгоритма, использующего Z-буфер, объединенного с закраской по Гуро.

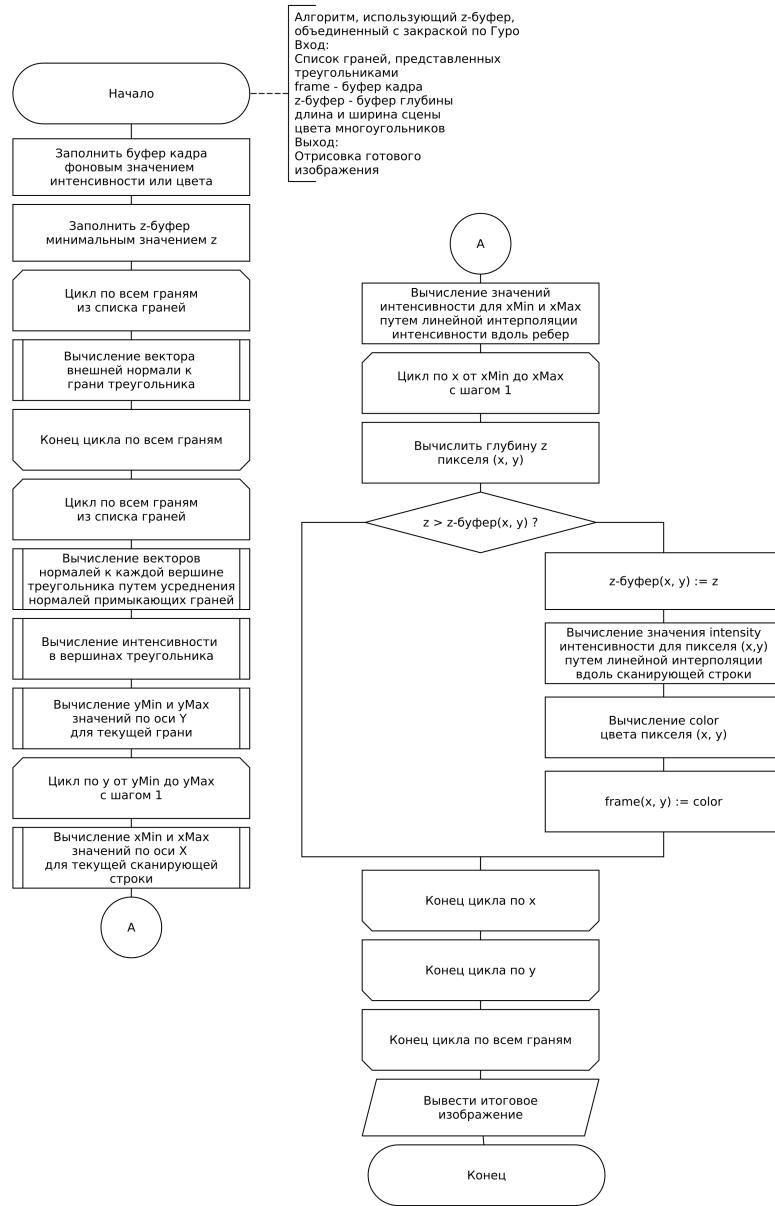


Рисунок 2.8 – Схема алгоритма, использующего Z-буфер, объединенного с закраской по Гуро

2.2.8 Выбор типов и структур данных

Для реализации разрабатываемого ПО необходимо использование структур данных, представленных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Представление данных в ПО

| Данные | Представление |
|----------------------------------|--|
| Точка в трехмерном пространстве | Координаты по осям x , y и z |
| Вектор в трехмерном пространстве | Точка в трехмерном пространстве |
| Карта высот | Двумерный массив точек в трехмерном пространстве |
| Плоскость | Три точки в трехмерном пространстве со значениями коэффициентов плоскости |
| Источник света | Точка трехмерного пространства со значениями интенсивности источника света и коэффициента диффузного освещения |
| Ландшафт | Карта высот, длина и ширина карты высот |

2.2.9 Описание структуры программного обеспечения

На рисунке 2.9 представлена диаграмма классов разрабатываемого программного обеспечения.

