

# Компьютерная графика

## Лекция 1: Введение в курс

---

2023

## Лекции

- Лисица Никита Игоревич (Яндекс)
- lisyarus@gmail.com
- +7(952)276-70-50

## Практики

- Садовский Владимир Сергеевич (NauEngine)
- vovacolt@yandex.ru
- +7(988)581-87-78

# Как устроен курс

- Репозиторий со слайдами:  
[github.com/lisyarus/graphics-course-slides/pdf](https://github.com/lisyarus/graphics-course-slides/pdf)
- Репозиторий с заготовками для практик:  
[github.com/lisyarus/graphics-course-practice](https://github.com/lisyarus/graphics-course-practice)

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода
  - В репозитории `practice` есть подробная инструкция по развёртке тестового проекта, – лучше это сделать заранее, чтобы не тратить время на первой практике

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода
  - В репозитории `practice` есть подробная инструкция по развёртке тестового проекта, – лучше это сделать заранее, чтобы не тратить время на первой практике
- Домашние задания

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода
  - В репозитории `practice` есть подробная инструкция по развёртке тестового проекта, – лучше это сделать заранее, чтобы не тратить время на первой практике
- Домашние задания
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода
  - В репозитории `practice` есть подробная инструкция по развертке тестового проекта, – лучше это сделать заранее, чтобы не тратить время на первой практике
- Домашние задания
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Сдача на практическом занятии

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода
  - В репозитории `practice` есть подробная инструкция по развертке тестового проекта, – лучше это сделать заранее, чтобы не тратить время на первой практике
- Домашние задания
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Сдача на практическом занятии
- Финальный проект
  - Большое, сложное, интересное задание по выбору

# Как устроен курс

- Лекции
  - Слайды (в репозитории `slides`)
- Практики
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Код-заготовка на C++ (в репозитории `practice`)
  - Сдача на занятии или отправкой кода
  - В репозитории `practice` есть подробная инструкция по развертке тестового проекта, – лучше это сделать заранее, чтобы не тратить время на первой практике
- Домашние задания
  - Слайды с заданием (в репозитории `slides`)
  - Сдача на практическом занятии
- Финальный проект
  - Большое, сложное, интересное задание по выбору
  - Сдача в конце курса

# Баллы

## Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках

## Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балла – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание

# Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балла – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание
  - Можно прислать код (или сдать лично) до конца следующей практики (через неделю)

# Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балл – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание
  - Можно прислать код (или сдать лично) до конца следующей практики (через неделю)
  - Можно прислать позже со штрафом в **1 балл**

# Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балл – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание
  - Можно прислать код (или сдать лично) до конца следующей практики (через неделю)
    - Можно прислать позже со штрафом в 1 балл
- 15 баллов – каждое из 3х домашних заданий

# Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балл – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание
  - Можно прислать код (или сдать лично) до конца следующей практики (через неделю)
    - Можно прислать позже со штрафом в 1 балл
- 15 баллов – каждое из 3х домашних заданий
  - Можно получить неполный балл

# Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балл – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание
  - Можно прислать код (или сдать лично) до конца следующей практики (через неделю)
    - Можно прислать позже со штрафом в 1 балл
- 15 баллов – каждое из 3х домашних заданий
  - Можно получить неполный балл
  - Можно сдать после дня сдачи со штрафом в 50% баллов

# Баллы

- ≈25 баллов – работа на практиках
  - 1 балл – получилось хоть что-нибудь
  - 2 балл – получилось всё
  - 3 балла – получилось всё + доп. задание
  - Можно прислать код (или сдать лично) до конца следующей практики (через неделю)
    - Можно прислать позже со штрафом в 1 балл
- 15 баллов – каждое из 3х домашних заданий
  - Можно получить неполный балл
  - Можно сдать после дня сдачи со штрафом в 50% баллов
- 30+ баллов – финальный проект

## Оценка за курс

## Оценка за курс

- Зачет: **50 и более** баллов

## Оценка за курс

- Зачет: **50 и более** баллов
- Экзамен:
  - 50-59 баллов: E
  - 60-69 баллов: D
  - 70-79 баллов: C
  - 80-89 баллов: B
  - 90-100 баллов: A

# Пререквизиты

# Пререквизиты

- Программирование

# Пререквизиты

- Программирование
  - Основы C++

# Пререквизиты

- Программирование
  - Основы C++
  - Компилировать и запускать программы в удобной вам среде

# Пререквизиты

- Программирование
  - Основы C++
  - Компилировать и запускать программы в удобной вам среде
- Математика

# Пререквизиты

- Программирование
  - Основы C++
  - Компилировать и запускать программы в удобной вам среде
- Математика
  - Линейная алгебра (векторы, матрицы, умножение матриц, линейные системы, ортогональность)

# Пререквизиты

- Программирование
  - Основы C++
  - Компилировать и запускать программы в удобной вам среде
- Математика
  - Линейная алгебра (векторы, матрицы, умножение матриц, линейные системы, ортогональность)
  - Аналитическая геометрия (координаты, уравнения кривых и поверхностей)

# Что такое компьютерная графика?

# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация

# The Matrix Revolutions (2003)



# Avatar (2009)



# The Avengers (2012)



# Klaus (2019)



# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры

# Space Invaders (1978)



# Doom (1993)



AMMO

100%  
HEALTH

2 3 4  
5 6 7  
ARMS



70%  
ARMOR

BULL 30 / 400  
WHEEL 23 / 100  
ROCKET 19 / 100  
CELL 0 / 600

id Software

# Grand Theft Auto: Vice City (2002)



# Civilization V (2010)



# The Witcher 3: Wild Hunt (2015)



# Cyberpunk 2077 (2020)

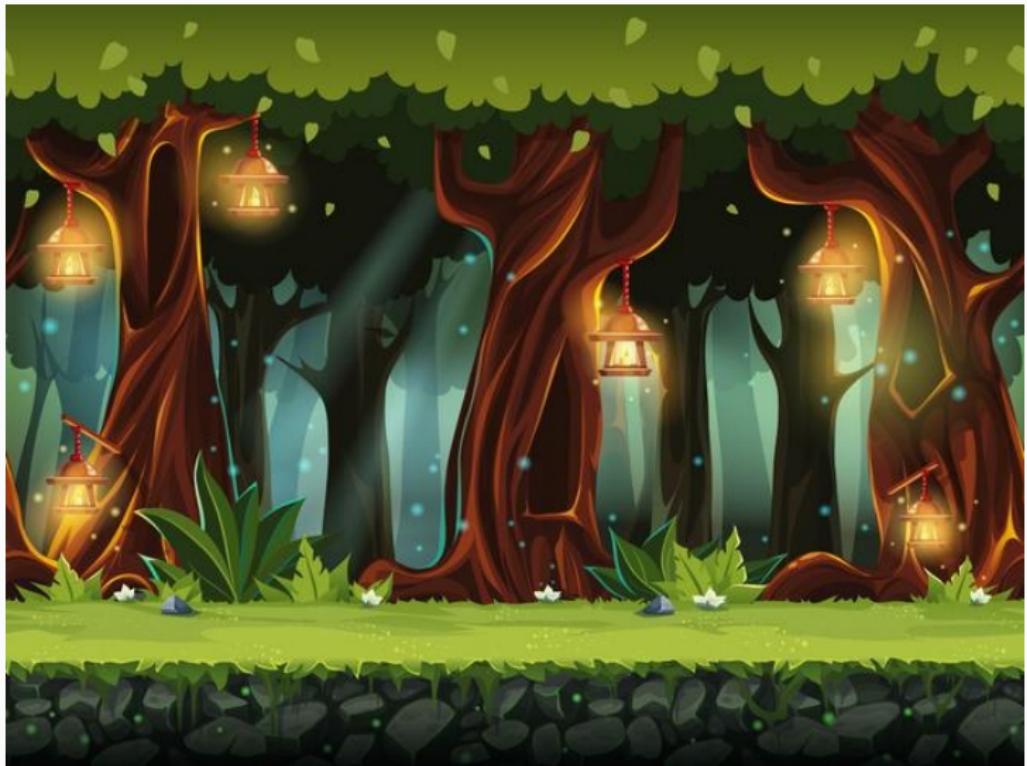


# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры
- Рисунки, concept art







# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры
- Рисунки, concept art
- Графический интерфейс

# Mac OS Catalina



# Windows 10

A System accent color: #0078D4

Buttons	Calendar Date Picker	Combo box	Textbox
Enabled button	Label title mm/dd/yyyy	Label title Placeholder text	Label title Placeholder text
Disabled button	Hover mm/dd/yyyy	Hover Placeholder text	Hover Placeholder text
Toggle button	Disabled mm/dd/yyyy	Disabled Placeholder text	Disabled Placeholder text
Checkbox	Radio button	Combo box	Textbox
<input type="checkbox"/> Unchecked	<input type="radio"/> Unchecked	Microsoft	Typing This is text.]
<input checked="" type="checkbox"/> Checked	<input checked="" type="radio"/> Checked	Windows	Password *****
<input type="checkbox"/> Third state	<input checked="" type="radio"/> Checked	Office	
<input checked="" type="checkbox"/> Disabled			
Toggle switch			
<input type="checkbox"/> Off		<input type="checkbox"/> Disabled Off	
<input checked="" type="checkbox"/> On		<input checked="" type="checkbox"/> Disabled On	

**Buttons**

Enabled button

Disabled button

Toggle button

**Checkbox**

Unchecked

Checked

Third state

Disabled

**Radio button**

Unchecked

Checked

Disabled

**Calendar Date Picker**

Label title  
mm/dd/yyyy

Hover  
mm/dd/yyyy

Disabled  
mm/dd/yyyy

**Combo box**

Label title  
Placeholder text

Hover  
Placeholder text

Disabled  
Placeholder text

**Textbox**

Label title  
Placeholder text

Hover  
Placeholder text

Disabled  
Placeholder text

Typing  
This is text.]

Password  
\*\*\*\*\*

**Toggle switch**

Off  Disabled Off

On  Disabled On

# Europa Universalis 4

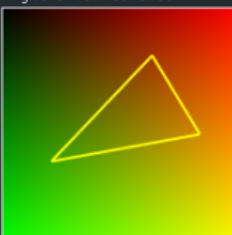


# Dear ImGui

▼ Example: Custom rendering

Clear Undo

Left-click and drag to add  
Right-click to undo



E028E4: 00 00 F0 44 00 40 7E 44 ...D.@@D  
E028EC: 06 33 88 3C 00 00 A0 40 ...<...@  
E028F4: 18 BA DE 00 00 BA DE 00 .....  
E028FC: 9A 99 99 3E 00 00 C0 40 ...>...@  
E02984: 00 00 C0 40 02 01 00 00 ...@...  
E0298C: 07 01 00 00 06 01 00 00 .....  
E02914: 09 01 00 00 08 01 00 00 .....  
E0291C: 0A 01 00 00 0B 01 00 00 .....  
E02924: 0C 01 00 00 0D 01 00 00 .....  
E0292C: 05 01 00 00 03 01 00 00 .....  
E02934: 01 01 00 00 00 01 00 00 .....  
E0293C: 41 00 00 00 43 00 00 00 A...C...  
E02944: 56 00 00 00 58 00 00 00 V...X...Console  
E0294C: 59 00 00 00 5A 00 00 00 Y...Z...  
E02954: 00 00 00 3E CD CC 4C 3D ...>URL implements a console with basic coloring,  
E0295C: 00 00 00 00 A4 28 E0 00 ...let!(), and history. A more elaborate implementation may  
support storing entries along with extra data such as timestamp,

8 rows Range E028E4..E03C93 Iter: etc.

