Компьютерная графика. Современные технологии компьютерной графики и рендеринга

Лекция 2

02.04.02 ФИИТ

Разработка мобильных приложений и компьютерных игр

2025-2026

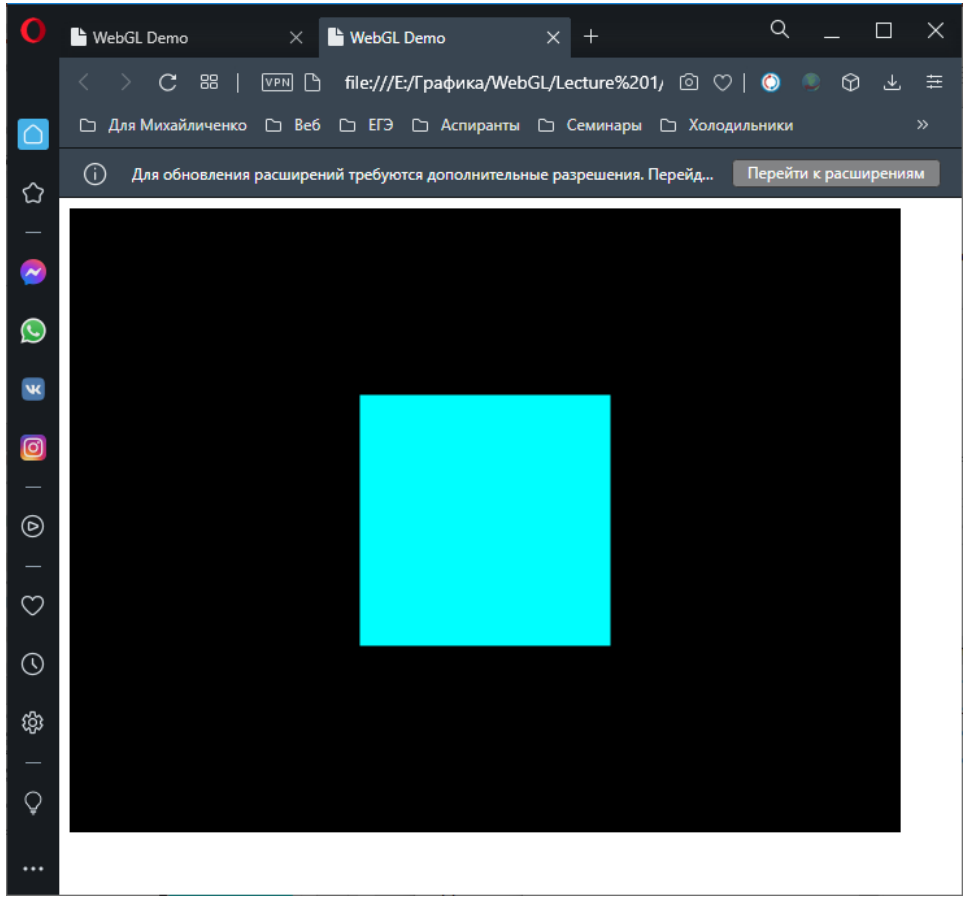
Синтаксис GLSL ES 3.00 (WebGL 2.0)

GLSL ES 1.0 - проще	GLSL ES 3.00 (WebGL 2.0) - современнее
attribute	in
varying	in/out
gl_FragColor	out vec4 color
uniform	uniform

Логика та же, название изменилось. WebGL 2.0 требует новый стандарт

Пример. Кубик

```
 // Vertex shader program
const vsSource = `
   in vec4 aVertexPosition;
   in mat4 uModelViewMatrix;
   uniform mat4 uProjectionMatrix;
   void main() {
      gl_Position = uProjectionMatrix * uModelViewMatrix * aVertexPosition;
} `;

// Fragment shader program
   const fsSource = `
   out vec4 color;
   void main() {
        color = vec4(0.0, 1.0, 1.0, 1.0);
    }
`;
```



Эти матрицы мы разбирали на Лекции 1 (слайды 43-47) — модельно-видовая и проекционная

Что хотим получить?

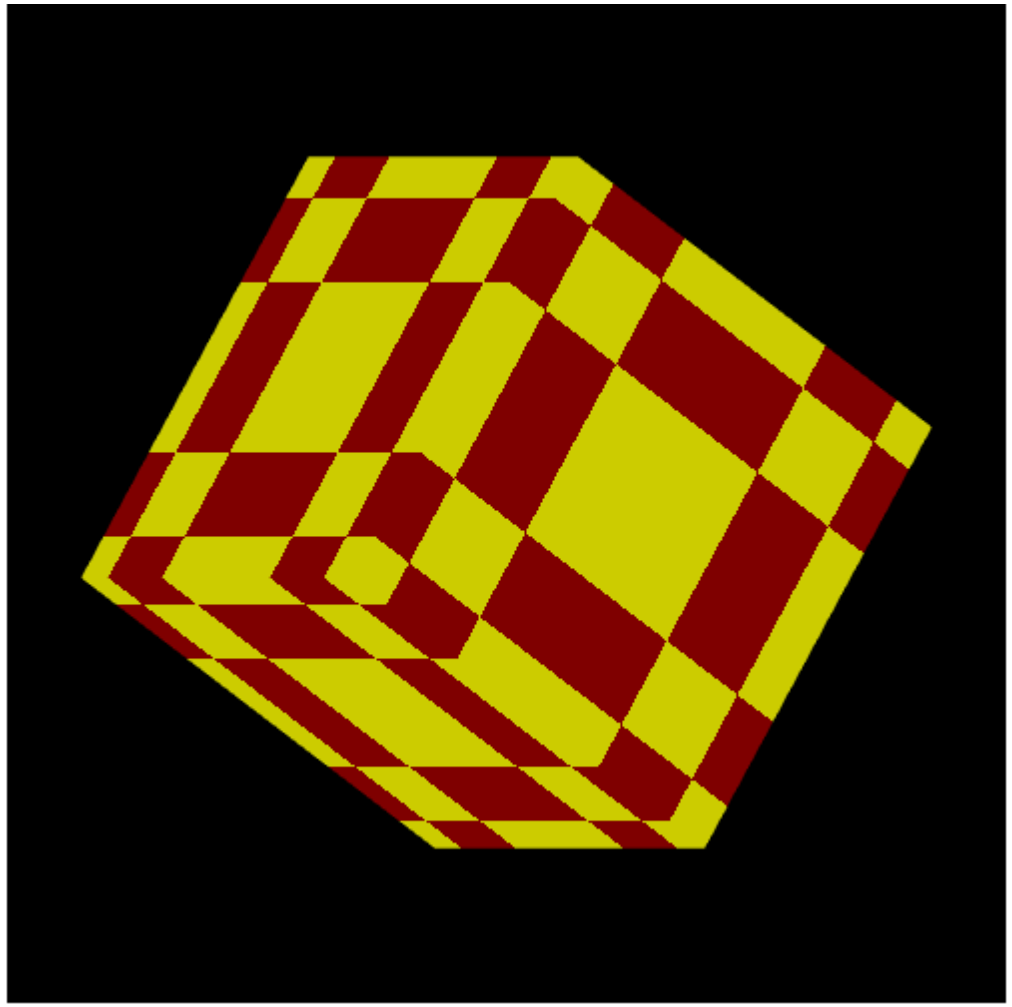
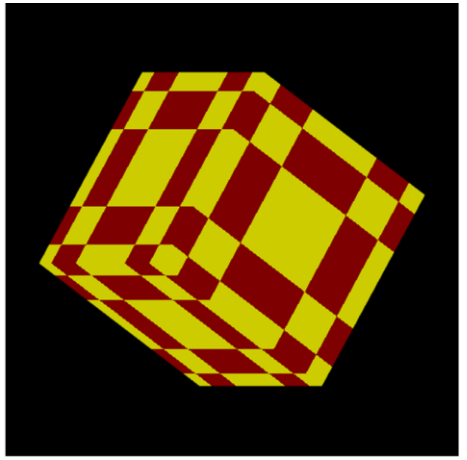


Схема для формирования заливки квадратиками

- Вершинный шейдер: вычисляет gl_Position () и передает непреобразованную позицию vPosition
- Растеризатор: интерполирует vPosition для каждого пикселя
- Фрагментный шейдер: получает свой интерполированный vPosition и вычисляет цвет пикселя



Исходный код вершинного шейдера в новом стандарте

```
// Исходный код вершинного шейдера
const vsSource = `#version 300 es
// Координаты вершины. Атрибут, инициализируется через буфер
in vec3 vertexPosition;
// Выходной параметр с координатами вершины, интерполируется и передаётся во фрагментный шейдер
 out vec3 vPosition;
void main() {
…
}`;
```

Вершинный шейдер. Ручное построение матрицы поворота

```
void main() {
 // углы поворота    float x_angle = 1.0;    float y_angle = 1.0;
mat3 transform = mat3(  1, 0, 0,
                                0, cos(x_angle),  sin(x_angle),
                                     0, -sin(x_angle), cos(x_angle)    )
                                * mat3( cos(y_angle), 0, sin(y_angle),
                                   0, 1, 0,
                                -sin(y_angle), 0, cos(y_angle)    );
   gl_Position = vec4(vertexPosition * transform, 1.0);   // Поворачиваем вершину
    // Передаём непреобразованную координату во фрагментный шейдер
    vPosition = vertexPosition;
}`;
```

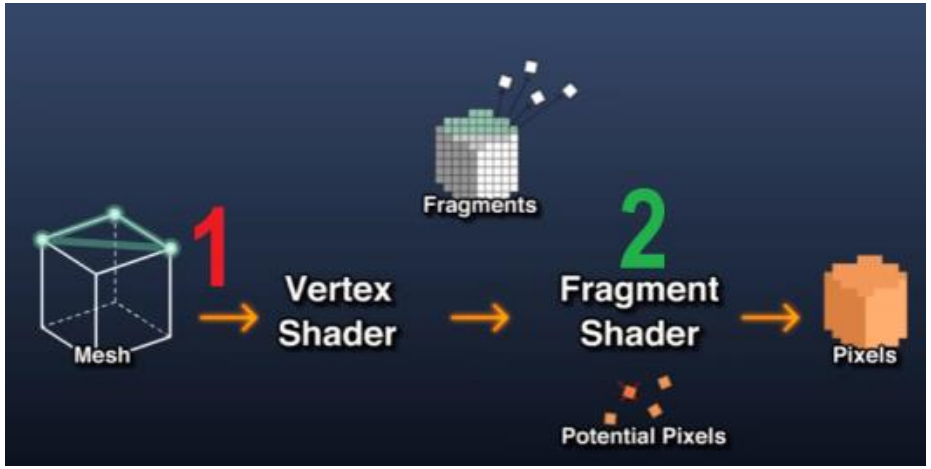
Обычно мы используем готовые функции из библиотек (как на слайде 10), но здесь показано, как это работает внутри