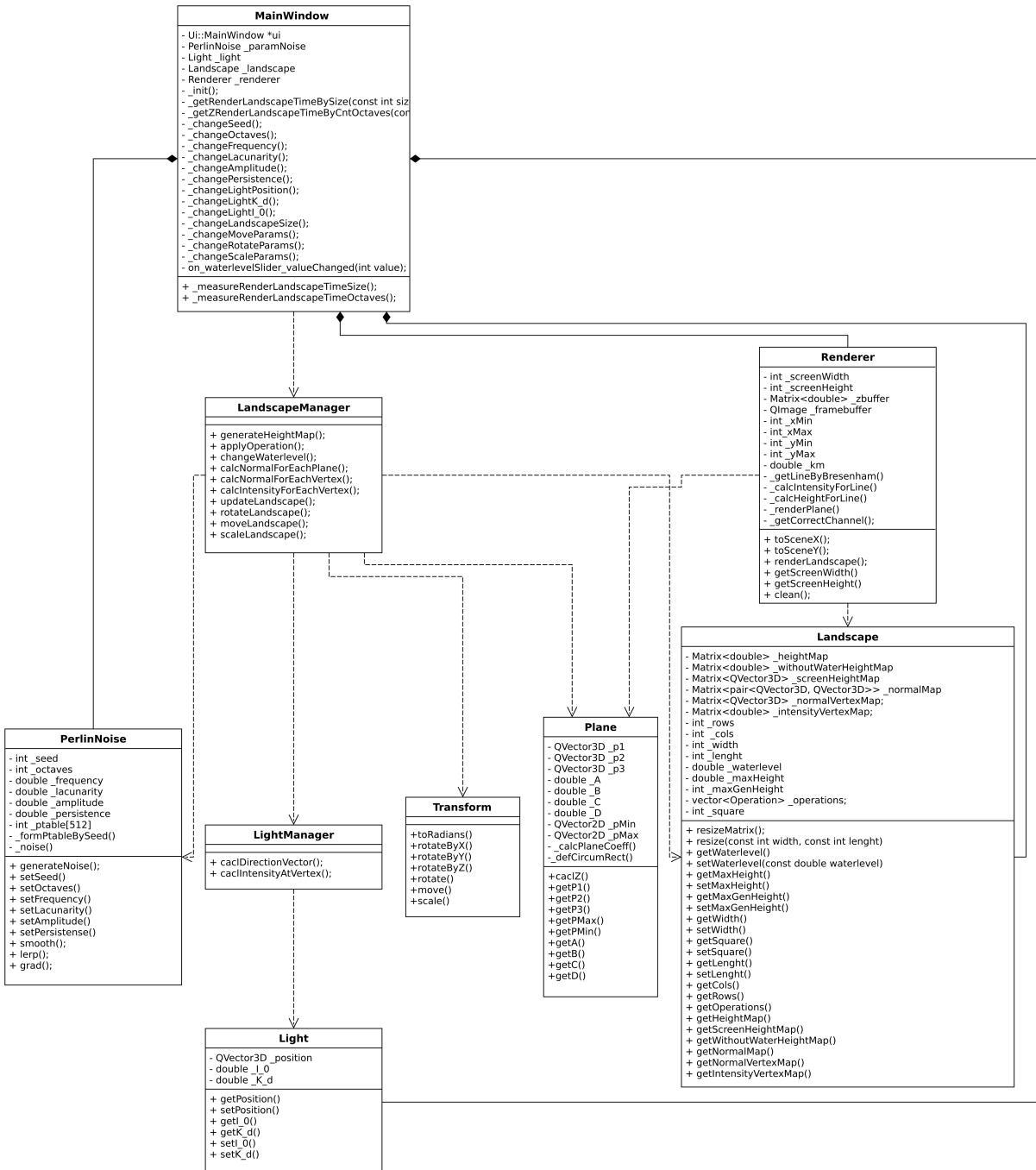


Рисунок 2.9 – Диаграмма классов разрабатываемого ПО

В разрабатываемом программном обеспечении реализуются следующие классы:

- **PerlinNoise** — класс, хранящий параметры алгоритма шума Перлина и реализующий возможность генерации высоты для переданной точки;
- **Plane** — класс для представления плоскости, являющейся треугольным полигоном;
- **Transform** — класс для осуществления афинных преобразований;
- **Light** — класс для представления точечного источника света;
- **LightManager** — класс для вычисления интенсивностей света в точке;
- **Landscape** — класс для представления трехмерного ландшафта;
- **LandscapeManager** — класс для осуществления всех операций по изменению ландшафта;
- **Renderer** — класс для растеризации ландшафта и вывода его на экран.

Вывод

На основе данных, полученных из аналитического раздела, были описаны алгоритм построения одного кадра изображения, приведены схемы алгоритма генерации карты высот, алгоритма закраски по Гуро и алгоритма удаления невидимых линий, использующего Z-буфер. Было дано математическое описание модели освещения Ламберта и приведены матрицы афинных преобразований. Также была приведена структура разрабатываемого ПО в виде диаграммы классов и были выдвинуты требования к ПО.

3 Технологический раздел

В данном разделе будут приведены средства реализации ПО, листинги реализованных алгоритмов, описание интерфейса и примеры работы программы.

3.1 Средства реализации

Для реализации программного продукта был выбран язык программирования *C++* [16] по следующим причинам:

- данный язык преподавался в рамках курса по ООП;
- *C++* обладает высокой вычислительной производительностью; [17; 18], что очень важно для решения поставленной задачи;
- в стандартной библиотеке языка присутствует поддержка всех структур данных, выбранных по результатам проектирования;
- средствами *C++* можно реализовать все алгоритмы, выбранные в результате проектирования.

В качестве среды разработки предпочтение было отдано среде *QT Creator* [19] по следующим причинам:

- он обладает всем необходимым функционалом для написания, проектирования и отладки программ, а также создания графического пользовательского интерфейса;
- данная среда поставляется с фреймворком Qt [20], который содержит в себе все необходимые средства, позволяющие работать непосредственно с пикселями изображения;
- *QT Creator* позволяет работать с расширением *QT Design* [21], который позволяет создавать удобный и надежный интерфейс.

Для упрощения и автоматизации сборки проекта используется утилита *make* [22].

3.2 Реализация алгоритмов

На листингах 3.1 и 3.2 представлена реализация алгоритма генерации шума Перлина.

На листинге 3.3 представлена реализация функции расчета интенсивности света.

На листинге 3.4 представлена реализация афинных преобразований поворота, масштабирования и переноса.

Листинг 3.1 – Реализация алгоритма шума Перлина с применением нескольких октав

```
double PerlinNoise::generateNoise(const double x, const double y)
{
    int octaves = this->octaves;
    double frequency = this->frequency;
    double amplitude = this->amplitude;

    double result = 0;
    double sum_ampl = 0;

    for (; octaves > 0; octaves--)
    {
        result += this->noise(x * frequency, y * frequency) *
                  amplitude;
        sum_ampl += amplitude;

        amplitude *= this->persistence;
        frequency *= this->lacunarity;
    }

    return result / sum_ampl;
}
```

Листинг 3.2 – Реализация алгоритма шума Перлина для текущей октавы

```
double PerlinNoise::_noise(double x, double y)
{
    int xi = (int)(floor(x)) & 255;
    int yi = (int)(floor(y)) & 255;
    x -= floor(x);
    y -= floor(y);
    double u = smooth(x), v = smooth(y);

    double tl = grad(this->pTable[this->pTable[xi] + yi], x, y,
                      0);
    double tr = grad(this->pTable[this->pTable[xi] + yi + 1], x,
                      y - 1, 0);
    double bl = grad(this->pTable[this->pTable[xi + 1] + yi +
                      1], x - 1, y - 1, 0);
    double br = grad(this->pTable[this->pTable[xi + 1] + yi], x
                      - 1, y, 0);

    double x1 = this->lerp(tl, br, u), x2 = this->lerp(tr, bl, u);

    return this->lerp(0, 1, this->lerp(x1, x2, v));
}
```

