

Компьютерная графика

Лекция 1: Введение в курс

2021

- ▶ Лисица Никита Игоревич
- ▶ lisyarus@gmail.com
- ▶ +79522767050

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf

github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf

github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на занятии или отправкой кода

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на занятии или отправкой кода
- ▶ Домашние задания:

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на занятии или отправкой кода
- ▶ Домашние задания:
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на занятии или отправкой кода
- ▶ Домашние задания:
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на практическом занятии

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на занятии или отправкой кода
- ▶ Домашние задания:
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на практическом занятии
- ▶ Финальный проект
 - ▶ В относительно свободной форме

Как устроен курс

github.com/lisyarus/graphics-course-slides/2022/pdf
github.com/lisyarus/graphics-course-practice/2022

- ▶ Лекции (слайды в github-репозитории)
- ▶ Практики:
 - ▶ Код-заготовка на C++ (в github-репозитории)
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на занятии или отправкой кода
- ▶ Домашние задания:
 - ▶ Слайды с заданием (в github-репозитории)
 - ▶ Сдача на практическом занятии
- ▶ Финальный проект
 - ▶ В относительно свободной форме
 - ▶ Сдача в конце курса

Баллы

Баллы

- ▶ 25 баллов – работа на практиках

Баллы

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

Баллы

- ▶ 25 баллов – работа на практиках
 - ▶ 1 балл – получилось хоть что-нибудь
 - ▶ 2 балл – получилось всё
 - ▶ 3 балла – получилось всё + доп. задание
 - ▶ Можно прислать в течение 3х дней после практики (до 24:00 среды)

Баллы

- ▶ 25 баллов – работа на практиках
 - ▶ 1 балл – получилось хоть что-нибудь
 - ▶ 2 балл – получилось всё
 - ▶ 3 балла – получилось всё + доп. задание
 - ▶ Можно прислать в течение 3х дней после практики (до 24:00 среды)
 - ▶ 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 в течение 3х дней после практики (до 24:00 среды)
 - ▶ 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 в течение 3х дней после практики (до 24:00 среды)
 - ▶ 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 в течение 3х дней после практики (до 24:00 среды)
 - ▶ Можно прислать позже со штрафом в 1 балл
- ▶ 15 баллов – каждое из 3х домашних заданий
 - ▶ Можно получить неполный балл
- ▶ 50+ 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: Е
 - ▶ 60-69 баллов: D
 - ▶ 70-79 баллов: С
 - ▶ 80-89 баллов: В
 - ▶ 90-100 баллов: А

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)



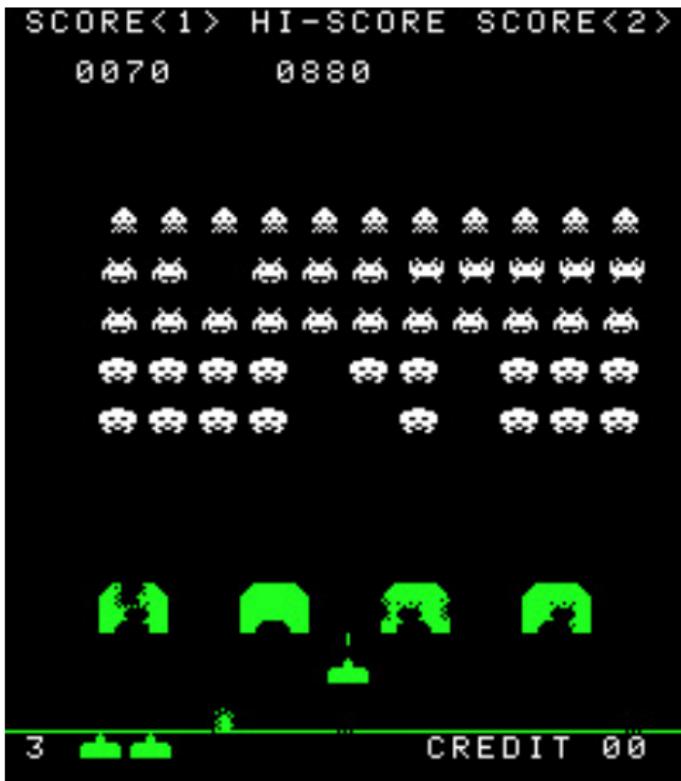
Klaus (2019)



Что такое компьютерная графика?

- ▶ Кинематограф, мультипликация
- ▶ Компьютерные игры

Space Invaders (1978)



Doom (1993)



Grand Theft Auto: Vice City (2002)



Civilization V (2010)



The Witcher 3: Wild Hunt (2015)



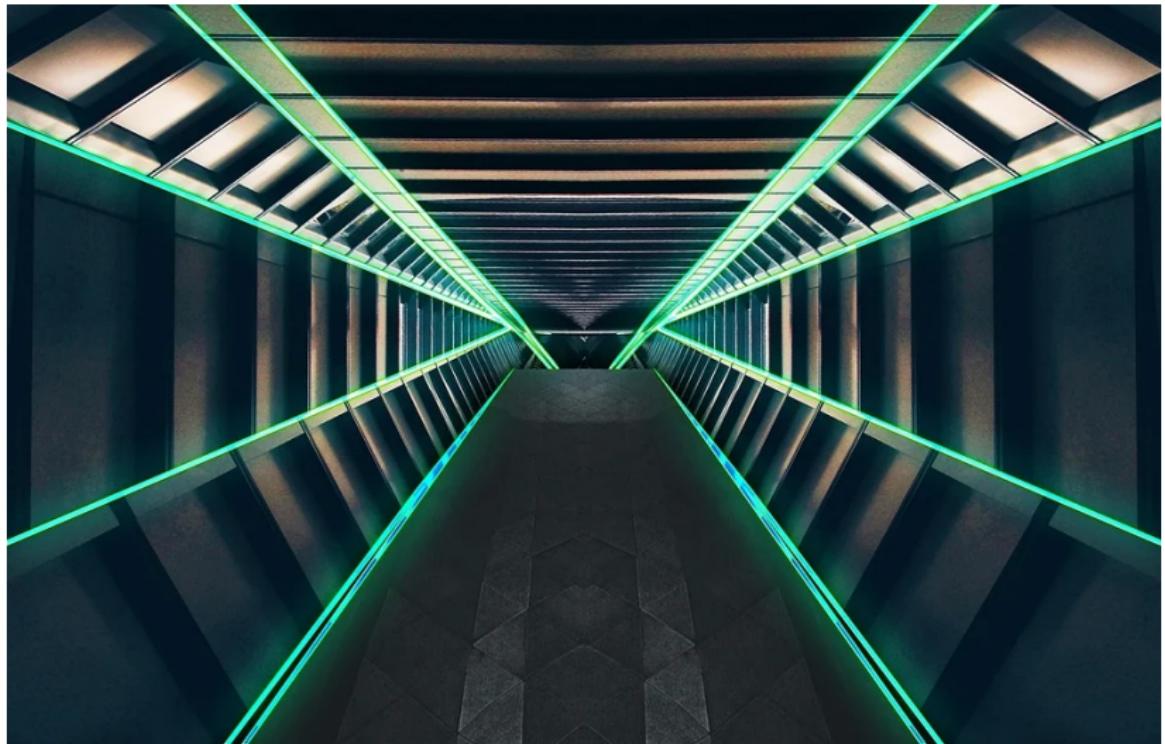
Cyberpunk 2077 (2020)



