

Современные графические технологии

или

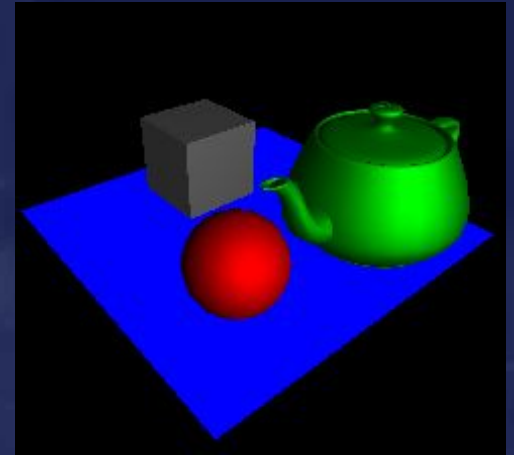
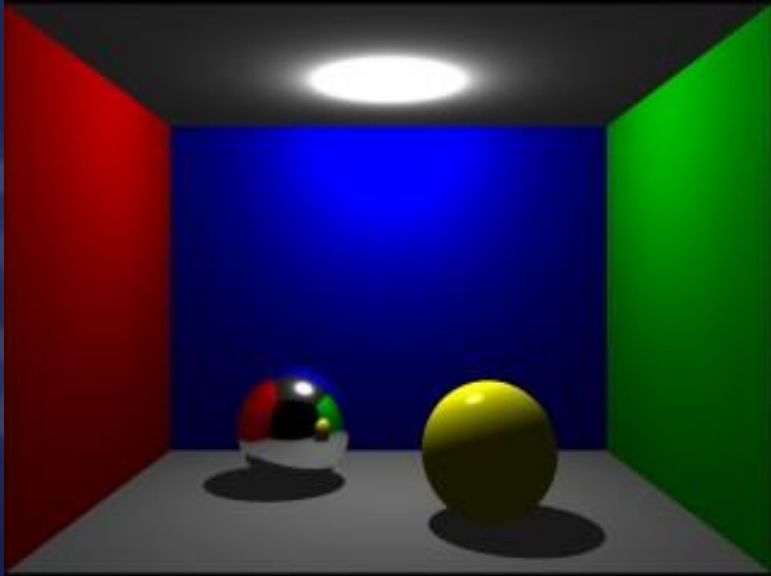
OpenGL и графические процессоры

2010

Методы создания изображений

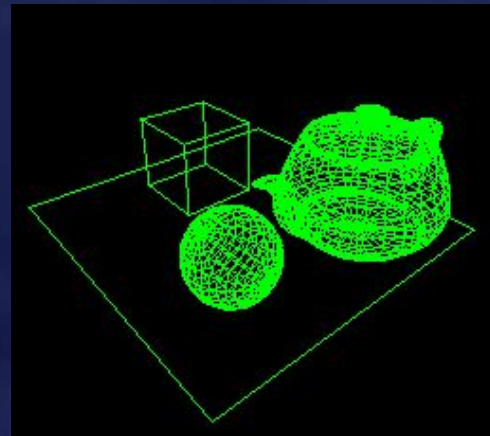
Точность и реалистичность:

- Трассировка лучей
- Излучательность
- Фотонные карты



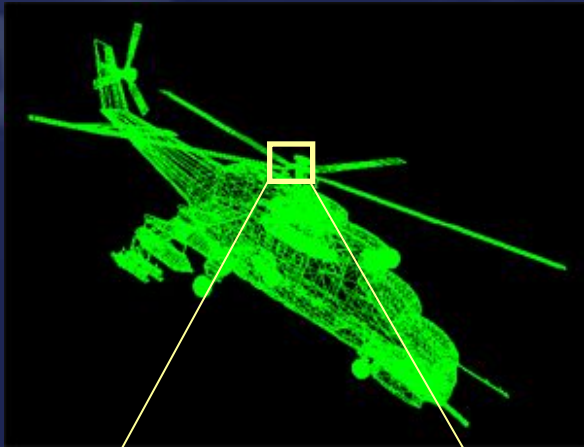
Скорость:

- Полигональная графика



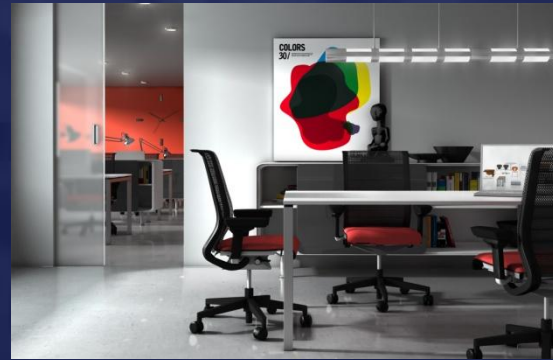
Полигональное представление объектов

Объект задан набором вершин, которые объединены в плоские грани, чаще всего – треугольные.



Для каждой вершины заданы:

- Координаты вершины
- Нормаль
- Координаты текстуры
- И много чего еще ...



Menu

Animation

Emotions

Rendering

About

Help

Quit

15
GPU: 576MHz MEM: 900MHz GPUt: 83C
OpenGL SMU: 194MB



GPU vs. CPU



GF100



RV870

- > 3 млрд. транзисторов
- Тактовая частота 700Mhz
- 1.5GB GDDR5 памяти
- ??? транзисторов
- Тактовая частота 825Mhz
- 1-2GB 1300 MHz памяти



- Тактовая частота 3.3Ghz
- 1.17 млрд. транзисторов (six core)

Core i7-980X

GPU vs. CPU (4 года назад)



NV30



R300

- 120 млн. транзисторов
- Тактовая частота 500Mhz
- 128MB 500MHz памяти
- 107 млн. транзисторов
- Тактовая частота 325Mhz
- 128MB 310MHz памяти



- Тактовая частота 1.6Ghz – 3.06Ghz
- 42 млн. Транзисторов (core)

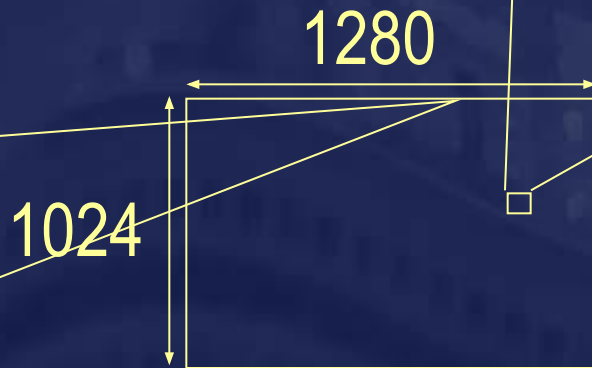
Архитектура GF100



Буфер кадра



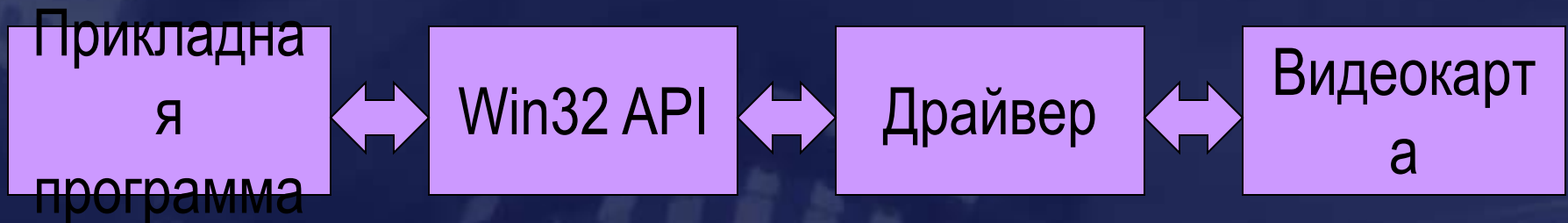
Буфер кадра – прямоугольный массив структур `<Red,Green,Blue>`