Листинг 3.3 – Реализация функции расчета интенсивности света согласно с моделью освещения Ламберта

```
double LightManager::calcIntensityAtVertex(const Light &light,
                                            const QVector3D
                                              &direction,
                                            const QVector3D &normal)
{
    double _scalar_product = QVector3D::dotProduct(direction,
                                                    normal);
    double I = light.getI_0() * light.getK_d() * std::max(0.0,
                                                          _scalar_product);

    return I;
}
```

Листинг 3.4 – Реализация афинных преобразований

```
void Transform::rotate(QVector3D &point, const Rotate &rotate,
    QVector3D &centerRotate)
{
    rotateByX(point, rotate.xAngle, centerRotate);
    rotateByY(point, rotate.yAngle, centerRotate);
    rotateByZ(point, rotate.zAngle, centerRotate);
}

void Transform::move(QVector3D &point, const Move &move)
{
    point.setX(point.x() + move.dx);
    point.setY(point.y() + move.dy);
    point.setZ(point.z() + move.dz);
}

void Transform::scale(QVector3D &point, const Scale &scale,
    QVector3D &centerScale)
{
    point.setX(scale.kx * point.x() + (1 - scale.kx) *
        centerScale.x());
    point.setY(scale.ky * point.y() + (1 - scale.ky) *
        centerScale.y());
    point.setZ(scale.kz * point.z() + (1 - scale.kz) *
        centerScale.z());
}
```

Листинг 3.5 – Реализация алгоритма закраски по Гуро в сочетании с алгоритмом удаления невидимых линий, использующим Z-буфер (часть 1)

```
void Renderer::_renderPlane(const Plane &screenPlane, const
    vector<double> &heights, const vector<double> &intensity, const
    double waterlevel, const double maxHeight)
{
    double yMin = screenPlane.getPMin().y();
    double yMax = screenPlane.getPMax().y();
    double a = screenPlane.getA(), c = screenPlane.getc();
    vector<Pixel> line1 =
        this->_getLineByBresenham(screenPlane.getP1(),
        screenPlane.getP2());
    vector<Pixel> line2 =
        this->_getLineByBresenham(screenPlane.getP2(),
        screenPlane.getP3());
    vector<Pixel> line3 =
        this->_getLineByBresenham(screenPlane.getP3(),
        screenPlane.getP1());

    this->_calcParamsLine(line1, intensity[0], intensity[1],
        heights[0], heights[1]);
    this->_calcParamsLine(line2, intensity[1], intensity[2],
        heights[1], heights[2]);
    this->_calcParamsLine(line3, intensity[2], intensity[0],
        heights[2], heights[0]);

    vector<Pixel> allLines;
    allLines.insert(allLines.end(), line1.begin(), line1.end());
    allLines.insert(allLines.end(), line2.begin(), line2.end());
    allLines.insert(allLines.end(), line3.begin(), line3.end());

    for (int y = yMin; y <= yMax; ++y)
    {
        vector<Pixel> yn;
        std::copy_if(allLines.begin(), allLines.end(),
            std::back_inserter(yn), [y](const Pixel &point)
                { return point.vec.y() == y; });
    }
}
```

Листинг 3.6 – Реализация алгоритма закраски по Гуро в сочетании с алгоритмом удаления невидимых линий, использующим Z-буфер (часть 2)

```
    std::sort(yn.begin(), yn.end(), [](const Pixel &a, const Pixel &b)
    { return a.vec.x() < b.vec.x(); });

    double deltaX = yn[yn.size() - 1].vec.x() - yn[0].vec.x();
    double x0 = yn[0].vec.x();

    double z = screenPlane.caclZ(x0, y);

    double I = yn[0].I, deltaI = I - yn[yn.size() - 1].I;
    double height = yn[0].vec.z(), deltaZ = height -
        yn[yn.size() - 1].vec.z();

    for (int x = yn[0].vec.x(); x <= yn[yn.size() -
        1].vec.x(); ++x)
    {
        int sceneX = this->toSceneX(x), sceneY =
            this->toSceneY(y);
        if (sceneX < 0 || sceneX >= this->_screenWidth ||
            sceneY < 0 || sceneY >= this->_screenHeight)
            continue;
        double deltaU = (x - x0) / deltaX - 0;

        if (z > this->_zbuffer[sceneX][sceneY])
        {
            this->_zbuffer[sceneX][sceneY] = z;
            this->_framebuffer.setPixelColor(sceneX, sceneY,
                this->_getColorByHeight(I, height, maxHeight,
                waterlevel));
        }
        z -= (a / c);
        I += (deltaI * deltaU);
        height += (deltaZ * deltaU);
    }
}
```

3.3 Интерфейс программы

На рисунке 3.1 интерфейс реализованного ПО.