Исходный код фрагментного шейдера в новом стандарте

```
const fsSource = `#version 300 es
precision mediump float;
// Интерполированные непреобразованные координаты вершины,
// передаются из вершинного шейдера
in vec3 vPosition;
// Цвет, которым будем отрисовывать
out vec4 color;

 void main() {
…
}`;
```

Код для формирования заливки квадратиками

```
void main() {
  float k = 5.0;
  int sum = int(vPosition.x * k) + int(vPosition.y * k) + int(vPosition.z * k);
  if ((sum - (sum / 2 * 2)) == 0) {            //если остаток от деления равен 0
     color = vec4(0.8, 0.8, 0, 1);
  }
  else {
     color = vec4(0.5, 0.0, 0, 1);
   }
}`;
```



Для каждой точки грани (пикселя) значение vPosition свое, поэтому условие меняется

Заполнение матриц

Матрицы можно заполнять вручную или с использованием библиотек, например,
glMatrix Sylvester
и другие

Операции с матрицами

mat4.identity(mvMatrix); //https://glmatrix.net/docs/v4/classes/Mat4.html

Метод **mat4.translate(output, input, vec)**,
где output — итоговая выходная матрица, которая получается после перемещения матрицы input на трёхмерный вектор vec

Метод mat4.**rotate(output, input, rad, axis)** , где output — итоговая матрица, которая получается поворотом матрицы input на угол rad (в радианах) вокруг оси axis.

Или
mat4.rotateX(output, input, rad),
mat4.rotateY(output, input, rad)
mat4.rotateZ(output, input, rad)

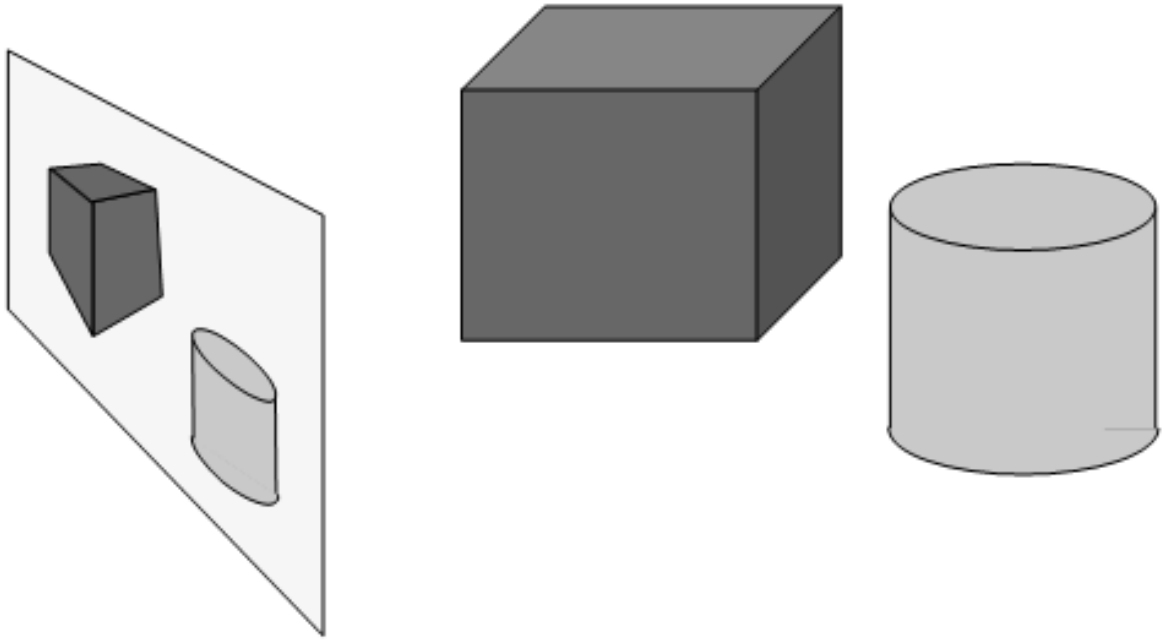
Метод **mat4.scale(output, input, vec)**. Вектор vec указывает масштаб, на который изменяются значения матрицы input

Помните формулы аффинных преобразований из Лекции 1? Эти функции реализуют их внутри себя

Применение mat4 для аффинных преобразований

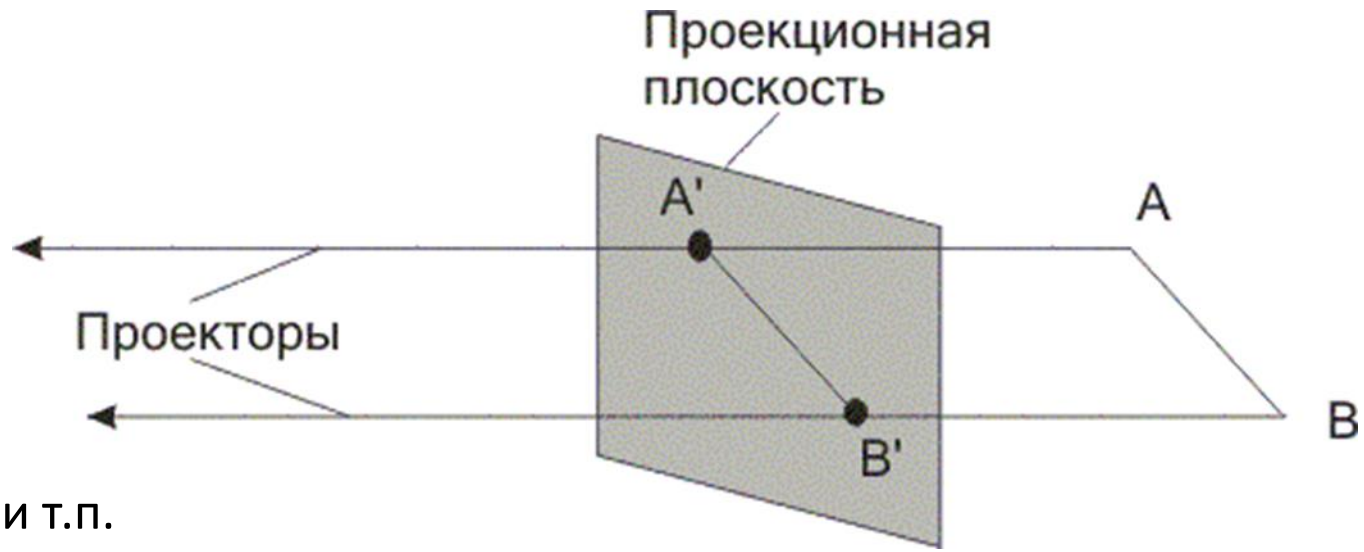
```
 // Set the drawing position to the identity point, which is  the center of the scene.
const modelViewMatrix = mat4.create();

// Now move the drawing position a bit to where we want to start drawing the square.
mat4.translate(modelViewMatrix,     // destination matrix
               modelViewMatrix,     // matrix to translate
               [-0.0, 0.0, -6.0]);  // amount to translate
```

Проецирование

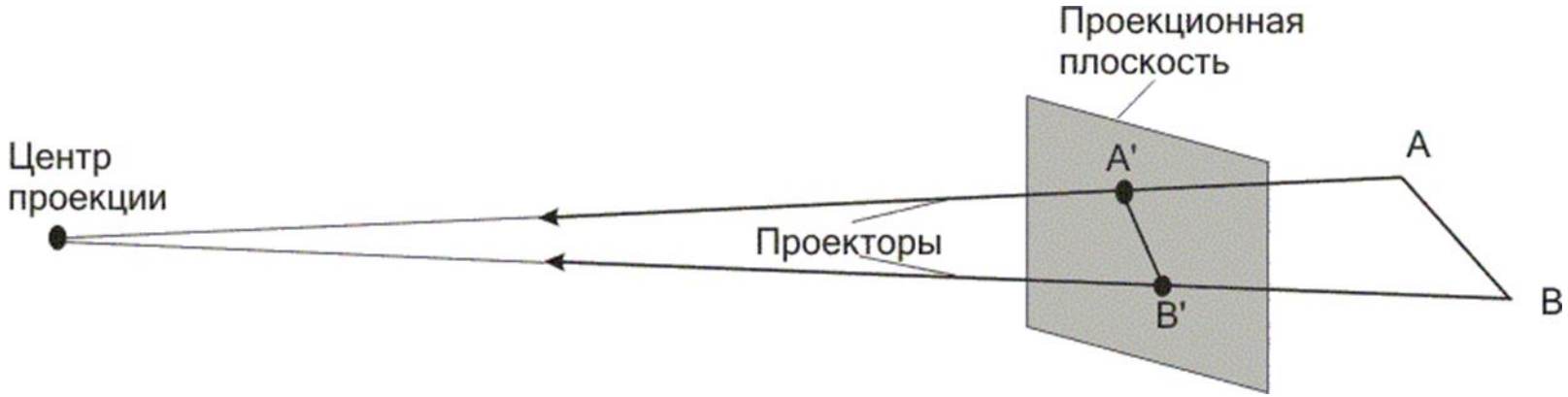


Переход от 2D к 3D можно реализовать разными способами

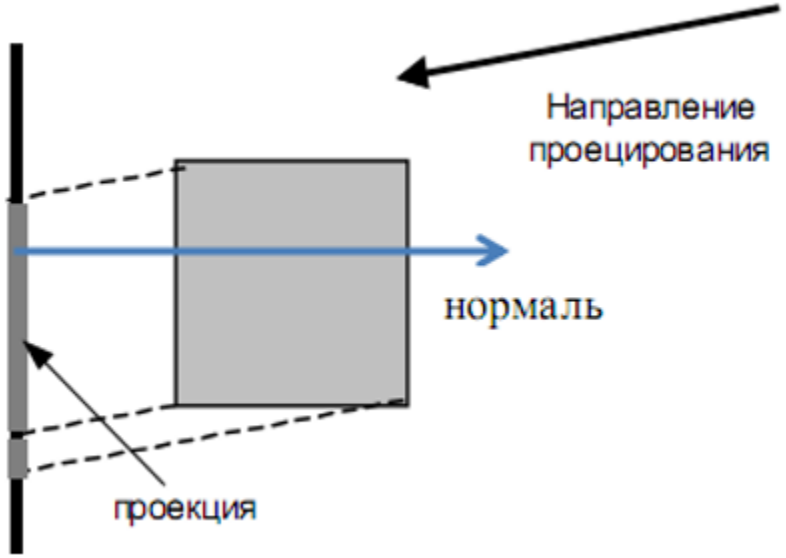
Основные типы проекций



- Параллельная
  - (x,y,z) → (x,y)
  - используется в САПР (CAD), архитектуре и т.п.
  - выглядит нереалистично
- Центральная (перспективная) – так работают камеры
  - (x,y,z) → (x/z,y/z)
  - уменьшение с удалением
  - выглядит реалистично



