

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра математической кибернетики и компьютерных наук

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ
OPENGL**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 411 группы
направления 02.03.02 — Фундаментальная информатика и информационные
технологии
факультета КНиИТ
Андряновой Анастасии Юрьевны

Научный руководитель

к. ф.-м. н.

С. В. Миронов

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н.

С. В. Миронов

Саратов 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Методы моделирования водной поверхности	4
1.1 Статистический подход	4
1.2 Параметрические подходы	6
1.2.1 Синусоидальные волны	6
1.2.2 Волны Герстнера	6
1.3 Физические методы	7
1.3.1 Метод сеток Эйлера	8
1.3.2 Метод Лагранжа	9
1.4 Спектральный подход	10
1.5 Bump Mapping	10
2 Реализация отображения водной поверхности	12
2.1 Составные части проекта	12
2.2 Итоги	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	14
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	15

ВВЕДЕНИЕ

Графика используется практически во всех областях деятельности человека, так или иначе связанных с использованием компьютера. Графическое представление информации может быть как всего лишь более удобным средством представления информации для пользователя, так и важной частью моделирования сложных процессов, природных явлений, и конечно же частью создания реалистичных сцен в компьютерных играх.

Одним из сложнейших объектов для графического представления является водная поверхность. Моделирование жидкостей в реальном времени по сей день является важной задачей в области компьютерных технологий.

В настоящее время существует множество средств и методов представления водной поверхности в графическом изображении. К сожалению в русскоязычной литературе данная тематика мало освещена.

В настоящей работе ставится задача представить методическое сопровождение реализации водной поверхности в трехмерном графическом изображении. В рамках достижения данной цели необходимо рассмотреть решение следующих задач:

- рассмотреть и описать основные методы отрисовки водной поверхности;
- разработать приложение, реализующее один, наиболее подходящий, метод отрисовки водной поверхности с применением библиотеки OpenGL на языке C++;
- описать создание реализованного приложения как пошаговую инструкцию разработчика.

Бакалаврская работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка использованных источников. Объем работы составляет 55 страниц. Список источников включает в себя 23 наименования.

Вся работа строго разделена на теоретическую и практическую части.

В первой главе рассматриваются самые существенные на сегодняшний день методы отображения водной поверхности.

Вторая глава включает в себя алгоритм создания приложения. Тут рассматриваются составные части приложения, используемые технологии, подключаемые библиотеки, описание процесса разработки и результаты работы приложения.

1 Методы моделирования водной поверхности

Моделирование водной поверхности является сложной, но интересной задачей. На сегодняшний день эта задача актуальна как в сфере научного моделирования, так и кинематографа с видеоиграми.

Сложность задачи состоит в том, что вода может принимать любые формы и взаимодействовать с окружением. Моделирование небольших водоемов и океанических волн сильно отличаются друг от друга: для водоемов характерны малые колебания поверхности, где можно обойтись изменением лишь пары текстур поверхности, для океанического же движения необходимо работать со всей поверхностью, работая с самой поверхностью, изменяя ее и приводя в движение. Имеет место быть и задача рендеринга всплесков и брызг, которые требуют использования гравитационных законов.

Для получения визуально похожего изображения водной поверхности необходимо моделировать как геометрию поверхности, так и оптические явления, происходящие на границе и в толще воды.

Из таких наиболее популярных алгоритмов в современных системах используется статистический подход Тессендорфа, спектральный подход, волны синусоид и волны Герстнера. Однако, существуют и другие методы отображения воды, обходящие работу с сеткой, например, Bump Mapping.