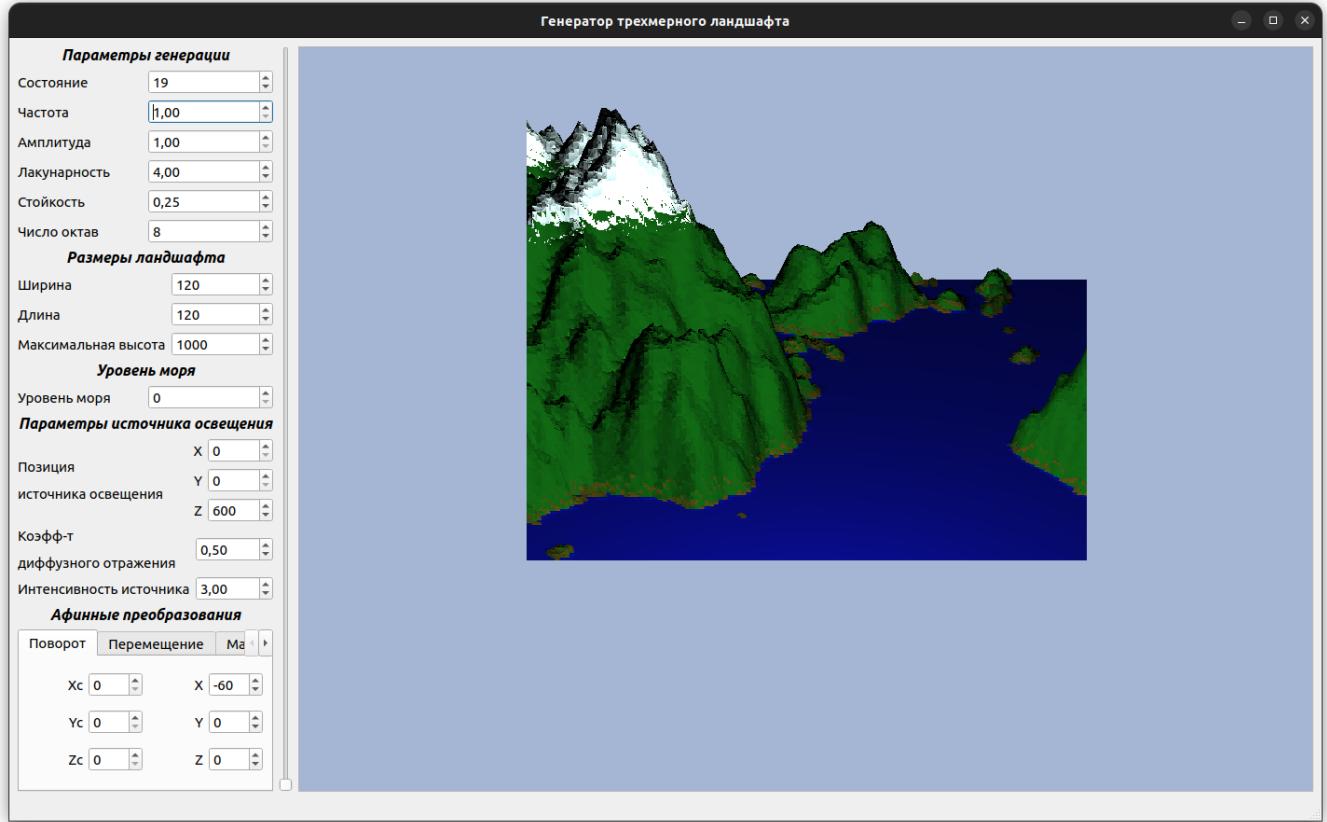


Рисунок 3.1 – интерфейс реализованного ПО

Пользователь может изменять вид ландшафта следующим образом:

- 1) изменить параметры генерации;
- 2) изменить размеры ландшафта;
- 3) изменить положение и параметры источника света;
- 4) изменить уровень моря с помощью слайдера или через поле ввода;
- 5) осуществить поворот, перенос и масштабирование ландшафта.

3.4 Демонстрация работы программы

На рисунках 3.2 показаны примеры работы программы.