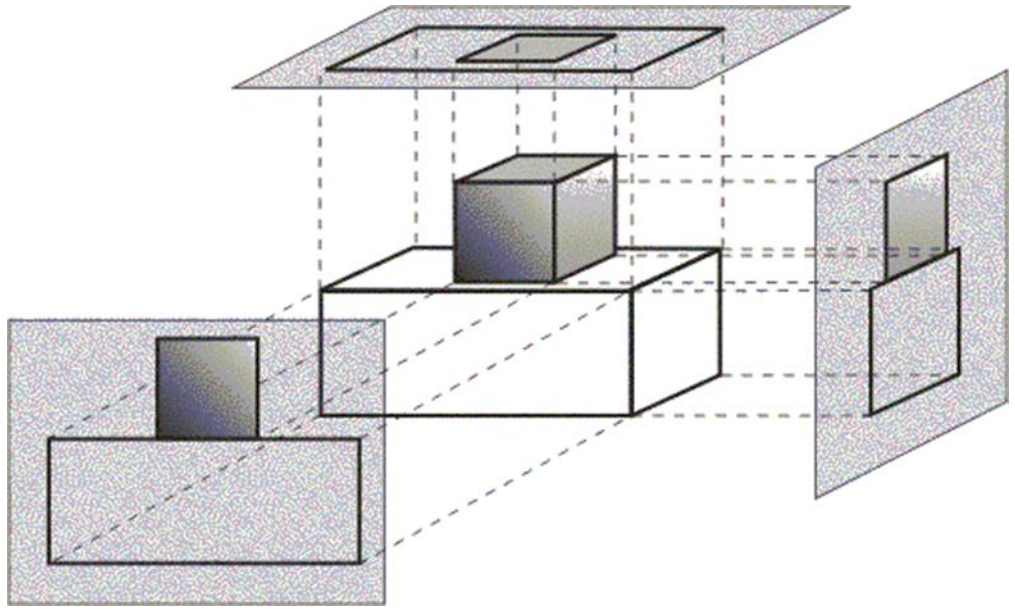
Классификация параллельных проекций



кавалье

кабине

Ортографические проекции

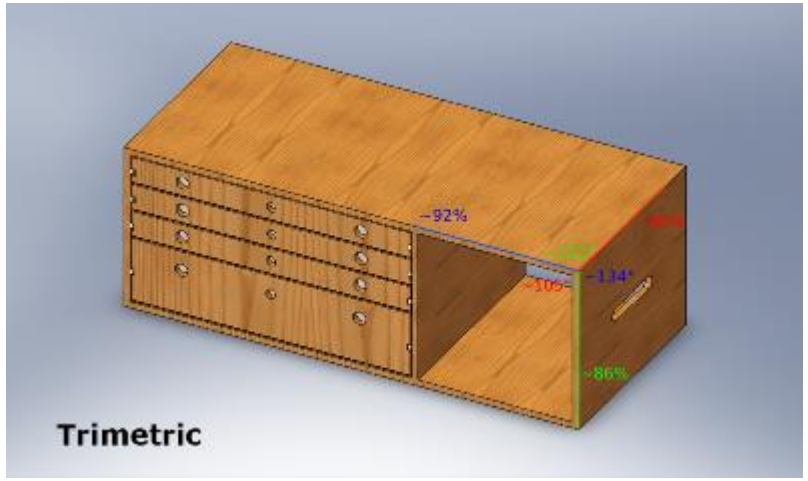


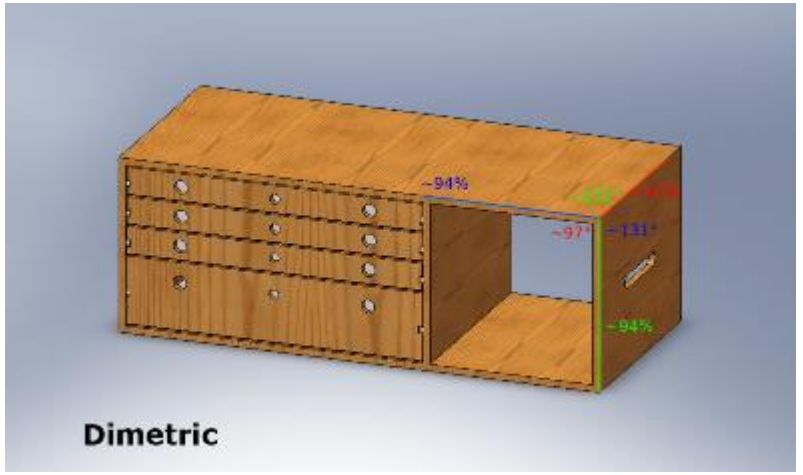
$$[P_x] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad [P_x] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

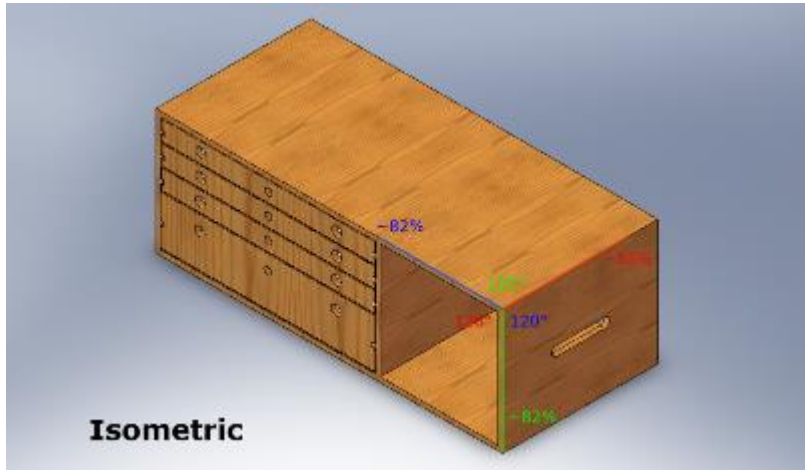
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & q & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 1 \end{bmatrix}$$

В играх ортографическая проекция часто используется для 2D-игр или стратегий

Аксонометрические проекции



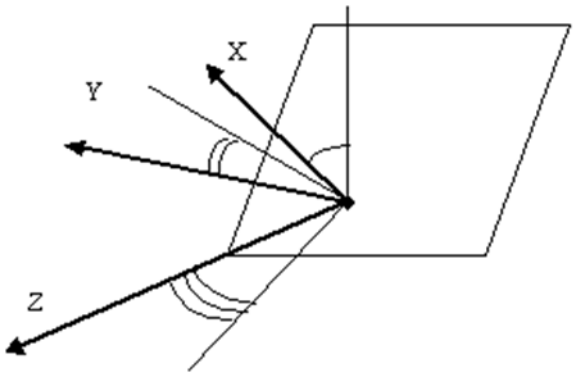


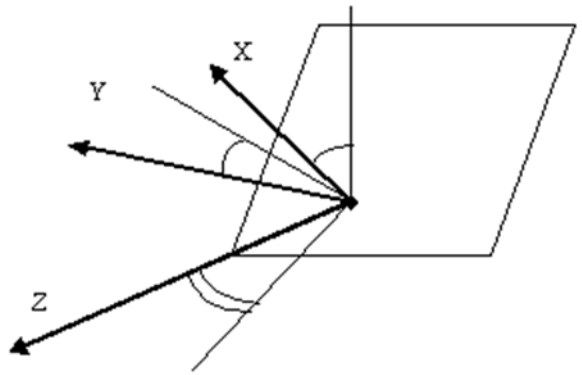


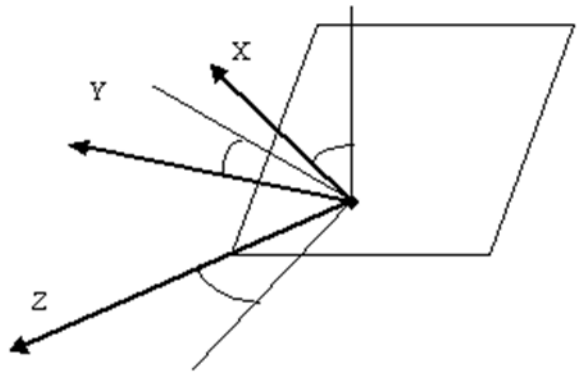
Аксонометрические проекции

$$\begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\phi\sin\psi & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & 0 & 0 \\ \sin\psi & -\sin\varphi\cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