1.1 Статистический подход

Джерри Тессендорфом была описана математическая модель [1], позволяющая анимировать океанские волны их в реальном времени. В основе этой модели лежит двумерное быстрое преобразование Фурье. Данная модель подразумевает создания поля высот $h(x, t)$, где x — точка на плоскости, t — время. Поле высот состоит из набора синусоид с различными амплитудами и фазами. Быстрое преобразование же Фурье здесь позволяет получить сумму этих синусоид. Итак, уравнение, описывающее изменения координат во времени выглядит следующим образом [2]:

$$h(\vec{x}, t) = \sum_k h(k, t) \exp(ikx) \quad (1)$$

Здесь $h(x, t)$ — высота в точке $x = (x, z)$ в момент времени t ;

$h(k, t)$ — комплексное число, содержащее амплитуду и фазу волны в момент

времени t ;

\mathbf{k} — вектор, указывающий направление движения воды.

Направление движения волны зависит от длины волны:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (2)$$

Если обозначить размер поля высот S , размерность сетки — N , то вектор \vec{k} определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \vec{k} = (k_x, k_z) = (\frac{2\pi m}{S}, \frac{2\pi n}{S}), \\ -\frac{N}{2} \leq m, n < \frac{N}{2}, \\ m, n \in Z \end{cases} \quad (3)$$

Чтобы правильно сгенерировать амплитуды и фазы для каждой из высот, используют спектр Филлипса. Этот спектр позволяет отобразить эффект ветра на волнах. Спектр задается уравнением:

$$P_h(\vec{k}) = A \frac{\exp(-\frac{1}{(kL)^2})}{k^4} |\vec{k}\vec{w}|^2 \quad (4)$$

При этом $L = \frac{V^2}{g}$, где V - скорость ветра,

g - ускорение свободного падения,

\vec{w} - направление ветра,

A - значение амплитуды.

Начальный набор амплитуд и фаз имеет следующий вид:

$$\vec{h}_0(\vec{k}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\zeta_r + i\zeta_i)\sqrt{P_h(\vec{k})} \quad (5)$$

После этого задается набор частотных амплитуд в зависимости от времени:

$$\vec{h}(\vec{k}, t) = \vec{h}_0(\vec{k}) \exp(iw(k)t) + \vec{h}_0(-\vec{k}) \exp(-iw(k)t) \quad (6)$$

Тут $w(k)$ — частота волны, зависящая от ускорения свободного падения и длины волны: $w^2(k) = gk$.

1.2 Параметрические подходы

1.2.1 Синусоидальные волны

Метод волн синусоид появился примерно в 1981 году. Идея метода заключается в комбинации кривых синусов высокой и низкой амплитуды. Для одной волны высота в каждой точке в новый момент времени может быть выражена как:

$$h(\vec{x}, t) = \cos(\vec{k}\vec{x} + w_i t), \quad (7)$$

где w_i - смещение по фазе.

Для n-волн формула примет вид:

$$h(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^{N_w} A_i \cos(k_i - w_i t) \quad (8)$$

A_i здесь — амплитуда i-ой волны, \vec{k} — вектор направления движения волны.

Данный метод сейчас редко используется для отрисовки воды, так как тот является не слишком реалистичным. Предпочтение сейчас отдается волнам Герстнера.

1.2.2 Волны Герстнера

Волны Герстнера [3] были открыты как приближенное решение уравнений гидродинамики и впервые использованы в области компьютерной графики в 1986г. Физическая модель сфокусирована на движении отдельных точек на поверхности. Если точки на спокойной поверхности имеют координаты (x_0, z_0) , соответствующая высота равна 0, то смещение точек при прохождении волны с амплитудой A можно выразить уравнениями [4]:

$$\begin{cases} x = x_0 - kA \sin(kx_0 - \omega t), \\ y = A \cos(kx_0 - \omega t), \\ k = \frac{2\pi}{\lambda} \end{cases} \quad (9)$$

Параметр k задает направление движения волны.

Иными словами, каждая точка совершает круговое движение по мере прохождения через нее отдельной волны. Каждая волна зависит от амплитуды и вектора волны (\vec{k}). При разном соотношении этих значений можно получить

различные виды волн. Можно отметить, что при значении $|\vec{k}A/2|$ превышающем единицу волна будет слишком округлой, что не идет на руку реалистичности изображения.