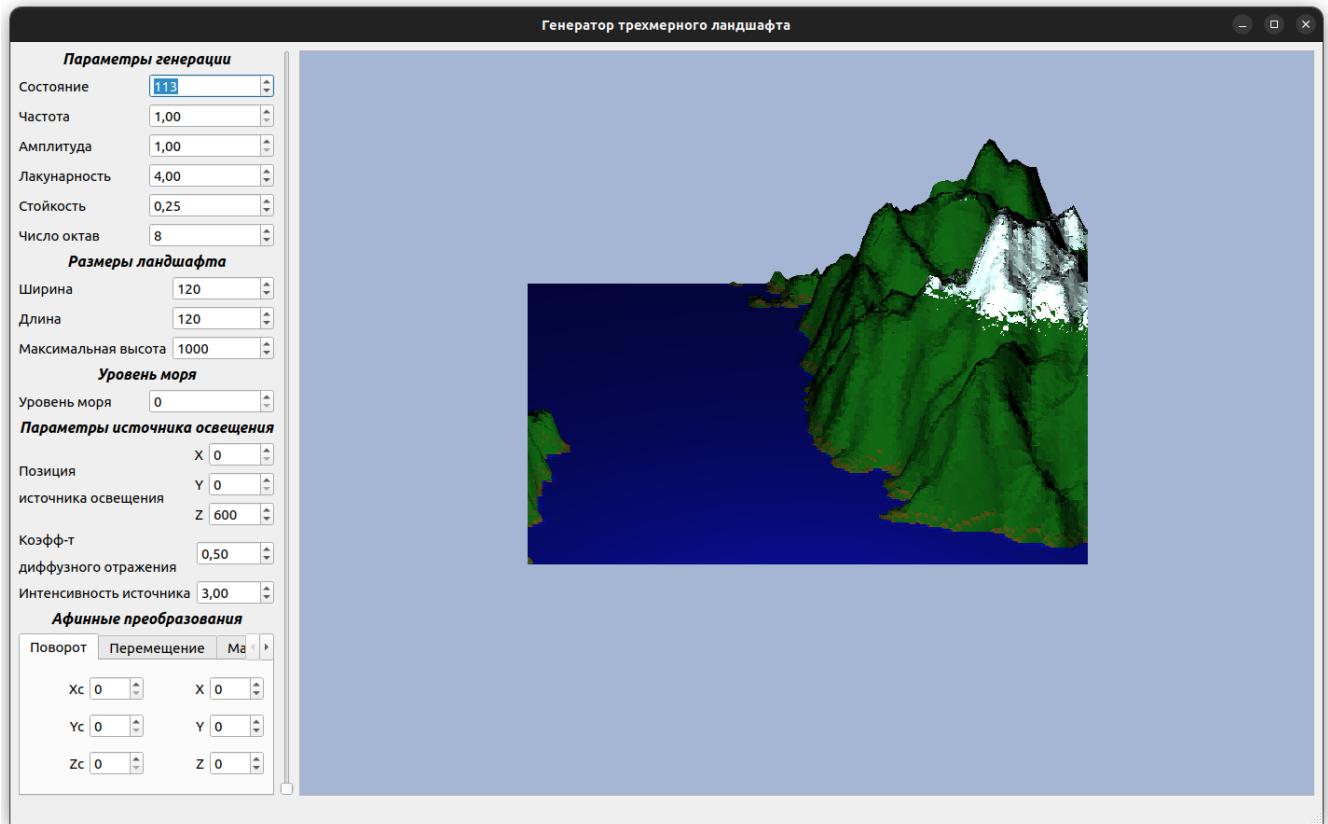


Рисунок 3.2 – Пример визуализации сгенерированного ландшафта

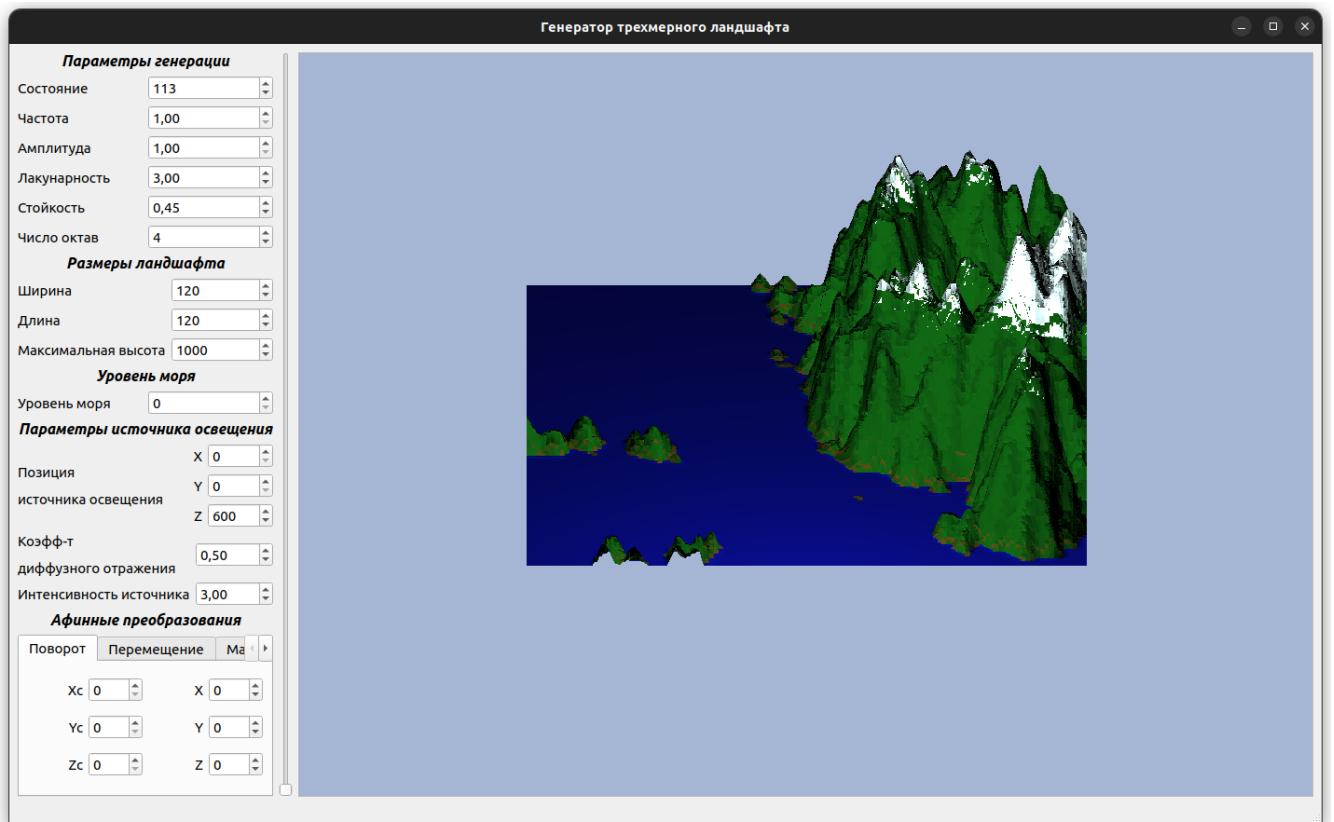


Рисунок 3.3 – Пример визуализации ландшафта с измененными параметрами генерации

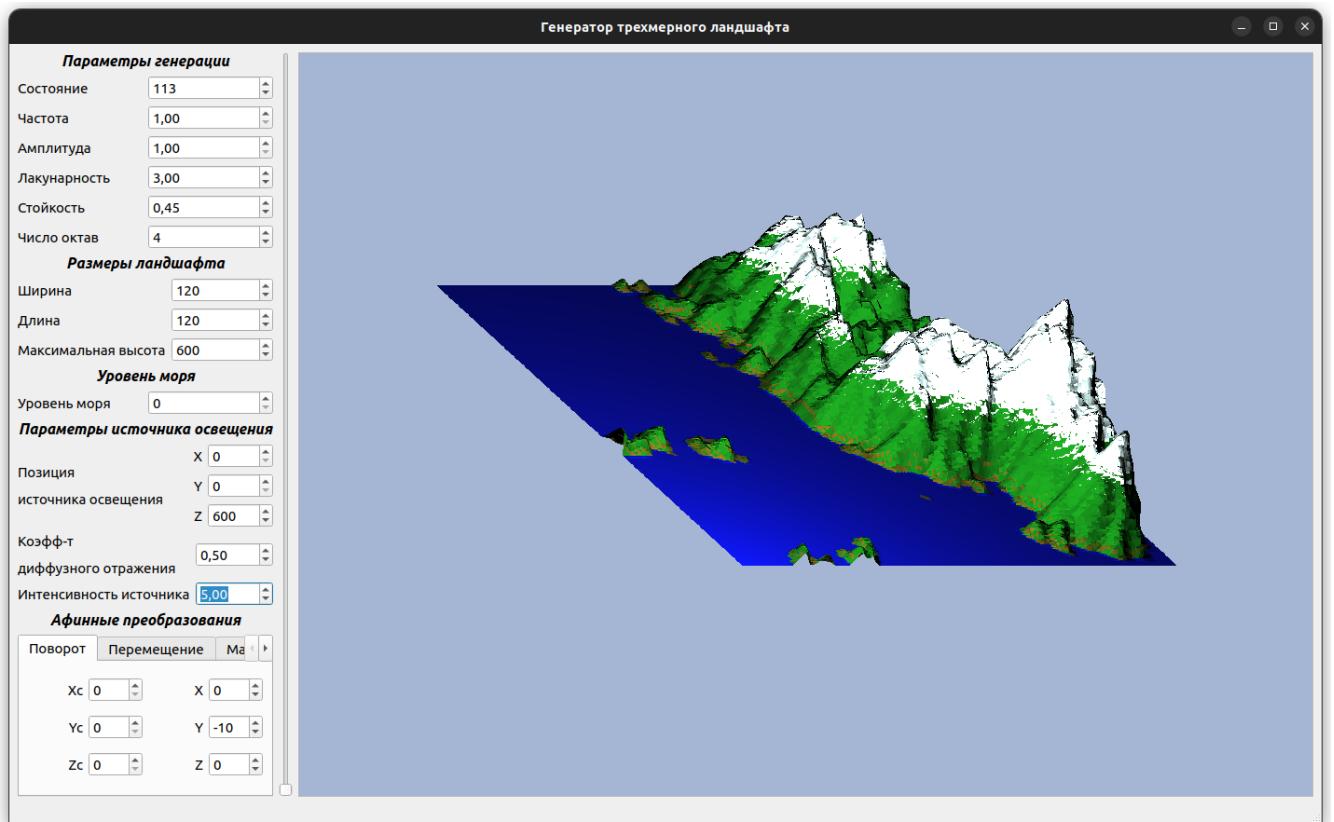


Рисунок 3.4 – Пример визуализации ландшафта с измененным положением в пространстве, увеличенной интенсивностью света и уменьшенной максимально генерируемой высотой

Вывод

В данном разделе были приведены средства реализации ПО, листинги реализованных алгоритмов, описание интерфейса и примеры работы программы.

4 Исследовательский раздел

В разделе представлены результаты проведенных исследований, в котором сравниваются временные характеристики работы реализованного программного обеспечения.

4.1 Технические характеристики

Технические характеристики устройства, на котором проводились исследования:

- операционная система: Ubuntu 22.04.3 LTS x86_64 [23];
- оперативная память: 16 Гб;
- процессор: 11th Gen Intel® Core™ i7-1185G7 @ 3.00 ГГц × 8.

Исследования проводились на ноутбуке, который был подключен к сети электропитания. Во время проведения исследований ноутбук был загружен только встроенными приложениями окружения и самим окружением.

4.2 Проведение первого исследования

4.2.1 Цель первого исследования

Целью первого исследования является проведение сравнительного анализа времени построения одного кадра ландшафта в зависимости от его линейных размеров, заданных в количестве треугольных полигонов.