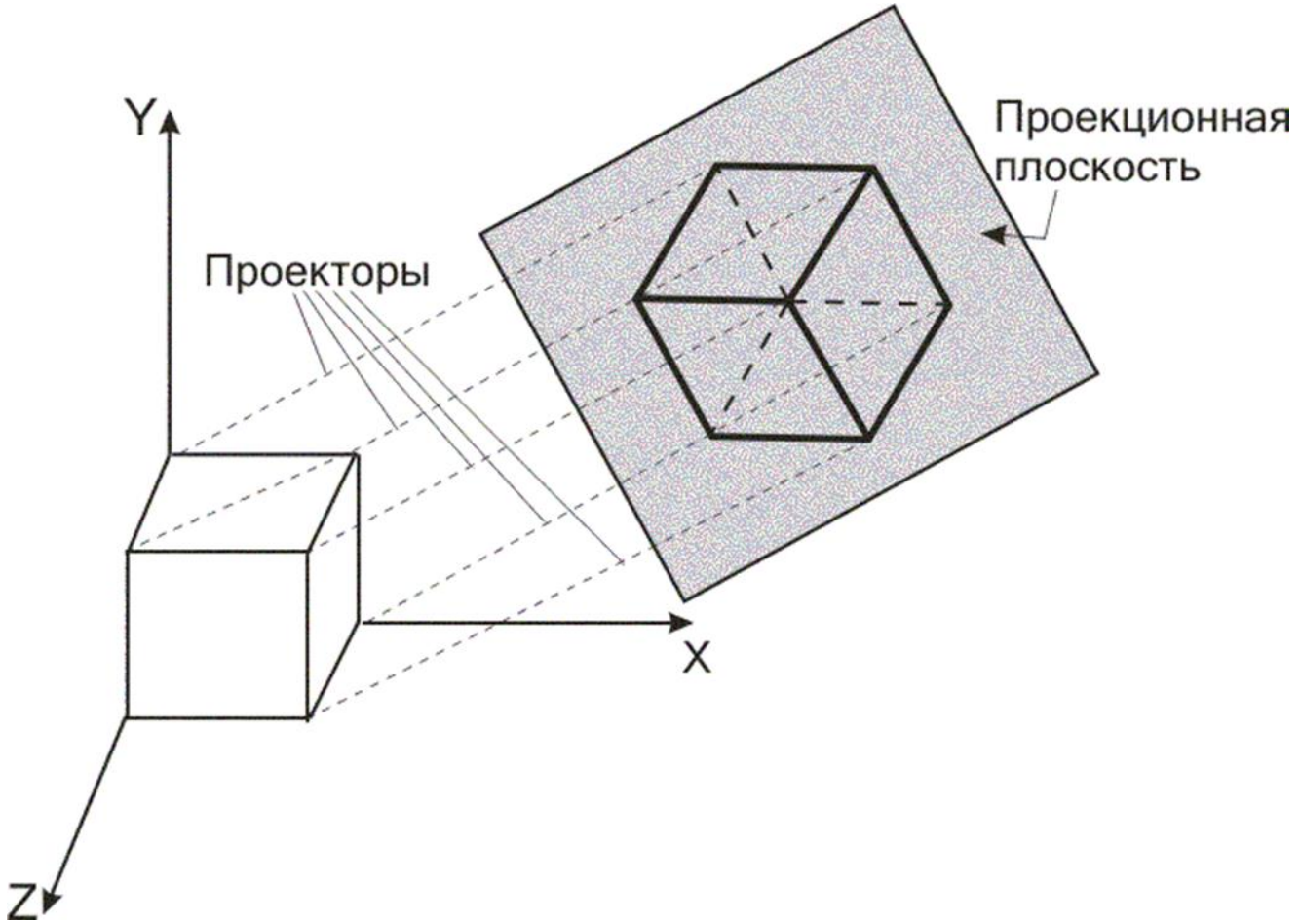




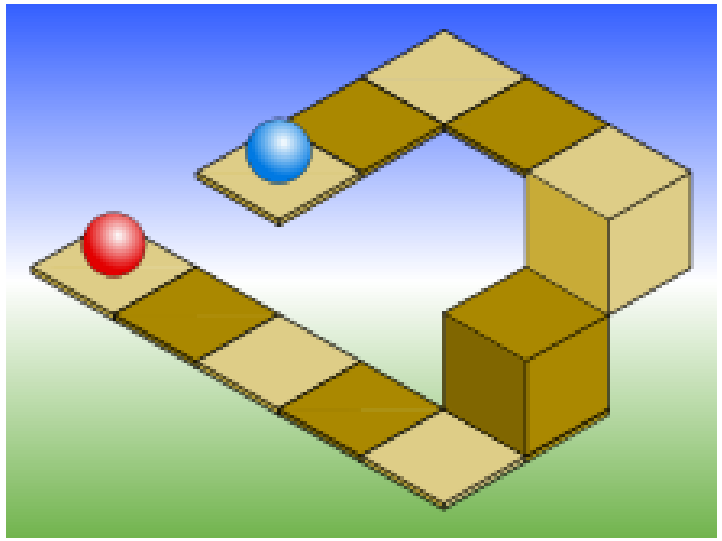


Ограничения аксонометрической проекции

- Как и в других видах параллельных проекций, объекты в аксонометрической проекции не выглядят больше или меньше при приближении или удалении от наблюдателя.
- Это удобно в спрайто-ориентированных компьютерных играх, но, в отличие от перспективной проекции, приводит к ощущению искривления, поскольку человеческий глаз работает иначе.

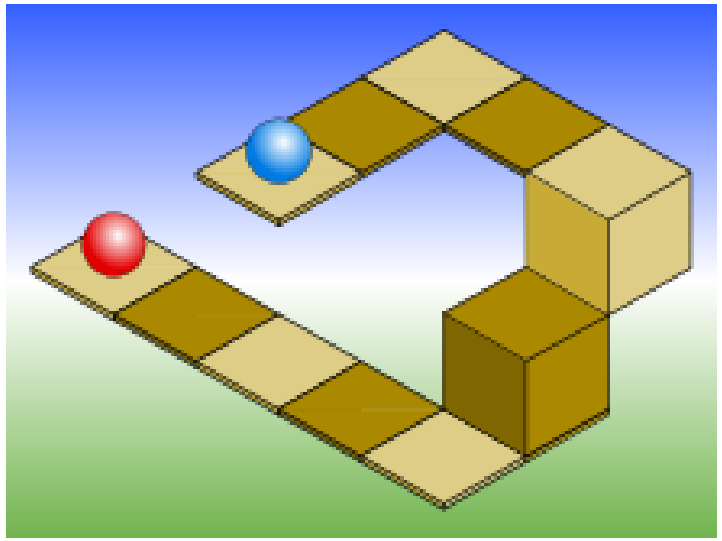


Ограничения аксонометрической проекции



Голубой и красный шары на одном уровне или на разных?

Ограничения аксонометрической проекции



Голубой шар на два уровня выше красного

«Водопад» — литография голландского художника Эшера (октябрь 1961)

Изображён парадокс — падающая вода водопада управляет колесом, которое направляет воду на вершину водопада.

Водопад имеет структуру «невозможного» треугольника Пенроуза: Водопад на литографии работает как вечный двигатель.

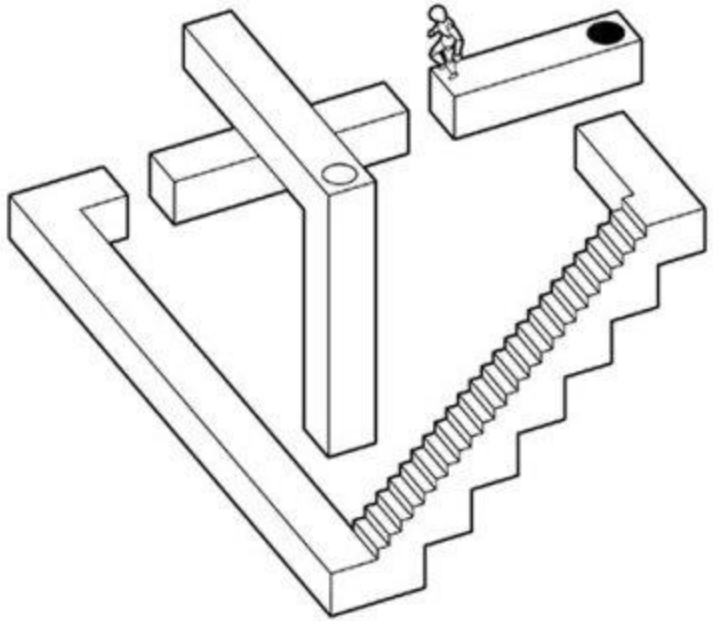
Треугольник Пенроуза

Скульптура, кажущийся треугольник, Немецкий технический музей

Та же скульптура при изменении точки просмотра

Математически корректная сцена, но мозг интерпретирует её неправильно из-за отсутствия глубины

Кадр из игры «echochrome»



Слоган игры — «В этом мире то, что ты видишь, становится реальностью»

Q*bert (1982)

одна из первых игр с изометрической графикой

аркадные игры начала 1980-х

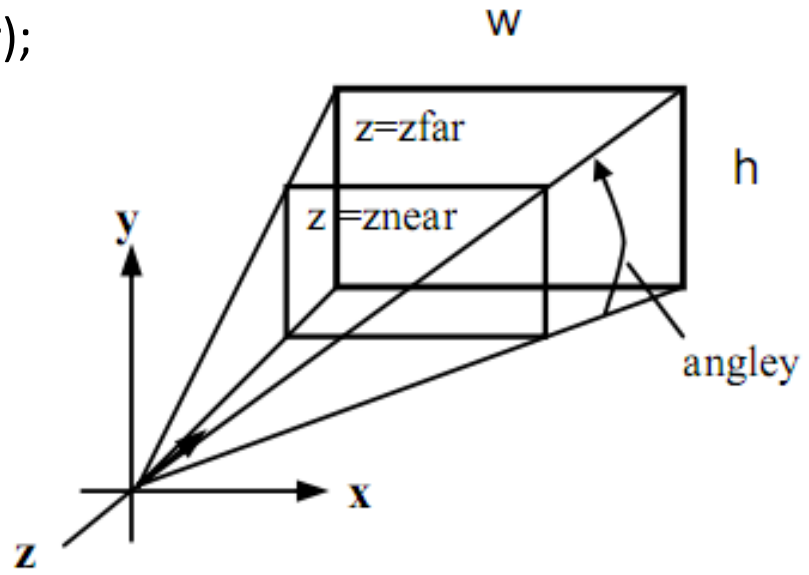
Современные игры с аксонометрией. Cult of the Lamb

Современные игры с аксонометрией. Hades

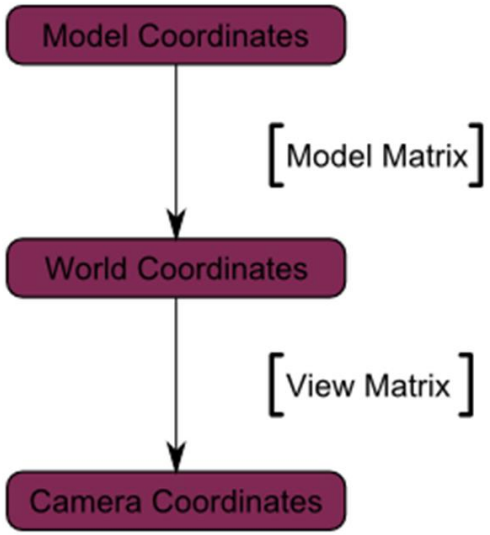
Код для матрицы проецирования

```
const fieldOfView = 45 * Math.PI / 180;   // in radians
const aspect = gl.canvas.clientWidth / gl.canvas.clientHeight;
const zNear = 0.1;
const zFar = 100.0;
const projectionMatrix = mat4.create();
// the first argument  as the destination to receive the result.
mat4.perspective(projectionMatrix, fieldOfView, aspect,  zNear,  zFar);
```

fieldOfView — аналог угла обзора объектива,
aspect — соотношение сторон экрана



Установка камеры



Можно менять не свойства объекта, а свойства точки обзора.

