



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:

«Моделирование облаков»

Студент ИУ7-54Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Булдаков М. Ю.
(И. О. Фамилия)

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата)

Кузнецова О. В.
(И. О. Фамилия)

2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Аналитический раздел	6
1.1 Модель облаков	6
1.2 Методы представления облаков	7
1.2.1 Система частиц	7
1.2.2 Объемы, ограниченные поверхностью	8
1.2.3 Процедурное представление	8
1.2.4 Сравнение методов представление облаков	10
1.3 Алгоритмы визуализации облаков	11
1.3.1 Алгоритм Сдвиг—Деформации	12
1.3.2 Алгоритм разбрызгивания текстур	12
1.3.3 Алгоритм Ray Marching	13
1.3.4 Сравнение алгоритмов визуализации	13
1.4 Модель освещения	14
1.5 Расчет цвета неба	16
1.6 Постановка задачи	16
2 Конструкторский раздел	19
2.1 Требования к программному обеспечению	19
2.2 Разработка алгоритмов	19
2.2.1 Пересечение луча со сферой	20
2.2.2 Вычисление плотности облаков в атмосфере	21
2.2.3 Схемы алгоритмов	21
2.3 Диаграмма классов	26
2.4 Выбор используемых типов и структур данных	26
3 Технологический раздел	27
3.1 Выбор средств реализации	27
3.2 Реализация алгоритмов	27
3.3 Результаты разработки	27

3.4	Функциональное тестирование	30
4	Исследовательский раздел	33
4.1	Технические характеристики	33
4.2	Время выполнения реализаций алгоритмов	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		39
ПРИЛОЖЕНИЕ А		40
ПРИЛОЖЕНИЕ Б		48

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей расчетно-пояснительной записке применяют следующие термины с соответствующими определениями.

Яркость — световая величина L , характеризующая излучательную способность источника света [1].

Луч — понятие геометрической оптики, обозначающие линию, вдоль которой распространяется поток энергии, испущенной источником света [1].

Интенсивность излучения — энергетическая характеристика распространяющегося в заданном направлении электромагнитного излучения, пропорциональная квадрату амплитуды его волны [1].

Длина волны — расстояние между двумя ближайшими точками гармонической бегущей волны, которые находятся в одинаковой фазе [1].

Плотность — масса, приходящаяся на единицу объема однородного вещества [1].

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерная графика представляет собой совокупность методов и способов преобразования информации в графическое представление при помощи электронно вычислительной машины.

Наличие облаков сильно влияет на восприятие изображения, делая его более реалистичным. Поэтому задача визуализации реалистичных облаков чаще всего встречается при разработке компьютерных игр и в кинематографе [2–4].

Целью данной работы является реализация программного обеспечения, которое предоставляет возможность визуализировать облачное небо. При этом созданная программа должна позволить изменять параметры, влияющие на внешний вид неба.

Чтобы достигнуть поставленной цели, требуется решить следующие задачи:

- описать предметную область визуализации облаков и существующие методы их представления;
- спроектировать программное обеспечение, позволяющее визуализировать облака;
- выбрать инструменты для реализации программного обеспечения;
- реализовать спроектированное программное обеспечение;
- исследовать временные характеристики реализованного программного обеспечения.

1 Аналитический раздел

В данном разделе будет рассмотрена предметная область визуализации облаков.

1.1 Модель облаков

Облака представляют с помощью оптической модели, которая описывает как облачный объем рассеивает и поглощает свет [3—7]. Данная модель может быть описана функцией (1.1).

$$L(x, \vec{\omega}) = \rho(x_0, x)L(x_0, \vec{\omega}) + L_m(x, \vec{\omega}), \quad (1.1)$$

где $L(x, \vec{\omega})$ — яркость луча света в точке x , излучаемого в направлении $\vec{\omega}$; x_0 — точка в пространстве откуда был испущен луч света; $\rho(x_1, x_2)$ — функция, описывающая ослабление света при распространении его от точки x_1 до точки x_2 . Итоговая яркость луча формируется из двух составляющих: $L_{ri}(x, \vec{\omega}) = \rho(x_0, x)L(x_0, \vec{\omega})$ — яркости света, формируемой исходным лучом; $L_m(x, \vec{\omega})$ — яркости света, формируемой явлениями внутри среды [5].

Ослабление света за счет поглощения и рассеивания внутри облака описывается законом Бугера—Ламберта—Бера [5; 7]. Интенсивность светового пучка, обладающего начальной интенсивностью I_0 , и прошедшего от точки x_0 до x внутри облака, вычисляется по формуле (1.2).

$$I = I_0 \cdot e^{-\int_{x_0}^x k(u) du}, \quad (1.2)$$

где I — итоговая интенсивность пучка, а $k(u)$ называют показателем ослабления, который различен для разных длин волн света [3—5; 7].

Для определения доли светового потока, которая прошла без изменения направления через облачный объем используют понятие прозрачности [3; 4; 7]. Прозрачность в точке u определяется по формуле (1.3).

$$A_u = 1 - e^{-k(u)}. \quad (1.3)$$

Поскольку значение $k(u)$ зависит от плотности вещества из которого состоят облака, то для того чтобы задать форму облака, достаточно задать распределение плотности вещества в пространстве [3—5; 7].

1.2 Методы представления облаков

Были рассмотрены следующие методы представления плотности облаков:

- система частиц;
- объемы, ограниченные поверхностью;
- процедурное представление.

1.2.1 Система частиц

Система частиц — способ представления объектов с помощью набора частиц [8]. Каждая частица в системе задается своим положением в пространстве. Если x — некоторая точка в пространстве, R — заранее заданный радиус восприимчивости к частицам, $f(x)$ — функция распределения плотности от расстояния до частицы. Тогда алгоритм определения плотности в точке x будет состоять из следующих шагов:

- 1) найти все частицы, расстояние до которых от точки x не больше заданного радиуса R ;
- 2) вычислить расстояния от заданной точки x до отобранных частиц;
- 3) для каждого вычисленного расстояния найти значения функции $f(x)$;
- 4) просуммировать полученные значения функции.

Особенности метода представления:

- для определения плотности необходимо выполнить полный перебор;
- возможно представлять облака любой формы;
- качество результата и количество вычислений зависят от количества частиц.

1.2.2 Объемы, ограниченные поверхностью

Облачный объем представляется окружающей его оболочкой, обычно заданной с помощью полигональной сетки. Полигональная сетка — это совокупность вершин, ребер и граней, которые определяют форму многогранного объекта в пространстве [9].

Поскольку информация о внутренней структуре облака отсутствует, то предполагается, что объем однородный. Тогда плотность в точке x определяется по следующим шагам [6]:

- 1) проверить попала ли точка в какой-нибудь из ограниченных, заданных объемов;
- 2) если точка принадлежит объему, то плотность в этой точке равна заданной плотности объема, иначе плотность в этой точке равна 0.

Особенности данного метода:

- возможно задать облака любой формы;
- для определения плотности в точке, необходимо рассмотреть все облака, чтобы понять попала ли точка в одно из них;
- предположение, что облака однородны внутри снижает их реалистичность.

1.2.3 Процедурное представление

Для процедурной генерации могут использоваться функции шума, такие как: шум Перлина, шум Ворлея [3; 4].

Шум Перлина

Шум Перлина — это градиентный шум, состоящий из набора псевдослучайных единичных векторов (направлений градиента), расположенных в определенных точках пространства, и, интерполированных функцией сглаживания, значений между этими точками [10].

Шум Ворлея

Шум Ворлея — это шум полученный инвертированием шума Вороного [11]. Генерация шума Вороного состоит из следующих шагов:

- 1) создать регулярную сетку некоторого размера;
- 2) разместить в центре каждой ячейки точку;
- 3) сместить случайным образом каждую точку в пределах своей ячейки.

Вычисление значения шума Вороного в точке x состоит из следующих шагов:

- 1) определить в какую ячейку попала точка x ;
- 2) найти смежные ячейки с данной;
- 3) определить расстояние от точки x до всех точек, ассоциированных со смежными ячейками;
- 4) вернуть минимальное из вычисленных расстояний.

В данном подходе форма облака может задаваться поверхностью, а внутренняя структура с высоким разрешением генерируется процедурно [3; 4; 6; 12].

В итоге, определение плотности в точке состоит из следующих шагов:

- 1) определить попала ли точка в объем, содержащий облако;
- 2) если точка попала в объем, то плотность равна значению функции шума, иначе плотность равна 0.

Особенности данного представления:

- возможно задать облака любой формы;
- для определения плотности в точке, необходимо рассмотреть все облака, чтобы понять попала ли точка в одно из них;
- возможно вычислить значения функций шума заранее и хранить их в некотором массиве.

1.2.4 Сравнение методов представление облаков

Сравнение методов будет производится для представления облака кубической формы, размером $n \times n \times n$ вокселей. Для всех алгоритмов будут рассмотрены худшие случаи.

Для задания неоднородного распределения плотности внутри облака предполагается использование частиц с радиусом в пределах одного вокселя, тогда в объеме $n \times n \times n$ будет размещено n^3 частиц. Т. о. для определения плотности в некоторой точке необходимо рассмотреть n^3 частиц, а для их хранения требуется $n^3 \cdot C$ байт памяти, где C — объем памяти в байтах, занимаемый одной частицей.

В свою очередь, для объемов ограниченных поверхностью (в качестве поверхности используется полигональная сетка), для того чтобы задать такое же облако требуется хранить в памяти восемь вершин и двенадцать полигонов, а для определения попадания точки в облако необходимо проверить принадлежность этой точки ко всем облакам на сцене, в данном случае, принадлежность одному облаку. Т. о. плотность в точке вычисляется за одно действие и не зависит от размеров облака, а объем требуемой памяти равен $8 \cdot C + 12 \cdot D$, где C — объем памяти в байтах, занимаемый одной вершиной, а D — объем памяти, занимаемый одним полигоном.

Для процедурного представления облака, может быть задана также объемлющая оболочка с помощью полигональной сетки, для хранения которой требуется $8 \cdot C + 12 \cdot D$ байт памяти, где C — объем памяти в байтах, занимаемый одной вершиной, а D — объем памяти, занимаемый одним полигоном. При этом неоднородность плотности внутри облака, будет задаваться с помощью процедурно вычисленной текстуры, размер которой $n \times n \times n$, а объем требуемой памяти $n^3 \cdot E$, где E — объем памяти в байтах, занимаемый одним вокселим текстуры. Т. о. суммарные требования по памяти $8 \cdot C + 12 \cdot D + n^3 \cdot E$, а для определения плотности в точке, необходимо определить попала ли точка в облако и получить значение плотности из текстуры, т. е. выполнить два действия.