4.2.2 Наборы варьируемых и фиксированных параметров

Замеры проводились для ландшафта размером 10×10 , 50×50 , 100×100 , 200×200 , 300×300 , 400×400 , 500×500 , 600×600 , 700×700 .

Для каждого размера ландшафта измерялось время 20 визуализаций, после чего вычислялось среднее арифметическое из полученных значений.

В качестве фиксированных параметров были выбраны следующие:

- состояние (равно 25)
- частота (равна 1)
- амплитуда (равна 1)
- лакунарность (равна 4)
- стойкость (равна 0.25)
- число октав (равно 8)
- максимальная высота (равно 1000)
- уровень моря (равен 0)
- позиция источника освещения (равна точке с координатами $(0, 0, 600)$)
- коэффициент диффузного отражения источника (равна 0.5)
- интенсивность источника (равна 3)

4.2.3 Результаты первого исследования

Результаты замеров времени построения одного кадра ландшафта от размеров ландшафта приведены в таблице 4.1 и на рисунке 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты замеров времени построения одного кадра ландшафта от линейных размеров ландшафта

| Размеры ландшафта, количество треугольных полигонов | Время построения, секунды |
|---|------------------------------|
| 10×10 | 0.035 |
| 50×50 | 0.106 |
| 100×100 | 0.340 |
| 200×200 | 1.134 |
| 300×300 | 2.595 |
| 400×400 | 4.899 |
| 500×500 | 8.524 |
| 600×600 | 12.226 |
| 700×700 | 17.154 |