Для установки камеры в библиотеке glMatrix используется функция

mat4.lookAt(matrix, eye, center, up)

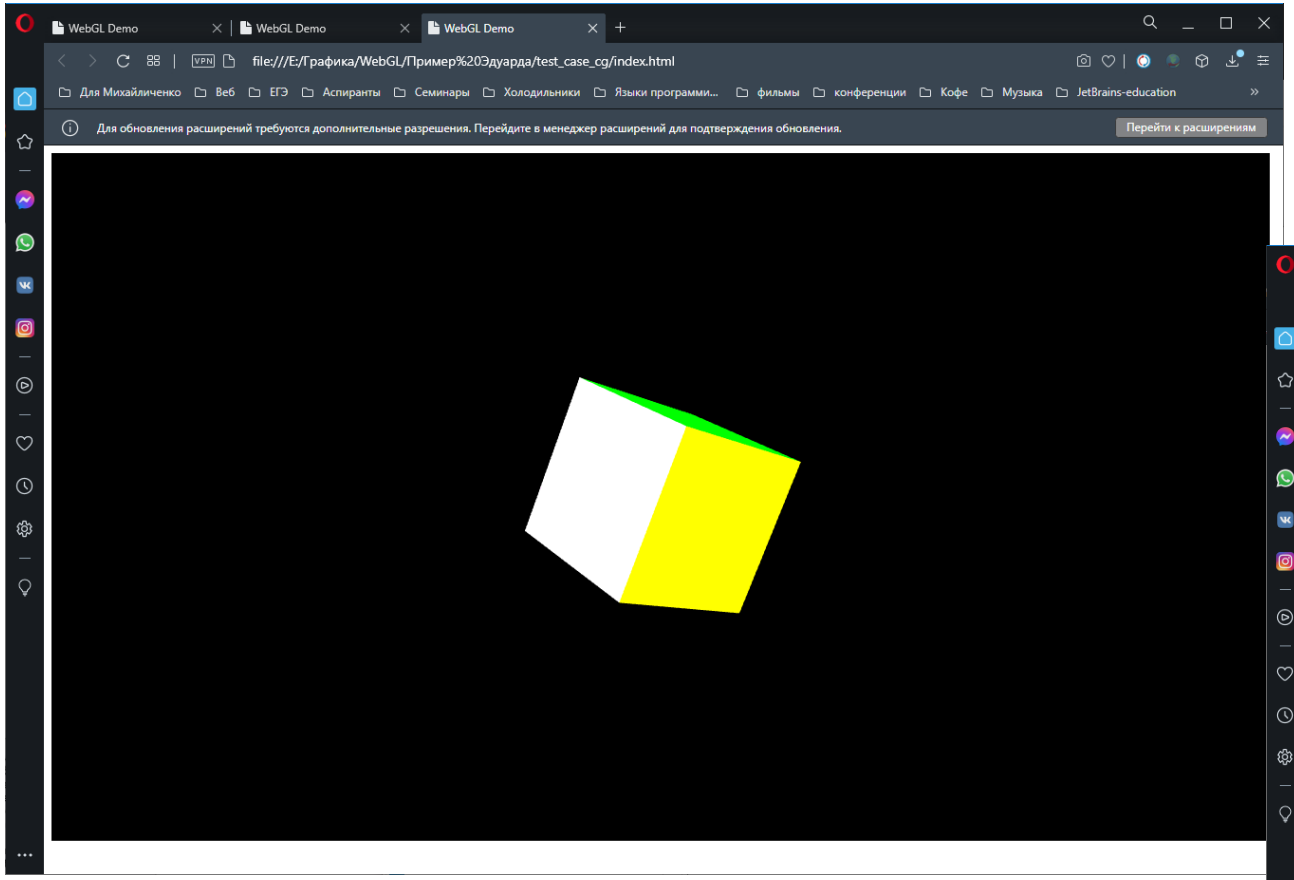
- matrix: матрица модели, которая настраивается в зависимости от свойств камеры
- eye: позиция камеры
- center: точка, на которую направлена камера
- up: вектор вертикальной ориентации

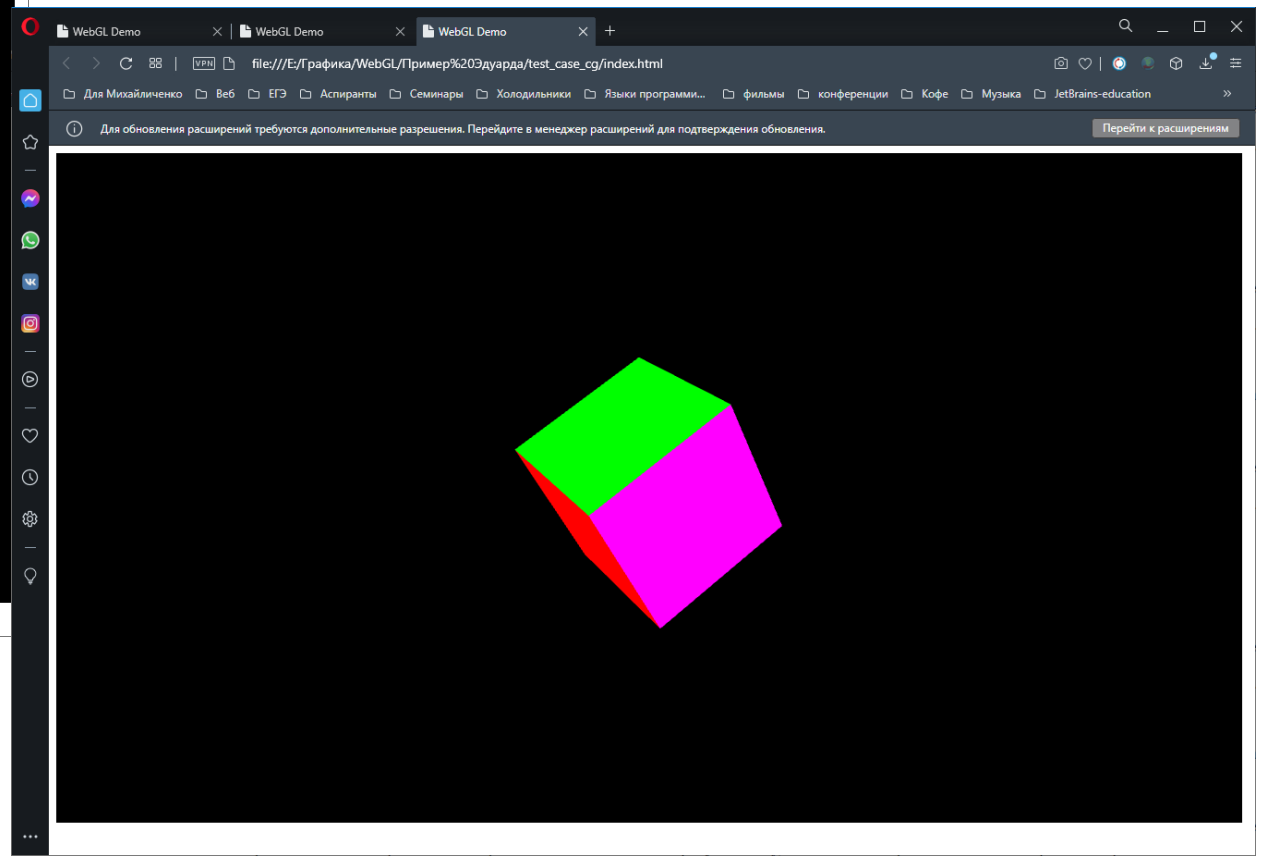
Эта функция как раз строит ту самую видовую матрицу, о которой мы говорили в Лекции 1 на слайде 46

Пример. Настройки окна вывода и матриц ModelView и камеры

```
function setupWebGL()
{
   gl.clearColor(0.0, 0.0, 0.0, 1.0);
   gl.clear(gl.COLOR_BUFFER_BIT);

   gl.viewport(0, 0, gl.viewportWidth, gl.viewportHeight);
   mat4.perspective(pMatrix, Math.PI/2, gl.viewportWidth / gl.viewportHeight, 0.1, 100.0);
   mat4.identity(mvMatrix);
   mat4.lookAt(mvMatrix, [2, 0,-2], [0,0,0], [0,1,0]);
}
```

Что еще хотим получить?