В результате, с учетом того, что $D < C < E$. Получаем, что для представления облака заданной формы и размера, больше памяти будет требоваться для представления облака с помощью процедурной генерации, затем с помощью системы частиц и после с помощью объемлющих оболочек.

При этом вычисление плотности в точке для процедурной генерации и для объемлющих оболочек приблизительно одинаково по трудозатратам и меньше, чем для системы частиц.

Вывод

В результате для решения поставленной задачи был выбран метод процедурного представления, поскольку данный метод позволяет получить плотность в точке пространства за наименьшее количество действий и, в отличии от метода объемлющих оболочек, позволяет учитывать неоднородность внутреннего объема облака.

1.3 Алгоритмы визуализации облаков

Для визуализации облаков по их пространственному представлению, необходимо провести вычисление цвета каждого пикселя в буфере кадра. Буфер кадра — часть графической памяти для хранения массива кодов, определяющих засветку пикселей на экране [13].

Были рассмотрены следующие алгоритмы визуализации облаков:

- Сдвиг—Деформации;
- разбрзгивание текстур;
- Ray Marching.

Во всех описанных алгоритмах цвет пикселя вычисляется с помощью смешивания цветов.

Имеется массив из n элементов, содержащий значения цвета и прозрачности в некоторой точке. Тогда смешивание цвета вычисляется по формуле (1.4) итеративно в порядке от последнего к первому элементу, изменяя i от $n - 1$ до 0.

$$C'_i = C_i + (1 - A_i)C'_{i+1}, \quad (1.4)$$

где C'_i — новое значение цвета, C_i и A_i — цвет и прозрачность на i -м шаге, C'_{i+1} — значение смешанного цвета на предыдущем шаге. Начальным значением считают $C'_n = 0$.

Формула (1.4) может быть изменена для прохода по массиву от первого

к последнему, т. е. i от 1 до n .

$$C'_i = C'_{i-1} + (1 - A'_{i-1})C_i, \quad (1.5)$$

$$A'_i = A'_{i-1} + (1 - A'_{i-1})A_i. \quad (1.6)$$

Начальными значениями в этом случае считают $C'_0 = 0$ и $A'_0 = 0$ [7].

1.3.1 Алгоритм Сдвиг—Деформации

Алгоритм Сдвиг—Деформации состоит из следующих шагов [14]:

- 1) сформировать массив срезов объема плоскостями, параллельными осями координат z ;
- 2) каждый срез из массива сдвинуть перпендикулярно оси z , так чтобы луч, распространяющийся в объеме был параллелен оси z (данный шаг называется сдвигом);
- 3) смешать пиксели текстур срезов в некотором временном буфере, в порядке от последнего к первому;
- 4) спроектировать временный буфер на буфер кадра (данный шаг называется деформацией).

Особенность алгоритма заключается в том, что выбор большого шага среза приведет к меньшему количеству вычислений, но при этом возможна потеря резких форм облака.

1.3.2 Алгоритм разбрызгивания текстур

Алгоритм разбрызгивания текстур применяется для визуализации системы частиц, но в общем случае, под частицой, в данном контексте, подразумевается точка пространства с заданной плотностью [6]. Частицы могут быть визуализированы с помощью текстурированного четырехугольника, представляющего проекцию частицы на плоскость, также называемую «отпечатком» [6; 15].

Алгоритм разбрызгивания состоит из следующих шагов [6; 15]:

- 1) найти частицы, пересекаемые лучом, исходящим от наблюдателя и приходящим в некоторый пиксель буфера кадра;

- 2) смешать проекции текстур этих частиц в буфере кадра, в порядке удаления от наблюдателя.

Особенность алгоритма состоит в том, что необходимо найти частицы, отпечаток которых попадает на выбранный пиксель и при этом хранить такие частицы нужно будет в порядке удаления от наблюдателя.

1.3.3 Алгоритм Ray Marching

Алгоритм Ray Marching состоит из следующих шагов [3; 4; 6]:

- 1) выпустить от наблюдателя луч для каждого пикселя буфера кадра;
- 2) разбить луч на равные интервалы;
- 3) выполнить итеративное смешение цветов на этих интервалах.

Особенность алгоритма заключается в том, что за счет итеративного смешивания цветов нет необходимости в сохранении порядка интервалов, а итоговый цвет можно вычислять по ходу распространения луча.

1.3.4 Сравнение алгоритмов визуализации

Сравнение алгоритмов будет проводится для облака, описанного в пункте 1.2.4. Сравнение производится для худшего случая.

Для алгоритма сдвиг деформации важен выбор шага, который влияет на точность визуализации. В дальнейшем будет считаться, что шаг среза равен одному. Тогда для данного алгоритма необходимо будет сформировать n срезов размера $n \times n$ и один дополнительный буфер размера $n \times n$, для хранения которых требуется $(n + 1) \cdot (n^2 \cdot A)$, где A — объем памяти, занимаемый одной ячейкой среза. Для сдвига необходимо изменить координаты каждого пикселя в каждом срезе, т. о. необходимо выполнить порядка $n \cdot n^2$ операций [14]. После сдвига производится смешивание текстур во временном буфере, т. е. производится еще порядка $n \cdot n^2$ операций и далее полученный буфер проецируется на буфер кадра за порядка n^2 операций. В итоге для визуализации одного облака алгоритмом Сдвиг—Деформации необходимо порядка $O(n^3)$ операций.

В алгоритме разбрзгивания текстур, будет считаться, что каждый луч, испущенный наблюдателем, пересек n частиц. Тогда для каждого луча

требуется дополнительно $n \cdot B$ байт памяти, где B — объем памяти в байтах, занимаемый одной частицей. В итоге, для каждого пикселя буфера кадра вычисляются проекции частиц, т. о. для визуализации облака необходимо выполнить порядка $N \cdot M \cdot n \cdot \alpha$ операций, где размер буфера кадра $N \times M$, α — количество операций, требуемое для определения текстур частиц, которые пересекаются с лучом наблюдателя. Т. о. визуализация выполняется за порядка $O(NMn)$ операций.

В алгоритме Ray Marching, испущенный луч хранит результирующий цвет некоторого пикселя в буфере кадра, т. е. требуется D байт памяти, где D — объем памяти, требуемый для хранения цвета. Для визуализации облака требуется порядка $N \cdot M \cdot \beta \cdot \gamma$ операций, где размер буфера кадра $N \times M$, β — количество операций, требуемое для определения цвета в некоторой точке луча, а γ — константа, которая обозначает количество интервалов на которые разбивается луч. Т. о. визуализация выполняется за порядка $O(NM)$ операций.

В результате, поскольку обычно размеры буфера кадра велики, то минимальное количество операций необходимо для алгоритма Сдвиг—Деформации, затем для алгоритма Ray Marching, и больше всего операций требуется для визуализации облака с помощью системы частиц. При этом алгоритм Ray Marching требует меньше памяти, чем алгоритм Сдвиг—Деформации.

Вывод

В результате для визуализации облаков был выбран алгоритм Ray Marching, поскольку данный алгоритм требует меньше всего памяти и при этом обладает приемлемой оценкой количества операций.

1.4 Модель освещения

Поскольку облака освещаются солнцем, которое сильно удалено от Земли, то солнечные лучи распространяются параллельно.

Световая энергия луча, распространяющегося в облачном объеме, может быть поглощена или рассеяна некоторой частицей. При этом облака являются анизотропной средой, т. е. отраженные фотоны распространяются в разных направлениях неравномерно [3—6].

Модель освещения приближенно учитывает формулу (1.2), которая

рассчитывается следующим образом (1.7).

$$BL = e^{-d}, \quad (1.7)$$

где d — приближенно вычисленное значение интеграла $\int_{x_0}^x k(u) du$.

Для аппроксимации явления неравномерного распространения рассеянного света используют фазовую функцию [3—6]. Фазовая функция описывает вероятность отражения луча от рассеивающего объекта под определенным углом. В качестве фазовой функции для облаков используется функция Хенни — Гринштейна (1.8).

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (1.8)$$

где g — варьируемый параметр, причем $0 \leq g < 1$, а θ — угол между направлениями луча до и после отражения [6].

В результате рассеивания луч может изменить свое направление на 180 градусов. Для учета этого в модель освещения вносят поправку [3; 4]. Поправка вычисляется по формуле (1.9).

$$PSE = 1 - e^{-2d}. \quad (1.9)$$

Для расчета энергии луча, испущенного солнцем, в некоторой точке пространства, необходимо учесть путь этого луча внутри облака до рассматриваемой точки. Для этого плотность вычисляется в нескольких точках, выбранных на луче.

В итоге, яркость света, в некоторой точке пространства вычисляется по формуле (1.10).

$$L = 2 \cdot e^{-d} \cdot (1 - 2e^{-2d}) \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (1.10)$$

где g — некоторая константа в функции Хенни—Гринштейна, а θ — угол между лучами света и направления взгляда.

1.5 Расчет цвета неба

В случае, когда на небе нет облаков, яркость в точке пространства x вычисляется приближено по формуле (1.11).

$$L = P(\cos(\theta)) \cdot \beta_0 \cdot e^{-\beta_0(d_1+d_2)-\frac{h}{H_0}}, \quad (1.11)$$

где $P(\cos(\theta))$ — коэффициент зависящий от типа рассеивания; θ — угол между лучами света и направления взгляда; β_0 — некоторая константа; h — высота в текущей точке пространства; H_0 — масштабирующая высота; d_1 — суммарная плотность воздуха, накопленная лучом распространяющимся от наблюдателя до точки x ; d_2 — суммарная плотность воздуха, накопленная лучом распространяющимся от солнца к точке x [4].

Проходя через атмосферу луч подвергается двум типам рассеивания: Рэлеевскому рассеиванию и рассеиванию Ми [4].

Коэффициент Рэлеевского рассеивания вычисляется по формуле (1.12).

$$P_R(\cos(\theta)) = \frac{3\pi}{16}(1 + \cos(\theta)). \quad (1.12)$$

Коэффициент рассеивания Ми вычисляется по формуле (1.13).

$$P_M(\cos(\theta)) = \frac{3\pi}{8} \frac{g^2(1 + \cos(\theta)^2)}{(2 + g^2)(1 + g^2 - 2g \cos(\theta))^{\frac{3}{2}}}, \quad (1.13)$$

где g — варьируемый параметр, причем $0 \leq g < 1$.