▼ Memory Editor

Address	Value
E028E4	00 00 F0 44 00 40 7E 44
E028EC	06 33 88 3C 00 00 A0 40
E028F4	18 BA DE 00 00 BA DE 00
E028FC	9A 99 99 3E 00 00 C0 40
E02984	00 00 C0 40 02 01 00 00
E0298C	07 01 00 00 06 01 00 00
E02914	09 01 00 00 08 01 00 00
E0291C	0A 01 00 00 0B 01 00 00
E02924	0C 01 00 00 0D 01 00 00
E0292C	05 01 00 00 03 01 00 00
E02934	01 01 00 00 00 01 00 00
E0293C	41 00 00 00 43 00 00 00
E02944	56 00 00 00 58 00 00 00
E0294C	59 00 00 00 5A 00 00 00
E02954	00 00 00 3E CD CC 4C 3D
E0295C	00 00 00 00 A4 28 E0 00

use functions such as IsItemHovered() on

AAA BBB CCC EEE DDD LEVERAGE BUZZWORD

ACTION REACTION

Text Baseline Alignment  
Scrolling

▼ Example: Layout

File

MyObject 0

MyObject 1

MyObject 2

MyObject 3

MyObject 4

MyObject 5

MyObject 6

MyObject 7

MyObject 8

MyObject 9

MyObject 10

MyObject 11

MyObject 12

MyObject 13

Revert Save

MyObject: 0

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.

Enter 'HELP' for help, press TAB to use text completion.

Add Dummy Text Add Dummy Error Clear

Filter ("incl,-excl") ("error")

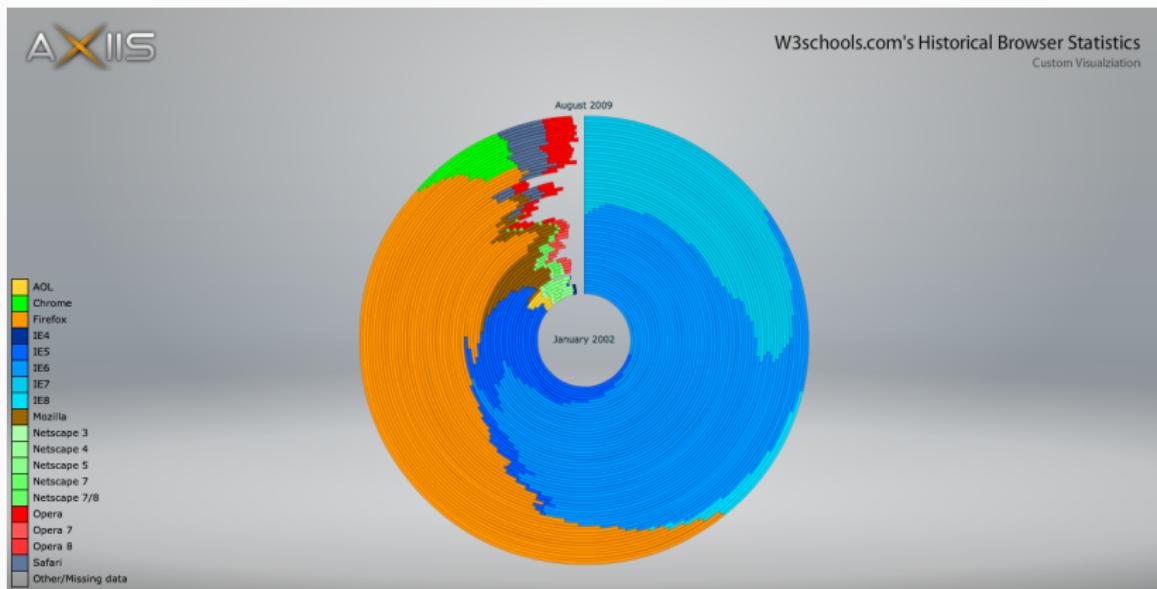
0 some text  
some more text  
display very important message here!  
[error] something went wrong  
Possible matches:  
- HELP  
- HISTORY  
# HELP  
Commands:  
- HELP  
- HISTORY  
- CLEAR  
- CLASSIFY  
# hello, imgui world!  
Unknown command: 'hello, imgui world!'

hello, imgui world! Input

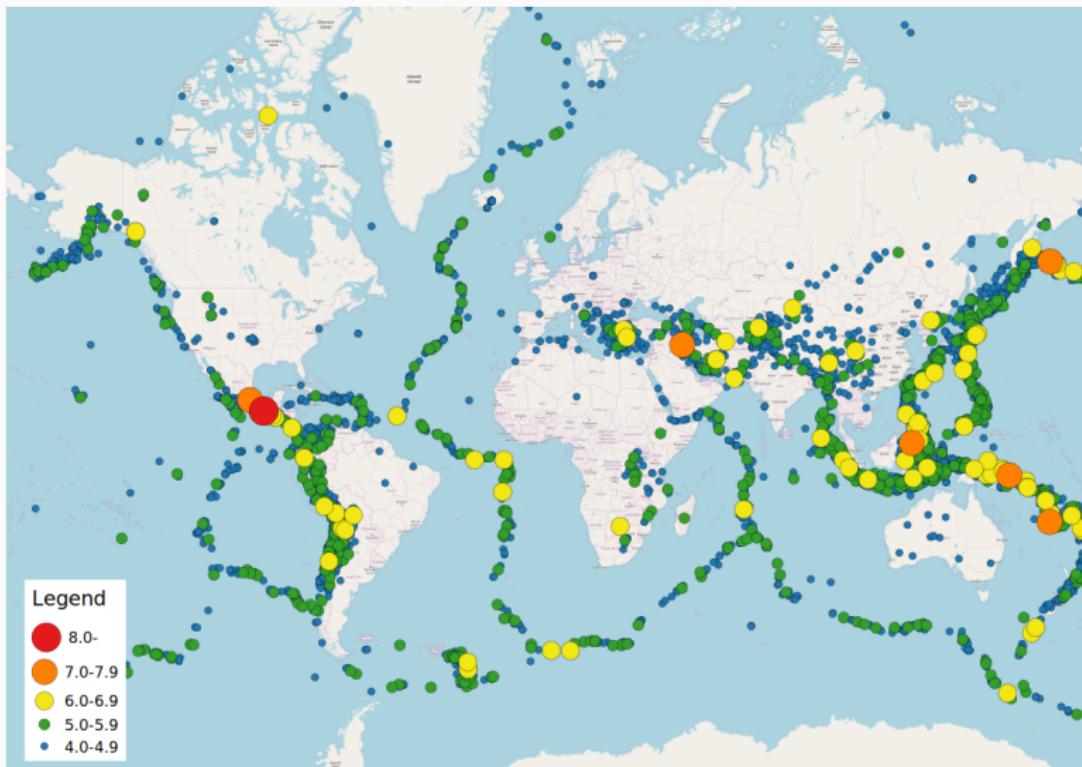
# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры
- Рисунки, concept art
- Графический интерфейс
- Визуализация данных