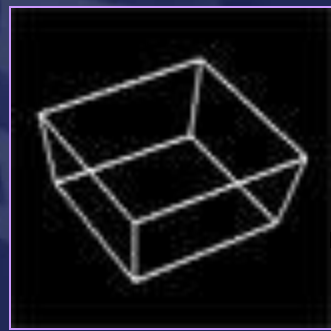
2D-ускорители



- Копирование и перемещение прямоугольных блоков
- Масштабирование прямоугольных блоков
- Отрисовка курсора мыши
- Отрисовка прямых линий и других примитивов



Графический конвейер



$V_i = \{P, n, \dots\}$
 $F_j = \{V_1, V_2, V_3\}$

T&L:
Преобразование
и освещение

$V_i' = \{P', \text{RGBA}, \dots\}$
 $F_j' = \{V_1, V_2, V_3\}$

Rasterization:
Разбиение
примитивов
на пиксели



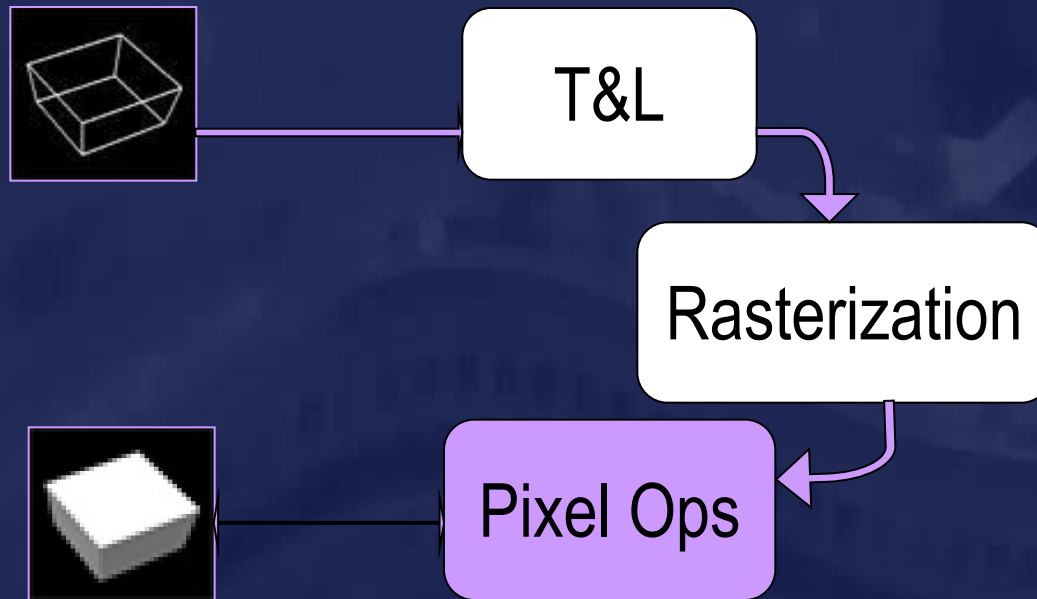
$\{x_i, y_i, z_i, \text{RGBA}_i\}$

Pixel Ops:
Запись пиксела
в буфер кадра

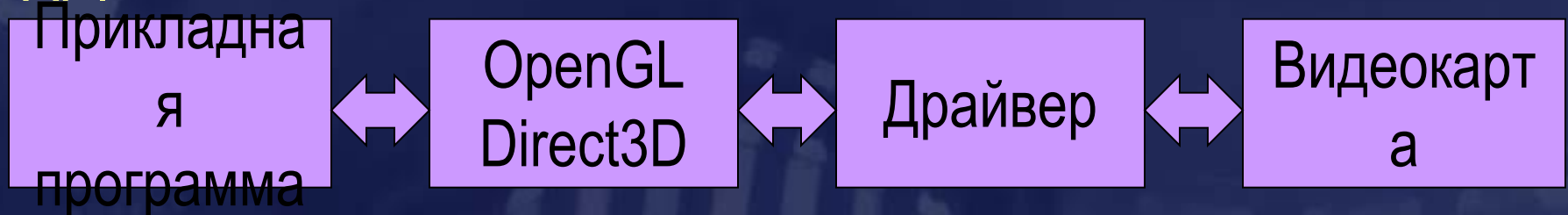
$\{x_i, y_i, z_i, \text{RGBA}_i\}$

3D-ускорители

- “Ускоряются” этапы T&L и растеризации



- Взаимодействие с программой при помощи специальных API



Поколение 4: Шейдеры



NV25-NV47



R250-R580



T&L

Rasterization

n

Pixel
Ops



```
dp4 r0.x, v0, c[0]
dp4 r0.y, v0, c[1]
dp4 r0.z, v0, c[2]
dp4 r0.w, v0, c[3]
mov oD0, c[4] ; Output color
mov oPos, r0 ; Output vertex
```

```
ps.1.0 // DX8 Version.
tex t0 // n-map.
texm3x3pad t1, t0_bx2
texm3x3pad t2, t0_bx2 v0_bx2
texm3x3tex t3, t0_bx2 dp3_sat
r0, t3_bx2,
```

OpenGL – многоплатформенная библиотека функций для создания интерактивных 2D и 3D приложений.

Отраслевой стандарт с 1992 года

- <http://www.opengl.org>
- <http://www.opengl.org.ru>

GLut – многоплатформенная библиотека вспомогательных функций для создания оконных приложений, использующих OpenGL

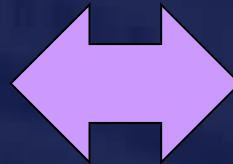
Позволяет скрыть особенности программирования под данную оконную систему.

OpenGL: клиент-сервер

```
/* прикладная программа
*/

#include<gl/gl.h>
#include<gl/glu.h>

...
glEnable(GL_TEXTURE_2D);
glBegin(GL_TRIANGLES);
...
glTexCoord2d(0.5,0.5);
glVertex3f(1.0,0.5,-0.2);
...
glEnd();
...
```