1.6 Постановка задачи

Постановка задачи может быть представлена с помощью диаграммы, изображенной на рисунке 1.1.

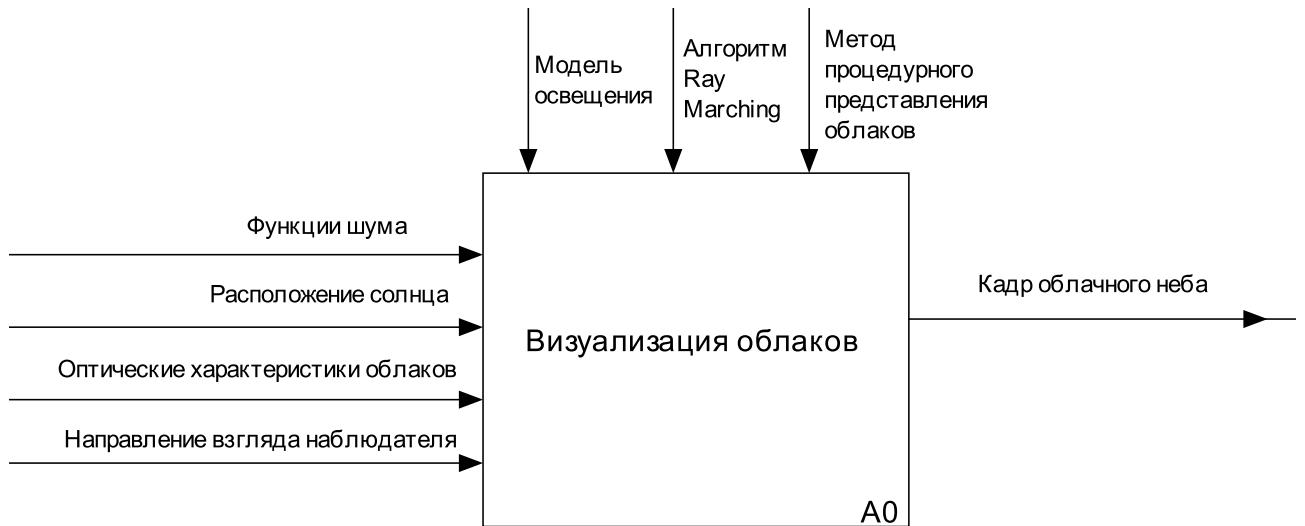


Рисунок 1.1 – Диграмма IDEF0 нулевого уровня

Вывод

В данном разделе был проведен анализ методов представления облаков, алгоритмов визуализации и модели освещения, которые возможно использовать для решения поставленных задач. В итоге были выбраны процедурное представление облаков и алгоритм Ray Marching.

В таблицах 1.1 и 1.2 представлено сравнение методов представления облаков и алгоритмов визуализации.

Таблица 1.1 – Сравнение методов представления облаков

Характеристика	СЧ	ООП	П
Учет неоднородности	Да	Нет	Да
Трудоемкость вычисления плотности в точке	$O(n^3)$	$O(Q)$	$O(Q)$
Требования по памяти	$O(n^3)$	$O(Q)$	$O(Q + n^3)$

Примечание: СЧ – система частиц; ООП – объемы, ограниченные поверхностью; П – процедурное представление, с предварительно вычисленными значениями функций шума; n – размер облака; Q – количество ограничивающих поверхностей.

Таблица 1.2 – Сравнение алгоритмов визуализации облаков

Характеристика	СД	РТ	RM
Трудоемкость построения изображения	$O(n^3)$	$O(NMn)$	$O(NM)$
Требования по памяти	$O(n^3)$	$O(n)$	$O(1)$

Примечание: СД — алгоритм сдвиг—деформации; РТ — алгоритм разбрызгивания текстур; RM — алгоритм Ray Marching; n — размер облака; $N \times M$ — размер изображения.

2 Конструкторский раздел

В данном разделе представлены требования к программному обеспечению, а также схемы алгоритмов, выбранных для решения поставленной задачи.

2.1 Требования к программному обеспечению

Программа должна обладать следующей функциональностью:

- задать направление взгляда камеры;
- изменить направление лучей света;
- варьировать параметры облачного неба.

Программа должна корректно реагировать на любые действия пользователя.

2.2 Разработка алгоритмов

Для повышения эффективности алгоритма Ray Marching необходимо снизить количество шагов вне облака. Для этого применяются объемлющие оболочки, в данном случае, такими оболочками будут являться сферы. Когда луч пересекает оболочку, необходимо сделать N шагов, на каждом из которых вычисляется плотность в точке пространства и ее освещенность, используя эти данные итеративно вычисляется значение цвета пикселя.

Как показано на рисунке 2.1, атмосфера будет моделироваться с помощью двух концентрических сфер, между которыми и будет происходить генерация облаков.

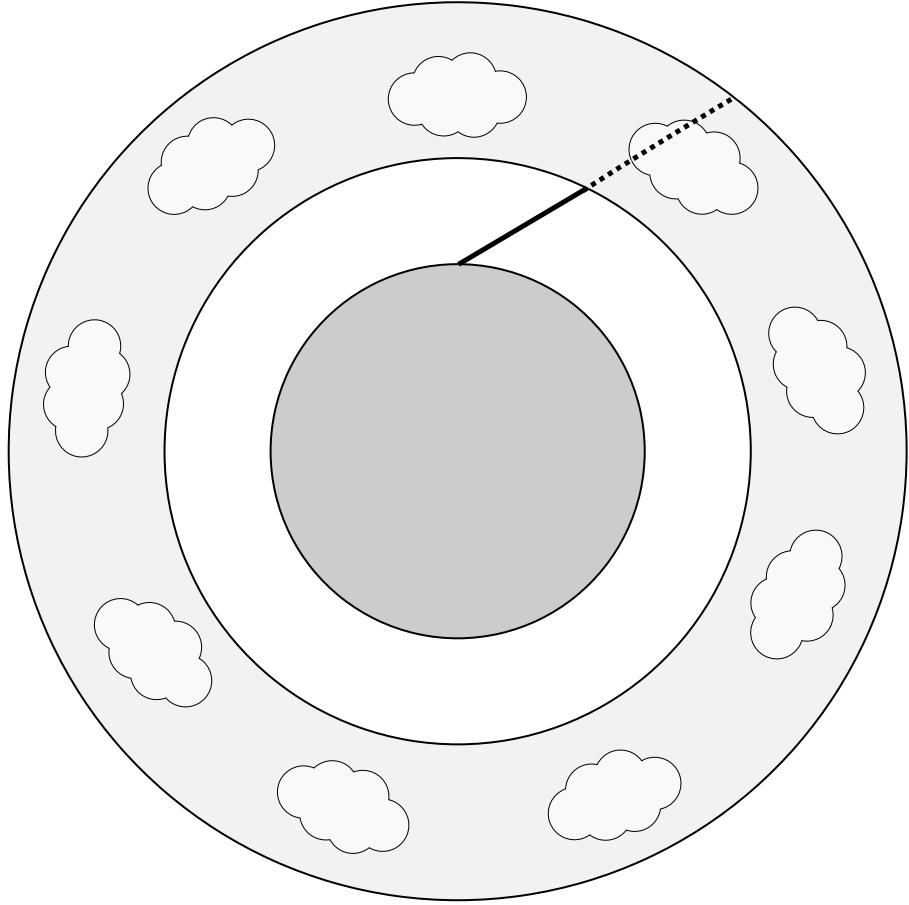


Рисунок 2.1 – Схема атмосферы и положения наблюдателя

2.2.1 Пересечение луча со сферой

Уравнение луча записывается следующим образом:

$$P = S + t\vec{D}, t \geq 0, \quad (2.1)$$

где S — точка, откуда луч испускается, а \vec{D} — направление луча.

Сфера задается своим центром C и радиусом r . Если луч пересекает сферу, тогда точка P лежит на поверхности:

$$\|P - C\| = r. \quad (2.2)$$

Используя скалярное умножение (2.2) записывается следующим образом:

$$\sqrt{\langle P - C, P - C \rangle} = r. \quad (2.3)$$

Подставляя в (2.3) уравнение луча (2.1), получается:

$$\sqrt{\langle S + t\vec{D} - C, S + t\vec{D} - C \rangle} = r. \quad (2.4)$$

Обозначив $S - C = \vec{SC}$ и раскрыв скалярное произведение, возведя обе части уравнения (2.4) в квадрат, получается:

$$t^2 \langle \vec{D}, \vec{D} \rangle + 2t \langle \vec{SC}, \vec{D} \rangle + \langle \vec{SC}, \vec{SC} \rangle - r^2 = 0. \quad (2.5)$$

Решая квадратное уравнение (2.5), вычисляются точки пересечения луча со сферой.

2.2.2 Вычисление плотности облаков в атмосфере

Для вычисления плотности будут использоваться две текстуры. Первая (основная) текстура отвечает за грубую форму облака, имеет размер $128 \times 128 \times 128$. Вторая (вспомогательная) текстура отвечает за детализацию облака, имеет размер $32 \times 32 \times 32$. В таблице 2.1 показаны какие шумы используются для формирования текстур.

Таблица 2.1 – Таблица шумов.

Текстура	Шумы			
Основная	ПВ (НЧ)	В (НЧ)	В (СЧ)	В (ВЧ)
Вспомогательная	В (НЧ)	В (СЧ)	В (ВЧ)	-

Примечание: ПВ — шум Перлина—Ворлея, В — шум Ворлея, НЧ — низкая частота, СЧ — средняя частота, ВЧ — высокая частота.

Сами текстуры формируются как сумма перечисленных в таблице 2.1 шумов с убывающими амплитудами.

Для возможности формировать облачное небо используется погодная карта. Погодная карта является двумерной текстурой, и состоит из четырех каналов RGBA, где в R канале хранится коэффициент покрытия неба облаками на малой высоте, G хранит покрытие облаками на большой высоте, B канал хранит максимальную высоту облаков, A канал хранит коэффициент плотности облаков.

2.2.3 Схемы алгоритмов

На рисунке 2.2 изображена диаграмма генерации кадра.