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 <input type="text" value="mm/dd/yyyy"/>	Label title <input type="text" value="Placeholder text"/>	Label title <input type="text" value="Placeholder text"/>																																																	
Disabled button	Hover <input type="text" value="mm/dd/yyyy"/>	Hover <input type="text" value="Placeholder text"/>	Hover <input type="text" value="Placeholder text"/>																																																	
Toggle button	Disabled <input type="text" value="mm/dd/yyyy"/>	Disabled <input type="text" value="Placeholder text"/>	Disabled <input type="text" value="Placeholder text"/>																																																	
Checkbox	Disabled <input type="checkbox"/>	Disabled	Typing <input type="text" value="This is text."/>																																																	
	Disabled <input checked="" type="checkbox"/>	Microsoft	Password <input type="password" value="*****"/>																																																	
	Disabled <input type="checkbox"/>	Windows																																																		
	Disabled <input type="checkbox"/>	Office																																																		
Radio button	February 2018 <table border="1"><thead><tr><th>Sun</th><th>Mon</th><th>Tue</th><th>Wed</th><th>Thu</th><th>Fri</th><th>Sat</th></tr></thead><tbody><tr><td>31</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td></tr><tr><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td></tr><tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td></tr><tr><td>28</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td></tr></tbody></table>	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Toggle switch	
Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat																																														
31	1	2	3	4	5	6																																														
7	8	9	10	11	12	13																																														
14	15	16	17	18	19	20																																														
21	22	23	24	25	26	27																																														
28	1	2	3	4	5	6																																														
7	8	9	10	11	12	13																																														
	Unchecked <input type="radio"/>	Microsoft	Off <input type="button" value="Off"/>																																																	
	Checked <input checked="" type="radio"/>	Windows	Disabled Off <input type="button" value="Disabled Off"/>																																																	
	Third state <input type="radio"/>	Office	On <input type="button" value="On"/>																																																	
	Disabled <input type="radio"/>		Disabled On <input type="button" value="Disabled On"/>																																																	

Europa Universalis 4

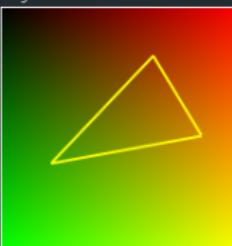


Dear ImGui

▼ Example: Custom rendering

Clear Undo

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



E028E4: 00 00 F8 44 00 40 7E 44 ...D, @-D
E028EC: 06 33 88 3C 00 00 A0 40 ...3,<...@
E028F4: 18 BA DE 00 08 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 08 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 08 01 00 00
E0293C: 41 00 00 00 43 00 00 00 A...C...
E02944: 56 00 00 00 58 00 00 00 E...X...Console
E0294C: 59 00 00 00 5A 00 00 00 Y...Z...
E02954: 00 00 88 3E CD CC 4C 3D #CLASSIFY implements a console with basic coloring,
E0295C: 00 00 00 00 A4 28 E0 80 #HELP, and history. A more elaborate implementation may
store entries along with extra data such as timestamp,
8 rows Range E028E4..E03C93 iter, etc.

use functions such as IsItemHovered() on
AAA BBB CCC EEE LEVERAGE BUZZWORD
DDD ACTION REACTION
► Text Baseline Alignment
► Scrolling

Enter 'HELP' for help, press TAB to use text completion.
Add Dummy Text Add Dummy Error Clear
Filter ("incl,-excl") ("error")

▼ 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.

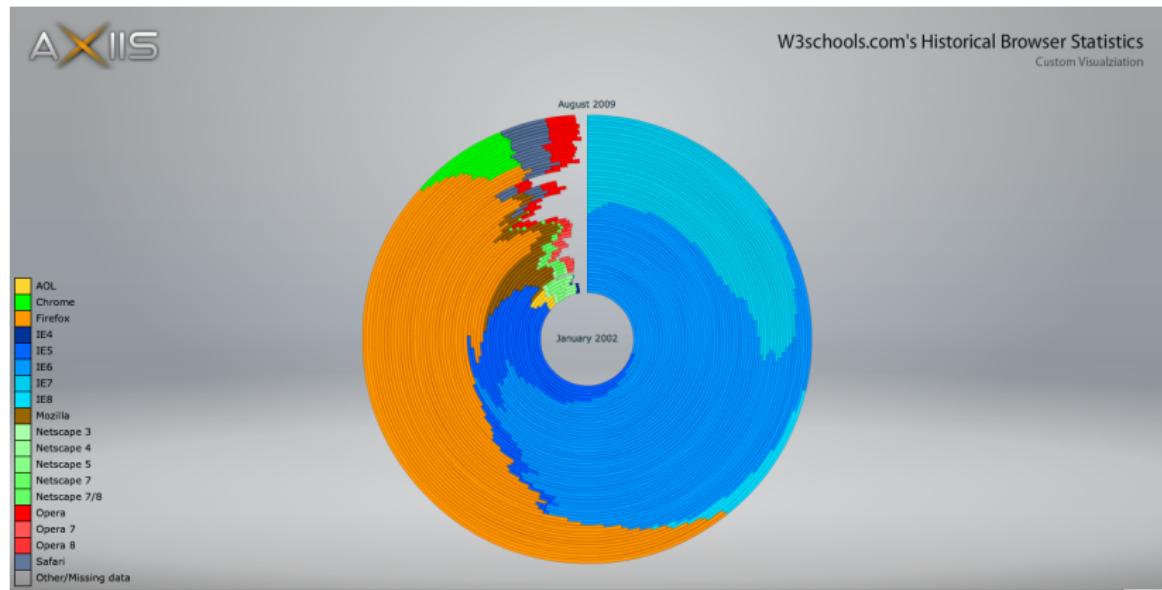
0 some text
some more text
display very important message here!
[error] something went wrong
Possible matches:
- HELP
- HISTORY
HELP
Commands:
- HELP
- HISTORY
- CLEAR
- CLASSIFY
hello, imgui world!
Unknown command: 'hello, imgui world!'