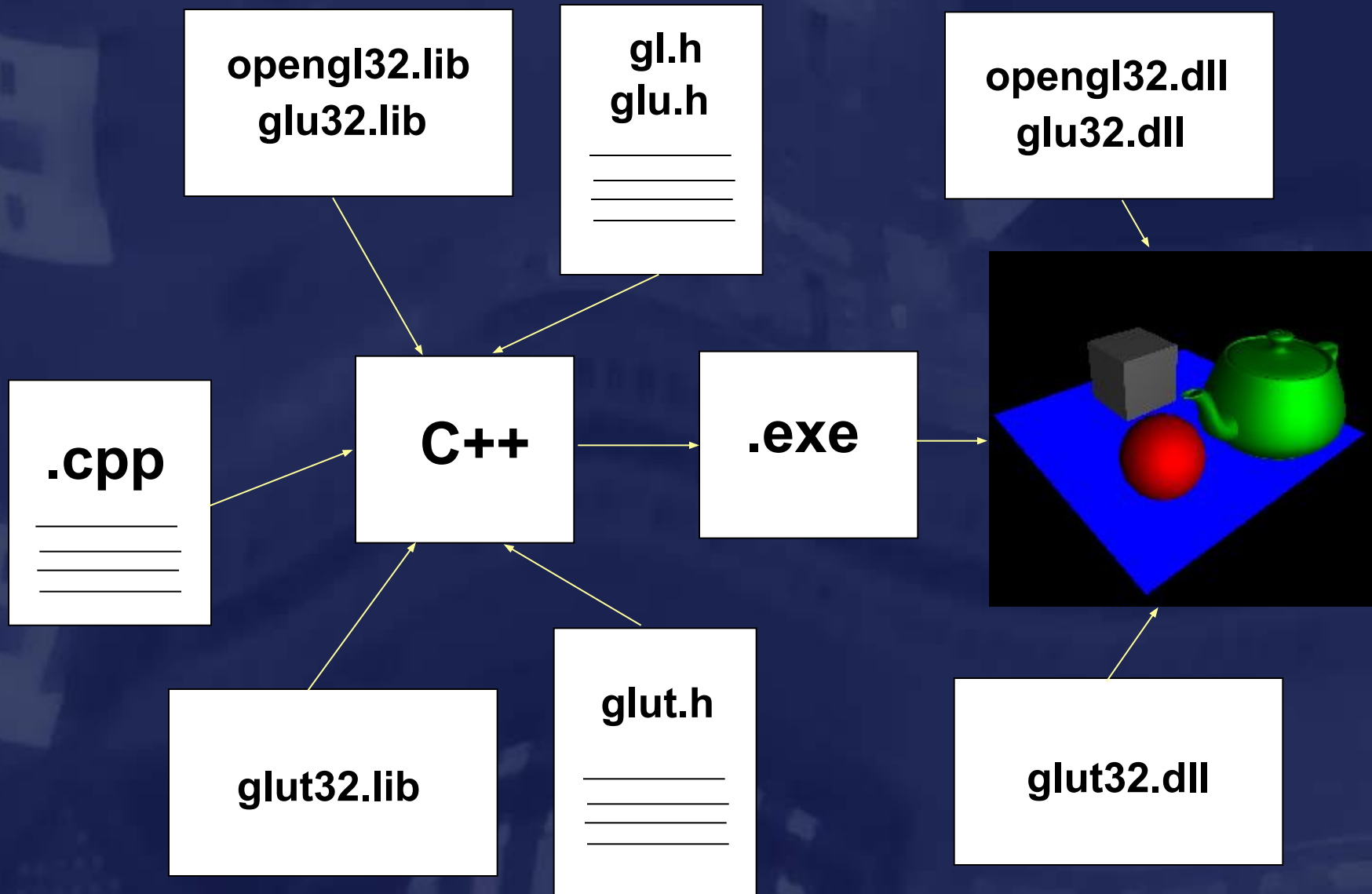


Сервер OpenGL



Буфер кадра,
Буфер глубины,
Буфер трафарета,
Буфер аккумулятора.

Что нужно для работы с OpenGL



Литература (1/5)

Ю. Тихомиров. OpenGL. Программирование трехмерной графики, БХВ – Петербург, 2002



Эдвард Энджел. Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL, 2-е изд., Вильямс, 2001

Литература (2/5)

Бу Мейсон, Нейдер Джеки, Девис Том, Шрайнер Дейв.
OpenGL. Руководство по программированию. Диа-Софт, 2002.



Френсис Хилл. OpenGL. Программирование компьютерной
графики. Для профессионалов. Питер. 2002

Литература (3/5)

Гайдуков С. OpenGL. Профессиональное программирование трехмерной графики на C++. - БХВ-Петербург, 2004



Литература (4/5)

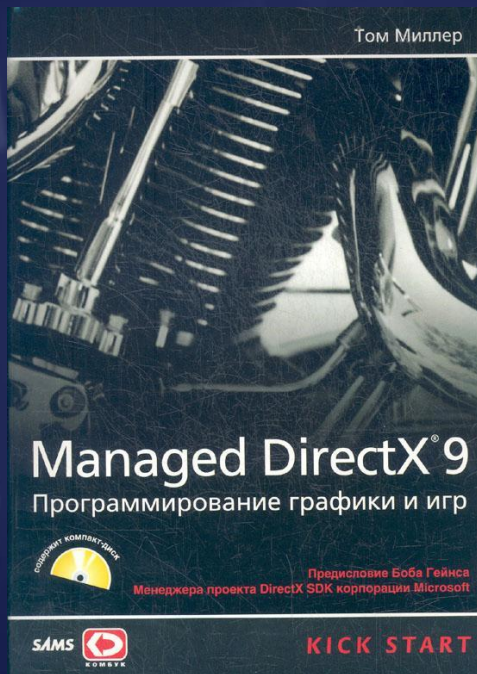
Боресков А.В. Расширения OpenGL. -
СПб.: БХВ-Петербург, 2005



Дж. Рост OpenGL. Трёхмерная графика и язык
программирования шейдеров - СПб.: Питер, 2005

Литература (5/5)

Миллер Т. DirectX 9 с управляемым кодом.
Программирование игр и графика. – КомБук, 2005.



Горнаков С. DirectX 9. Уроки программирования на C++. – БХВ, 2004.

Где взять GLUT?

- <http://www.opengl.org/developers/documentation/glut/index.html>
- <http://www.xmission.com/~nate/glut.html>
- <http://www.xmission.com/~nate/glut/glut-3.7.6-bin.zip>
- <http://www.xmission.com/~nate/glut/glut-3.7.6-src.zip>

Где прочитать про GLUT?

- <http://www.opengl.org.ru/coding/glut/> - работа с GLUT

Самая простая программа

```
#include<gl/glut.h>
#include<gl/gl.h>

void reshape(int w, int h)
    { /* Здесь обрабатываем изменение размеров окна */ }
void display(void)
    { /* Здесь помещаются команды рисования */ }
void idle(void)
    { /* Здесь происходит анимация */ }

int main(int argc, char **argv)
{
    glutInit(&argc, argv);
    glutInitDisplayMode(GLUT_RGB);
        // GLUT_DOUBLE|GLUT_DEPTH|GLUT_STENCIL|GLUT_ACCUM
    glutCreateWindow("Самая простая программа");
    glutDisplayFunc(display);
    glutReshapeFunc(reshape);
    glutIdleFunc(idle);
    glutMainLoop();
    return 0;
}
```

Работа с буфером кадра

- Задание цвета для заполнения буфера кадра

```
void glClearColor(GLclampf red, GLclampf green,  
                 GLclampf blue, GLclampf  
alpha);
```

$red, green, blue, alpha \in [0, 1]$

Представление цвета в OpenGL

- Заполнение экранных буферов

```
void glClear(GLenum buffers);
```

```
buffers = GL_COLOR_BUFFER_BIT |  
          GL_DEPTH_BUFFER_BIT |  
          GL_ACCUM_BUFFER_BIT |  
          GL_STENCIL_BUFFER_BIT
```