Шейдеры

```
const vsSource = `
   in vec4 aVertexPosition;
   in vec4 aVertexColor;
   uniform mat4 uModelViewMatrix;
   uniform mat4 uProjectionMatrix;
   out lowp vec4 vColor;
   void main(void) {
       gl_Position = uProjectionMatrix * uModelViewMatrix * aVertexPosition;
       vColor = aVertexColor;
   } `;

const fsSource = `
   in lowp vec4 vColor;
   out lowp vec4 Color
   void main(void) {
        Color = vColor;
   }  `;
```

Передача атрибутов и uniform-переменных

```
const programInfo = {
    program: shaderProgram,
    attribLocations: {
        vertexPosition: gl.getAttribLocation(shaderProgram, 'aVertexPosition’),
        vertexColor: gl.getAttribLocation(shaderProgram, 'aVertexColor’),
    },
    uniformLocations: {
        projectionMatrix: gl.getUniformLocation(shaderProgram, 'uProjectionMatrix’),
        modelViewMatrix: gl.getUniformLocation(shaderProgram, 'uModelViewMatrix’),
    }
};
```

programInfo — это просто объект JavaScript для удобства хранения ссылок на атрибуты

Передача uniform-параметров

```
gl.uniformMatrix4fv(
      programInfo.uniformLocations.projectionMatrix,
      false,
      projectionMatrix);

gl.uniformMatrix4fv(
     programInfo.uniformLocations.modelViewMatrix,
      false,
      modelViewMatrix);
```

Анимация

```
const buffers = initBuffers(gl);
var then = 0;

function render(now) {
      now *= 0.001;  // convert to seconds
      const deltaTime = now - then;
      then = now;
      drawScene(gl, programInfo, buffers, deltaTime);
      requestAnimationFrame(render);
   }
```

Координаты куба

```
function initBuffers(gl) {
  const positionBuffer = gl.createBuffer();
  gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, positionBuffer);
```

```
const positions = [
    // Front face
    -1.0, -1.0,  1.0,
    1.0, -1.0,  1.0,
    1.0,  1.0,  1.0,
    -1.0,  1.0,  1.0,
    // Back face
    -1.0, -1.0, -1.0,
    -1.0,  1.0, -1.0,
    1.0,  1.0, -1.0,
    1.0, -1.0, -1.0,
    // Top face
    -1.0,  1.0, -1.0,
    -1.0,  1.0,  1.0,
    1.0,  1.0,  1.0,
    1.0,  1.0, -1.0,
    // Bottom face
    -1.0, -1.0, -1.0,
    1.0, -1.0, -1.0,
    1.0, -1.0,  1.0,
    -1.0, -1.0,  1.0,
    // Right face
    1.0, -1.0, -1.0,
    1.0,  1.0, -1.0,
    1.0,  1.0,  1.0,
    1.0, -1.0,  1.0,
    // Left face
    -1.0, -1.0, -1.0,
    -1.0, -1.0,  1.0,
    -1.0,  1.0,  1.0,
    -1.0,  1.0, -1.0,
  ];
```

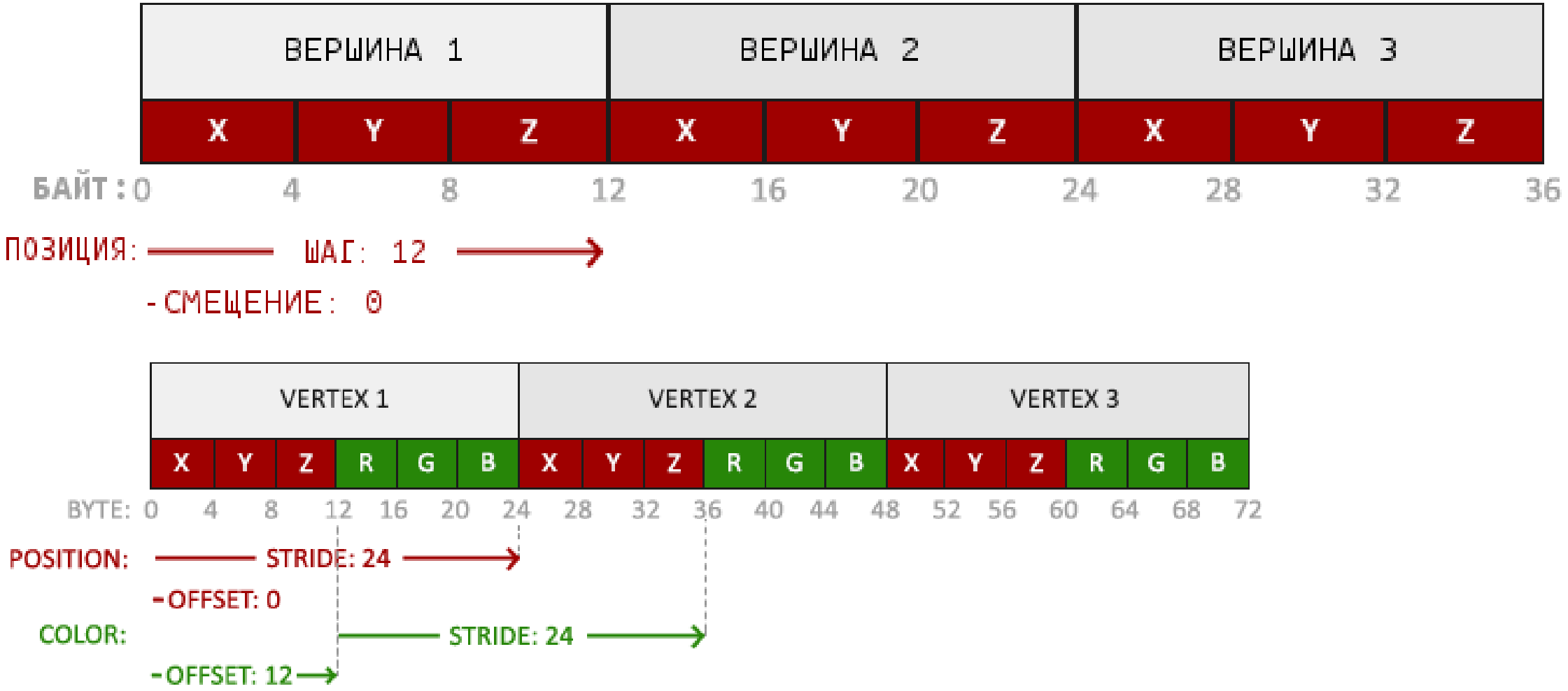
```
gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(positions), gl.STATIC_DRAW);
```

Цвет граней куба

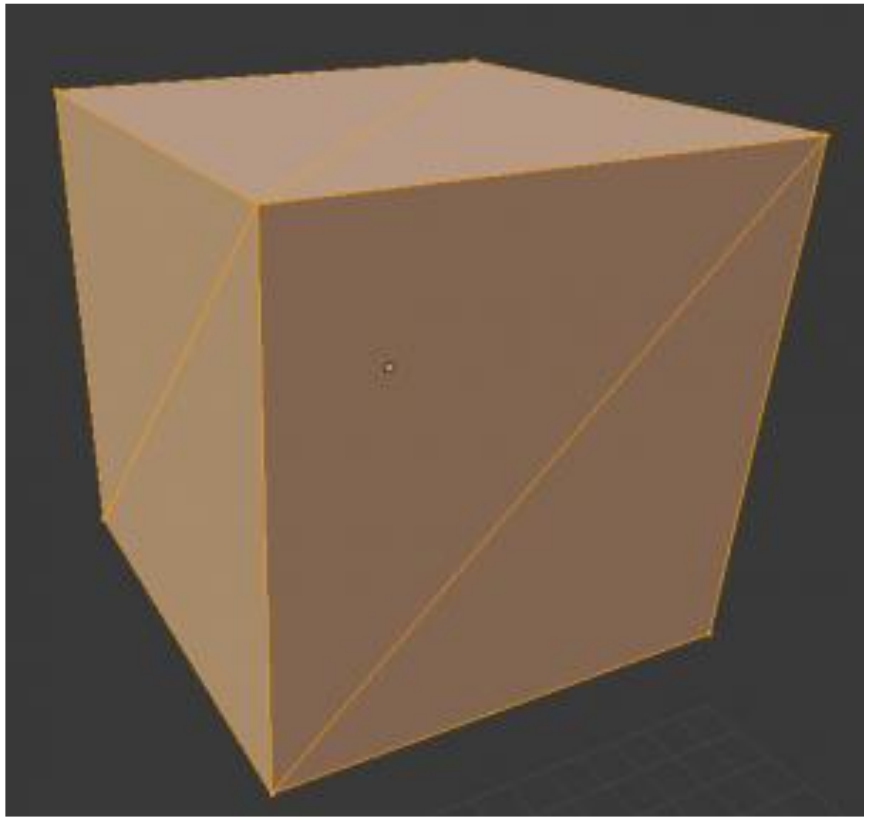
```
const faceColors = [
      [1.0,  1.0,  1.0,  1.0],    // Front face: white
      [1.0,  0.0,  0.0,  1.0],    // Back face: red
      [0.0,  1.0,  0.0,  1.0],    // Top face: green
      [0.0,  0.0,  1.0,  1.0],    // Bottom face: blue
      [1.0,  1.0,  0.0,  1.0],    // Right face: yellow
      [1.0,  0.0,  1.0,  1.0],    // Left face: purple
   ];
```

```
var colors = [];
for (var j = 0; j < faceColors.length; ++j) {
    const c = faceColors[j];
    colors = colors.concat(c, c, c, c);
 }

 const colorBuffer = gl.createBuffer();
 gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, colorBuffer);
 gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(colors), gl.STATIC_DRAW);
```

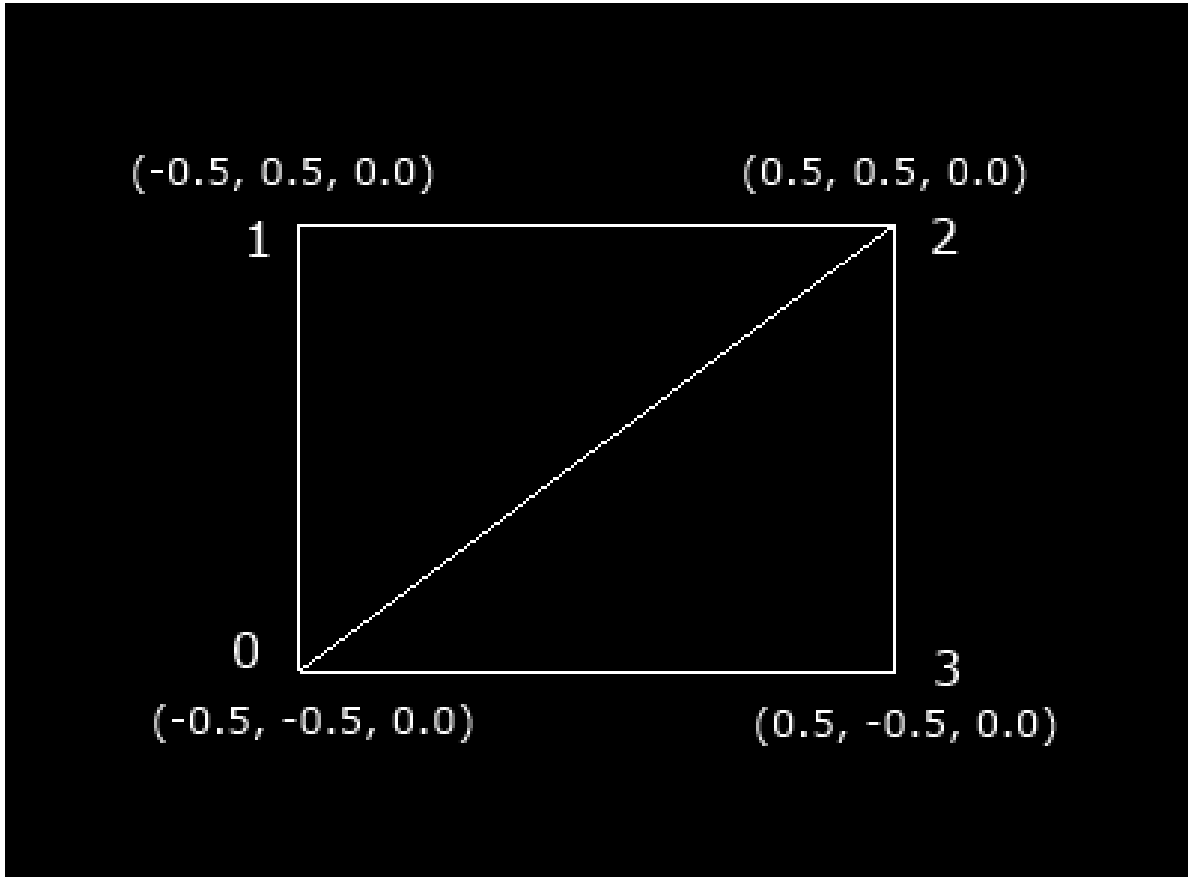
Структура буфера



Сколько вершин и сколько примитивов?