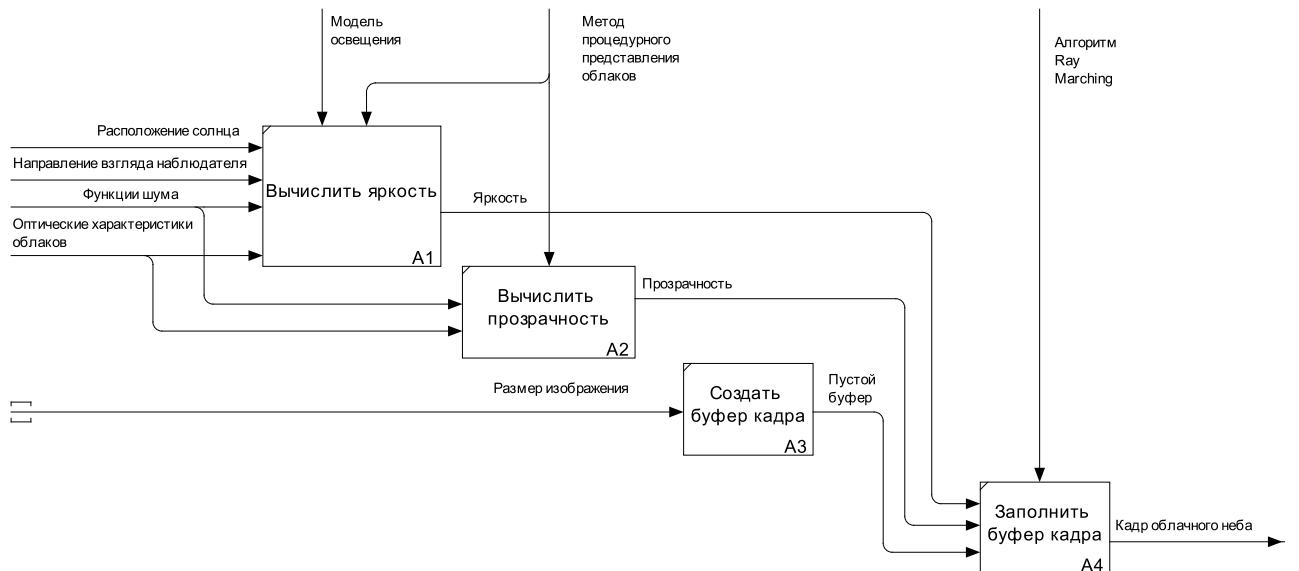


Рисунок 2.2 – Диаграмма генерации кадра

Схема алгоритма Ray Marching приведена на рисунке 2.3. Алгоритм вычисления плотности в точке изображен на рисунке 2.4. Алгоритм вычисления яркости в точке изображен на рисунке 2.5.

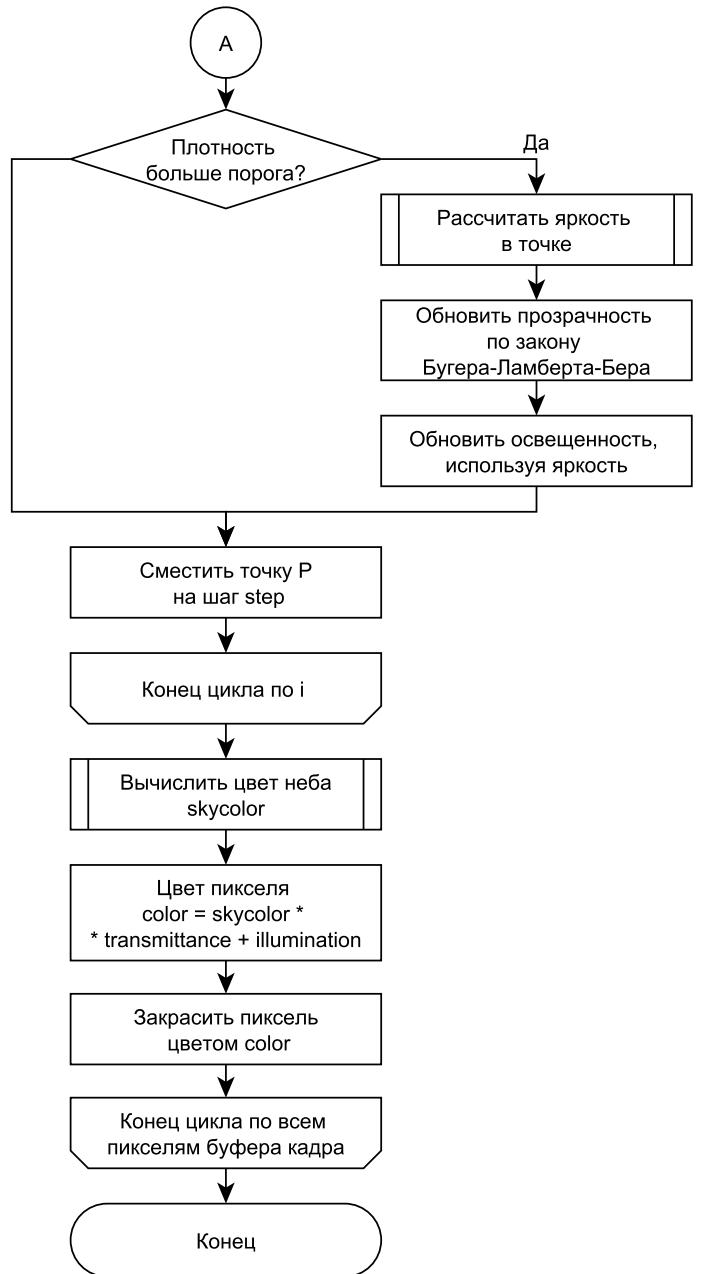
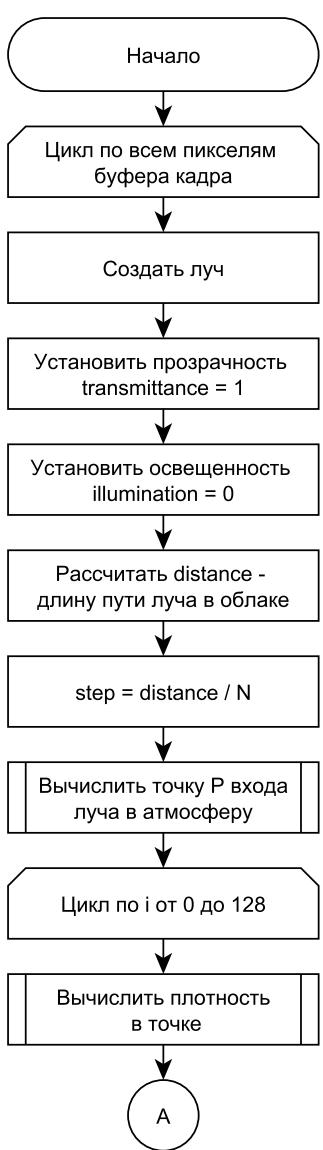