Преобразование координат: viewport

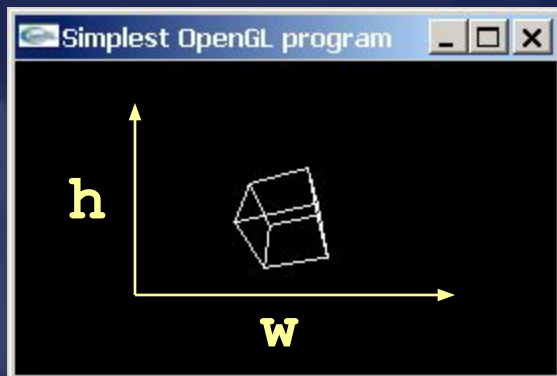
$$x_d, y_d, z_d \in [-1, 1]$$

$$x_w = x + w(1 + x_d) / 2$$

$$y_w = y + h(1 + y_d) / 2$$

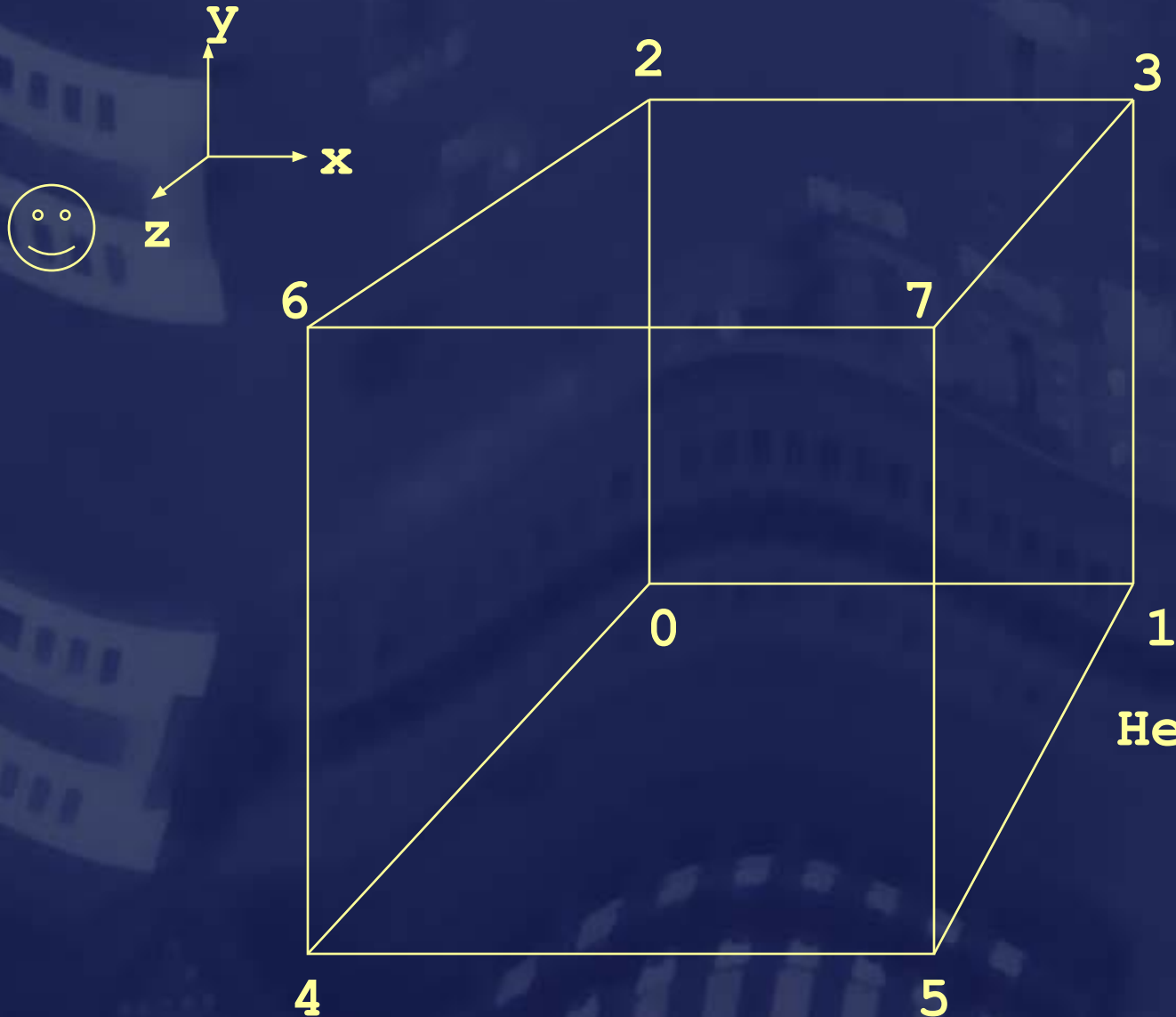
$$z_w = (f + n) / 2 + z_d (f - n) / 2, 0 \leq n < f \leq 1.$$

```
void glViewport(GLint x, GLint y,  
               GLsizei w, GLsizei h);
```



```
void glDepthRange(GLclampd n, GLclampd  
                 f);
```

Рисуем куб



Видимые грани:

7-6-5-4

6-7-3-2

7-5-1-3

Невидимые грани:

4-0-1-5

4-6-2-0

0-2-3-1

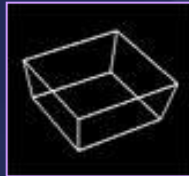
Команды OpenGL

glVertex3fv (v)

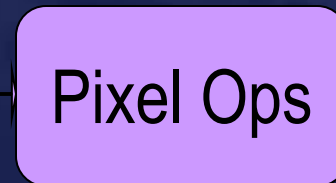
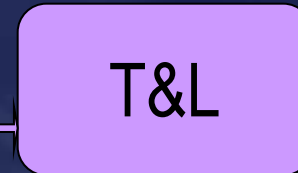


Модель begin/end

```
void glBegin(GLenum type);  
void glVertex(...);  
void glNormal(...);  
void glColor(...);  
void glEnd();
```



```
void glMatrixMode(...);  
void glLoadIdentity();  
void glMultMatrixd(...);
```



```
void glTexture2d(...);  
void glTexEnv(...);  
void glPolygonMode(...);
```



```
void glDepthFunc(...);  
void glBlendFunc(...);  
void glStencilOp(...);
```

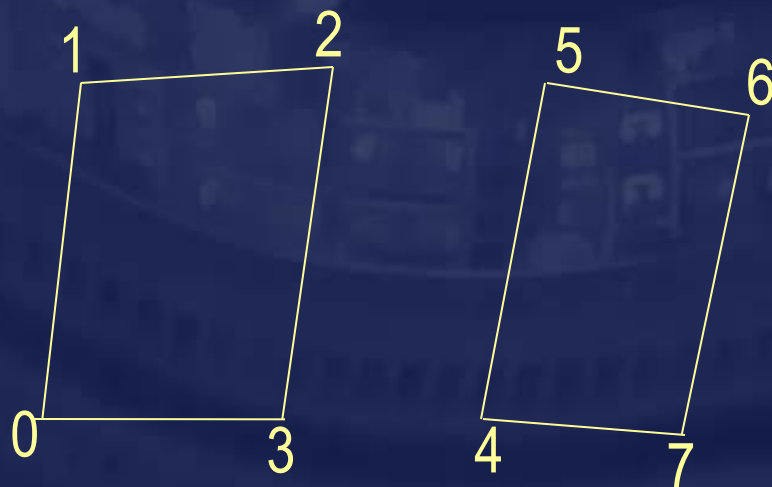


Формирование граней из вершин

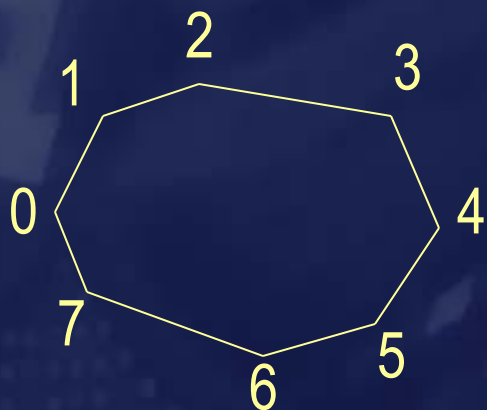
GL_TRIANGLES:



GL_QUADS:



GL_POLYGON:



Однородные координаты

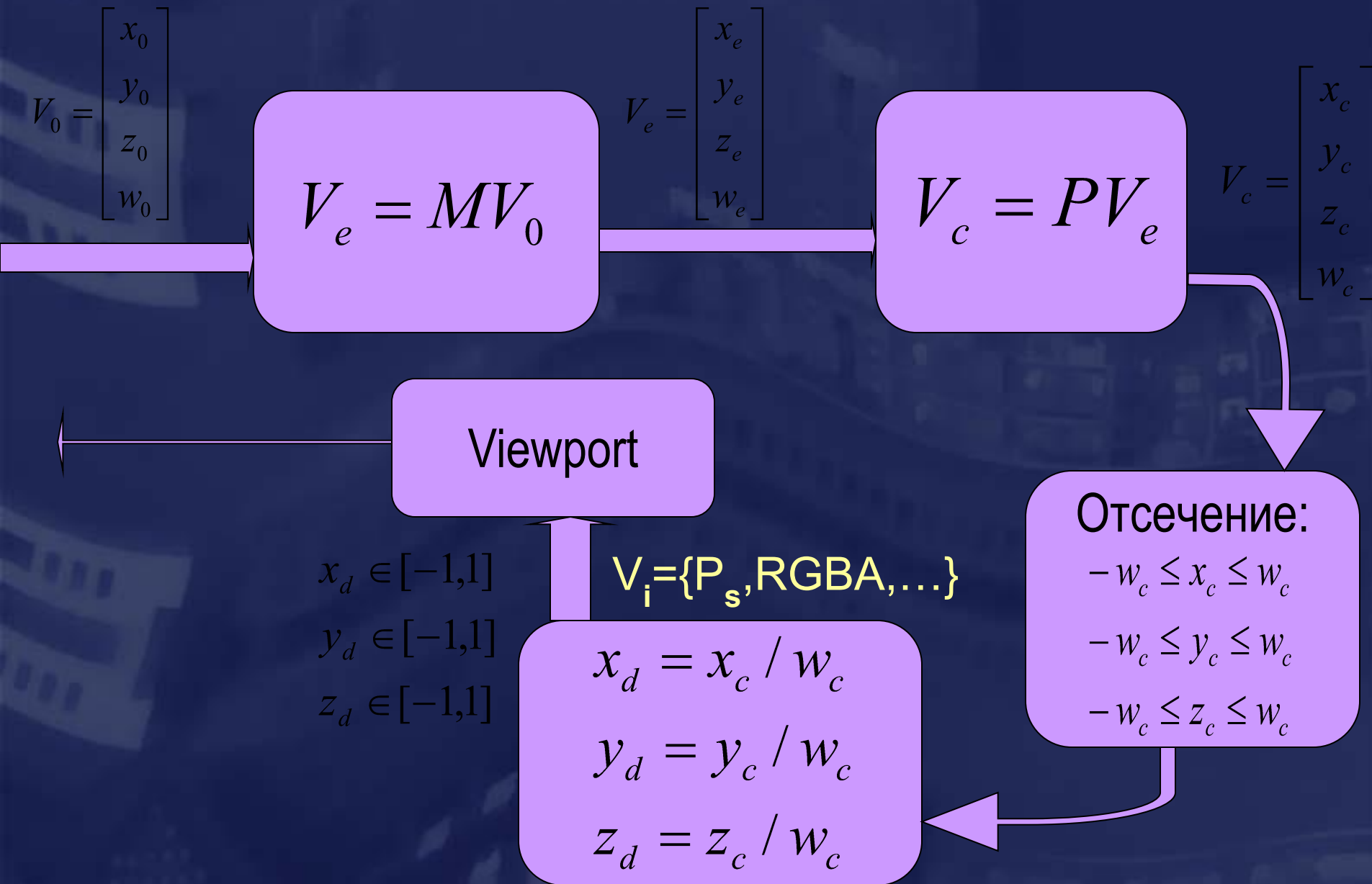
$$P = \{x, y, z, w; w \neq 0\} \longrightarrow P_3 = \{x/w, y/w, z/w\}$$

- Общее аффинное преобразование сводится к умножению на матрицу

$$T(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Проецирование также сводится к умножению на матрицу

Преобразование координат



Матрицы преобразований

- Выбираем матрицу преобразований для изменения:

```
void glMatrixMode(GLenum mode);
```

```
mode={GL_MODELVIEW|GL_PROJECTION}
```

- Две основные операции над матрицами:

```
void glLoadIdentity();
```

$$M = E$$

```
void glMultMatrixd(GLdouble c[16]);
```

$$M = M \cdot \begin{bmatrix} c[0] & c[4] & c[8] & c[12] \\ c[1] & c[5] & c[9] & c[13] \\ c[2] & c[6] & c[10] & c[14] \\ c[3] & c[7] & c[11] & c[15] \end{bmatrix}$$

Матрицы преобразований. Продолжение

```
void glTranslated(GLdouble x,  
                 GLdouble y,  
                 GLdouble z);
```

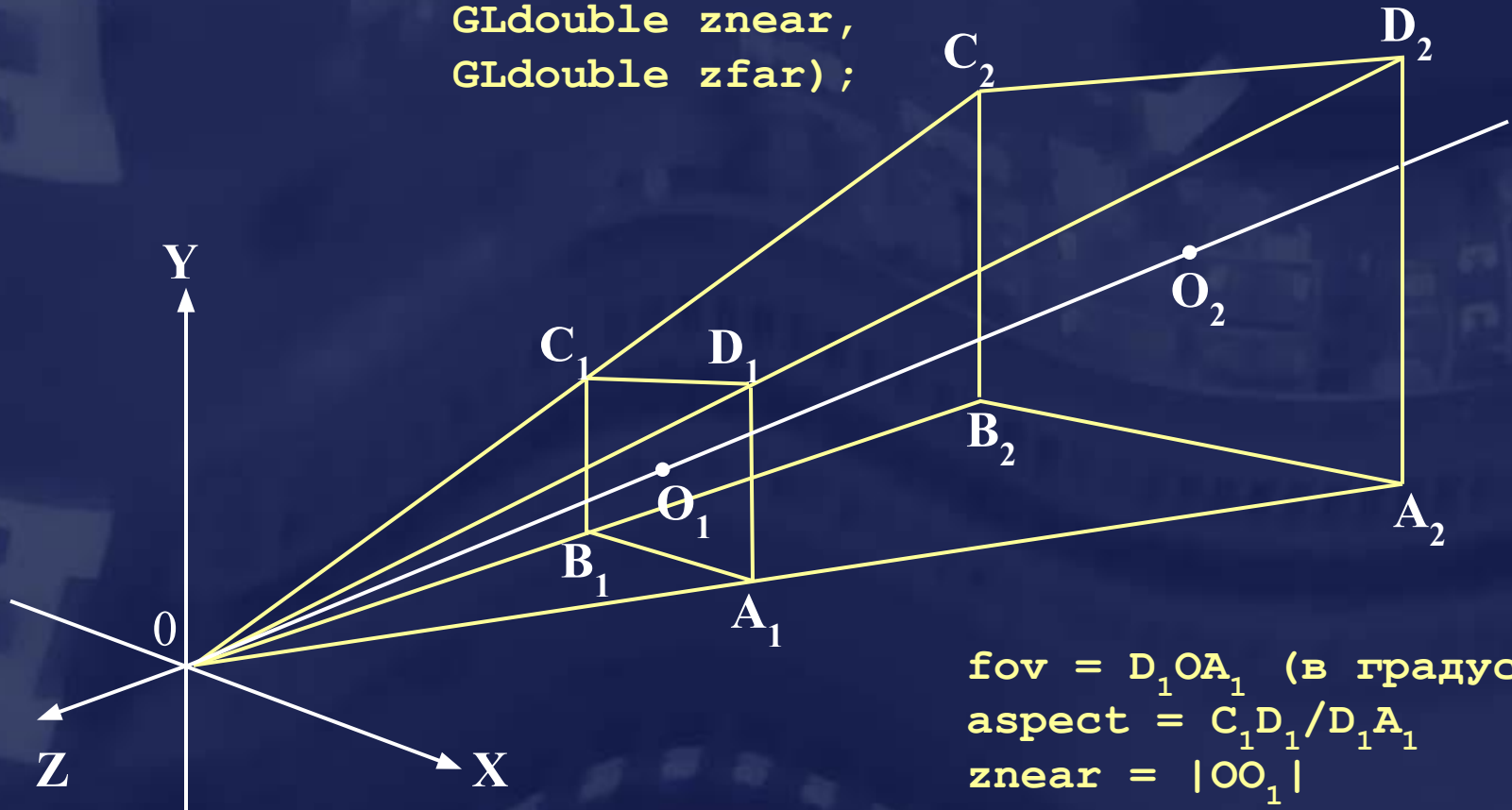
```
void glScaled(GLdouble x,  
             GLdouble y,  
             GLdouble z);
```

```
void glRotated(GLdouble angle,  
              GLdouble ax,  
              GLdouble ay,  
              GLdouble az);
```

```
void gluPerspective(GLdouble fovy,  
                   GLdouble aspect,  
                   GLdouble znear,  
                   GLdouble zfar);
```