hello, imgui world! Input

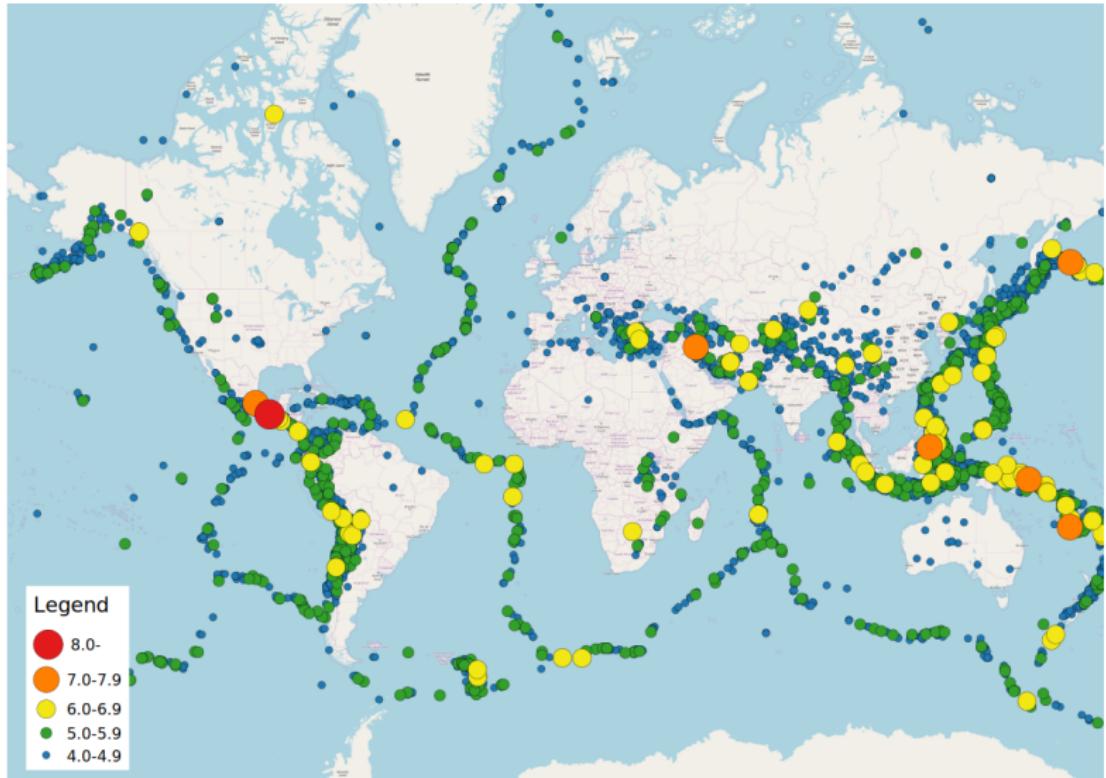
Что такое компьютерная графика?

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

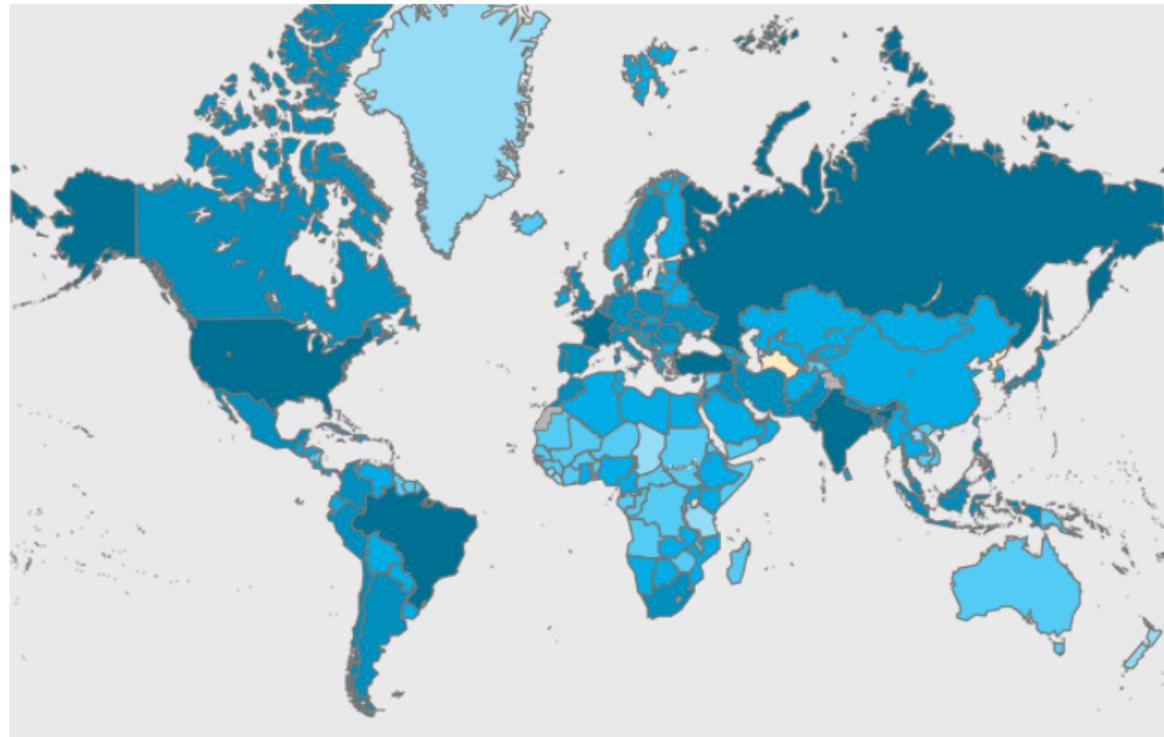
Популярность браузеров в 2002-2009



Карта землетрясений



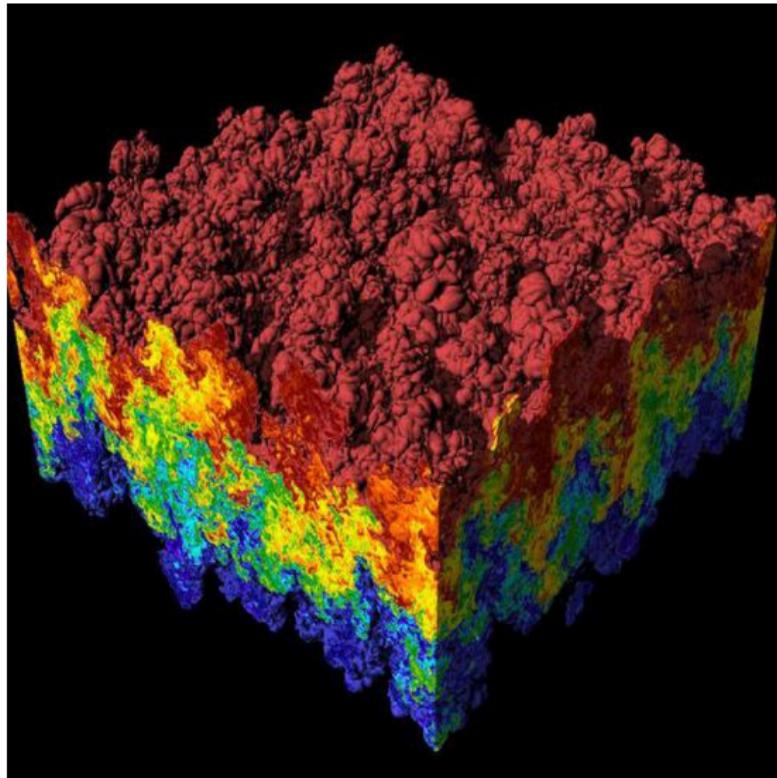
Количество случаев заражения COVID-19



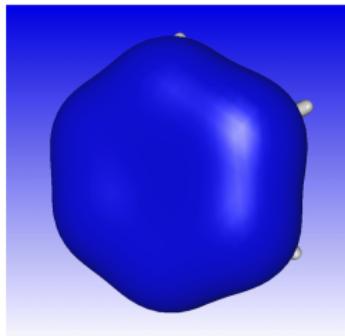
Что такое компьютерная графика?