Рисунок 2.3 – Схема визуализации облаков с помощью алгоритма Ray Marching

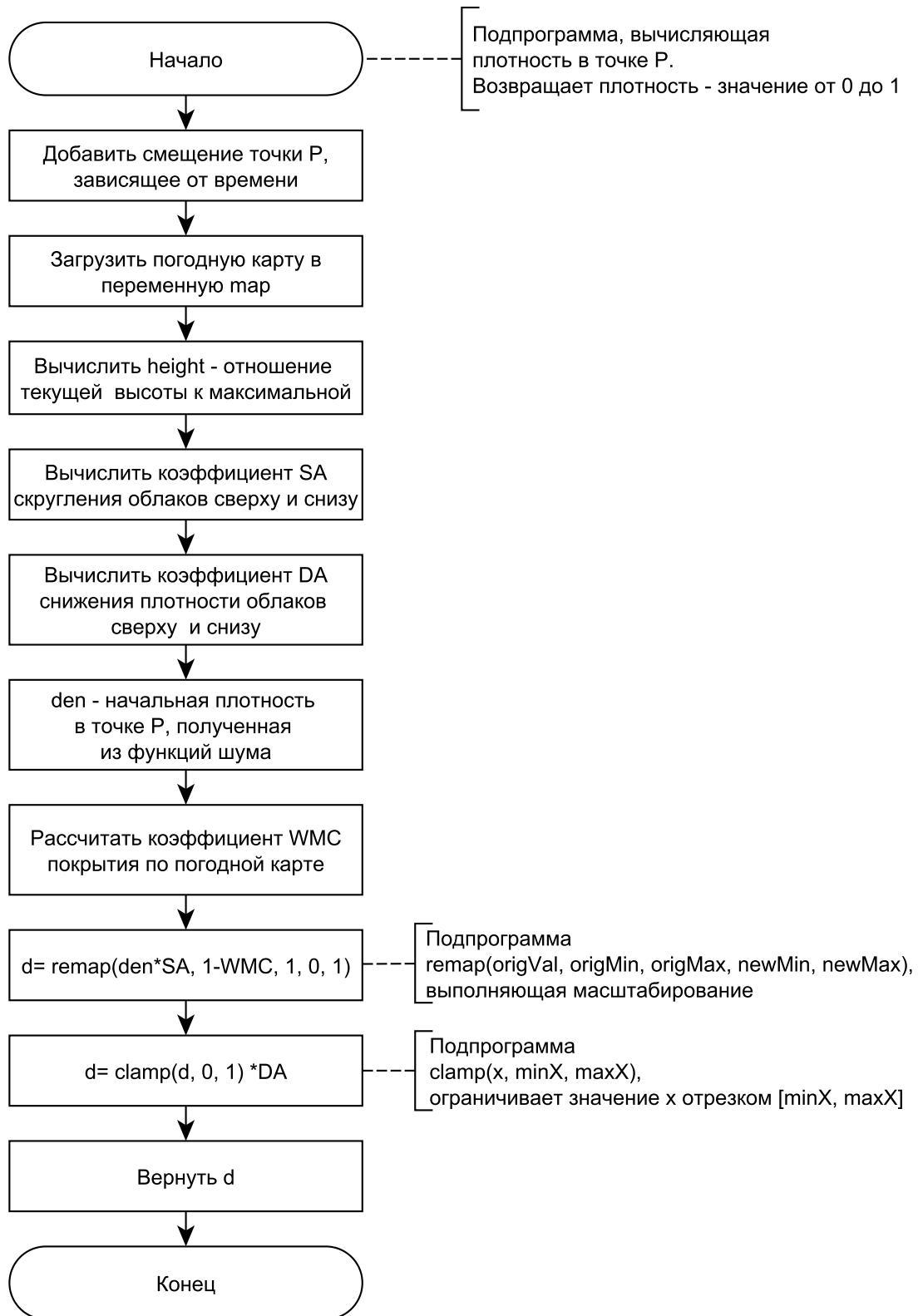


Рисунок 2.4 – Схема вычисления плотности в точке

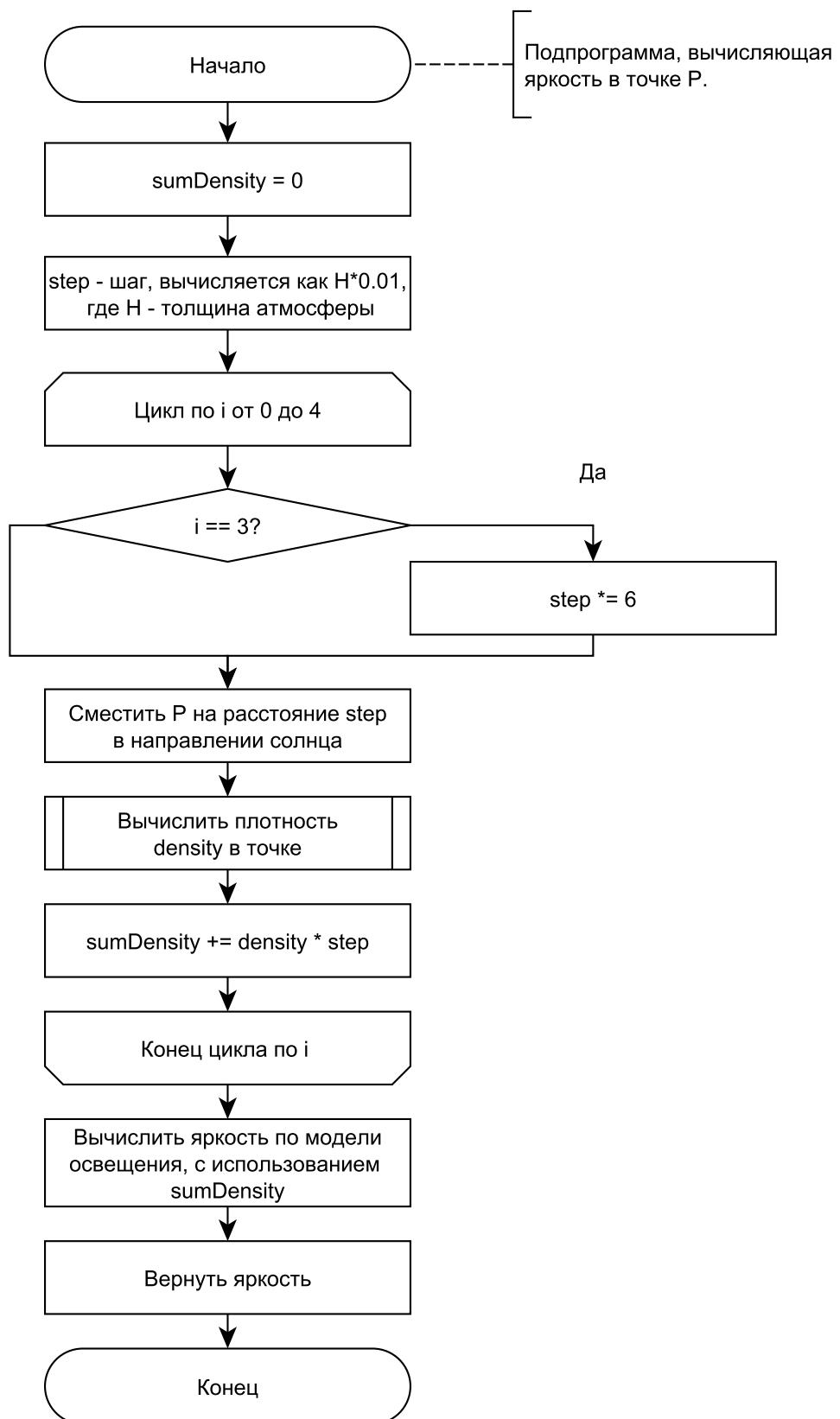


Рисунок 2.5 – Схема вычисления яркости в точке

2.3 Диаграмма классов

На рисунке 2.6 изображена диаграмма классов программного обеспечения.

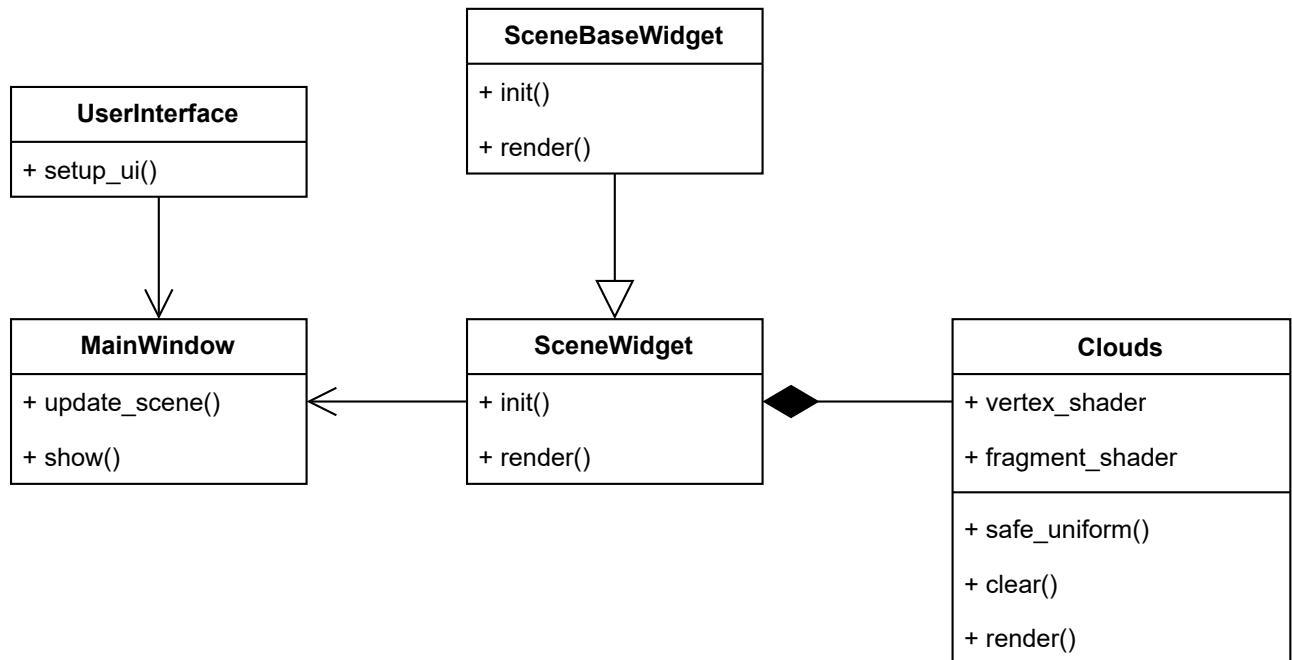


Рисунок 2.6 – Диаграмма классов программного обеспечения

2.4 Выбор используемых типов и структур данных

В данной работе используются следующие типы и структуры данных:

- текстура — задается с помощью двумерных и трехмерных массивов, состоящих из цветов;
- цвет — хранит одну, три или четыре составляющие grayscale, RGB или RGBA модели цвета соответственно;
- точка — хранит координаты x, y, z;
- вектор — хранит направление по x, y, z.

Вывод

В данном разделе были представлены требования к разрабатываемому программному обеспечению и разработана схема разрабатываемых алгоритмов. Так же, были описаны структуры данных, которые будут использоваться при реализации программного обеспечения.

3 Технологический раздел

В данном разделе будут представлены средства разработки программного обеспечения, детали реализации и процесс сборки разрабатываемого программного обеспечения.

3.1 Выбор средств реализации

В качестве языка программирования для разработки программного обеспечения был выбран язык *GLSL* [16]. Данный выбор обусловлен следующим:

- поддержка языком всех структур данных, выбранных в результате проектирования;
- возможность реализовать все алгоритмы, выбранные в результате проектирования.

Для создания графического интерфейса был выбран язык *Python* [17], поскольку данный язык позволяет работать с библиотекой *ModernGL* [18].

Графический интерфейс создан с помощью библиотеки *PyQt* [19]. Данная библиотека содержит в себе объекты, позволяющие интегрировать *OpenGL* контекст, а также возможности создания панели управления с кнопками, что позволит в интерактивном режиме управлять изображением.

В качестве среды разработки был выбран текстовый редактор *Visual Studio Code* [20], поддерживающий возможность установки плагинов и обладающий системой отладки кода.

3.2 Реализация алгоритмов

Листинги реализаций алгоритмов находятся в приложении Б.

На листинге Б.1 представлена реализация алгоритма вычисления плотности в точке пространства. На листинге Б.2 представлена реализация алгоритма вычисления освещенности в точке пространства. На листинге Б.3 представлена реализация алгоритма Ray Marching.

3.3 Результаты разработки

При запуске программы на сцене отображаются облака с предустановленными параметрами. Для изменения параметров облаков с правой стороны

окна имеются поля ввода. Интерфейс разработанного программного обеспечения изображен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Интерфейс разработанного программного обеспечения

На рисунке 3.2 изображена визуализация облаков в разработанном программном обеспечении с просветами солнца. На полученном изображении видна яркая граница облака и более темная сердцевина, такой же эффект наблюдается в реальных облаках. Для сравнения на рисунке 3.3 представлена фотография реального облака с солнечным просветом.



Рисунок 3.2 – Визуализация облаков с солнечным просветом



Рисунок 3.3 – Фотография облаков с солнечным просветом

На рисунке 3.4 показан результат визуализации неба для случая, когда падающий солнечный луч и луч наблюдения практически сонаправлены. На полученном изображении видны неровности на поверхности облаков.



Рисунок 3.4 – Визуализация, демонстрирующая неровную поверхность облаков

3.4 Функциональное тестирование

Тест 1: установка максимального покрытия.

Ожидаемый результат: облака покрывают все небо.

Фактический результат изображен на рисунке 3.5. Тест пройден.



Рисунок 3.5 – Результат теста 1. Небо полностью покрыто облаками

Тест 2: установка минимального покрытия.

Ожидаемый результат: на небе нет облаков.

Фактический результат изображен на рисунке 3.6. Тест пройден.