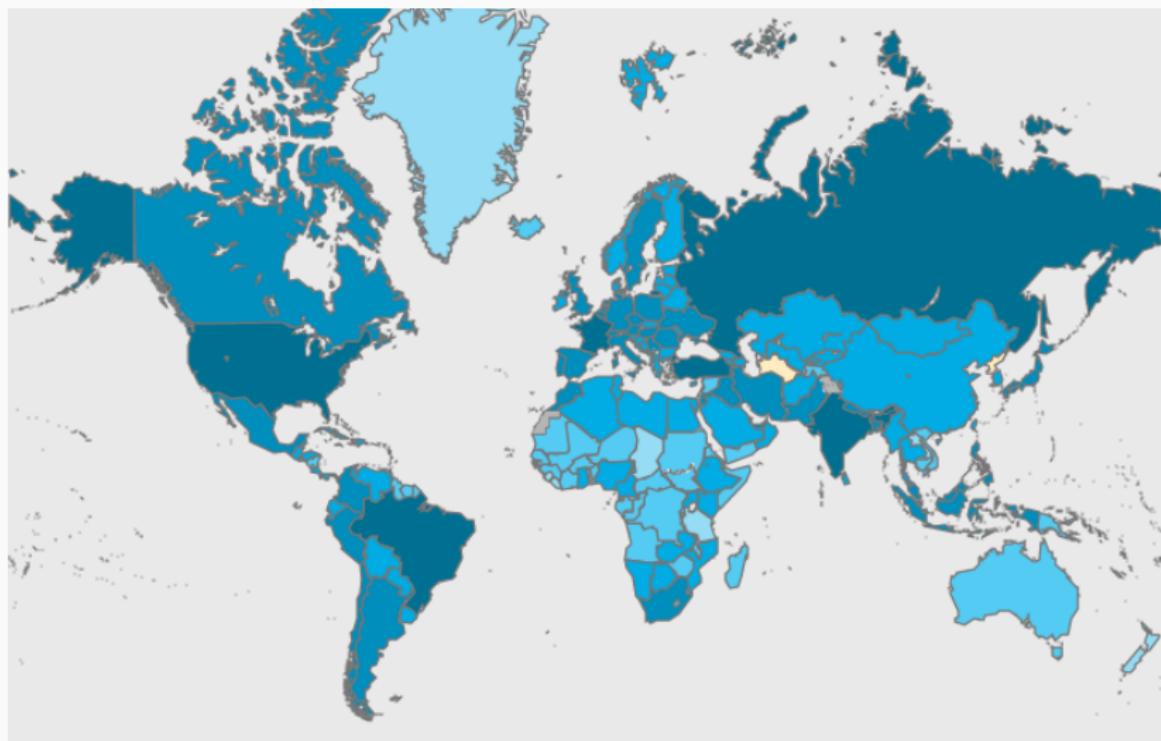
# Популярность браузеров в 2002-2009



# Карта землетрясений



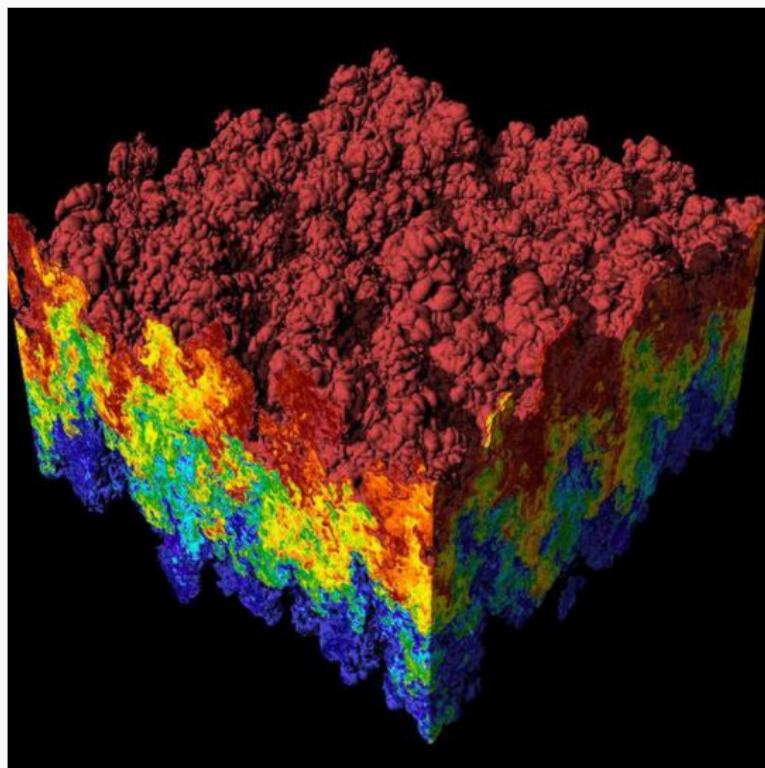
# Количество случаев заражения COVID-19



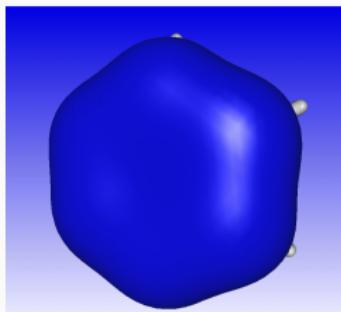
# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры
- Рисунки, concept art
- Графический интерфейс
- Визуализация данных
- Научная визуализация

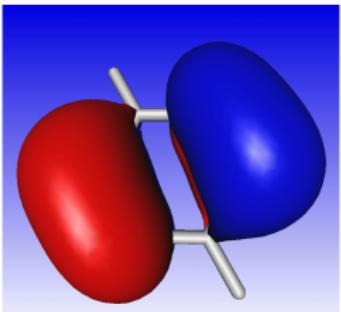
# Неустойчивость Рэлея – Тейлора



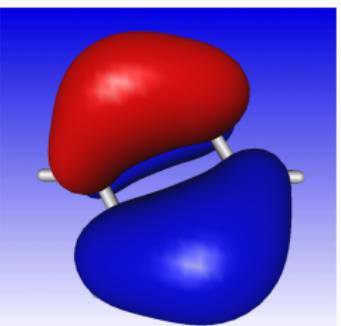
# Молекулярные орбитали бензола



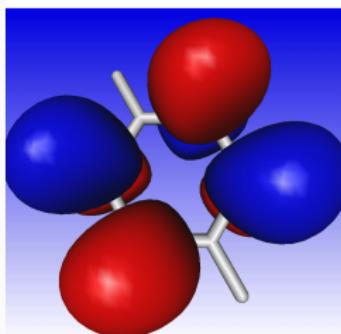
16



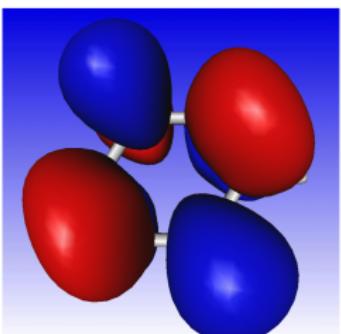
20



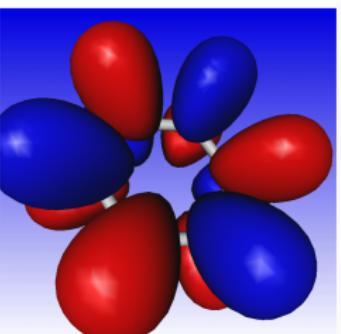
21



22

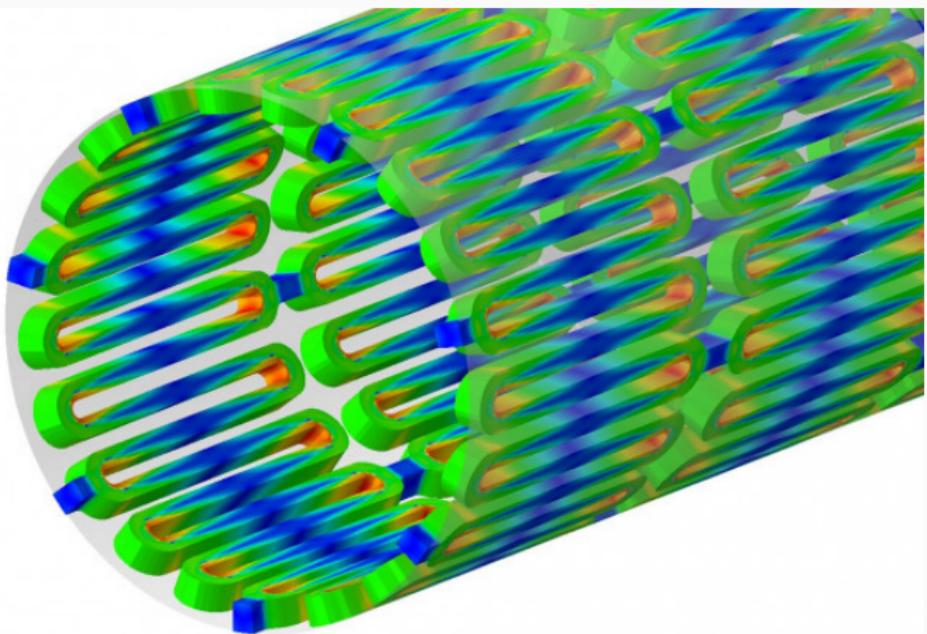


23



30

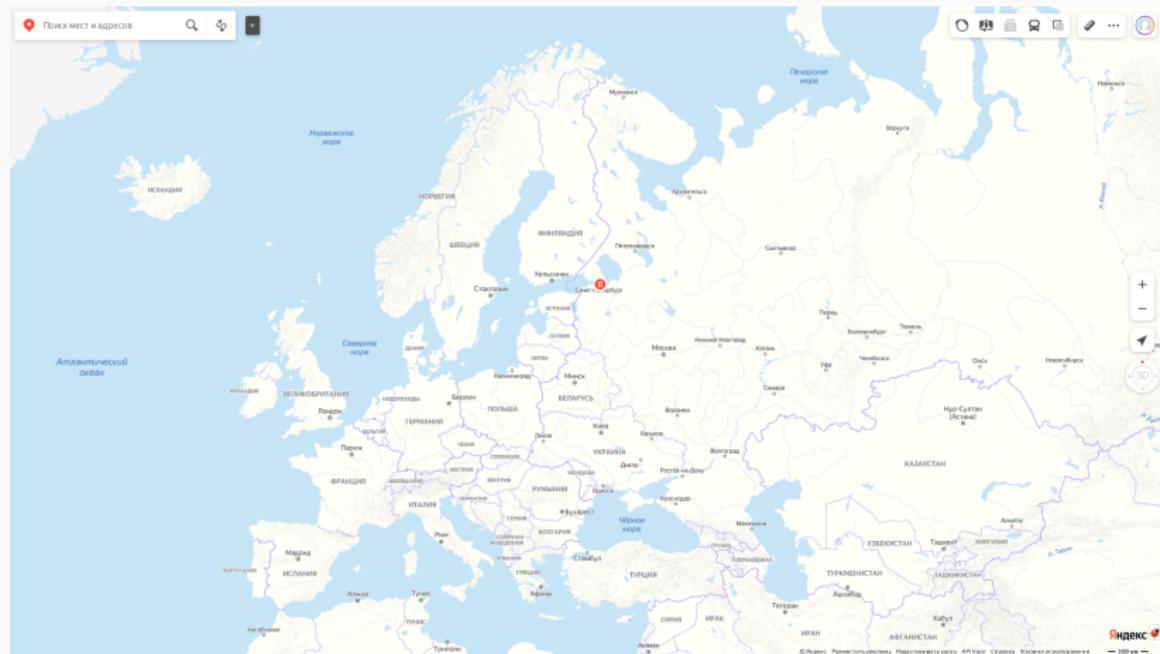
# Симуляция напряжений в стене методом конечных элементов



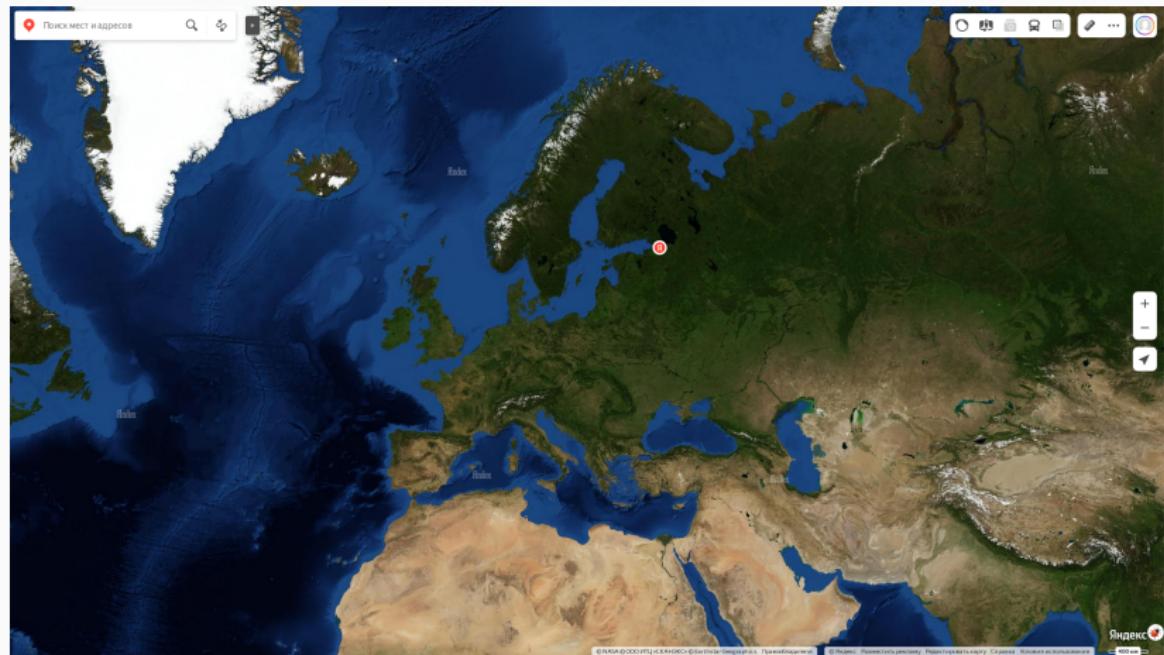
# Что такое компьютерная графика?

- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры
- Рисунки, concept art
- Графический интерфейс
- Визуализация данных
- Научная визуализация
- Карты

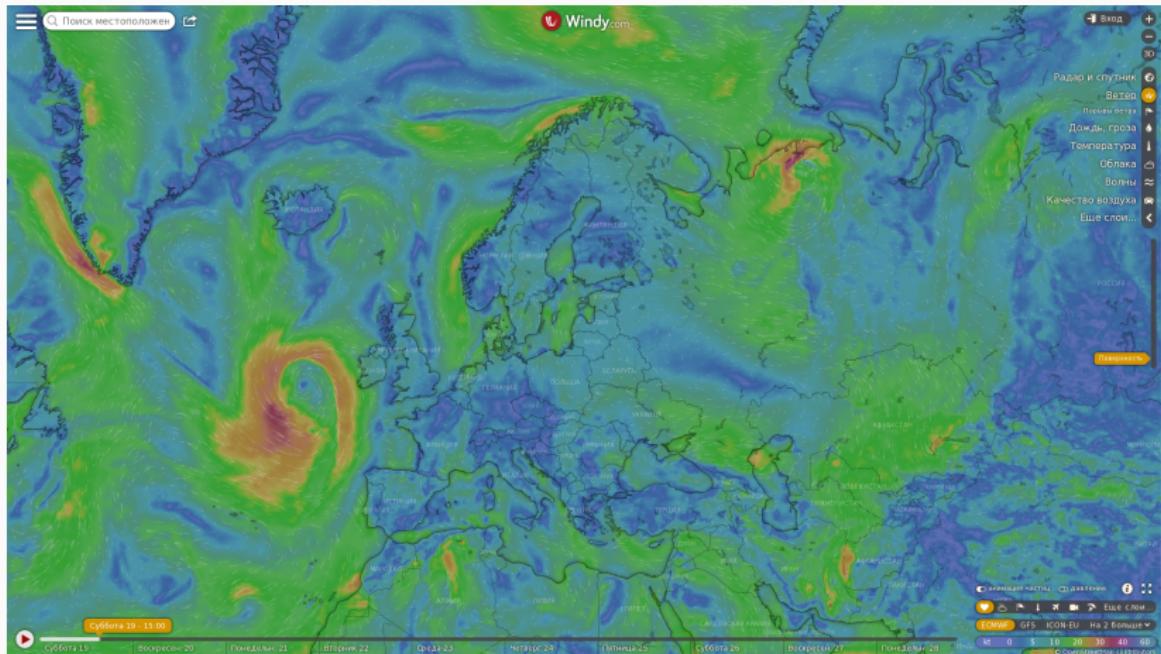
# Схематическая карта



# Спутниковая карта



## Карта погоды



# Что такое компьютерная графика?

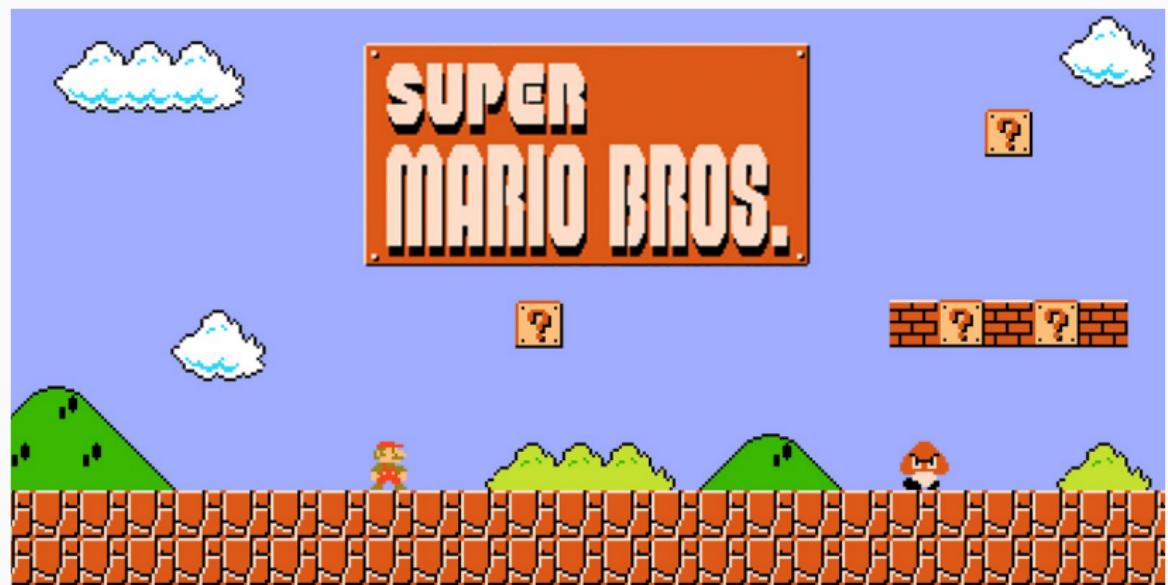
- Кинематограф, мультипликация
- Компьютерные игры
- Рисунки, concept art
- Графический интерфейс
- Визуализация данных
- Научная визуализация
- Карты
- И т.д.

# Грубая и неточная классификация

## Грубая и неточная классификация

- 2D / 3D

# Super Mario Bros. (1983) - 2D



# Red Dead Redemption 2 (2018) - 3D



## Грубая и неточная классификация

- 2D / 3D

## Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D

# Civilization III (2001) - 2.5D



## Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D

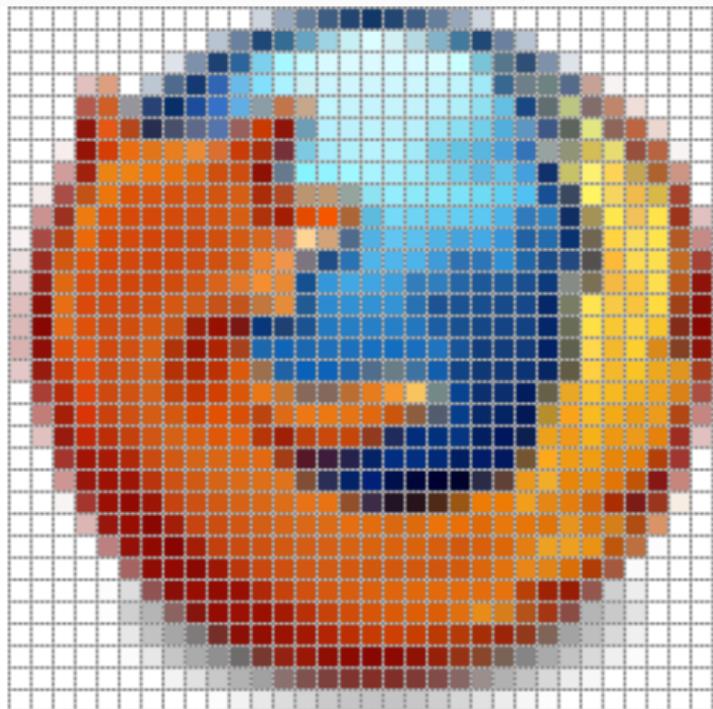
## Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая

# Векторная графика



# Растровая графика



## Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая

# Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / offline

## Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline

# Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная

# Грубая и неточная классификация

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

- 2D / 2.5D / 3D
- Векторная / растровая
- Realtime / near real-time / offline
- Фотореалистичная / стилизованная
- CPU / GPU

# Чем мы будем заниматься?

# Чем мы будем заниматься?

- Как пользоваться *графическими API*

# Чем мы будем заниматься?

- Как пользоваться *графическими API*
- Как реализовывать *графические движки*

# Чем мы будем заниматься?

- Как пользоваться *графическими API*
- Как реализовывать *графические движки*
- Как реализовывать *графические эффекты*

# Чем мы будем заниматься?

- Как пользоваться *графическими API*
- Как реализовывать *графические движки*
- Как реализовывать *графические эффекты*
- Как их *оптимизировать*

# Чем мы будем заниматься?

- Как пользоваться графическими API
- Как реализовывать графические движки
- Как реализовывать графические эффекты
- Как их оптимизировать
- Профессия *graphics engineer*

Где это пригодится?

## Где это пригодится?

- Разработка игр и игровых движков

## Где это пригодится?

- Разработка игр и игровых движков
- Разработка инструментов для художников/дизайнеров/архитекторов

# Где это пригодится?

- Разработка игр и игровых движков
- Разработка инструментов для художников/дизайнеров/архитекторов
- Разработка инструментов для научной визуализации/визуализации данных

# Где это пригодится?

- Разработка игр и игровых движков
- Разработка инструментов для художников/дизайнеров/архитекторов
- Разработка инструментов для научной визуализации/визуализации данных
- Разработка картографических приложений

# Где это пригодится?

- Разработка игр и игровых движков
- Разработка инструментов для художников/дизайнеров/архитекторов
- Разработка инструментов для научной визуализации/визуализации данных
- Разработка картографических приложений
- Разработка движков графического интерфейса

## Где это пригодится?

- Разработка игр и игровых движков
- Разработка инструментов для художников/дизайнеров/архитекторов
- Разработка инструментов для научной визуализации/визуализации данных
- Разработка картографических приложений
- Разработка движков графического интерфейса
- И т.д.

Чем мы не будем заниматься?

## Чем мы не будем заниматься?

- Учиться рисовать / моделировать и анимировать объекты / etc.