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

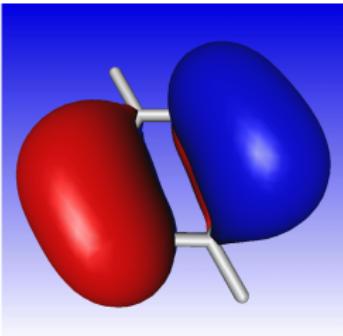
Неустойчивость Рэлея — Тейлора



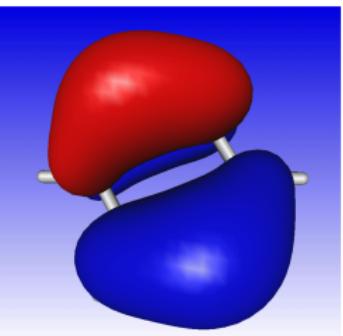
Молекулярные орбитали бензола



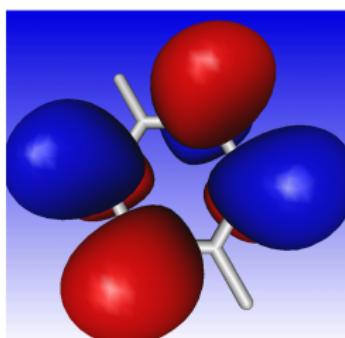
16



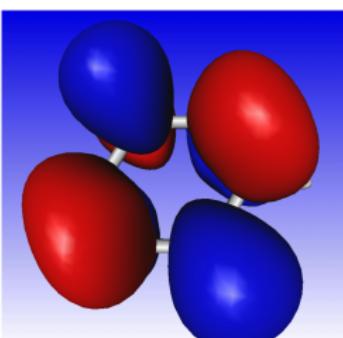
20



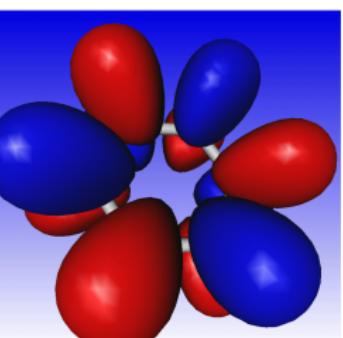
21



22

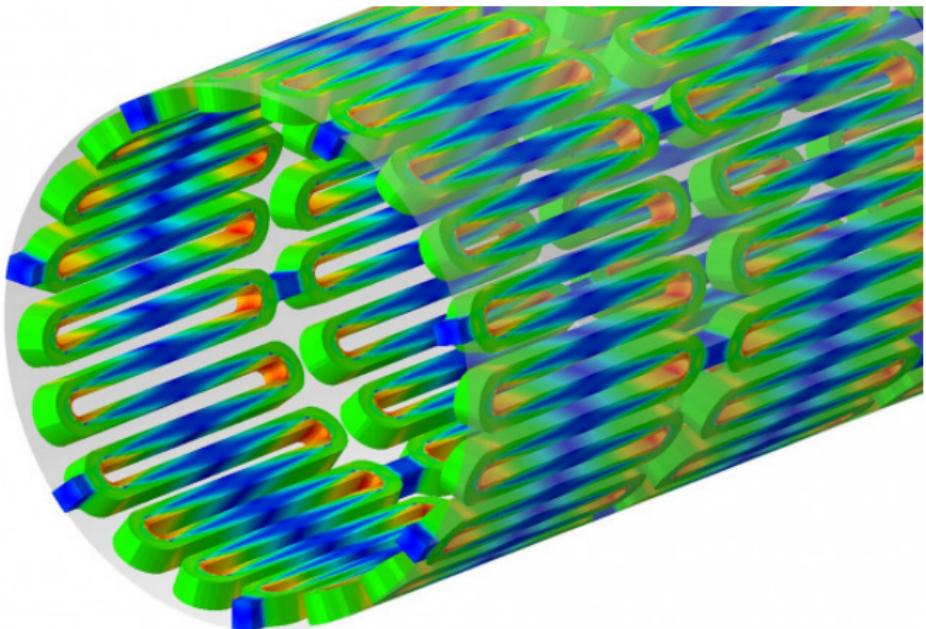


23



30

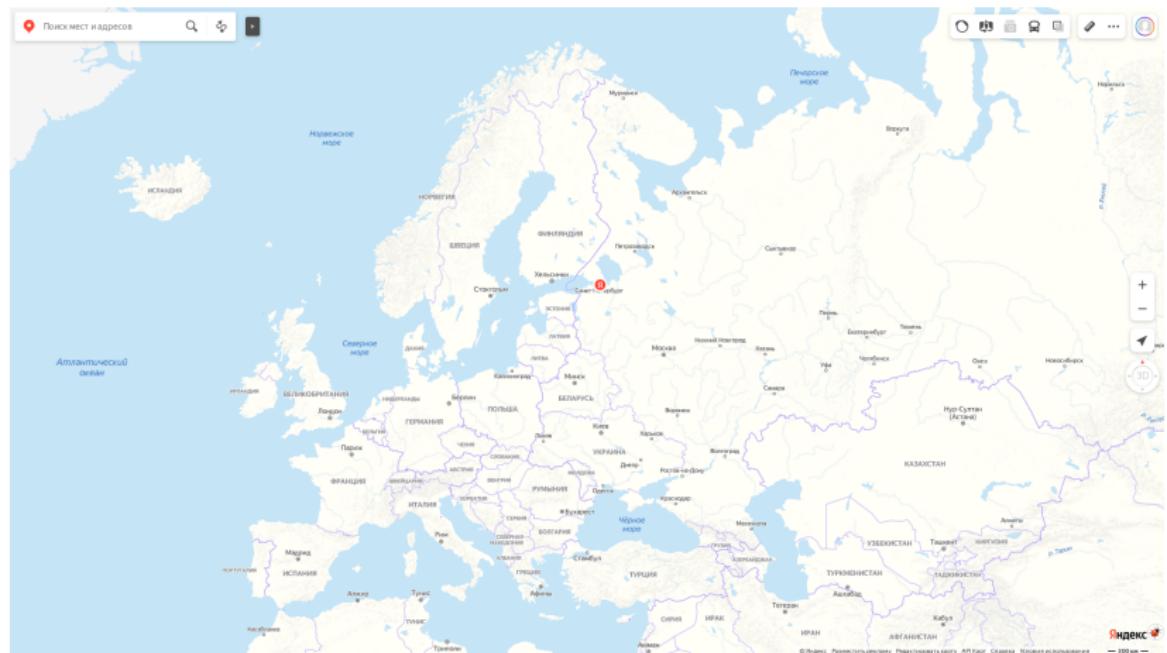
Симуляция напряжений в стенке методом конечных элементов