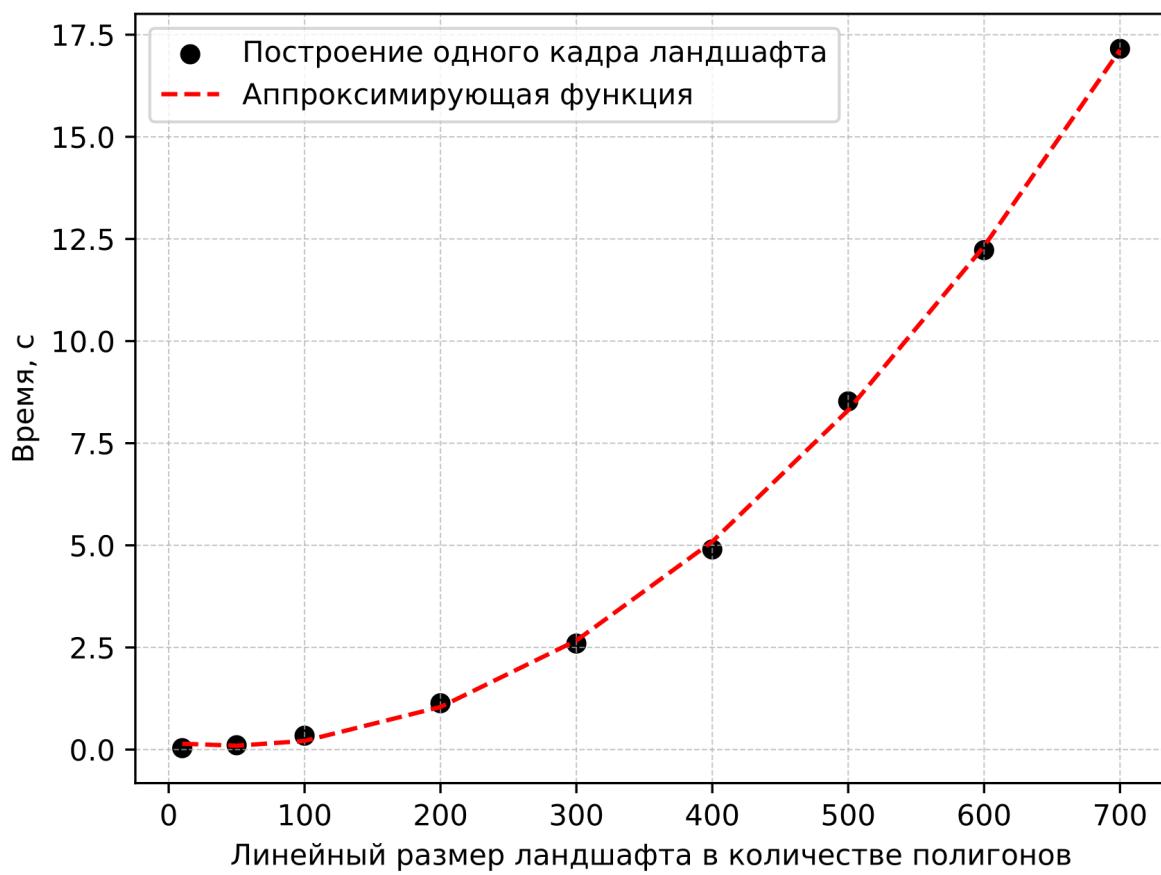


Рисунок 4.1 – Результаты замеров времени построения одного кадра ландшафта от размеров ландшафта

С помощью метода наименьших квадратов было установлено, что полученные дискретные значения результатов аппроксимируются квадратичной функцией вида $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ с невязкой, имеющей значение ≈ 0.135 .

Таким образом, по результатам первого исследования можно сделать вывод о том, что в зависимости от размеров ландшафта наблюдается квадратичная зависимость времени построения кадра. Это означает, что увеличение размеров ландшафта приводит к более значительному увеличению времени построения кадра.

4.3 Проведение второго исследования

4.3.1 Цель второго исследования

Целью второго исследования является проведение сравнительного анализа времени генерации одного кадра ландшафта в зависимости от количества октав.

4.3.2 Наборы варьируемых и фиксированных параметров

Замеры проводились для ландшафта с количеством октав, равным 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Для каждой октавы измерялось время 20 визуализаций, после чего вычислялось среднее арифметическое из полученных значений.

В качестве фиксированных параметров были выбраны следующие:

- состояние (равно 25)
- частота (равна 1)
- амплитуда (равна 1)
- лакунарность (равна 4)
- стойкость (равна 0.25)
- размеры ландшафта (равны 120×120)
- максимальная высота (равно 1000)
- уровень моря (равен 0)
- позиция источника освещения (равна точке с координатами $(0, 0, 600)$)
- коэффициент диффузного отражения источника (равна 0.5)
- интенсивность источника (равна 3)

4.3.3 Результаты второго исследования

Результаты замеров времени построения одного кадра ландшафта от его размеров приведены в таблице 4.2 и на рисунке 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты замеров времени построения одного кадра ландшафта от количества октав

| Число октав | Время построения, секунды |
|-------------|---------------------------|
| 1 | 0.346 |
| 2 | 0.452 |
| 3 | 0.565 |
| 4 | 0.690 |
| 5 | 0.862 |
| 6 | 0.940 |
| 7 | 1.199 |
| 8 | 1.392 |
| 9 | 1.538 |