# Чем мы не будем заниматься?

- Учиться рисовать / моделировать и анимировать объекты / etc.
  - Красивая картинка – движок + данные (текстуры, модели, частицы, etc, – assets)
  - Курс про движок

# Чем мы не будем заниматься?

- Учиться рисовать / моделировать и анимировать объекты / etc.
  - Красивая картинка – движок + данные (текстуры, модели, частицы, etc, – assets)
  - Курс про движок
- Делать игры
  - Игра – гейм-дизайн + контент + графика + физика + механики + UI + аудио + сетевые компоненты + ...
  - Курс про графику

# Примерный план курса

# Примерный план курса

- Основы OpenGL
  - Как хранить данные на GPU
  - Как рисовать эти данные
  - Вершинные буферы, шейдеры, текстуры, фреймбуферы
  - Работа с камерой, перспективная проекция

# Примерный план курса

- Основы OpenGL
  - Как хранить данные на GPU
  - Как рисовать эти данные
  - Вершинные буферы, шейдеры, текстуры, фреймбуферы
  - Работа с камерой, перспективная проекция
- Освещение
  - Теория
  - Модели освещения и материалов
  - Тени, отражения, ambient occlusion
  - Обработка большого количества источников света

# Примерный план курса

- Основы OpenGL
  - Как хранить данные на GPU
  - Как рисовать эти данные
  - Вершинные буферы, шейдеры, текстуры, фреймбуферы
  - Работа с камерой, перспективная проекция
- Освещение
  - Теория
  - Модели освещения и материалов
  - Тени, отражения, ambient occlusion
  - Обработка большого количества источников света
- Эффекты и оптимизации
  - Системы частиц (e.g. дым)
  - Скелетная анимация
  - Уровни детализации, frustum culling
  - Объёмный (volumetric) рендеринг
  - Рендеринг текста

# Краткая история real-time компьютерной графики

1960-е: Осциллографы

# Осциллограф



# Краткая история real-time компьютерной графики

1960-е: Осциллографы

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)

# Tennis For Two



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)

# PDP-1



# Spacewar!



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

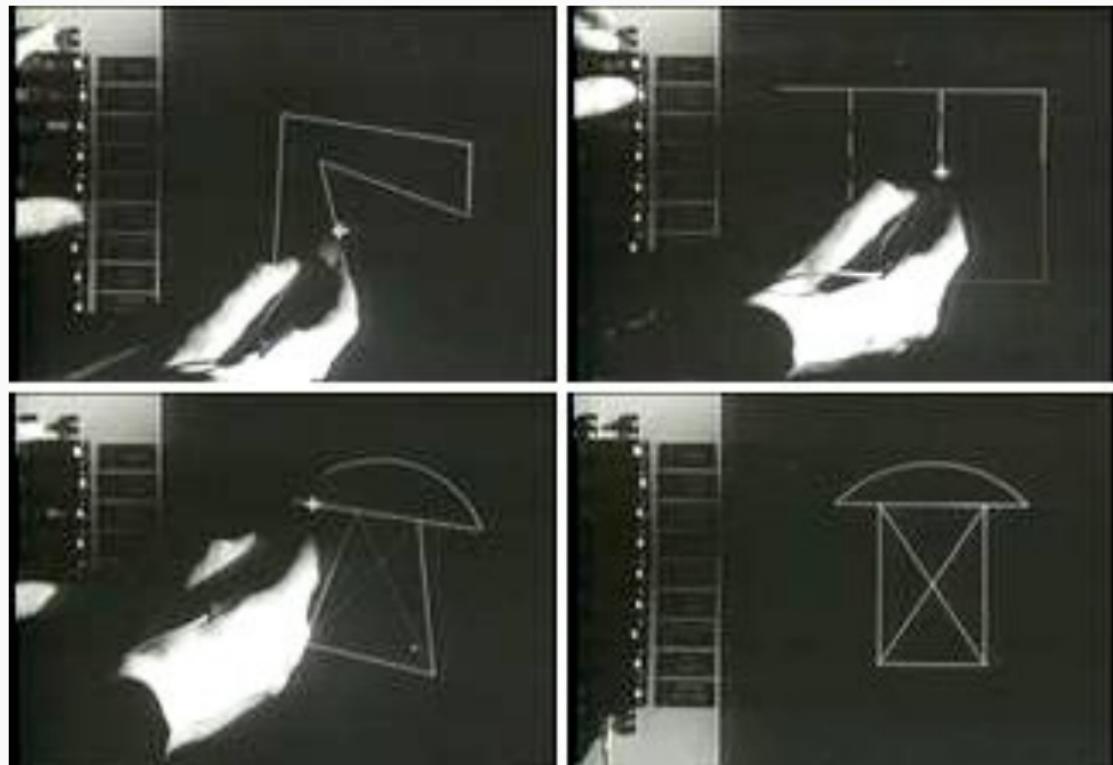
- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)
- Sketchpad (1963, TX-2, световое перо)

# Sketchpad



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

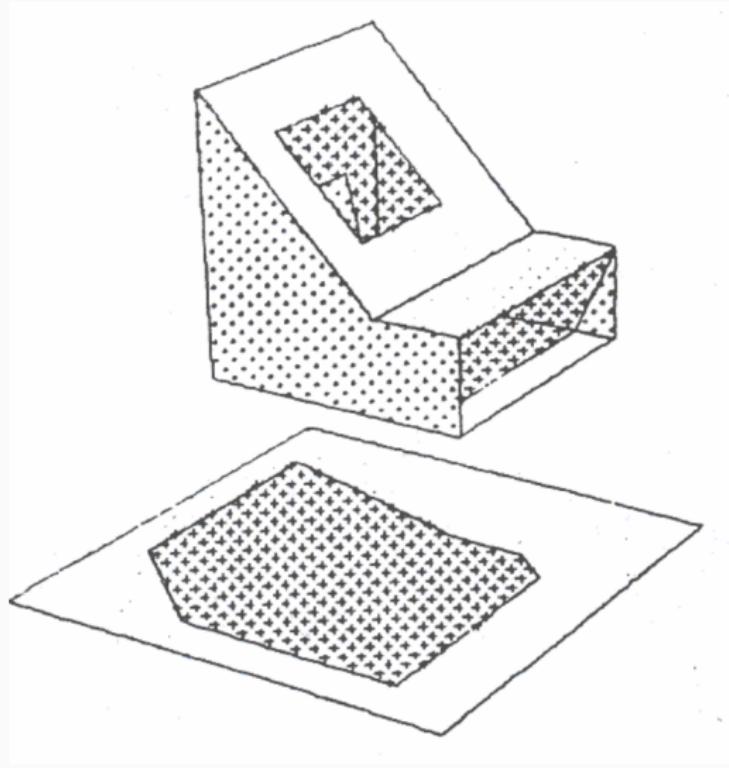
- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)
- Sketchpad (1963, TX-2, световое перо)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)
- Sketchpad (1963, TX-2, световое перо)
- Освещение и тени (Аппель, 1968)

## Освещение (Аппель, 1968)



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)
- Sketchpad (1963, TX-2, световое перо)
- Освещение и тени (Аппель, 1968)

## 1960-е: Осциллографы

- Tennis For Two (1958)
- Spacewar! (1962, PDP-1)
- Sketchpad (1963, TX-2, световое перо)
- Освещение и тени (Аппель, 1968)
- Векторная графика довольно плохого качества: линии одного цвета
- Компьютеры довольно слабые (TX-2 занимал большую комнату)

# Краткая история real-time компьютерной графики

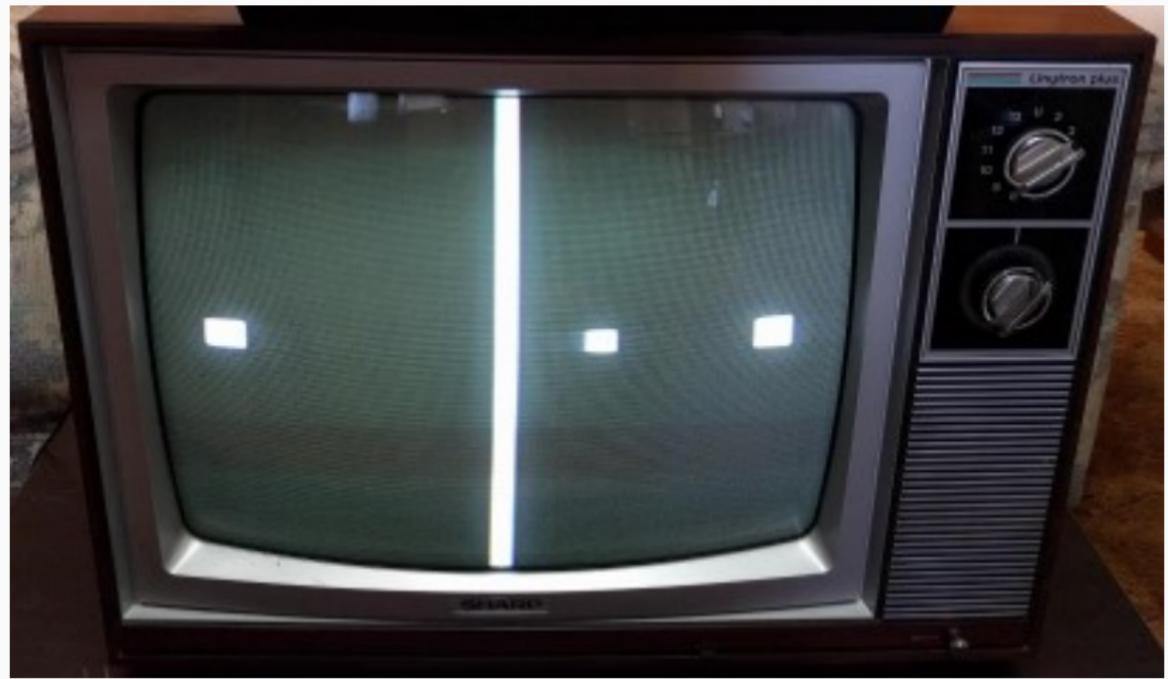
1970-е: Аркадные игры

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)

# Magnavox Odyssey



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)

# Краткая история real-time компьютерной графики

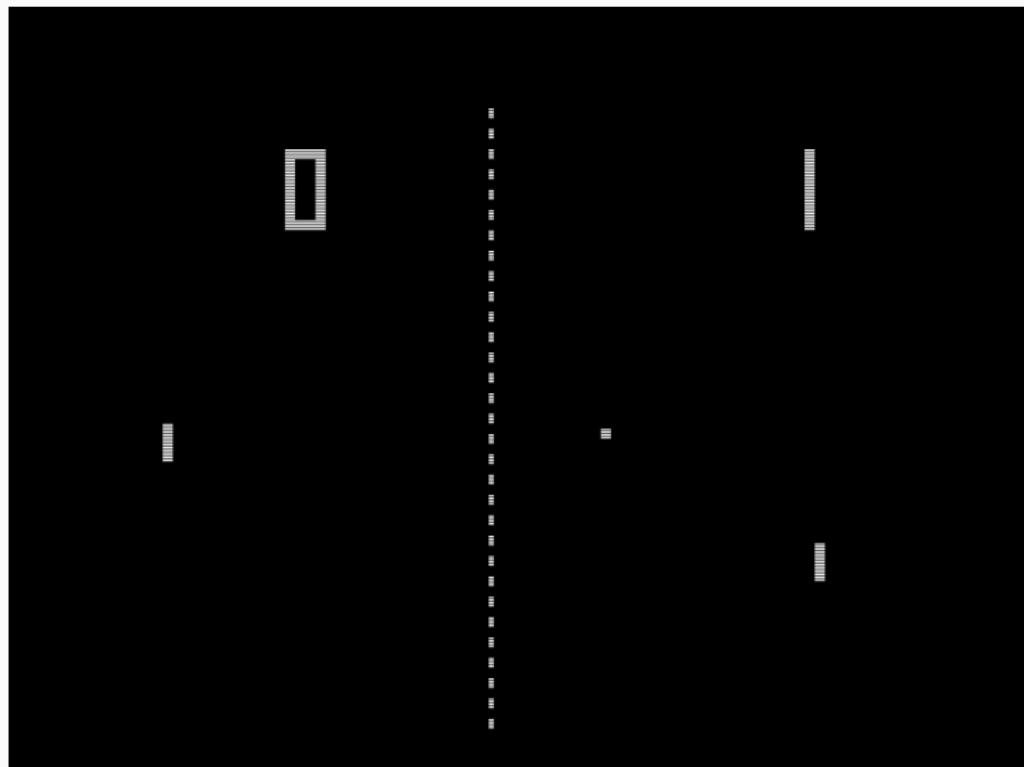
## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр

# Pong



# Pong



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)

# Speed Race



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)

# Gun Fight



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)
- Space Invaders (Taito, 1978)

# Space Invaders



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)
- Space Invaders (Taito, 1978)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)
- Space Invaders (Taito, 1978)
- Pac-Man (Namco, 1980)

# Pac-Man



# Space Invaders

Технические характеристики:

# Space Invaders

## Технические характеристики:

- Intel 8080, 8-bit, 2Mhz

# Space Invaders

## Технические характеристики:

- Intel 8080, 8-bit, 2Mhz
- Экран 256x224, монохромный (1-bit)

# Space Invaders

## Технические характеристики:

- Intel 8080, 8-bit, 2Mhz
- Экран 256x224, монохромный (1-bit)
- 8Kb ROM

# Space Invaders

## Технические характеристики:

- Intel 8080, 8-bit, 2Mhz
- Экран 256x224, монохромный (1-bit)
- 8Kb ROM
- 8Kb RAM, из которых 7Kb занимал экран (framebuffer)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)
- Space Invaders (Taito, 1978)
- Pac-Man (Namco, 1980)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)
- Space Invaders (Taito, 1978)
- Pac-Man (Namco, 1980)
- Переход к растровой графике

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1970-е: Аркадные игры

- Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- Speed Race (Taito, 1974)
- Gun Fight (Taito, 1975)
- Space Invaders (Taito, 1978)
- Pac-Man (Namco, 1980)
- Переход к растровой графике
- Разрешение экрана ограничено объёмами памяти

# Краткая история real-time компьютерной графики

1980-е: Векторные аркады

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)

# Asteroids



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

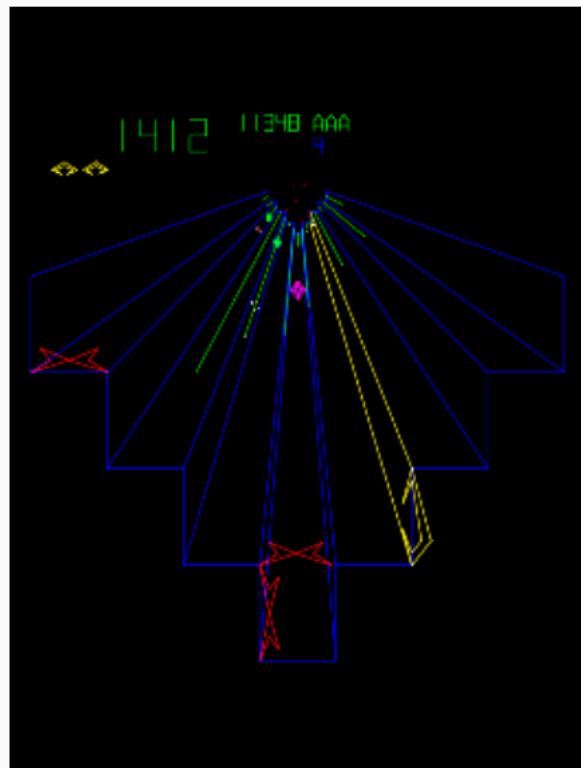
- Asteroids (Atari, 1979)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)
- Tempest (Atari, 1981)

# Tempest



Arcade Machines look WEIRD in Slow Mo – The Slow Mo Guys

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)
- Tempest (Atari, 1981)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)
- Tempest (Atari, 1981)
- Star Wars (Atari, 1983)

# Star Wars



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)
- Tempest (Atari, 1981)
- Star Wars (Atari, 1983)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)
- Tempest (Atari, 1981)
- Star Wars (Atari, 1983)
- Требует специального оборудования (Atari's QuadraScan)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: Векторные аркады

- Asteroids (Atari, 1979)
- Tempest (Atari, 1981)
- Star Wars (Atari, 1983)
- Требует специального оборудования (Atari's QuadraScan)
- Может рисовать только линии

# Краткая история real-time компьютерной графики

1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

- Atari 2600 (Atari, 1977)

# Atari 2600



# Donkey Kong (Nintendo, 1981)



# Pitfall! (Activision, 1982)



# Краткая история real-time компьютерной графики

1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

- Atari 2600 (Atari, 1977)

# Краткая история real-time компьютерной графики

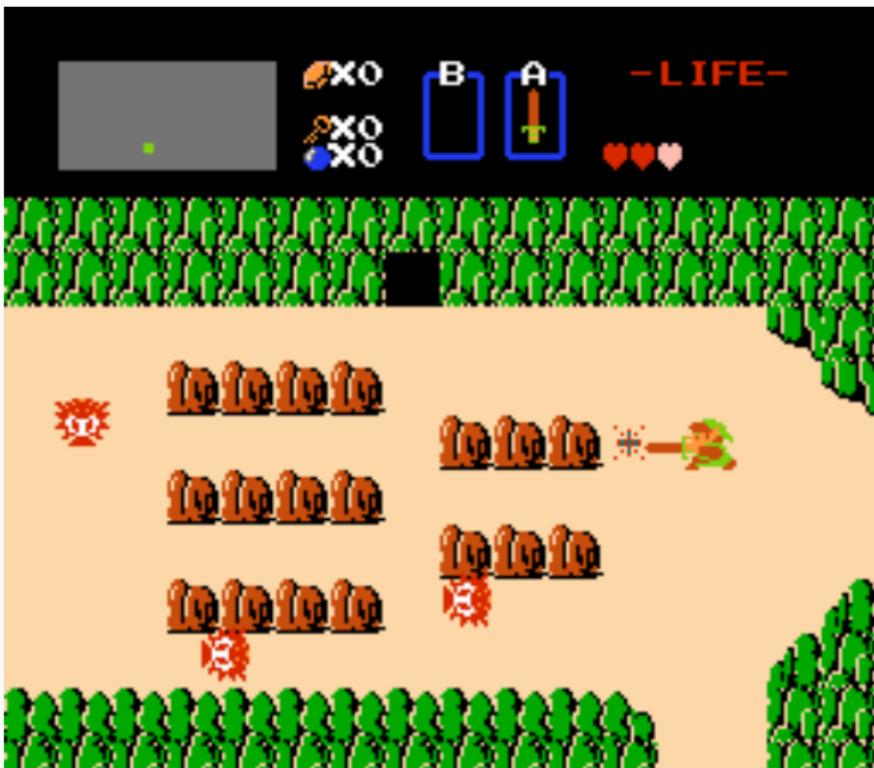
## 1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

- Atari 2600 (Atari, 1977)
- NES (Nintendo, 1983)

# Super Mario Bros. (Nintendo, 1985)



# The Legend of Zelda. (Nintendo, 1986)



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

- Atari 2600 (Atari, 1977)
- NES (Nintendo, 1983)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

- Atari 2600 (Atari, 1977)
- NES (Nintendo, 1983)
- Рисуют готовые изображения (спрайты) в указанных частях экрана

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1980-е: 8-битные спрайтовые консоли

- Atari 2600 (Atari, 1977)
- NES (Nintendo, 1983)
- Рисуют готовые изображения (спрайты) в указанных частях экрана
- Не так требовательны к объёмам памяти

# Краткая история real-time компьютерной графики

Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

# Краткая история real-time компьютерной графики

Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

- Sega Mega Drive (Sega, 1988)

# Sonic the Hedgehog (Sega, 1991)



# Краткая история real-time компьютерной графики

Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

- Sega Mega Drive (Sega, 1988)

# Краткая история real-time компьютерной графики

Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

- Sega Mega Drive (Sega, 1988)
- Super NES (Nintendo, 1990)

# Super Mario World (Nintendo, 1990)



# Краткая история real-time компьютерной графики

Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

- Sega Mega Drive (Sega, 1988)
- Super NES (Nintendo, 1990)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

- Sega Mega Drive (Sega, 1988)
- Super NES (Nintendo, 1990)
- Больше памяти, быстрее процессоры

# Краткая история real-time компьютерной графики

## Конец 1980-х: 16-битные консоли и персональные компьютеры

- Sega Mega Drive (Sega, 1988)
- Super NES (Nintendo, 1990)
- Больше памяти, быстрее процессоры
- Поддерживают больше спрайтов и цветов

# Краткая история real-time компьютерной графики

1990-е: Raycasting

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: Raycasting

- Алгоритм рисования двумерных уровней в 3D

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: Raycasting

- Алгоритм рисования двумерных уровней в 3D
- Wolfenstein 3D (id Software, 1992)

# Wolfenstein 3D



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: Raycasting

- Алгоритм рисования двумерных уровней в 3D
- Wolfenstein 3D (id Software, 1992)

## 1990-е: Raycasting

- Алгоритм рисования двумерных уровней в 3D
- Wolfenstein 3D (id Software, 1992)
- Doom (id Software, 1993)

# Doom



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: Raycasting

- Алгоритм рисования двумерных уровней в 3D
- Wolfenstein 3D (id Software, 1992)
- Doom (id Software, 1993)

## 1990-е: Raycasting

- Алгоритм рисования двумерных уровней в 3D
- Wolfenstein 3D (id Software, 1992)
- Doom (id Software, 1993)
- Quake (id Software, 1996)

# Quake



# Краткая история real-time компьютерной графики

1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)
- Разрешения экрана до 640x480, 24-bit цвет

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)
- Разрешения экрана до 640x480, 24-bit цвет
- Virtua Racing (Sega, 1992)

# Virtua Racing



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)
- Разрешения экрана до 640x480, 24-bit цвет
- Virtua Racing (Sega, 1992)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)
- Разрешения экрана до 640x480, 24-bit цвет
- Virtua Racing (Sega, 1992)
- Tomb Raider (Core Design, 1996)

# Tomb Raider



# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)
- Разрешения экрана до 640x480, 24-bit цвет
- Virtua Racing (Sega, 1992)
- Tomb Raider (Core Design, 1996)

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 1990-е: 32-битные консоли и компьютеры