Использование буфера индексов



Индексный буфер

```
…
const indexBuffer = gl.createBuffer();
gl.bindBuffer(gl.ELEMENT_ARRAY_BUFFER, indexBuffer);
const indices = [
      0,  1,  2,     0,  2,  3,    // front
      4,  5,  6,     4,  6,  7,    // back
      8,  9,  10,    8,  10, 11,   // top
      12, 13, 14,    12, 14, 15,   // bottom
      16, 17, 18,    16, 18, 19,   // right
      20, 21, 22,    20, 22, 23,   // left
   ];
gl.bufferData(gl.ELEMENT_ARRAY_BUFFER, new Uint16Array(indices), gl.STATIC_DRAW);
 return {
     position: positionBuffer,
     color: colorBuffer,
     indices: indexBuffer,
   };
} //initBuffers
```

```
function drawScene(gl, programInfo, buffers, deltaTime) {

  gl.clearColor(0.0, 0.0, 0.0, 1.0);
  gl.clearDepth(1.0);
  gl.enable(gl.DEPTH_TEST);
  gl.depthFunc(gl.LEQUAL);
  gl.clear(gl.COLOR_BUFFER_BIT | gl.DEPTH_BUFFER_BIT);

  const fieldOfView = 45 * Math.PI / 180;   // in radians
  const aspect = gl.canvas.clientWidth / gl.canvas.clientHeight;
  const zNear = 0.1;
  const zFar = 100.0;

  const projectionMatrix = mat4.create();
  mat4.perspective(projectionMatrix, fieldOfView, aspect, zNear, zFar);
  const modelViewMatrix = mat4.create();
  mat4.translate(modelViewMatrix, modelViewMatrix, [-0.0, 0.0, -10.0]);
  mat4.rotate(modelViewMatrix, modelViewMatrix, cubeRotation, [0, 1, 0.5]);
```

```
const numComponents = 3;
const type = gl.FLOAT;
const normalize = false;
const stride = 0;
const offset = 0;
gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, buffers.position);

gl.vertexAttribPointer(
        programInfo.attribLocations.vertexPosition,
        numComponents,
        type,        normalize,        stride,        offset);

gl.enableVertexAttribArray(programInfo.attribLocations.vertexPosition);
```

Кроме установки указателя нам еще надо включить атрибут с помощью метода gl.enableVertexAttribArray(),
в который передается ранее установленный атрибут:

```
gl.enableVertexAttribArray(shaderProgram.vertexPositionAttribute);
```

После этого мы сможем передать каждую вершину в вершинный шейдер через переменную attribute vec3 aVertexPosition.

```
const numComponents = 4;
const type = gl.FLOAT;
const normalize = false;
const stride = 0;
const offset = 0;
gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, buffers.color);
gl.vertexAttribPointer (
                programInfo.attribLocations.vertexColor,
                numComponents,
                type,        normalize,        stride,        offset);
 gl.enableVertexAttribArray(programInfo.attribLocations.vertexColor);
```

```
    gl.bindBuffer(gl.ELEMENT_ARRAY_BUFFER, buffers.indices);
    gl.useProgram(programInfo.program);
    gl.uniformMatrix4fv( programInfo.uniformLocations.projectionMatrix,    false,      projectionMatrix);
    gl.uniformMatrix4fv( programInfo.uniformLocations.modelViewMatrix,  false,      modelViewMatrix);


    const vertexCount = 36;
    const type = gl.UNSIGNED_SHORT;
    const offset = 0;
    gl.drawElements(gl.TRIANGLES, vertexCount, type, offset);


     cubeRotation += deltaTime;

}
```

Вывод или отрисовка

Для отрисовки фигур в WebGL используется следующие методы:

gl.**drawArrays()**

gl.**drawElements()**

```
const vertexCount = 36;
const type = gl.UNSIGNED_SHORT;
const offset = 0;
gl.drawElements(gl.TRIANGLES, vertexCount, type, offset);
```

Метод gl.drawElements()

Метод gl.drawElements() работает с буфером индексов. Он имеет следующую сигнатуру:
gl.drawElements(mode, count, type, offset):

mode: режим, указывающий на тип примитива. В качестве примитивов используются те же, что и для метода gl.drawArrays()

count: число элементов для отрисовки

type: тип значений в буфере индексов. Может иметь значение UNSIGNED_BYTE или UNSIGNED_SHORT

offset: смещение - с какого индекса будет проводиться отрисовка

Например,
gl.**drawElements**(gl.TRIANGLES, vertexCount, type, offset);

Примитивные типы GLSL

void: функция не возвращает никакого значения

bool: логические значения true или false

int: целочисленные значения

float: числовые значения с плавающей точкой

Примитивные типы GLSL

vec2, vec3, vec4: двух-, трех- и четырехмерные векторы соответственно, которые содержат объекты типа float

ivec2, ivec3, ivec4: двух-, трех- и четырехмерные векторы соответственно, которые содержат объекты типа int

bvec2, bvec3, bvec4: двух-, трех- и четырехмерные векторы соответственно, которые содержат объекты типа bool

mat2, mat3, mat4: матрицы размера 2x2, 3x3 и 4x4 соответственно, которые содержат объекты типа float

sampler2D, samplerCube: специальные типы - семплеры для работы с текстурами. С помощью сэмплеров во фрагментном шейдере мы можем получить цветовые значения текстур и передать их примитиву

Какой тип данных использовать для координат вершины?
А для цвета?
А для передачи текстуры?

Примитивные типы GLSL

vec2, vec3, vec4: двух-, трех- и четырехмерные векторы соответственно, которые содержат объекты типа float

ivec2, ivec3, ivec4: двух-, трех- и четырехмерные векторы соответственно, которые содержат объекты типа int

bvec2, bvec3, bvec4: двух-, трех- и четырехмерные векторы соответственно, которые содержат объекты типа bool

mat2, mat3, mat4: матрицы размера 2x2, 3x3 и 4x4 соответственно, которые содержат объекты типа float

sampler2D, samplerCube: специальные типы - семплеры для работы с текстурами. С помощью сэмплеров во фрагментном шейдере мы можем получить цветовые значения текстур и передать их примитиву

Какой тип данных использовать для координат вершины? (vec3)
А для цвета? (vec4)
А для передачи текстуры? (sampler2D)

Структуры

```
struct someStruct{
    int someInt;
    vec4 someVec;
}
```

Квалификаторы (модификаторы)

- in (attribute): атрибут или часть описания вершины, которое передается из программы на WebGL в вершинный шейдер
- const: константы, эти переменные определяют свое значение только один раз и в процессе программы его уже не меняют
- uniform: по сути то же переменные с константными значениями, только эти значения задаются для всего примитива
- out/in с одинаковым именем в обоих шейдерах
  - varying: переменная, которая задается в вершинном шейдере и затем передается во фрагментный шейдер, где может быть использована – устаревшая

Квалификаторы для чисел с плавающей точкой

highp: число с плавающей точкой сохраняет максимальную точность

mediump: число со средней степенью точности

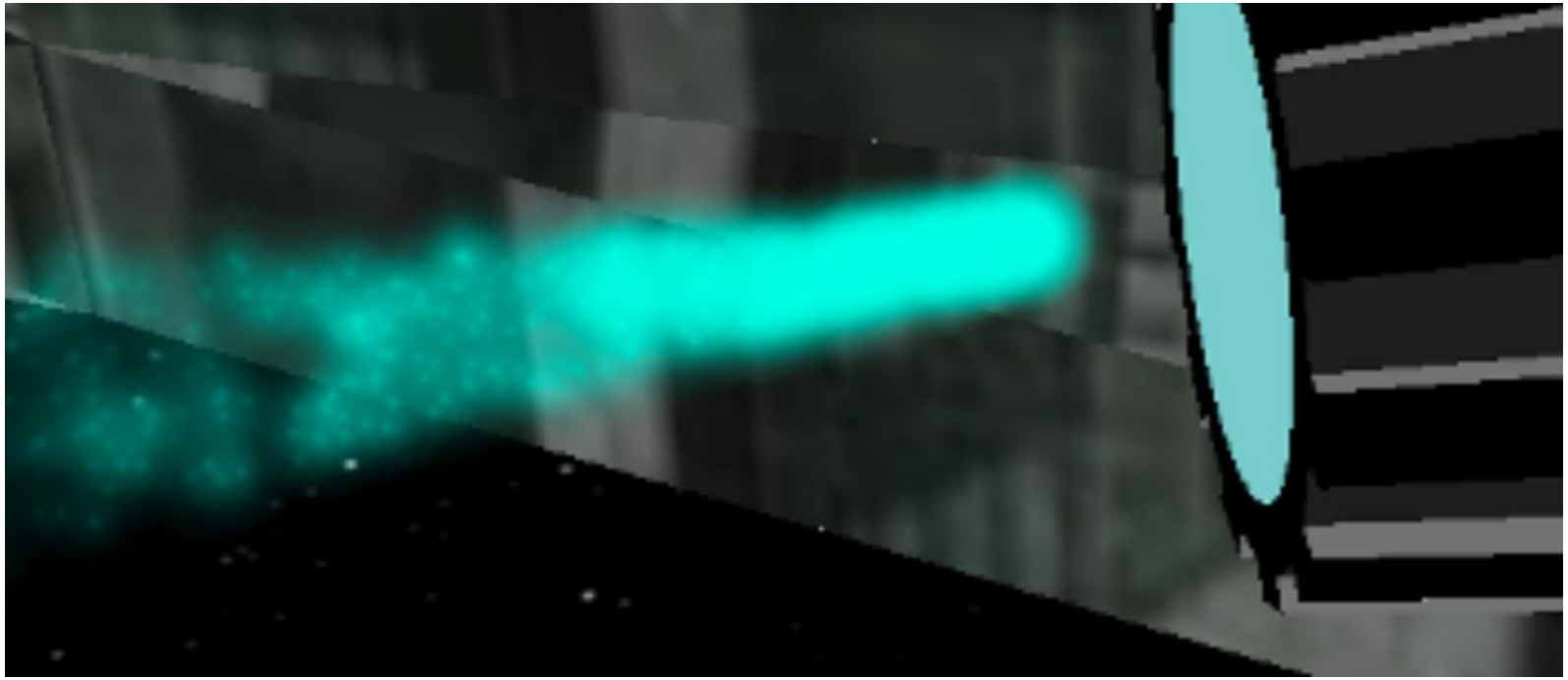
lowp: диапазон плавающей запятой от -2 до 2