Как работает gluPerspective?

```
void gluPerspective(GLdouble fovy,  
                  GLdouble aspect,  
                  GLdouble znear,  
                  GLdouble zfar);
```



$fov = \angle D_1 O A_1$ (в градусах)
 $aspect = C_1 D_1 / D_1 A_1$
 $znear = |OO_1|$
 $zfar = |OO_2|$

gluPerspective: продолжение

$$P = \begin{bmatrix} \frac{f}{a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z_f + z_n}{z_n - z_f} & \frac{2z_f z_n}{z_n - z_f} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$f = \text{ctg}(\text{fovy}/2),$$

$$a = \text{aspect}$$

$$z_n = \text{znear}$$

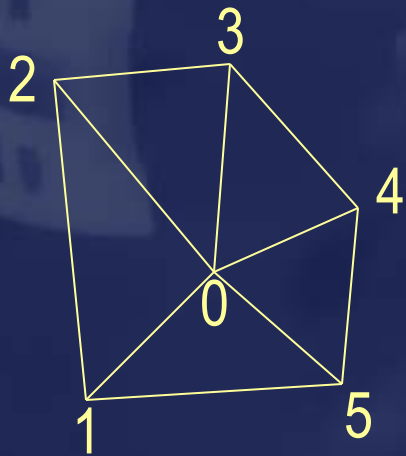
$$z_f = \text{zfar}$$

$$O_1 : P \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -z_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_n \\ -z_n \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

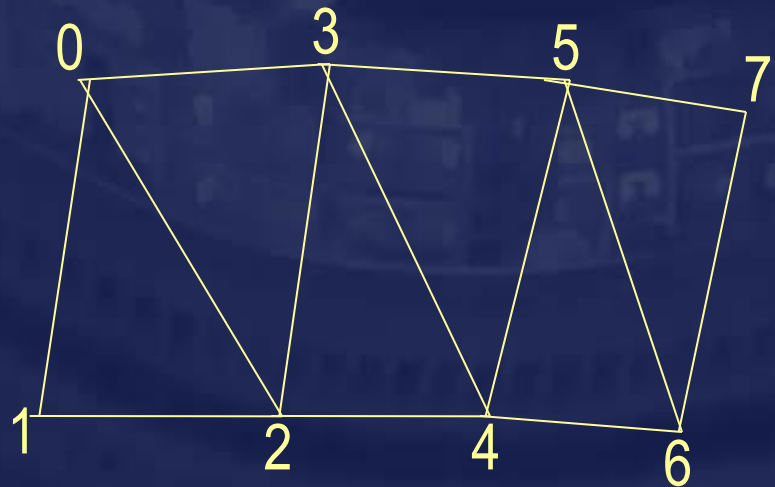
$$O_2 : P \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -z_f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -z_f \\ -z_f \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Уменьшение количества вершин

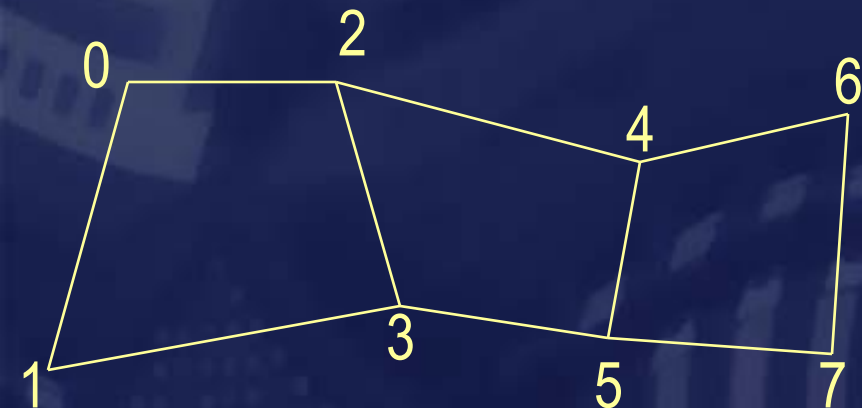
GL_TRIANGLE_FAN: $3n$ vs. $1+n$, $n>1$



GL_TRIANGLE_STRIP: $3n$ vs. $2+n$



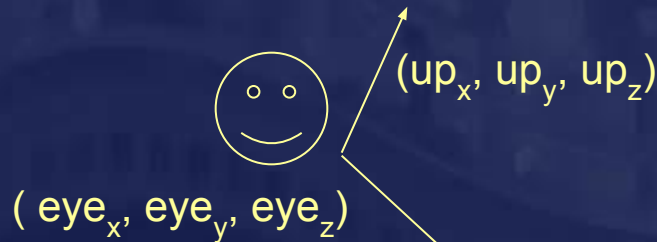
GL_QUAD_STRIP: $4n$ vs. $2+2n$



Виртуальная камера

Настройка виртуальной камеры

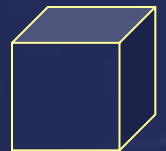
```
gluLookAt( eye_x, eye_y, eye_z, aim_x, aim_y, aim_z, up_x, up_y, up_z)
```