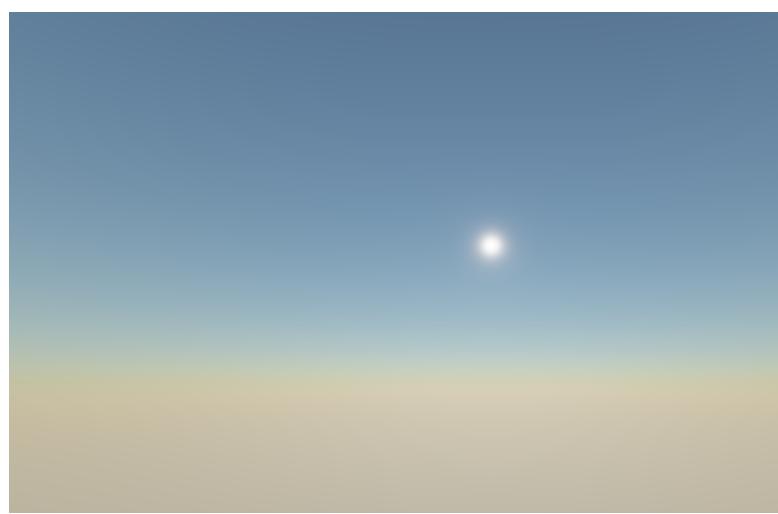


Рисунок 3.6 – Результат теста 2. На небе нет облаков

Тест 3: установка плотности 0.

Ожидаемый результат: на небе нет облаков.

Фактический результат изображен на рисунке 3.7. Тест пройден.

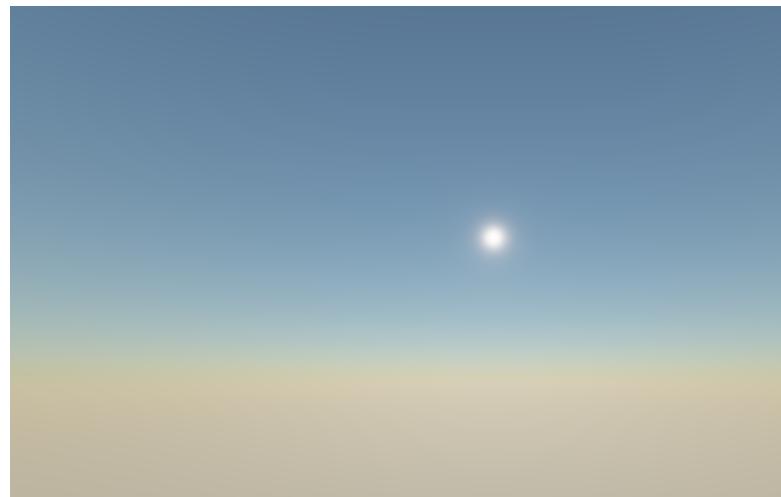


Рисунок 3.7 – Результат теста 3. На небе нет облаков

Тест 4: установка малой плотности.

Ожидаемый результат: у облаков практически отсутствует тень.

Фактический результат изображен на рисунке 3.8. Тест пройден.

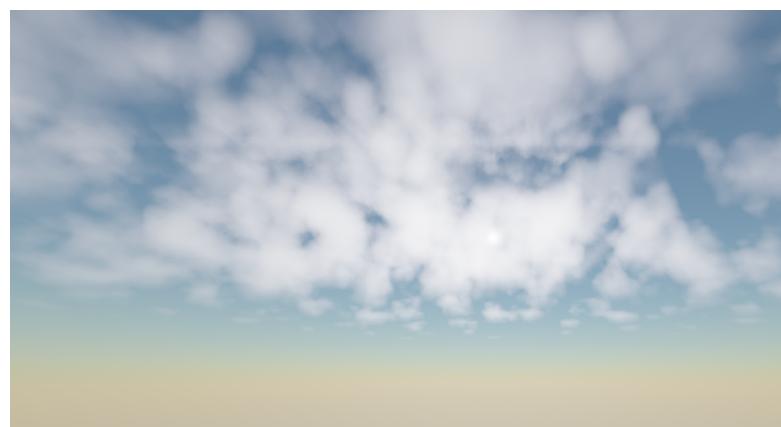


Рисунок 3.8 – Результат теста 4. Облака малой плотности

Тест 5: установка максимальной плотности.

Ожидаемый результат: у облаков ярко выражена тень.

Фактический результат изображен на рисунке 3.8. Тест пройден.



Рисунок 3.9 – Результат теста 5. Облака максимальной плотности

Тест 6: установка вектора падения света в 0.

Ожидаемый результат: сообщение об ошибке.

Фактический результат: сообщение об ошибке. Тест пройден.

Тест 7: установка вектора взгляда в 0.

Ожидаемый результат: сообщение об ошибке.

Фактический результат: сообщение об ошибке. Тест пройден.

Вывод

В данном разделе были представлены средства разработки программного обеспечения и детали реализации. В итоге было разработано программное обеспечение, позволяющее визуализировать облачное небо.

4 Исследовательский раздел

В данном разделе будет проведено исследование кадровой частоты от различных параметров.

4.1 Технические характеристики

Технические характеристики устройства, на котором выполнялись замеры по времени, следующие:

- процессор: AMD Ryzen 5 4600H 3 ГГц [21];
- видеокарта: NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti [22];
- оперативная память: 16 ГБайт;
- операционная система: Windows 10 Pro 64-разрядная система версии 22H2 [23].

При замерах времени ноутбук был включен в сеть электропитания и был нагружен только системными приложениями.

4.2 Время выполнения реализаций алгоритмов

Целью исследования является определение зависимости кадровой частоты от размера изображения, плотности облаков и уровня покрытия неба облаками.

Замер времени между кадрами проводился с помощью *ModernGL* [18]. Для расчета количества кадров в секунду, т. е. кадровой частоты, производился подсчет кадров и времени между ними на протяжении 100 секунд, затем, подсчитанное количество кадров делилось на суммарное время.

В результате зависимость количества кадров в секунду от плотности облаков представлена в таблице 4.1. Для данного исследования размер изображения 900×600 , уровень покрытия 1.2.

Таблица 4.1 – Зависимость количества кадров в секунду от плотности

Плотность	Количество кадров в секунду
0	33
20	33
40	33
60	32
80	33
100	33
120	33
140	33

Зависимость количества кадров в секунду от покрытия неба облаками представлена в таблице 4.2. Для данного исследования размер изображения 900×600 , плотность облаков 150.

Таблица 4.2 – Зависимость количества кадров в секунду от уровня покрытия неба

Уровень покрытия	Количество кадров в секунду
1.0	34
1.2	33
1.4	32
1.6	32
1.8	32
2.0	32

Зависимость количества кадров в секунду от разрешения экрана представлена в таблице 4.3. Для данного исследования плотность облаков 150, уровень покрытия 1.2.

Таблица 4.3 – Зависимость количества кадров в секунду от размера изображения

№	Ширина	Высота	Количество кадров в секунду
1	640	360	53
2	800	480	37
3	1280	720	16
4	1920	1080	8
5	3840	2160	3

На рисунке 4.1 изображен график зависимости количества кадров в секунду от размера изображения.

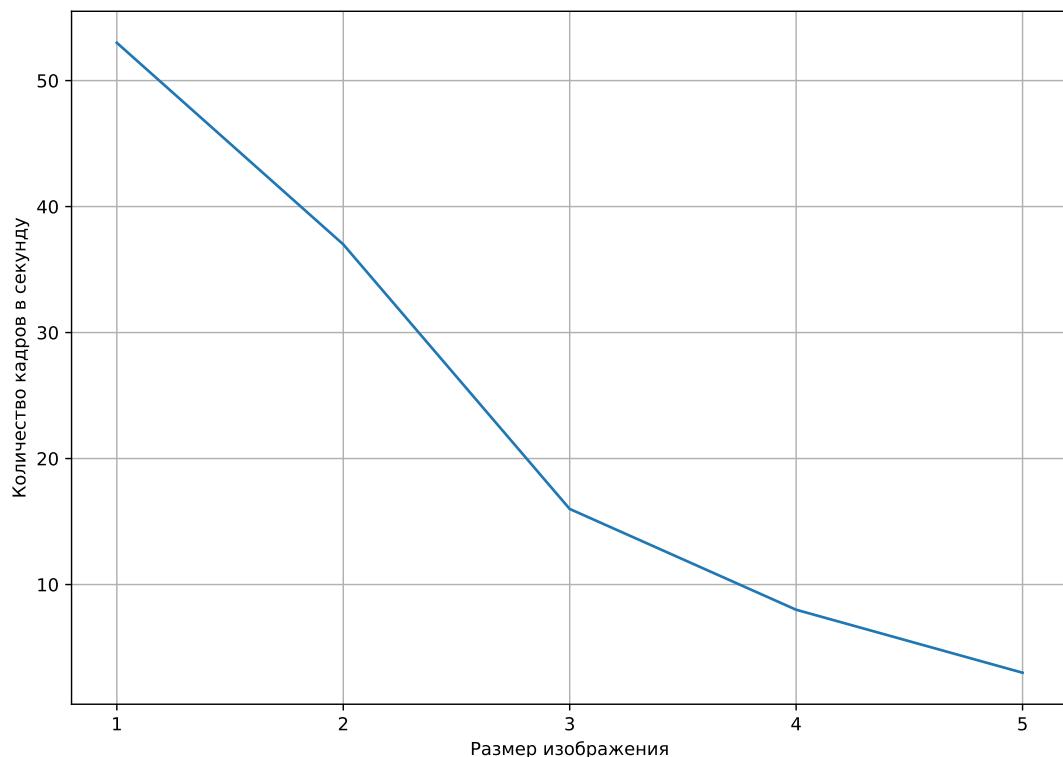


Рисунок 4.1 – График зависимости количества кадров в секунду от размера изображения

Вывод

В результате исследования программного обеспечения выяснилось, что в среднем для размера изображения 900×600 получается генерировать 32–34

кадра в секунду.

По рисунку 4.1 и таблицам 4.1, 4.2 можно сделать вывод, что на кадровую частоту существенно влияет только размер изображения, что соответствует оценке трудоемкости $O(NM)$ алгоритма Ray Marching. С ростом размеров изображения кадровая частота уменьшается. Такой результат обусловлен тем, что в реализации алгоритма Ray Marching луч выпускается для каждого пикселя, т. е. чем больше изображение, тем больше лучей необходимо испустить. При распространении луча в атмосфере выполняется фиксированное количество шагов, на каждом из которых, необходимо вычислять плотность. Плотность же, за счет сохранения значений функций шума, вычисляется за константное время, которое не зависит ни от каких параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижение поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ предметной области визуализации облаков и описаны существующие методы их представления;
- спроектировано программное обеспечение, позволяющее визуализировать облака;
- выбраны инструменты для реализации программного обеспечения;
- реализовано спроектированное программное обеспечение;
- исследованы временные характеристики программного обеспечения.