Например,
varying highp vec4 vColor;

Встроенные глобальные переменные GLSL

gl_Position: переменная имеет тип vec4 и указывает на положение вершины. Используется в **вершинном** шейдере в качестве в**ыходного** параметра

gl_PointSize: имеет тип float и содержит размер точки. Используется в **вершинном** шейдере в качестве **выходного** параметра



Встроенные глобальные переменные GLSL

gl_FragCoord: имеет тип vec4 и указывает на положение фрагмента в буфере фреймов. Используется во **фрагментном** шейдере в качестве **входного** параметра

gl_FontFacing: имеет тип bool и определяет, принадлежит ли фрагмент лицевому примитиву. Используется во **фрагментном** шейдере в качестве **входного** параметра

gl_PointCoord: имеет тип vec2 и указывает на позицию фрагмента. Используется во **фрагментном** шейдере в качестве **входного** параметра

gl_FragColor: имеет тип vec4 и указывает на итоговый цвет фрагмента. Используется во **фрагментном** шейдере в качестве **выходного** параметра

gl_FragData[n]: имеет тип vec4 и указывает на цвет фрагмента для прикрепления цвета n. Используется во **фрагментном** шейдере в качестве **выходного** параметра

Встроенные функции

abs(x);
round(x)
mod(x);
fmod(x)
sqrt(x);
pow(x, y)
max(x, y);
min(x, y)
sin(angle);
cos(angle);
tan(angle)
log(x)
dot(x, y) скалярное произведение векторов
cross(x, y) векторное произведение векторов
matrixCompMult(mat x, mat y) произведение матриц одной размерности
normalize(x) нормализация вектора
reflect(t, n) отражает вектор t вдоль вектора n
vec4 texture2D (sampler2D sampler,vec2 coord) выборка текстур

Создаем свою функцию

```
// матрица для двумерного вращения
mat2 rot ( in float a ) {
return mat2 ( cos (a), sin (a), -sin (a), cos (a) ) ;
}

// Используем
vec2 pos1 = rot (17.0) * pos ;
```

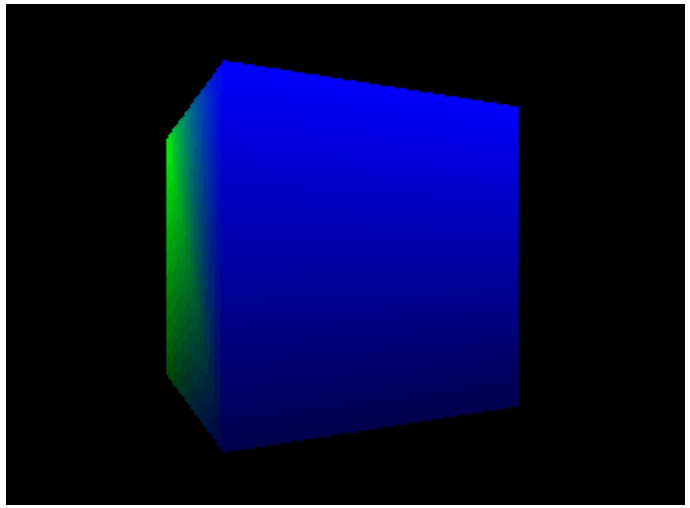
Операторы управления

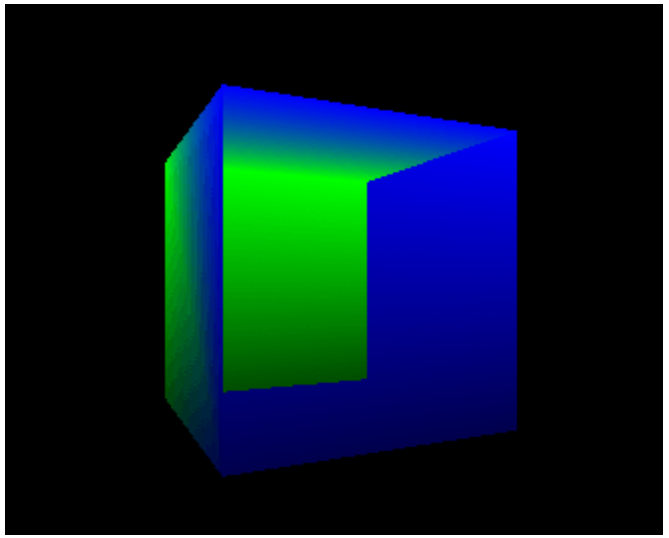
if
switch
discard //специфическое ветвление для пиксельного шейдера
break
continue
do
for
while

Рекомендации: старайтесь использовать встроенные функции

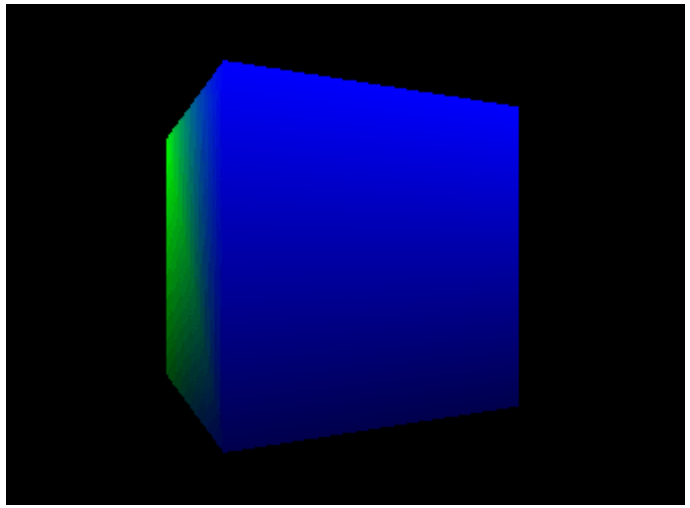
```
float f1 , f2 , f3 , f4 ; . . .
float c = f1+f2+f3+f4 ; // медленно
float a = dot (vec4( f1, f2, f3, f4 ), vec4(1.0)) ; // быстро
```

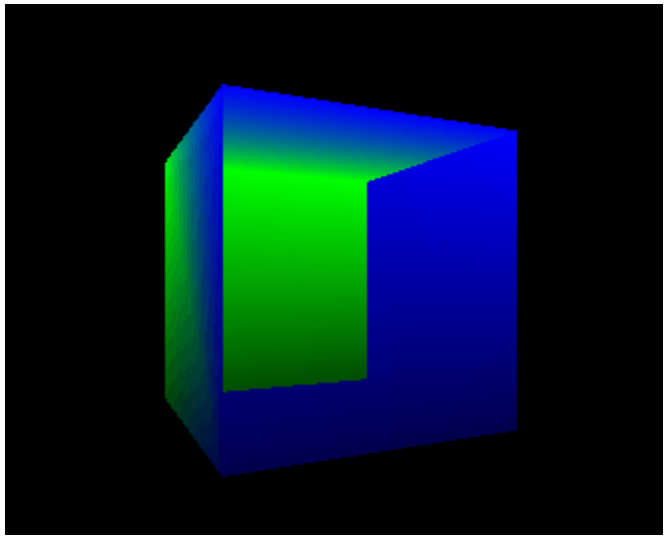
Некоторые ошибки – в чём проблема?





Некоторые ошибки – в чём проблема?





gl.enable(gl.DEPTH_TEST); //если забыли
gl.drawElements(gl.TRIANGLES, indexBuffer.numberOfItems, gl.UNSIGNED_SHORT,0);

Мы сегодня разобрали

1. Современный WebGL 2.0
   * Переход на GLSL ES 3.00: in/out вместо attribute/varying
   * Явное объявление выходного цвета out vec4 Color

2. Математика на практике
   * Аффинные преобразования через библиотеку glMatrix
   * Построение матриц проекции и видовой матрицы
   * Связь с теорией из Лекции 1: теперь мы знаем, как это работает под капотом, и как это писать в коде

3. Проекции в играх и приложениях
   * Параллельная (ортографическая/аксонометрическая) vs Перспективная
   * Сильные и слабые стороны: аксонометрия не искажает размеры, но обманывает восприятие
   * Примеры из индустрии: Q*bert, Cult of the Lamb, Hades

4. Алгоритмические шейдеры
   * Вершинные шейдеры могут трансформировать геометрию
   * Фрагментные шейдеры — это мини-программы для каждого пикселя (генерация текстуры на GPU)

5. Оптимизация данных
   * Использование индексных буферов для экономии памяти

Домашнее задание / Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается in от uniform?
2. Почему для Hades выбрали аксонометрию, а не перспективу?
3. Откройте пример с квадратиками (слайд 9). Что изменится, если убрать умножение на k?
4. (Для продвинутых) Что произойдет с изображением, если в `at4.perspective`поставить zNear = 0.0?

Вопросы?