eye – координаты наблюдателя

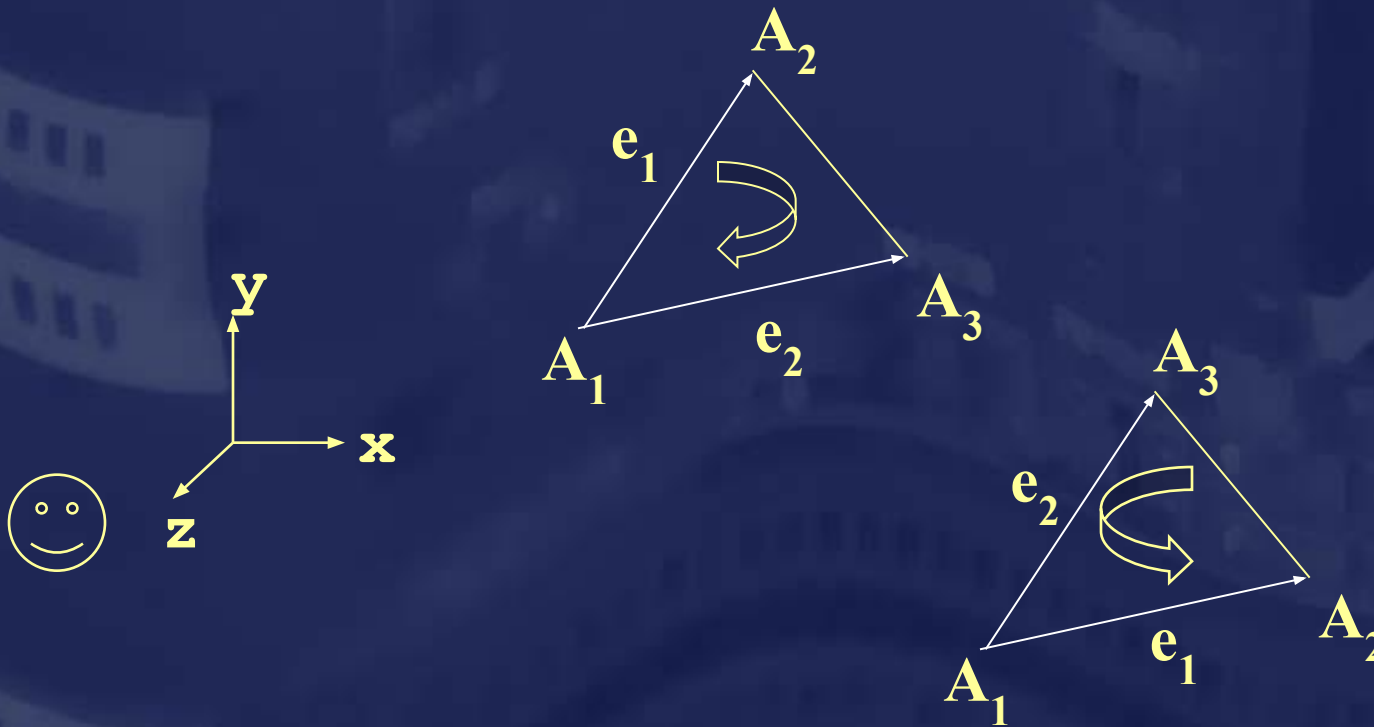
aim – координаты “цели”

up – направление вверх



(aim_x, aim_y, aim_z)

Лицевые и нелицевые грани



$$e_1 = A_2 - A_1,$$

$$e_2 = A_3 - A_1,$$

$$n = [e_1, e_2]$$

```
glEnable(GL_CULL_FACE); glDisable(GL_CULL_FACE);
```

```
void glFrontFace(GLenum type);  
    type = {GL_CW|GL_CCW}
```

```
void glCullFace(GLenum type);  
    type = {GL_FRONT|GL_BACK (по умолчанию)}
```

Дисплейные списки

- ❑ Дисплейный список (display list) – запомненная последовательность команд OpenGL.

- ❑ Находим неиспользуемый номер дисплейного списка

```
GLuint n = glGenLists(1);
```

- ❑ Сохраняем последовательность команд

```
glNewList(n, GL_COMPILE);  
<...вызовы функции OpenGL...>  
glEndList();
```

- ❑ Воспроизводим сохраненную последовательность команд (с теми же самыми параметрами!)

```
glCallList(n);
```

- ❑ Освобождаем номер дисплейного списка

```
glDeleteLists(n, 1);
```

Z-буфер

- ❑ Необходимо создать z-буфер

```
glutDisplayMode (GLUT_DEPTH | /*...*/);
```

- ❑ Перед рисованием сцены очистить z-буфер

```
glClear (GL_DEPTH_BUFFER_BIT | /*...*/);
```

- ❑ Включить или выключить сравнение z координат

```
glEnable (GL_DEPTH_TEST);  
glDisable (GL_DEPTH_TEST);
```

- ❑ Возможно включить или выключить запись в z-буфер

```
glDepthMask (TRUE); или glDepthMask (FALSE);
```

- ❑ Возможно задать операцию сравнения

```
glDepthFunc (GLenum type);  
type = {GL_ALWAYS | GL_NEVER | GL_LESS | GL_GREATER |  
        GL_EQUAL | GL_NOTEQUAL | GL_LEQUAL | GL_GEQUAL}
```


Стек матриц

`glLoadIdentity();`

`glTranslated(...);`

`glPushMatrix();`

`glRotated(...);`

`glPopMatrix();`

`glPushMatrix();`

`glRotated(...);`

`glPopMatrix();`

E

T

T

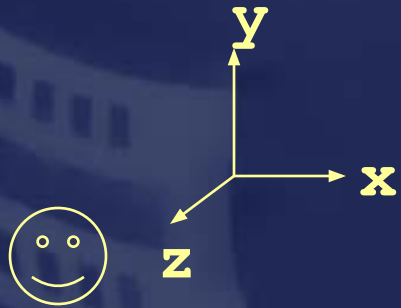
T*R1

T

T

T*R2

Рисуем тор

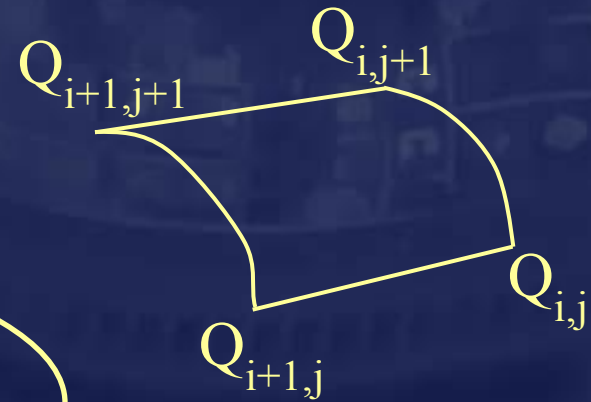
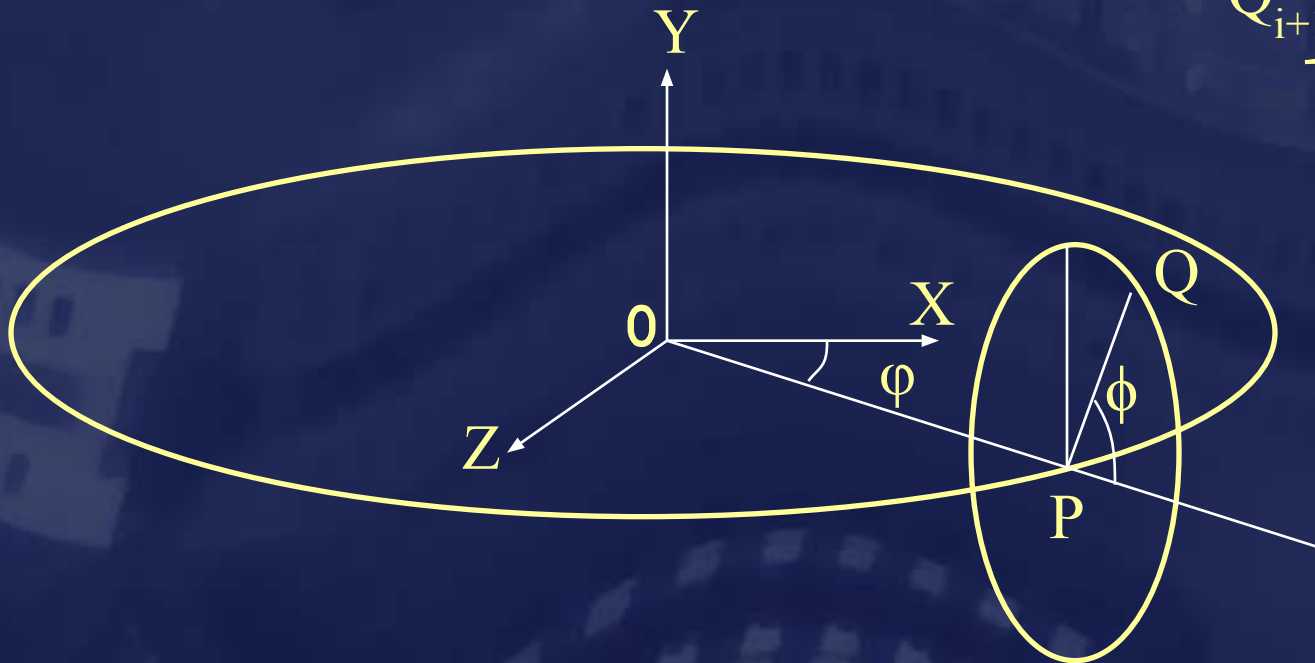