Существует модификация волнового движения Герстнера, которое предложили Фурнье и Ривс в том же 1986 году. Суть этой модификации — в суммировании влияния отдельно взятых точек синусоид. Эта модель работает согласно следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \vec{p} = \vec{p}_0 - \sum_{i=1}^N \left(\frac{\vec{k}_i}{|\vec{k}_i|} \right) A_i \sin(\vec{k}_i \vec{p}_0 - w_i t + \phi_i) \\ y = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\vec{k}_i \vec{p}_0 - w_i t + \phi_i) \end{cases} \quad (10)$$

где \vec{k}_i — набор волновых векторов,

A_i — амплитуды волновых векторов,

w_i — угловые частоты ϕ_0 — начальные фазы от $i = 1, \dots, N$.

Такая модель контролирует гораздо большее количество параметров, чем обычные волны Герстнера, но вместе с этим и ухудшает производительность из-за обширных математических вычислений.

Волны Герстнера можно отнести к развитию волн синусоид. Если волны синусоид давали более круглые формы волн, то волны Герстнера дают более резкие и угловатые очертания.

1.3 Физические методы

Суть метода моделирования водоема, основанного на физической модели, заключается в решении уравнений Навье-Стокса. Уравнение Навье-Стокса — это система уравнений, описывающих текучие вещества, такие как жидкость и воздух, описывающих динамическое равновесие сил, действующих на любую заданную область жидкости. Его используют так же для моделирования погоды, потока воды, потока воздуха и движения звезд.

Система уравнений имеет вид [5]:

$$\begin{cases} \vec{U} = 0, \\ \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \nabla \vec{U} + \frac{\nabla p}{\rho_0} - \mu \frac{\nabla^2 \vec{U}}{\rho_0} - \vec{g} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $\vec{U} = (u, v, w)$ — вектор скорости движения жидкости,

μ — коэффициент вязкости,

p — давление,

ρ_0 — плотность жидкости,

\vec{g} — вектор массовых сил (например, тяготения),

t — время,

∇ — оператор набла $\nabla = \frac{\partial}{\partial i}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial j}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial k}\vec{k}$

∇^2 — оператор Лапласа $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial i^2}\vec{i} + \frac{\partial^2}{\partial j^2}\vec{j} + \frac{\partial^2}{\partial k^2}\vec{k}$

Первое равенство обеспечивает постоянство плотности жидкости, второе — выполнение закона сохранения импульса.

Физические методы отображения водной поверхности сложны в реализации и требуют высокой производительности, потому их необходимо подвергать модификациям и упрощениям.

1.3.1 Метод сеток Эйлера

Метод Эйлера — это модификация системы уравнений Навье-Стокса на основе сетки. Он начинается с изучения движения каждой фиксированной точки в пространстве, занимаемом жидкостью, и анализирует изменения во времени скорости, давления, плотности и других параметров жидкости в каждой фиксированной точке в пространстве.

Такой метод позволяет построить модель мало движущейся жидкости. Этот метод хорошо подходит для имитации воды в небольших водоемах и бассейнах, и никак не подходит для симуляции океанических волн.

Система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial p}{\partial x} - \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial p}{\partial x} - \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial p}{\partial x} - \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)\right) \end{cases} \quad (12)$$

Если ограничить количество изменений системы, то можно привести ее к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + g\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + g\frac{\partial h}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial h}{\partial t} + d\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

где h — высота сетки,

u, v — скорости движения жидкости в направлении осей x и y .

1.3.2 Метод Лагранжа

Метод Лагранжа — это метод на основе частиц. Он начинается с анализа движения каждой частицы жидкости, то есть изучения изменения скорости, давления, плотности и других параметров определенной частицы в жидкости со временем, и изучения изменения параметров, когда одна частица жидкости переносится на другие частицы жидкости. Этот метод позволяет получить более достоверные результаты отображения поверхности, чем по методу Эйлера.