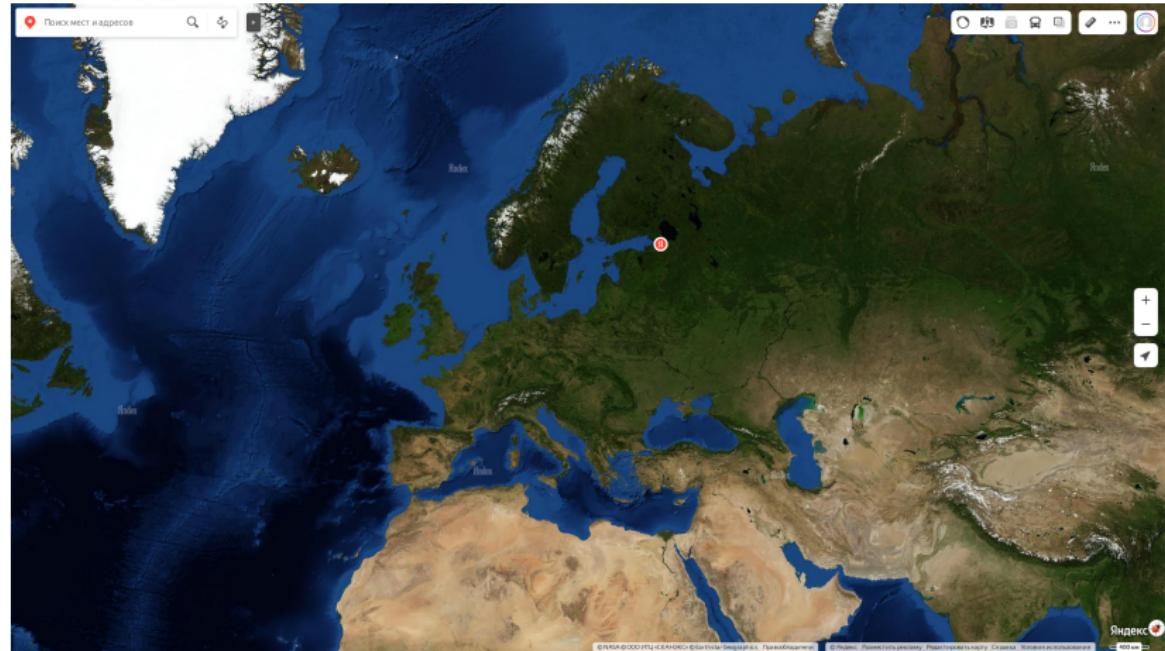
Что такое компьютерная графика?

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

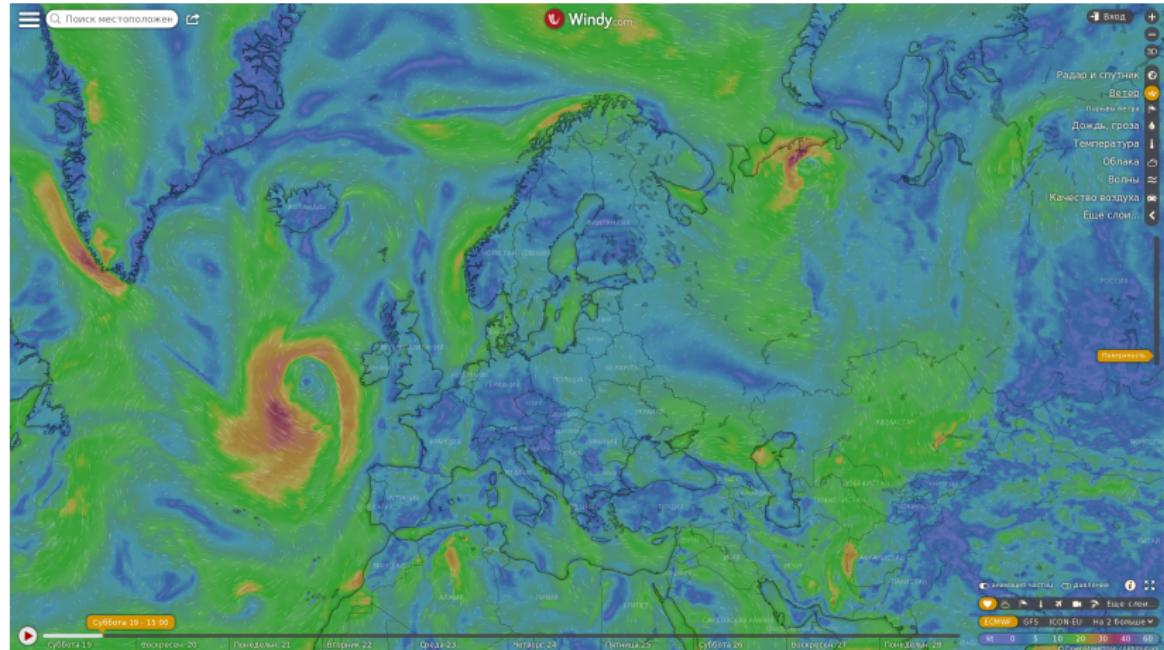
Схематическая карта



Спутниковая карта



Карта погоды



Что такое компьютерная графика?

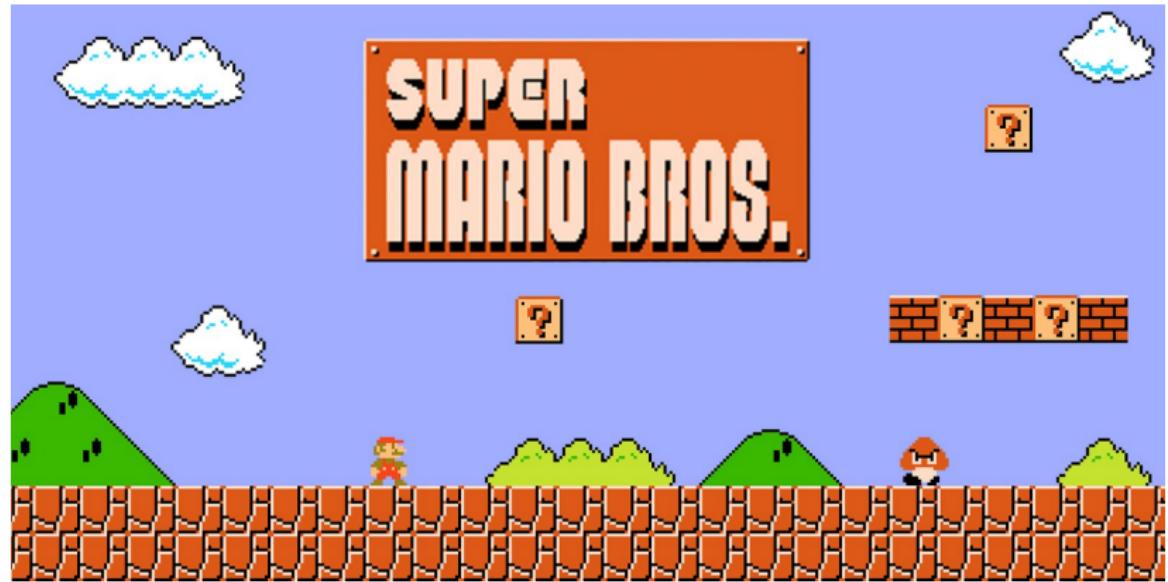
- ▶ Кинематограф, мультипликация
- ▶ Компьютерные игры
- ▶ Рисунки, concept art
- ▶ Графический интерфейс
- ▶ Визуализация данных
- ▶ Научная визуализация
- ▶ Карты
- ▶ И т.д.