- Графические процессоры с 3D графикой (Sony Playstation, Sega Saturn, Nintendo 64)
- Умеют рисовать полигоны с текстурами и примитивным освещением (порядка нескольких тысяч за кадр)
- Разрешения экрана до 640x480, 24-bit цвет
- Virtua Racing (Sega, 1992)
- Tomb Raider (Core Design, 1996)
- Crash Bandicoot (Naughty Dog, 1996)

# Crash Bandicoot



# Краткая история real-time компьютерной графики

2000-е и дальше

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 2000-е и дальше

- Растут мощности как CPU, так и GPU

# Краткая история real-time компьютерной графики

## 2000-е и дальше

- Растут мощности как CPU, так и GPU
- Растут доступные объёмы памяти

## 2000-е и дальше

- Растут мощности как CPU, так и GPU
- Растут доступные объёмы памяти
- Новые возможности GPU: шейдеры, рендеринг в текстуру, тесселяция

## 2000-е и дальше

- Растут мощности как CPU, так и GPU
- Растут доступные объёмы памяти
- Новые возможности GPU: шейдеры, рендеринг в текстуру, тесселяция
- Фотореалистичная графика

# Ghost of Tsushima (Sucker Punch Productions, 2020)



# Как использовать GPU?

GPU – Graphics Processing Unit

# Как использовать GPU? Графические API

GPU – Graphics Processing Unit

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)
  - DirectX 12 (Microsoft, 2015)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)
  - DirectX 12 (Microsoft, 2015)
- Metal (Apple, 2014)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)
  - DirectX 12 (Microsoft, 2015)
- Metal (Apple, 2014)
- Vulkan (Khronos Group, 2018)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)
  - DirectX 12 (Microsoft, 2015)
- Metal (Apple, 2014)
- Vulkan (Khronos Group, 2018)
- WebGPU (W3C, working draft)

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)
  - DirectX 12 (Microsoft, 2015)
- Metal (Apple, 2014)
- Vulkan (Khronos Group, 2018)
- WebGPU (W3C, working draft)

## Современные API

# Как использовать GPU? Графические API

## GPU – Graphics Processing Unit

- Вендор-специфичные API (1980е – 1990е)
- OpenGL (Silicon Graphics, 1992)
  - OpenGL 3.3 (Khronos Group, 2010)
- DirectX (Microsoft, 1995)
  - **DirectX 12** (Microsoft, 2015)
- **Metal** (Apple, 2014)
- **Vulkan** (Khronos Group, 2018)
- **WebGPU** (W3C, working draft)

## Современные API

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)
- DirectX 11 DirectCompute (Microsoft, 2008)

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)
- DirectX 11 DirectCompute (Microsoft, 2008)
- OpenCL (Khronos Group, 2009)

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

## GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)
- DirectX 11 DirectCompute (Microsoft, 2008)
- OpenCL (Khronos Group, 2009)
- OpenGL 4.3 Compute Shaders (Khronos Group, 2012)

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

## GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)
- DirectX 11 DirectCompute (Microsoft, 2008)
- OpenCL (Khronos Group, 2009)
- OpenGL 4.3 Compute Shaders (Khronos Group, 2012)
- Metal Compute Shaders (Apple, 2014)

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

## GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)
- DirectX 11 DirectCompute (Microsoft, 2008)
- OpenCL (Khronos Group, 2009)
- OpenGL 4.3 Compute Shaders (Khronos Group, 2012)
- Metal Compute Shaders (Apple, 2014)
- Vulkan Compute Shaders (Khronos Group, 2018)

# Как использовать GPU? API общего назначения (GPGPU):

## GPGPU – General-Purpose Graphics Processing Unit

- CUDA (Nvidia, 2007)
- DirectX 11 DirectCompute (Microsoft, 2008)
- OpenCL (Khronos Group, 2009)
- OpenGL 4.3 Compute Shaders (Khronos Group, 2012)
- Metal Compute Shaders (Apple, 2014)
- Vulkan Compute Shaders (Khronos Group, 2018)
- WebGPU Compute Shaders (W3C, 2021)

# Почему OpenGL 3.3?

## Почему OpenGL 3.3?

- *Широкая поддержка:* интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки

## Почему OpenGL 3.3?

- Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- Поддерживает все нужные нам возможности GPU

## Почему OpenGL 3.3?

- Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- Поддерживает все нужные нам возможности GPU
- +/- Кроссплатформенность

## Почему OpenGL 3.3?

- Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- Поддерживает все нужные нам возможности GPU
- +/- Кроссплатформенность (спасибо, Apple)

## Почему OpenGL 3.3?

- Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- Поддерживает все нужные нам возможности GPU
- +/- Кроссплатформенность (спасибо, Apple)
- Низкий порог входления (в сравнении с более современными API)

# Почему OpenGL 3.3?

- Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- Поддерживает все нужные нам возможности GPU
- +/- Кроссплатформенность (спасибо, Apple)
- Низкий порог вхождения (в сравнении с более современными API)
- Достаточно старый
  - Много вспомогательных библиотек
  - Известны *best practices*
  - Известны все грабли

# Почему OpenGL 3.3?

- Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- Поддерживает все нужные нам возможности GPU
- +/- Кроссплатформенность (спасибо, Apple)
- Низкий порог вхождения (в сравнении с более современными API)
- Достаточно старый
  - Много вспомогательных библиотек
  - Известны *best practices*
  - Известны все грабли (их много)

# Почему OpenGL 3.3?

## Почему OpenGL 3.3?

- Крупные движки переписывают на Vulkan / DirectX 12

## Почему OpenGL 3.3?

- Крупные движки переписывают на Vulkan / DirectX 12
- Не у всех есть на это ресурсы

# Почему OpenGL 3.3?

- Крупные движки переписывают на Vulkan / DirectX 12
- Не у всех есть на это ресурсы
- Не всем нужна самая крутая графика и производительность (работает в 60 fps – и ладно)

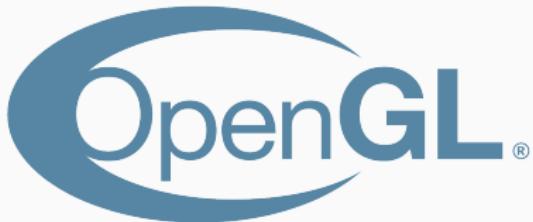
# Почему OpenGL 3.3?

- Крупные движки переписывают на Vulkan / DirectX 12
- Не у всех есть на это ресурсы
- Не всем нужна самая крутая графика и производительность (работает в 60 fps – и ладно)
- OpenGL всё ещё широко используется

# Почему OpenGL 3.3?

- Крупные движки переписывают на Vulkan / DirectX 12
- Не у всех есть на это ресурсы
- Не всем нужна самая крутая графика и производительность (работает в 60 fps – и ладно)
- OpenGL всё ещё широко используется
- Все основные концепции OpenGL (*шейдеры, атрибуты вершин, буферы с данными, текстуры, ...*) есть в любом графическом API ⇒ изучение OpenGL поможет в изучении более современных API

# История графических API: OpenGL 1.0 (1992)



```
for object in scene.objects:
    glBegin(GL_TRIANGLES)
        for triangle in object.triangles:
            for vertex in triangle.vertices:
                glColor3f(vertex.color)
                glNormal3f(vertex.normal)
                glVertex3f(vertex.position)
    glEnd(GL_TRIANGLES)
```

## История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Данные хранятся в памяти CPU

## История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Данные хранятся в памяти CPU
- Несколько OpenGL-вызовов на каждую вершину

## История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Данные хранятся в памяти CPU
- Несколько OpenGL-вызовов на каждую вершину
  - GPU становятся быстрее  $\Rightarrow$  основное время тратится не на рисование, а на накладные расходы самих OpenGL-вызовов

## История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Как менять положение объектов и камеры?

## История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Как менять положение объектов и камеры?
- $\Rightarrow$  Матрицы преобразований (`glMatrixMode`, `glLoadMatrix`)

## История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Как менять положение объектов и камеры?
- $\Rightarrow$  Матрицы преобразований (`glMatrixMode`, `glLoadMatrix`)
- **Fixed-function pipeline**: настраиваемая, но *не расширяемая* последовательность операций (применить матрицы к входным данным, нарисовать треугольник на экране, выполнить тест глубины, ...)

# История графических API: OpenGL 1.0 (1992)

- Как менять положение объектов и камеры?
- **Матрицы преобразований** (`glMatrixMode`, `glLoadMatrix`)
- **Fixed-function pipeline**: настраиваемая, но *не расширяемая* последовательность операций (применить матрицы к входным данным, нарисовать треугольник на экране, выполнить тест глубины, ...)
- **Асинхронный API**: команды выполняются на GPU когда-нибудь

# История графических API: OpenGL 1.1 (1997)

- **Vertex array** – спецификация формата и расположения вершин
  - Сказать, где находятся вершины одной командой `glVertexPointer`
  - Нарисовать все вершины одной командой `glDrawArrays`
  - Вершины всё ещё хранятся на CPU

## История графических API: OpenGL 1.1 (1997)

- **Vertex array** – спецификация формата и расположения вершин
  - Сказать, где находятся вершины одной командой `glVertexPointer`
  - Нарисовать все вершины одной командой `glDrawArrays`
  - Вершины всё ещё хранятся на CPU
- **Текстуры** – изображения в памяти GPU, натягиваемые на полигоны

# История графических API: OpenGL 1.1 (1997)

```
# на старте
for object in scene.objects:
    object.createVertexArray(object.vertices)
    object.createTexture()

# при рендеринге
for object in scene.objects:
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, object.texture)
    glBindVertexArray(object.vertexArray)
    glDrawArrays(object.vertexCount)
```

## История графических API: OpenGL 1.2 - 1.4 (1998 - 2002)

- В текстурах можно записать очень много интересного, помимо цвета: normal map, material map, bump map
- Хочется выполнять сложные вычисления на каждый пиксель

## История графических API: OpenGL 1.2 - 1.4 (1998 - 2002)

- В текстурах можно записать очень много интересного, помимо цвета: normal map, material map, bump map
- Хочется выполнять сложные вычисления на каждый пиксель
- $\Rightarrow$  **Texture environments** – зачатки программируемости GPU (шейдеров)

## История графических API: OpenGL 1.5 (2003)

- **Vertex buffer** – возможность хранить вершины в памяти GPU

# История графических API: OpenGL 1.5 (2003)

- **Vertex buffer** – возможность хранить вершины в памяти GPU

```
# на старте
for object in scene.objects:
    object.createVertexBuffer(object.vertices)
    object.createVertexArray(object.vertexBuffer)
    object.createTexture()

# при рендеринге
for object in scene.objects:
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, object.texture)
    glBindVertexArray(object.vertexArray)
    glDrawArrays(object.vertexCount)
```

## История графических API: OpenGL 2.0 (2004)

- Шейдеры – программы на С-подобном языке GLSL, компилируемые под конкретную GPU
  - Заменяют fixed-function pipeline
  - Необходимые части fixed-function pipeline остаются (растеризация, тест глубины, etc)

# История графических API: OpenGL 2.0 (2004)

```
# на старте
for object in scene.objects:
    object.createVertexBuffer(object.vertices)
    object.createVertexArray(object.vertexBuffer)
    object.createTexture()
    object.createShaderProgram()

# при рендеринге
for object in scene.objects:
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, object.texture)
    glBindVertexArray(object.vertexArray)
    glUseProgram(object.shaderProgram)
    glDrawArrays(object.vertexCount)
```

# История графических API: OpenGL 2.0 (2004)

```
# на старте
for object in scene.objects:
    object.createVertexBuffer(object.vertices)
    object.createVertexArray(object.vertexBuffer)
    object.createTexture()
    object.createShaderProgram()

# при рендеринге
for object in scene.objects:
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, object.texture)
    glBindVertexArray(object.vertexArray)
    glUseProgram(object.shaderProgram)
    glDrawArrays(object.vertexCount)
```

- Примерно так будет выглядеть наш код

## История графических API: OpenGL 3.0 (2008)

- Огромная часть API объявлена *deprecated*

## История графических API: OpenGL 3.0 (2008)

- Огромная часть API объявлена *deprecated*
  - Immediate-mode рисование – glBegin/glEnd
  - Хранение данных на CPU – glVertexPointer, ...
  - Матрицы преобразований – glLoadMatrix, ...