Этот метод позволяет сократить всю модель изменений до вектора скорости движения жидкости:

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0}(\vec{f}_p + \vec{f}_v + \vec{f}_e), \quad (14)$$

где $\vec{f}_p = -\nabla p$ — силы давления,

$\vec{f}_v = \mu \nabla^2 \vec{U}$ — силы вязкости,

$\vec{f}_e = \rho_0 \vec{g}$ — внешние силы.

Главная идея в этой модели в связности отдельно взятых частиц. Каждая частица способна воздействовать на соседние частицы, и так далее по импульсу. Под частицей здесь подразумевается некоторый объем исходной жидкости, а не отдельная молекула [6]. Исходя из этого формула метода Лагранжа примет вид:

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_p} m_j \frac{S_j}{\rho_j} W(r, R), \quad (15)$$

где N_p — общее количество частиц жидкости,

m_j — масса j -ой частицы,

ρ_j — плотности частицы j ,

R — максимальный радиус взаимодействия между частицами,

W — заданная функция ядра.

1.4 Спектральный подход

В основе спектрального подхода лежит идея описания водной поверхности набором волн определенного спектра, полученного путем измерений тех или иных параметров океана. Это возможно с помощью разложения карты высот на сумму отдельных гармонических волн, что позволяет использовать алгоритм обратного преобразования Фурье, чтобы получить динамически изменяющуюся в реальном времени поверхность океана.

Формула для высоты точки поверхности $y = h(\vec{p}, t)$ имеет вид:

$$h(\vec{p}, t) = \sum_{\vec{k}} \tilde{h}(\vec{k}, t) e^{i\vec{k}\vec{p}}, \quad (16)$$

где $\vec{p}(x, z)$ — горизонтальная позиция h,

\vec{k} — двумерный волновой вектор,

$\tilde{h}(\vec{k}, t)$ — функция, определяющая структуру поверхности.

Спектральный подход дает очень достоверное изображение океанических волн, но с точки зрения физики данный подход — лишь небольшая симуляция волновых явлений реального физического мира.

1.5 Bump Mapping

Среди всех методов Bump Mapping (рельефное текстурирование) — практически самая первая схема моделирования водной поверхности. Рельефное текстурирование изобрел Джим Блинн [7], но только для твердых поверхностей. Для рисования воды такие текстуры стали использовать чуть позже.

В целом bump mapping используется для различных целей. Будь то, отображение мелких деталей на объекте, затемнение или освещение отдельных участков объекта, создание различных шумов (например, fractal noise), создание эффектов заблюривания (bloom) и размытия. Методика использования таких рельефных карт подразумевает смещение пикселей без разбиения поверхности на треугольники (тесселяции). Иными словами, в текстуре можно запечь буквально любой необходимый визуальный эффект, и после вывести его без каких-либо затрат на производительность.

Текстуры, используемые для bump mapping, можно разделить на множество категорий в зависимости от назначения. Так, на сегодняшний день нашли применение в компьютерной графике:

- Процедурные текстуры (Procedural Textures) — текстуры, использующие математические вычисления во фрагментном шейдере. Такие текстуры позволяют отрисовать, например, дым, огонь, лаву, облака. В этой категории находится очень важный алгоритм создания шума Перлина [8], который используется для создания генерации земных поверхностей.
- Карты смещения (Displacement Maps) — обычно черно-белая карта, которая позволяет создать иллюзию сложности поверхности. Чаще всего такие карты используются для создания рельефов местности.
- Карты нормалей (Normal Maps) — текстуры, в которых изначально сохранены значения нормалей, которые записаны в качестве цветовых компонент RGB.
- Карты параллакса (Parallax Mapping) — похожи на карты нормалей, но в них текстурные координаты изменены так, чтобы добавить эффект глубины.
- DuvMap — текстура, хранящая в RGB-формате направления текстурных координат.
- Карты потока (Flow Maps) — текстуры, хранящие в себе информацию о векторном поле. Используются для рендеринга водных потоков, а также для рисования бликов в прическе персонажей.