В результате исследования разработанного программного обеспечения выяснилось, что кадровая частота практически не зависит от таких параметров, как плотность облаков и уровень покрытия неба облаками и для размеров изображения 900×600 получилось достичь 32–34 кадров в секунду. Существенное влияние на кадровую частоту оказывает размер изображения, так если для размера изображения 640×360 получилось достичь 53 кадров в секунду, то для разрешения 3840×2160 уже 3 кадра в секунду.

В результате цель работы была достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Большая российская энциклопедия [Электронная ресурс]. — Режим доступа: <https://old.bigenc.ru/> (дата обращения: 13.12.2023).
2. *Wrenninge M., Kulla C., Lundqvist V.* Oz: the great and volumetric. — 2013.
3. *Schneider A.* The Real-Time volumetric cloudscape of Horizon Zero Dawn // SIGGRAPH 2015. — 2015.
4. Physically Based Sky, Atmosphere and Cloud Rendering in Frostbite [Электронная ресурс]. — 2016. — Режим доступа: <https://media.contentapi.ea.com/content/dam/eacom/frostbite/files/s2016-pbs-frostbite-sky-clouds-new.pdf> (дата обращения: 16.07.2023).
5. A Survey on Participating Media Rendering Techniques / E. Cerezo [и др.] // The Visual Computer. — 2005. — Июнь. — Т. 21. — DOI: 10.1007/s00371-005-0287-1.
6. *Hufnagel R., Held M.* A Survey of Cloud Lighting and Rendering Techniques // WSCG. — 2012. — № 20.
7. *Engel K.* Real-Time Volume Graphics // ACM SIGGRAPH. — 2004.
8. *A. H. Воронцов Ю. С. Б.* Компоненты и классификация частиц и их систем в компьютерной графике // Электронный журнал: наука, техника и образование. — 2016. — № 2(6).
9. *O.M. P.* Методы устранения шума на полигональных сетках // Теория и практика современной науки. — 2021. — № 1.
10. *Качурин А.В. И. В.* Основы формирования визуальной картины шума Перлина при программировании на языке Python // E-Scio. — 2021. — №8.
11. *Worley S.* A cellular texture basis function // Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. — 1996.
12. Interactive multiple anisotropic scattering in clouds / A. Bouthors [и др.] // Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, I3D 2008. — 2008. — Февр. — DOI: 10.1145/1342250.1342277.
13. *T.O. П.* Компьютерная графика : учебное пособие. // . — Томск: Эль Контент, 2012. — С. 15.

14. *Philip Lacroute M. L.* Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation // ACM Computer Graphics. — 1994.
15. A simple, efficient method for realistic animation of clouds / Y. Dobashi [и др.] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000. — 2000.
16. Core Language (GLSL) [Электронная ресурс]. — 2021. — Режим доступа: [https://www.khronos.org/opengl/wiki/Core_Language_\(GLSL\)](https://www.khronos.org/opengl/wiki/Core_Language_(GLSL)) (дата обращения: 06.11.2023).
17. Python [Электронная ресурс]. — 2001. — Режим доступа: <https://www.python.org/> (дата обращения: 20.08.2023).
18. ModernGL [Электронная ресурс]. — 2022. — Режим доступа: <https://moderngl.readthedocs.io/en/latest/index.html> (дата обращения: 20.08.2023).
19. Qt for Python [Электронная ресурс]. — 2023. — Режим доступа: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/> (дата обращения: 20.11.2023).
20. Visual Studio Code [Электронная ресурс]. — 2023. — Режим доступа: <https://code.visualstudio.com/> (дата обращения: 03.12.2023).
21. Amd [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.amd.com/en.html> (дата обращения: 28.09.2023).
22. Nvidia [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.nvidia.com/ru-ru/> (дата обращения: 11.12.2023).
23. Windows 10 Pro 22h2 64-bit [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.microsoft.com/ru-ru/software-download/windows10> (дата обращения: 28.09.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Моделирование облаков

Студент: Булдаков М. Ю. ИУ7-54Б

Руководитель: Кузнецова О. В.

Москва, 2023 г.

Рисунок А.1 – Титульный слайд (слайд 1)

Цели и задачи

Цель: реализация ПО, которое предоставляет возможность визуализировать облачное небо.

Задачи:

- описать предметную область визуализации облаков и существующие методы их представления;
- спроектировать ПО, позволяющее визуализировать облака;
- выбрать инструменты для реализации ПО;
- реализовать спроектированное ПО;
- исследовать временные характеристики реализованного ПО.

Рисунок А.2 – Слайд с целями и задачами (слайд 2)

Модель облаков

$$L(x, \vec{\omega}) = \rho(x_0, x)L(x_0, \vec{\omega}) + L_m(x, \vec{\omega})$$

Закон Бугера --- Ламберта --- Бера

$$I = I_0 \cdot e^{-\int_{x_0}^x k(u) du}$$

Явления:

- Поглощение
- Рассеивание

Рисунок А.3 – Слайд с моделью облаков (слайд 3)

Сравнение методов

Таблица 1.1 – Сравнение методов представления облаков

Характеристика	СЧ	ООП	П
Учет неоднородности	Да	Нет	Да
Трудоемкость вычисления плотности в точке	$O(n^3)$	$O(Q)$	$O(Q)$
Требования по памяти	$O(n^3)$	$O(Q)$	$O(Q + n^3)$

Примечание: СЧ – система частиц; ООП – объемы, ограниченные поверхностью; П – процедурное представление, с предварительно вычисленными значениями функций шума; n – размер облака; Q – количество ограничивающих поверхностей.

Таблица 1.2 – Сравнение алгоритмов визуализации облаков

Характеристика	СД	РТ	RM
Трудоемкость построения изображения	$O(n^3)$	$O(NMn)$	$O(NM)$
Требования по памяти	$O(n^3)$	$O(n)$	$O(1)$

Примечание: СД – алгоритм сдвиг–деформации; РТ – алгоритм разбрзгивания текстур; RM – алгоритм Ray Marching; n – размер облака; $N \times M$ – размер изображения.

Выбранные методы:

- Процедурное представление
- Ray Marching

Рисунок А.4 – Слайд со сравнением методов (слайд 4)

Постановка задачи



Рисунок А.5 – Слайд с постановкой задачи (слайд 5)

Процедурное представление

Ключевые моменты:

- Ограничивающие оболочки - 2 сферы
- Два вида шума: Перлина и Ворлея
- Значения шума хранятся в памяти

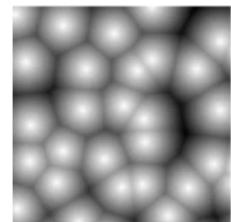
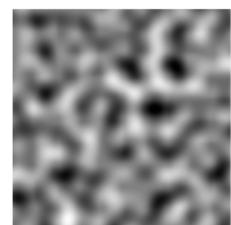


Рисунок А.6 – Слайд с описанием процедурного представления (слайд 6)

Ray Marching

Алгоритм Ray Marching состоит из следующих шагов:

1. выпустить от наблюдателя луч для каждого пикселя буфера кадра;
2. разбить луч на равные интервалы;
3. выполнить итеративное смешение цветов на этих интервалах.

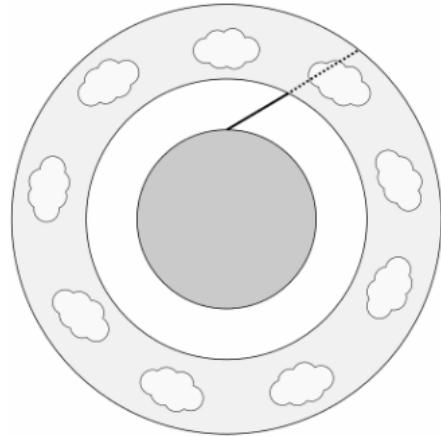


Рисунок А.7 – Слайд с Ray Marching (слайд 7)

Модель освещения

$$L = 2 \cdot e^{-d} \cdot (1 - 2e^{-2d}) \cdot \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}$$

g — некоторая константа в функции Хенни—Гринштейна, а θ — угол между лучами света и направления взгляда.

Рисунок А.8 – Слайд с моделью освещения (слайд 8)

Разработанные схемы алгоритмов

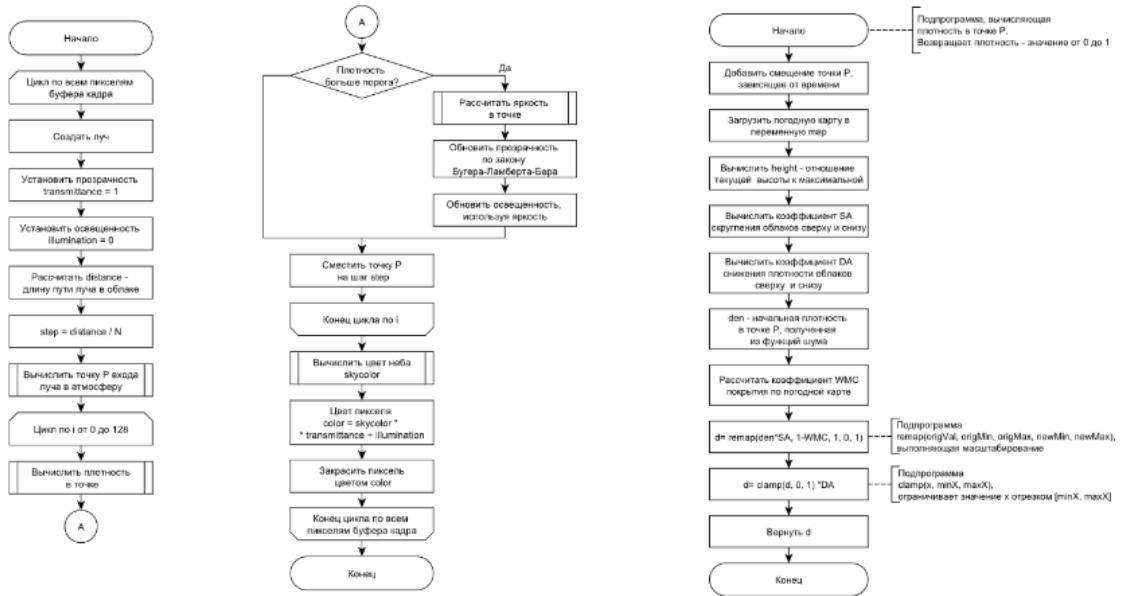


Рисунок А.9 – Слайд с разработанными схемами алгоритмов (слайд 9)