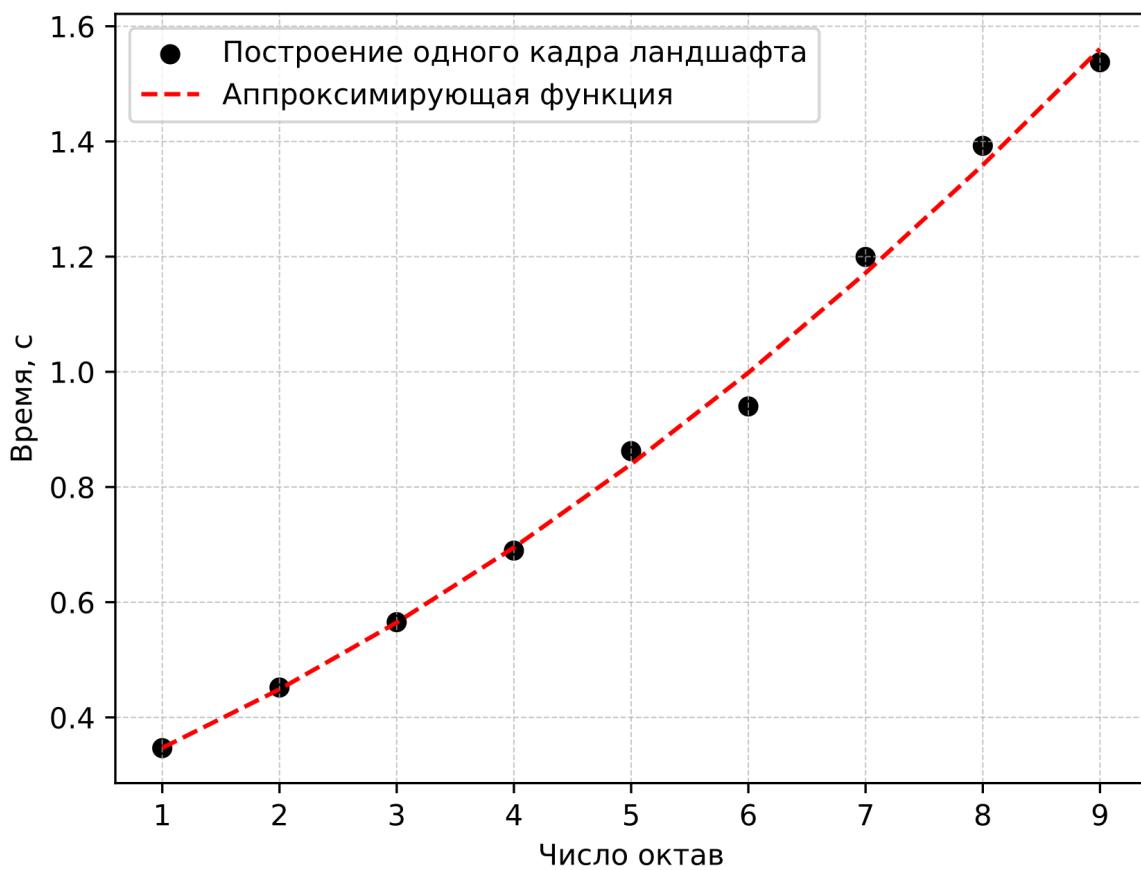


Рисунок 4.2 – Результаты замеров времени построения одного кадра ландшафта от количества октав

С помощью метода наименьших квадратов было установлено, что полученные дискретные значения результатов аппроксимируются квадратичной функцией вида $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ с невязкой, имеющей значение ≈ 0.006 .

С ростом числа октав наблюдается рост времени построения одного кадра: для построения одного кадра ландшафта с 9-ю октавами требуется в 4.44 раза больше времени, чем для построения одного кадра ландшафта с 1-й октавой.

4.4 Вывод

В данном разделе были проведены исследования по замеру времени построения одного кадра ландшафта от размеров ландшафта и времени построения одного кадра ландшафта от числа октав.

Время построения одного кадра ландшафта в зависимости от размеров ландшафта имеет квадратичную зависимость и начинает резко увеличиваться начиная с размеров ландшафта в 200×200 : для отображения ландшафта такой размерности по сравнению с размером 100×100 требуется в 3.33 раза больше времени, для отображения ландшафта размером 700×700 по сравнению с размером 300×300 требуется в 6.61 раза больше времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения курсового проекта были решены следующие задачи:

- 1) выполнена формализация объектов синтезируемой сцены;
- 2) проведен анализ существующих алгоритмов создания ландшафта и визуализации сцены, выбраны подходящие и обоснован их выбор;
- 3) разработано ПО;
- 4) реализованы выбранные алгоритмы;
- 5) проведено исследование временных характеристик разработанного ПО.

Цель работы, а именно разработка и создание программного обеспечения для генерации и визуализации трехмерного ландшафта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.Ю. Д. Основы компьютерной графики. — Томск: Издво Томского политехнического университета, 2011. — С. 191.
2. Генерация трехмерных ландшафтов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ixbt.com/video/3dterrains-generation.shtml> (дата обращения: 03.07.2023).
3. Применение дерева квадрантов в визуализации ландшафтов с изменяемым уровнем детализации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34887617_70147073.pdf (дата обращения: 19.10.2023).
4. Исследование методов компьютерного моделирования поверхностей Земли для тестирования программного обеспечения обработки изображений со спутников [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39141278_24936959.pdf (дата обращения: 19.10.2023).
5. Применение алгоритма midpoint-displacement в процедурной генерации ландшафтов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-algoritma-midpoint-displacement-v-protsedurnoy-generatsii-landshaftov> (дата обращения: 19.10.2023).
6. Процедурная генерация текстур на основе алгоритма Diamond-Square [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/31470/1/Multan_Protsedurnaya.PDF (дата обращения: 19.10.2023).
7. Diamond-square algorithm [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Diamond-square_algorithm (дата обращения: 04.07.2023).
8. Terrain Generation Tutorial: Hill Algorithm [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.stuffwithstuff.com/robot-frog/3d/hills/hill.html> (дата обращения: 08.07.2023).

9. Аникеев А. Генерация и моделирование 2D ландшафта по контрольным значениям с использованием Unity на языке программирования C#. — Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 2020. — С. 9.
10. Perlin noise [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Perlin_noise (дата обращения: 08.07.2023).
11. Снук Г. 3D-ландшафты в реальном времени на C++ и DirectX 9. — Пер. С англ М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2007. — С. 368.
12. Д. Р. Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. — СПб: БХВ-Петербург, 1989. — С. 512.
13. Простые модели освещения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cgraph.ru/node/435> (дата обращения: 16.07.2023).
14. Афинные преобразование объектов в компьютерной графике [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22077864_43675515.pdf (дата обращения: 17.12.2023).
15. Иванов В.П. Б. А. Трехмерная компьютерная графика. — под ред. Г.М. Полищука. М.: Радио и связь, 1995. — С. 224.
16. Справочник по языку C++ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/cpp/cpp/cpp-language-reference?view=msvc-170> (дата обращения: 28.09.2022).
17. Сравнение языков программирования C++ и Python [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42416104_98504159.pdf (дата обращения: 18.12.2023).
18. C++ против Java: базовое сравнение, ключевые различия и сходства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://itgap.ru/post/cpp-vs-java> (дата обращения: 18.12.2023).
19. Qt Creator Manual [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://doc.qt.io/qtcreator/> (дата обращения: 18.12.2023).

20. All Qt Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://doc.qt.io/all-topics.html> (дата обращения: 18.12.2023).
21. Qt Designer Manual [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://doc.qt.io/qt-6/qtdesigner-manual.html> (дата обращения: 18.12.2023).
22. CMake Documentation and Community [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cmake.org/documentation/> (дата обращения: 18.12.2023).
23. Ubuntu 22.04.3 LTS (Jammy Jellyfish) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://releases.ubuntu.com/22.04/> (дата обращения: 18.12.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Презентация к курсовой работе

Презентация содержит 14 слайдов.