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

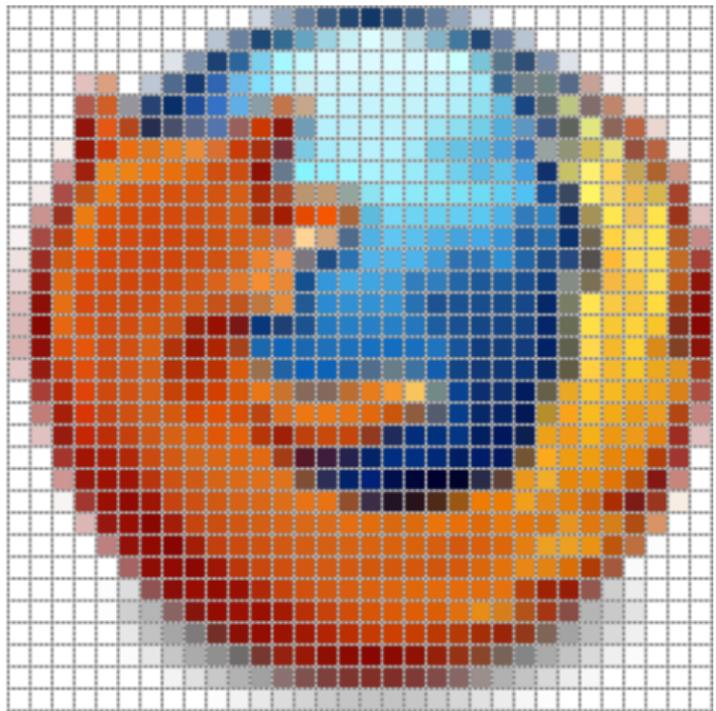
Грубая и неточная классификация

- ▶ 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 реализовывать графические движки

Чем мы будем заниматься?

- ▶ Как реализовывать графические движки
- ▶ Как реализовывать графические эффекты

Чем мы будем заниматься?

- ▶ Как реализовывать графические движки
- ▶ Как реализовывать графические эффекты
- ▶ Как их оптимизировать

Чем мы будем заниматься?

- ▶ Как реализовывать графические движки
- ▶ Как реализовывать графические эффекты
- ▶ Как их оптимизировать
- ▶ Graphics engineer

Где это пригодится?

Где это пригодится?

- ▶ Разработка игр и движков

Где это пригодится?

- ▶ Разработка игр и движков
- ▶ Разработка инструментов для художников/дизайнеров/архитекторов/etc

Где это пригодится?

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

Где это пригодится?

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

Где это пригодится?

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

Где это пригодится?

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

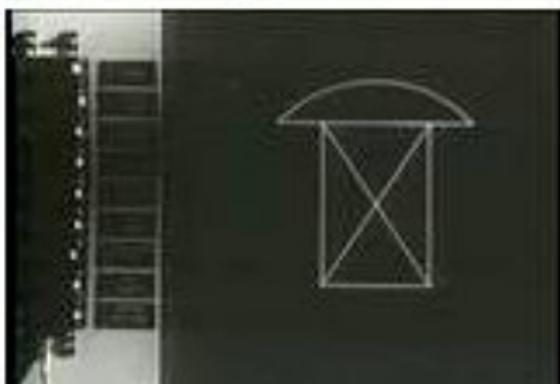
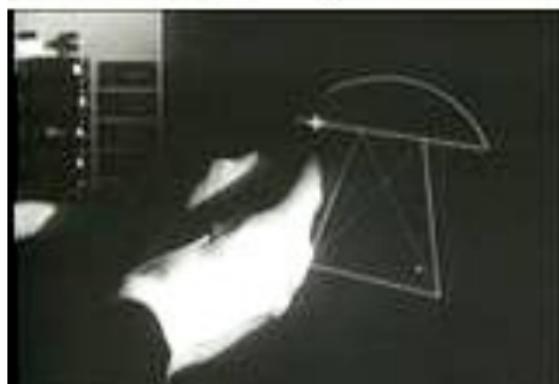
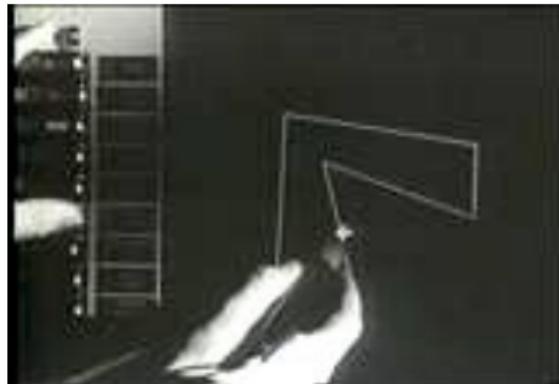
- ▶ Tennis For Two (1958)
- ▶ Spacewar! (1962, PDP-1)

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

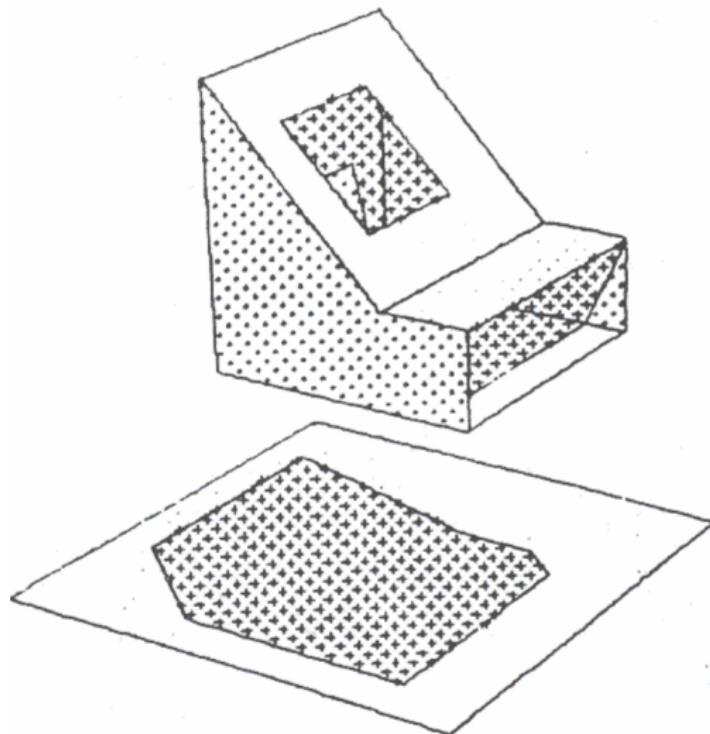
- ▶ Tennis For Two (1958)
- ▶ Spacewar! (1962, PDP-1)
- ▶ Sketchpad (1963, TX-2, световое перо)

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)

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)
- ▶ Векторная графика довольно плохого качества: линии одного цвета
- ▶ Компьютеры довольно слабые (TX-2 занимал большую комнату)