Разработанные схемы алгоритмов

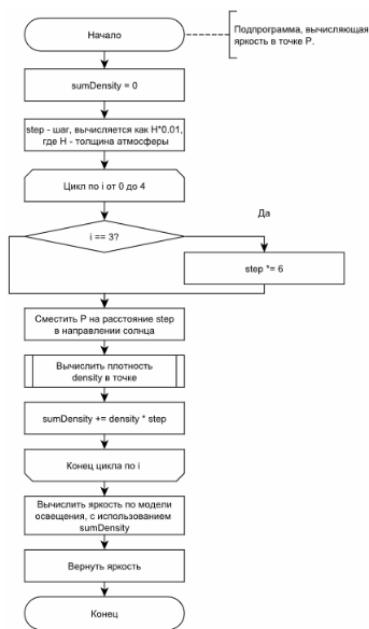


Рисунок А.10 – Слайд с разработанными схемами алгоритмов (продолжение)
(слайд 10)

Диаграмма классов

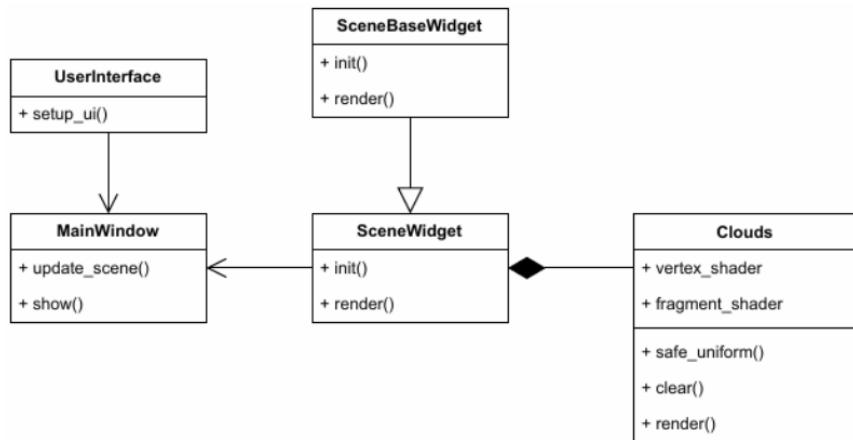


Рисунок А.11 – Слайд с диаграммой классов (слайд 11)

Интерфейс ПО



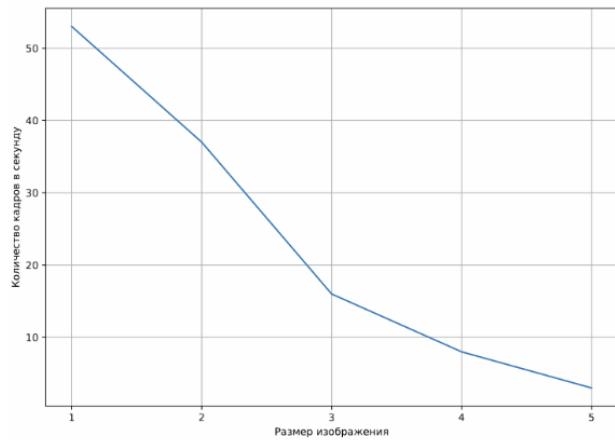
Рисунок А.12 – Слайд с интерфейсом программного обеспечения (слайд 12)

Пример работы



Рисунок А.13 – Слайд с примером работы (слайд 13)

Исследование характеристик



Уровень покрытия	Количество кадров в секунду
1.0	34
1.2	33
1.4	32
1.6	32
1.8	32
2.0	32

Плотность	Количество кадров в секунду
0	33
20	33
40	33
60	32
80	33
100	33
120	33
140	33

Рисунок А.14 – Слайд с исследованием характеристик (слайд 14)

Заключение

- Кадровая частота 32-34 кадра в секунду при разрешении 900 на 600.
- На кадровую частоту не влияют плотность и уровень покрытия.
- При увеличении размеров изображения кадровая частота снижается.

В результате были выполнены поставленные задачи и цель курсовой работы была достигнута.

Рисунок А.15 – Слайд с заключением (слайд 15)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг Б.1 – Реализация функции определяющей плотность в точке

```
1 const float maxCloud = 6435;
2 const float minCloud = 6415;
3
4 float cloudGetHeight(vec3 position){
5     return (position.y - minCloud) / (maxCloud - minCloud);
6 }
7
8 float remap(float value, float minValue, float maxValue, float
9     newMinValue, float newMaxValue)
10 {
11     return newMinValue+(value-minValue) /
12         (maxValue-minValue)*(newMaxValue-newMinValue);
13 }
14
15 float cloudSampleDensity(vec3 position)
16 {
17     position.xz+=vec2(0.5)*u_time;
18
19     vec4 weather=texture(u_weatherMap, position.xz/480+vec2(0.2,
20
21         0.1));
22     float height=cloudGetHeight(position);
23
24     float SRb=clamp(remap(height, 0, 0.07, 0, 1), 0, 1);
25     float SRt=clamp(remap(height, weather.b*0.2, weather.b, 1,
26
27         0), 0, 1);
28     float SA=SRb*SRt;
29
30     float DRb=height*clamp(remap(height, 0, 0.15, 0, 1), 0, 1);
31     float DRt=height*clamp(remap(height, 0.9, 1, 1, 0), 0, 1);
32     float DA=DRb*DRt*weather.a*2*u_density;
33
34     float SNSample=texture(u_lfNoise,
35         position/48.0f).x*0.85f+texture(u_hfNoise,
36         position/48).x*0.15f;
37
38     float WMc=max(weather.r, clamp(u_coverage-0.5, 0,
39         1)*weather.g*2);
```

```

32     float d=clamp(remap(SNssample*SA, 1-u_coverage*WMc, 1, 0, 1),
33                   0, 1)*DA;
34
35     return d;
36 }
```

Листинг Б.2 – Реализация модели освещения

```

1 const float DUAL_LOBE_WEIGHT = 0.7;
2
3 float henyeyGreenstein(float g, float mu) {
4     float gg = g * g;
5     return (1.0 / (4.0 * PI)) * ((1.0 - gg) / pow(1.0 + gg -
6         2.0 * g * mu, 1.5));
7 }
8
9 float dualhenyeyGreenstein(float g, float costh) {
10    return mix(henyeyGreenstein(-g, costh), henyeyGreenstein(g,
11        costh), DUAL_LOBE_WEIGHT);
12 }
13
14 float phaseFunction(float g, float costh) {
15    return dualhenyeyGreenstein(g, costh);
16 }
17
18 float cloudSampleDirectDensity(vec3 position, vec3 sunDir)
19 {
20     float avrStep=(6435.0-6415.0)*0.01;
21     float sumDensity=0.0;
22     for(int i=0;i<4;i++)
23     {
24         float step=avrStep;
25         if(i==3)
26             step=step*6.0;
27
28         position+=sunDir*step;
29         float density=cloudSampleDensity(position)*step;
30         sumDensity+=density;
31     }
32     return sumDensity;
33 }
34
35 vec3 calculateLightEnergy(vec3 position, vec3 sunDir, float mu) {
```

```

34
35     float density = cloudSampleDirectDensity(position, sunDir)*
36         u_attenuation2;
37     vec3 beersLaw = exp(-density * EXTINCTION_MULT) *
38         phaseFunction(u_eccentrisy2, mu);
39     vec3 powder = 1.0 - exp(-density * 2.0 * EXTINCTION_MULT);
40
41     return beersLaw * mix(2.0 * powder, vec3(1.0), remap(mu,
42         -1.0, 1.0, 0.0, 1.0));
43 }

```

Листинг Б.3 – Реализация алгоритма Ray Marching

```

1 const vec3 EXTINCTION_MULT = vec3(0.8, 0.8, 1.0);
2 const float CLOUD_LIGHT_MULTIPLIER = 50.0;
3
4 vec4 mainMarching(vec3 ro, vec3 viewDir, vec3 sunDir, vec3
5     sunColor, vec3 ambientColor)
6 {
7     vec2 t = rsi(ro, viewDir, minCloud);
8     vec3 position = ro + viewDir * t.y;
9
10    vec3 atmoColor = getAtmoColor(viewDir);
11
12    float avrStep = (maxCloud - minCloud) / 64;
13
14    vec3 iPos = position;
15
16    float density = 0;
17
18    float mu = dot(viewDir, sunDir);
19
20    vec3 transmittance = vec3(1);
21    vec3 scattering = vec3(0);
22
23    vec3 sunLightColor = vec3(1.0);
24    vec3 sunLight = sunLightColor * CLOUD_LIGHT_MULTIPLIER;
25    vec3 ambient = vec3(AMBIENT_STRENGTH * sunLightColor) *
26        u_ambient;
27
28    for (int i = 0; i < 128; ++i){
29        if (length(iPos) > maxCloud)
30            break;
31
32        float density = cloudSampleDirectDensity(iPos, sunDir)*
33            u_attenuation2;
34        vec3 beersLaw = exp(-density * EXTINCTION_MULT) *
35            phaseFunction(u_eccentrisy2, mu);
36        vec3 powder = 1.0 - exp(-density * 2.0 * EXTINCTION_MULT);
37
38        return beersLaw * mix(2.0 * powder, vec3(1.0), remap(mu,
39            -1.0, 1.0, 0.0, 1.0));
40    }
41
42    return transmittance * sunLight + scattering * ambient;
43 }

```

```

29     density = cloudSampleDensity(iPos);
30
31     if (density > 0.01){
32         vec3 luminance = ambient + sunLight *
33             calculateLightEnergy(iPos, sunDir, mu);
34         vec3 ttransmittance = exp(-density * avrStep *
35             EXTINCTION_MULT * u_attenuation);
36         vec3 integScatt = luminance * (1 -
37             ttransmittance);
38         scattering += transmittance * integScatt;
39         transmittance *= ttransmittance;
40
41         if (length(transmittance) <= 0.01) {
42             transmittance = vec3(0.0);
43             break;
44         }
45     }
46
47     vec3 color = atmoColor.xyz * transmittance + scattering;
48
49     return vec4(color, 1);
50 }
```