Существуют и другие виды текстур, которые работают с определенными эффектами (например, motion blur- текстуры, HDR-текстуры), но все они относятся к методам рельефного текстурирования. В основном для отображения воды используются normal- dudv- и flow-текстуры.

2 Реализация отображения водной поверхности

2.1 Составные части проекта

Весь проект в целом состоит из отрисовки:

1. Ландшафта
2. Скайбокса
3. Водной поверхности

Приложение разработано на языке C++ в среде разработки Visual Studio 17. Платформа приложения, установленная в проекте — *x64*, версия библиотеки OpenGL — *opengl32.lib*.

В отрисовке воды в данной работе используется метод рельефного текстурирования (*bump mapping*). Изменение текстуры со временем организовано благодаря выборке из *normal*- и *dudv* карт.

Файловая структура проекта приведена в таблице 1:

Mesh.cpp
Mesh.h
Model.cpp
Model.h
staticModelFragment.glsl
staticModelVertex.glsl
Shader.cpp
Shader.h
TextureLoader.cpp
TextureLoader.h
FBO.cpp
FBO.h
waterFragment.glsl
waterVertex.glsl
Camera.h
main.cpp

Таблица 1 – Файловая структура проекта

Модель позаимствована с сайта [9].

2.2 Итоги

В конечном итоге результатом работы программы станет сцена, как представлено на Рисунке 1 и Рисунке 2. В рамках интерактивной сцены можно перемещаться по локации с помощью клавиш стрелок курсора, а также регулировать угол обзора с помощью мыши.