Краткая история real-time компьютерной графики

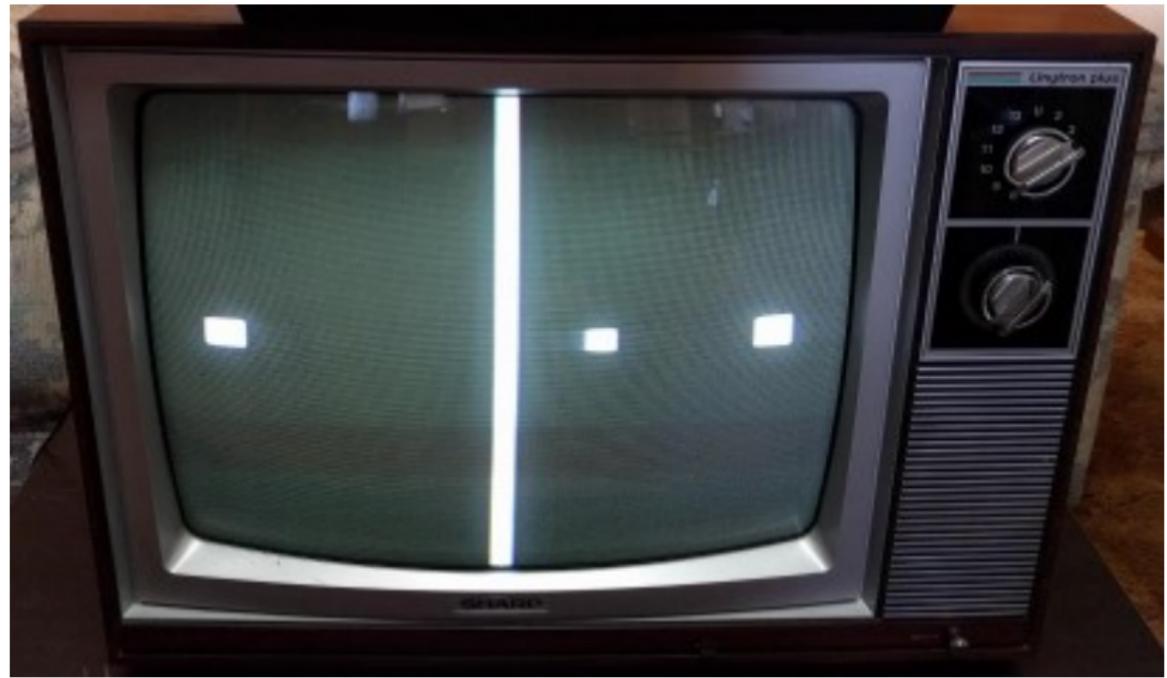
1970-е: Аркадные игры

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

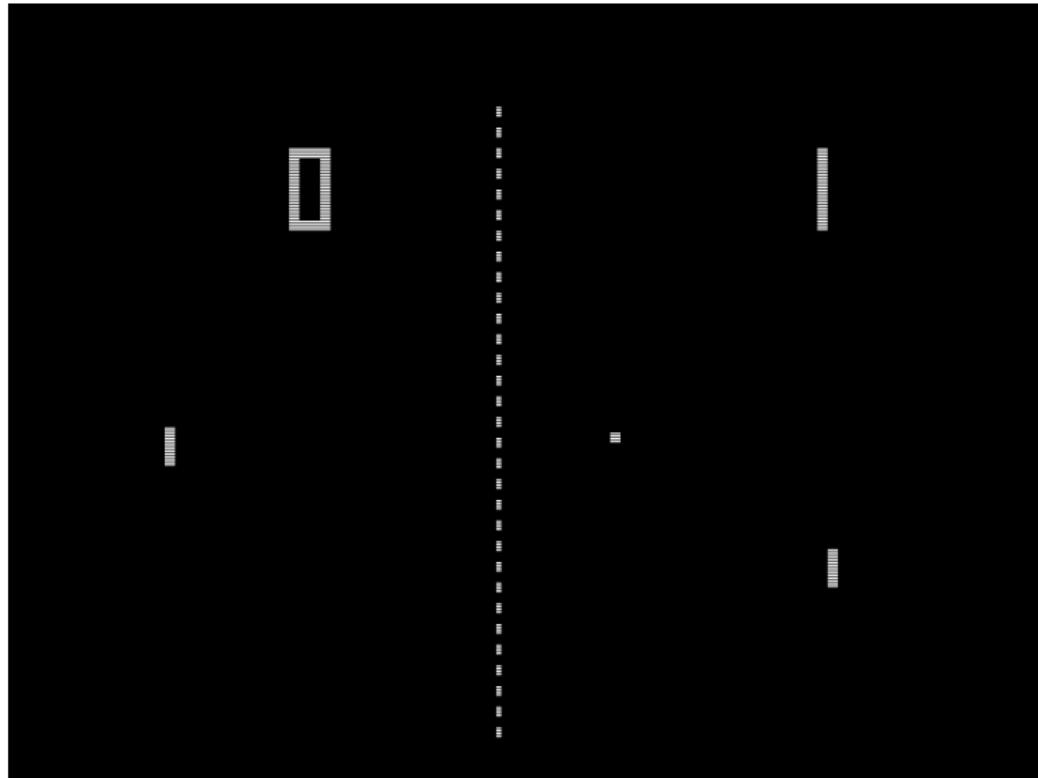
1970-е: Аркадные игры

- ▶ 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

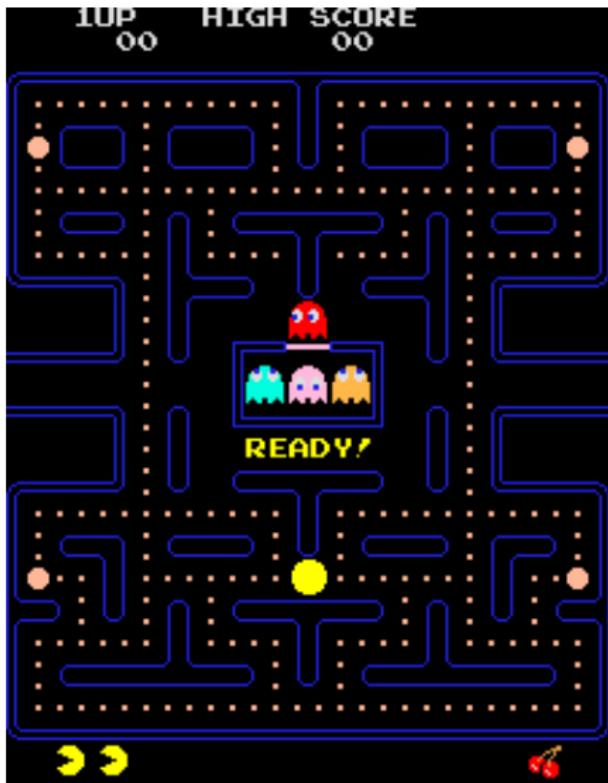
- ▶ Magnavox Odyssey (Magnavox, 1972) – первая игровая консоль, подключалась к телевизору (CRT)
- ▶ Pong (Atari, 1972) – одна из первых аркадных игр
- ▶ Speed Race (Taito, 1974)
- ▶ Gun Fight (Taito, 1975)
- ▶ Space Invaders (Taito, 1978)