# История графических API: OpenGL 3.0 (2008)

- Огромная часть API объявлена *deprecated*
  - Immediate-mode рисование – glBegin/glEnd
  - Хранение данных на CPU – glVertexPointer, ...
  - Матрицы преобразований – glLoadMatrix, ...
- **Transform feedback** – возможность записать результат работы шейдеров обратно в вершинный буфер
  - Зачатки GPGPU

## История графических API: OpenGL 3.1 (2009)

- Объявленные deprecated возможности удалены

## История графических API: OpenGL 3.1 (2009)

- Объявленные deprecated возможности удалены
- **Instanced rendering** – нарисовать много копий одного объекта в разных местах одной командой

- Механизм профилей
  - Core profile
    - Обязан поддерживаться
    - Только функционал конкретной версии OpenGL
  - Compatibility profile
    - Не обязан поддерживаться
    - Функционал этой и всех предыдущих версий OpenGL

- Механизм профилей
  - Core profile
    - Обязан поддерживаться
    - Только функционал конкретной версии OpenGL
  - Compatibility profile
    - Не обязан поддерживаться
    - Функционал этой и всех предыдущих версий OpenGL
  - Мы будем использовать *core profile*

- Механизм профилей
  - Core profile
    - Обязан поддерживаться
    - Только функционал конкретной версии OpenGL
  - Compatibility profile
    - Не обязан поддерживаться
    - Функционал этой и всех предыдущих версий OpenGL
  - Мы будем использовать core profile
- Геометрические шейдеры – возможность менять тип геометрии и количество вершин на лету (используются для систем частиц, травы, etc)

- Шейдеры тесселяции – увеличивают детализацию геометрии на лету
  - Гораздо меньше возможностей, чем у геометрических шейдеров, зато быстрее

- Шейдеры тесселяции – увеличивают детализацию геометрии на лету
  - Гораздо меньше возможностей, чем у геометрических шейдеров, зато *быстрее*
- Indirect drawing – можно вычислять количество вершин и их расположение в памяти на лету на GPU, и использовать вычисленные значения для команд рисования

- **Compute шейдеры** – настоящее GPGPU внутри OpenGL
- Проработка и детализация API
- **Атомарные операции** в шейдерах
- Вливание расширений в стандарт OpenGL
- [khronos.org/opengl/wiki/History\\_of\\_OpenGL](http://khronos.org/opengl/wiki/History_of_OpenGL)



- 700 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник



- 700 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник
- Крайне низкоуровневый API
- Последовательности команд для выполнения на GPU (command queues) в явном виде
  - Можно распараллелить генерацию command queues на несколько CPU



- 700 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник
- Крайне низкоуровневый API
- Последовательности команд для выполнения на GPU (command queues) в явном виде
  - Можно распараллелить генерацию command queues на несколько CPU
- Похож на DirectX 12, Metal
- [vulkan-tutorial.com](http://vulkan-tutorial.com)



- 200 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник



- 200 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник
- Ориентирован на web, но есть реализации под десктоп (`wgpu-native`)



- 200 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник
- Ориентирован на web, но есть реализации под десктоп (`wgpu-native`)
- Средне низкоуровневый API: сложнее (но приятнее), чем OpenGL, и легче, чем Vulkan
- Хороший выбор для изучения после OpenGL
- [sotrh.github.io/learn-wgpu](https://sotrh.github.io/learn-wgpu)

# Разновидности OpenGL

- OpenGL

# Разновидности OpenGL

- OpenGL
- OpenGL ES (Embedded Systems)
  - OpenGL ES 1.0 ≈ OpenGL 1.3
  - OpenGL ES 2.0 ≈ OpenGL 2.0
  - OpenGL ES 3.0 ≈ OpenGL 3.0

# Разновидности OpenGL

- OpenGL
- OpenGL ES (Embedded Systems)
  - OpenGL ES 1.0 ≈ OpenGL 1.3
  - OpenGL ES 2.0 ≈ OpenGL 2.0
  - OpenGL ES 3.0 ≈ OpenGL 3.0
- WebGL
  - WebGL 1.0 ≈ OpenGL ES 2.0
  - WebGL 2.0 ≈ OpenGL ES 3.0

# Разновидности OpenGL

- OpenGL
- OpenGL ES (Embedded Systems)
  - OpenGL ES 1.0 ≈ OpenGL 1.3
  - OpenGL ES 2.0 ≈ OpenGL 2.0
  - OpenGL ES 3.0 ≈ OpenGL 3.0
- WebGL
  - WebGL 1.0 ≈ OpenGL ES 2.0
  - WebGL 2.0 ≈ OpenGL ES 3.0
- OpenGL SC (Safety Critical)
  - Убранны любые способы отстрелить себе ногу, в ущерб производительности

# Что такое OpenGL?

- Не библиотека!
- Спецификация API (документ) на языке C
  - Описание констант-перечислений (тэгов)
  - Описание сигнатур функций и их семантики

# Что такое OpenGL?

- Не библиотека!
- Спецификация API (документ) на языке C
  - Описание констант-перечислений (тэгов)
  - Описание сигнатур функций и их семантики
- OpenGL 4.6 Specification

# Что такое реализация OpenGL?

# Что такое реализация OpenGL?

Заголовочный файл, поставляемый системой или драйвером

- Определение типов, e.g. `typedef unsigned int GLenum;`
- Определение констант, e.g. `#define GL_TEXTURE_2D 0x0DE1`
- Объявление функций, e.g.  
`void glBindTexture(GLenum target,GLuint texture);`

# Что такое реализация OpenGL?

# Что такое реализация OpenGL?

**Бинарная реализация** объявленных функций (обычно – динамическая библиотека), поставляемая системой и/или драйвером

- Может содержать *непосредственную реализацию OpenGL* как часть драйвера и общаться с GPU
- Может быть *промежуточным звеном*, маршрутизирующим вызов до драйвера
- Может быть *заглушкой*

# Что такое реализация OpenGL?

- Заголовочный файл
  - Linux: GL/gl.h – до OpenGL 1.3

# Что такое реализация OpenGL?

- Заголовочный файл
  - Linux: `GL/gl.h` – до OpenGL 1.3
  - Windows: `GL/gl.h` – до OpenGL 1.1

# Что такое реализация OpenGL?

- Заголовочный файл
  - Linux: GL/gl.h – до OpenGL 1.3
  - Windows: GL/gl.h – до OpenGL 1.1
  - MacOS: OpenGL/gl.h – до OpenGL 2.1
    - Не OpenGL/OpenGL.h
  - Все платформы: GL/glext.h вместе с  
`#define GL_GLEXT_PROTOTYPES` – до OpenGL 4.6

# Что такое реализация OpenGL?

- Динамическая библиотека
  - Linux: libGL.so
  - Windows: opengl32.dll
  - MacOS: OpenGL framework

# Что такое реализация OpenGL?

- Динамическая библиотека
  - Linux: libGL.so
  - Windows: opengl32.dll
  - MacOS: OpenGL framework
- Может содержать функции *не* всех версий OpenGL
  - Под Linux обычно содержит
- Остальные функции OpenGL нужно динамически загружать специальными для платформы средствами
- ⇒ Библиотеки-загрузчики OpenGL

# Загрузчики OpenGL

- С и C++ specific, для других языков обычно встроено в обёртку над OpenGL
- [khronos.org/opengl/wiki/OpenGL\\_Loading\\_Library](http://khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Loading_Library)
- Обычно содержат код, автоматически сгенерированный по XML-спецификации OpenGL
- Есть мой, основанный на `glLoadGen` (который перестали поддерживать):  
[github.com/lisyarus/opengl-loader-generator](https://github.com/lisyarus/opengl-loader-generator)
- Мы будем использовать [GLEW](#)

# Контекст OpenGL

- Необходим для вызова любой функции OpenGL
- Привязан к конкретной реализации OpenGL
- Привязан к конкретным версии и профилю OpenGL
- Привязан к экрану / окну оконной системы / изображению в памяти
- Хранит текущее глобальное состояние OpenGL
- [khronos.org/opengl/wiki/OpenGL\\_Context](https://www.khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Context)
- Создаётся специфичными для платформы средствами
- ⇒ Библиотеки, создающие контекст OpenGL

## Библиотеки, создающие контекст OpenGL

- Обычно привязывают контекст к окну и умеют обрабатывать события оконной системы
- GLUT – устаревшая, плохой интерфейс
- GLFW – простая, широко распространённая
- [SDL2](#) – умеет загружать изображения, выводить звук, и другое
- `open.gl/context`

# Как начать работать с OpenGL?

```
window = createWindow(title)
context = createGLContext(window, version, profile)
context.makeCurrent()
loadGLFunctions()
# тут можно работать с OpenGL!
```

# Литература, ссылки

- Realtime графика
  - Computer Graphics: Principles and Practice – книжка начального уровня
  - Real-Time Rendering (4th edition) – обзор передовых алгоритмов индустрии
  - GPU Gems 1, 2, 3 – журнал про техники и алгоритмы
- OpenGL
  - [khronos.org/opengl/wiki](http://khronos.org/opengl/wiki) – подробное изложение всех аспектов OpenGL
  - [docs.gl](http://docs.gl) – удобная документация по отдельным функциям
  - [learnopengl.com](http://learnopengl.com) – уроки по отдельным темам