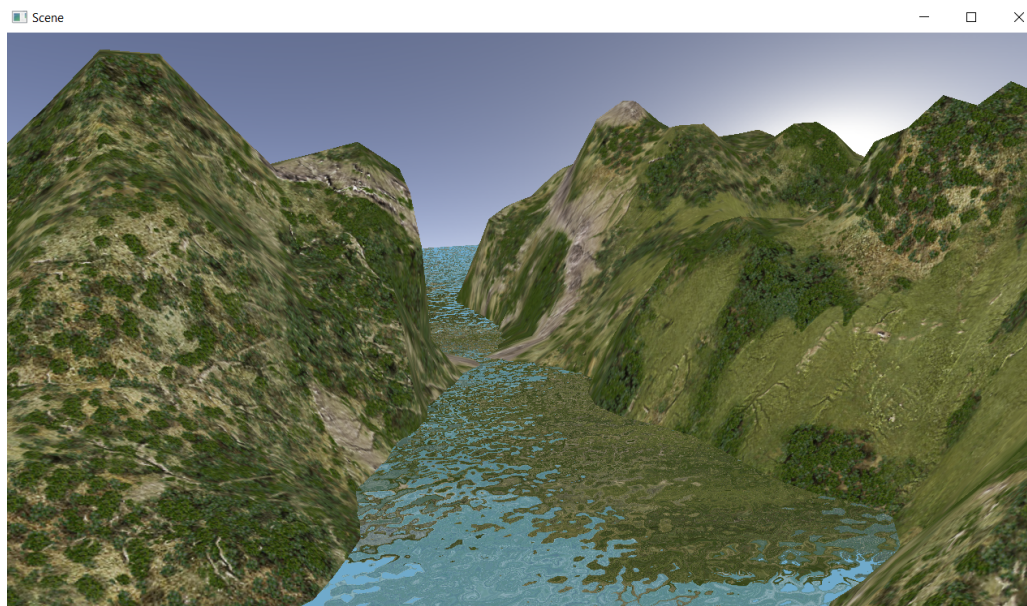


Рисунок 1 – Результат 1

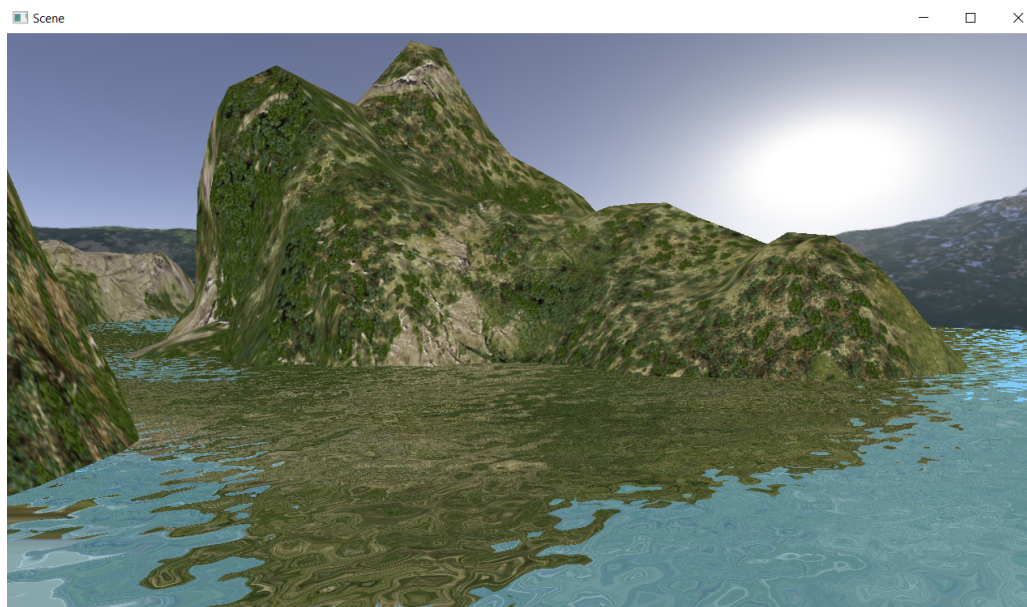


Рисунок 2 – Результат 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача визуализации поверхности воды как никогда актуальна в эпоху активного развития компьютерных игр, анимации и кинематографа. Рассмотренные методы симуляции водных пространств позволяют решать данную задачу в соответствии с необходимыми требованиями того или иного проекта.

В ходе выполнения работы были рассмотрены физические, статистические, спектральные и текстурные методы отображения водной поверхности. На основе этих методов реализован проект, включающий в себя скайбокс, ландшафт и отрисовку водной глади в среде разработки Visual Studio 2017 на языке C++ с помощью графической библиотеки OpenGL.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 *Tessendorf, Jerry*. Simulating ocean wather / Jerry Tessendorf. — 2001.
- 2 REAL-TIME WATER SIMULATION [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.cse.iitd.ac.in/~cs5080212/MiniP.pdf> (Дата обращения 29.05.2022). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 3 *T., Gerstner*. Fast multiresolution extraction of multiple transparent isosurfaces / Gerstner T. — 2001.
- 4 Effective Water Simulation from Physical Models [Электронный ресурс]. — URL: <https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-i-natural-effects/chapter-1-effective-water-simulation-physical-models> (Дата обращения 29.05.2022). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 5 *Колесниченко В.И., Шарифулин А.Н.* Введение в механику несжимаемой жидкости / Шарифулин А.Н. Колесниченко В.И. — 2019.
- 6 *Bridson, Robert*. Fluid Simulation for Computer Graphics / Robert Bridson. — 2008.
- 7 *J., BLINN*. Simulation of wrinkled surfaces / BLINN J. — 1978.
- 8 *L, Tian*. Ocean wave simulation by the mix of FFT and Perlin Noise / Tian L. — 2014.
- 9 cgtrader [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.cgtrader.com/free-3d-models/terrain> (Дата обращения 20.05.2022). Загл. с экрана. Яз. рус.