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

Space Invaders

- ▶ Intel 8080, 8-bit, 2Mhz

Space Invaders

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

Space Invaders

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

Space Invaders

- ▶ 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

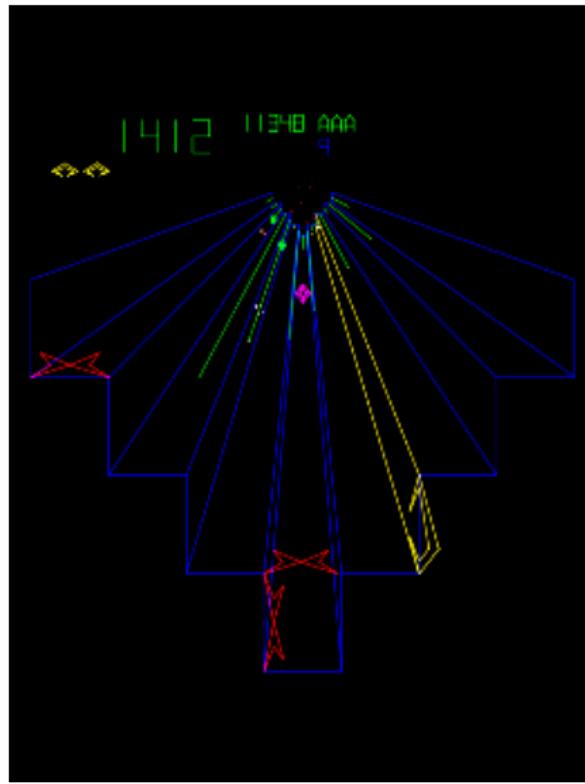
- ▶ Asteroids (Atari, 1979)

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)

Краткая история real-time компьютерной графики

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)

Краткая история real-time компьютерной графики

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 2010-е

Краткая история real-time компьютерной графики

2000-е и 2010-е

- ▶ Растут мощности как CPU, так и GPU

Краткая история real-time компьютерной графики

2000-е и 2010-е

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

Краткая история real-time компьютерной графики

2000-е и 2010-е

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

Краткая история real-time компьютерной графики

2000-е и 2010-е

- ▶ 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)



О треугольниках

Почему основным примитивом рисования стал треугольник?

О треугольниках

Почему основным примитивом рисования стал треугольник?

Более сложные геометрические фигуры (круг, многоугольник, и т.д.):

О треугольниках

Почему основным примитивом рисования стал треугольник?

Более сложные геометрические фигуры (круг, многоугольник, и т.д.):

- ▶ Сложно нарисовать на экране

О треугольниках

Почему основным примитивом рисования стал треугольник?
Более сложные геометрические фигуры (круг, многоугольник, и т.д.):

- ▶ Сложно нарисовать на экране
- ▶ Сложно интерполировать атрибуты (накладывать цвет и текстуру, вычислять освещение)

О треугольниках

Плюсы треугольника:

О треугольниках

Плюсы треугольника:

- ▶ Образ под действием перспективной проекции – тоже треугольник

О треугольниках

Плюсы треугольника:

- ▶ Образ под действием перспективной проекции – тоже треугольник
- ▶ Есть единственный разумный способ интерполяции (линейная, с барицентрическими координатами)

О треугольниках

Плюсы треугольника:

- ▶ Образ под действием перспективной проекции – тоже треугольник
- ▶ Есть единственный разумный способ интерполяции (линейная, с барицентрическими координатами)
- ▶ Позволяет рисовать спрайты (прямоугольник – два треугольника)

О треугольниках

Плюсы треугольника:

- ▶ Образ под действием перспективной проекции – тоже треугольник
- ▶ Есть единственный разумный способ интерполяции (линейная, с барицентрическими координатами)
- ▶ Позволяет рисовать спрайты (прямоугольник – два треугольника)
- ▶ Позволяет рисовать многоугольники (посредством триангуляции)

О треугольниках

Плюсы треугольника:

- ▶ Образ под действием перспективной проекции – тоже треугольник
- ▶ Есть единственный разумный способ интерполяции (линейная, с барицентрическими координатами)
- ▶ Позволяет рисовать спрайты (прямоугольник – два треугольника)
- ▶ Позволяет рисовать многоугольники (посредством триангуляции)
- ▶ Позволяет рисовать линии (превращая их в тонкие многоугольники)

О треугольниках

Плюсы треугольника:

- ▶ Образ под действием перспективной проекции – тоже треугольник
- ▶ Есть единственный разумный способ интерполяции (линейная, с барицентрическими координатами)
- ▶ Позволяет рисовать спрайты (прямоугольник – два треугольника)
- ▶ Позволяет рисовать многоугольники (посредством триангуляции)
- ▶ Позволяет рисовать линии (превращая их в тонкие многоугольники)
- ▶ Позволяет рисовать более сложные фигуры (аппроксимируя)

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, в разработке)

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, в разработке)

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, в разработке)

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)

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 всё, что нам нужно

Почему OpenGL 3.3?

- ▶ Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- ▶ Поддерживает всё, что нам нужно
- ▶ +/- Кроссплатформенность

Почему OpenGL 3.3?

- ▶ Широкая поддержка: интегрированные GPU, встраиваемые устройства, телефоны, web, некоторые игровые приставки
- ▶ Поддерживает всё, что нам нужно
- ▶ +/- Кроссплатформенность (спасибо, Apple)

Почему OpenGL 3.3?

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

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)

```
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)
```

- ▶ Данные хранятся в памяти CPU

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)
```

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

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)
```

- ▶ Данные хранятся в памяти CPU
- ▶ Несколько OpenGL-вызовов на каждую вершину
 - ▶ GPU становятся быстрее ⇒ 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?
- ▶ ⇒ Матрицы преобразований
(`glMatrixMode()`, `glLoadMatrix()`)

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, ...)

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
- ▶ ⇒ 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

История графических API: OpenGL 3.2 (2009)

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

История графических API: OpenGL 3.2 (2009)

- ▶ 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

История графических API: OpenGL 3.2 (2009)

- ▶ 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)

История графических API: OpenGL 4.0 (2010)

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

История графических API: OpenGL 4.0 (2010)

- ▶ 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

История графических API: OpenGL 4.1 - 4.7 (2010 - 2017)

- ▶ Compute shaders – настоящее GPGPU внутри OpenGL
- ▶ Проработка и детализация API
- ▶ Атомарные операции в шейдерах
- ▶ Вливание расширений в стандарт OpenGL
- ▶ khronos.org/opengl/wiki/History_of_OpenGL

История графических API: Vulkan 1.1 (2018)

- ▶ 700 строк кода, чтобы нарисовать один треугольник

История графических API: Vulkan 1.1 (2018)

- ▶ 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

История графических API: Vulkan 1.1 (2018)

- ▶ 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

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)
 - ▶ Убраны 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 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?

- ▶ 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);`
- ▶ 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 вызовы 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 не содержать функции всех версий OpenGL
 - ▶ Под Linux обычно содержит
- ▶ Остальные функции OpenGL нужно динамически загружать специфичными 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_Library
- ▶ Обычно содержат код, автоматически сгенерированный по XML-спецификации OpenGL
- ▶ Есть мой, основанный на glLoadGen (который перестали поддерживать): 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
- ▶ 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
- ▶ 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 - подробное изложение всех аспектов OpenGL
 - ▶ docs.gl - удобная документация по отдельным функциям
 - ▶ learnopengl.com - уроки по отдельным темам