$$P(\phi) = (R_1 \cos \phi, 0, R_1 \sin \phi)$$

$$\bar{n}(\phi, \varphi) = (\cos \phi \cos \varphi, \sin \varphi, \sin \phi \cos \varphi)$$

$$Q(\phi, \varphi) = P(\phi) + R_2 \bar{n}(\phi, \varphi)$$

$$\phi, \varphi \in [0, 2\pi]$$

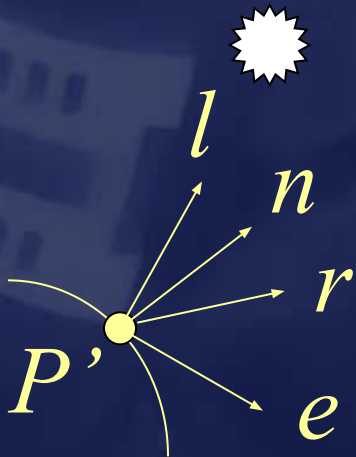


$$Q_{i,j} = Q(2\pi i / N_1, 2\pi j / N_2), i = 0, 1, \dots, N_1, j = 0, 1, \dots, N_2.$$

Уравнение освещенности по Фонгу

$$I = a_m a_l + d_m d_l (n \cdot l) + s_m s_l (e \cdot r)^{h_s}$$

- ❑ Фоновое освещение не имеет источника и зависит только от сцены
- ❑ При диффузном освещении свет от источника равномерно рассеивается во всех направлениях.
- ❑ При зеркальном освещении свет от источника отражается от поверхности в одном направлении. Зеркальная освещенность дополнительно зависит от положения наблюдателя..



$$(a \cdot b) = \begin{cases} (a, b), & (a, b) \geq 0 \\ 0, & (a, b) < 0 \end{cases}$$

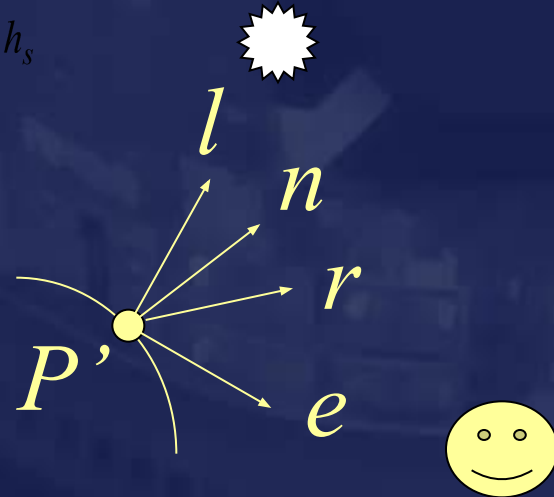
$$r = \text{reflect}(l, n)$$

Модели Блинна и Шлика

- ❑ Вычисление отраженного вектора – трудоемкая операция (Блинн)

$$I = a_m a_l + d_m d_l (n \otimes l) + s_m s_l (n \otimes h)^{h_s}$$

$$h = \frac{l + e}{\|l + e\|}$$



- ❑ Возведение в степень также работает не очень быстро... (Шлик)

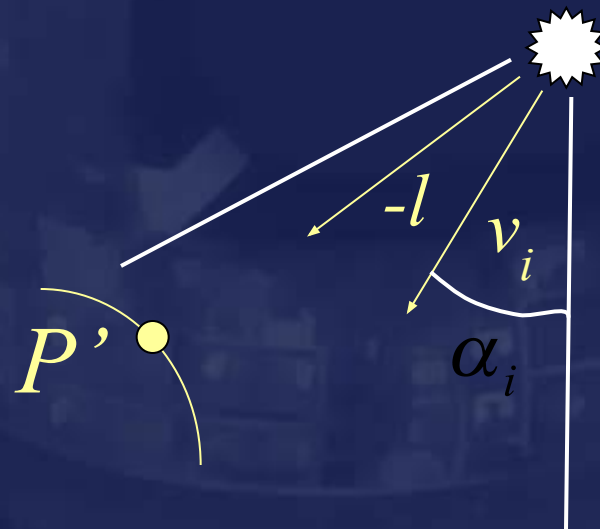
$$(n \otimes h)^{h_s} \sim \frac{D}{h_s - Dh_s + D}, D = (n \otimes h)$$

Уравнение освещенности OpenGL

$$c = e_m + a_m a_s + \sum_{i=0}^{n-1} att_i \cdot spot_i \cdot (a_m a_i + d_m d_i (n \boxtimes l) + s_m s_i (n \boxtimes h)^{h_m})$$

$$att_i = \frac{1}{k_{c,i} + k_{l,i} r + k_{q,i} r^2},$$

$$spot_i = \begin{cases} 1, \alpha_i = \pi, \\ 0, (v_i, -l) < \cos(\alpha_i), \\ (v_i, -l), (v_i, -l) \geq \cos(\alpha_i). \end{cases}$$



$spot_i$ – коэффициент направленности

att_i – коэффициент затухания

a_s – фоновое освещение

a_i, s_i, d_i – свойства i -го источника освещения

e_m, a_m, s_m, d_m, h_m – свойства материала

Установка параметров освещения в OpenGL

- Задаем параметры материала:

```
void glMaterialfv(GLenum face, GLenum param, GLfloat *value);  
    face = {GL_FRONT|GL_BACK}  
    param = {GL_AMBIENT|GL_DIFFUSE|GL_EMISSIVE|GL_SPECULAR}  
    value = float[4] // RGBA  
  
void glMaterialf(GLenum face, GL_SHININESS, GLfloat value);
```

- Задаем цвет фонового освещения:

```
void glLightModelfv(GLenum param, GLfloat *value);  
    param = LIGHT_MODEL_AMBIENT  
    value = float[4] // RGBA
```

- Задаем цвет источника освещения:

```
void glLightfv(GLenum light, GLenum param, GLfloat *value);  
    face = {GL_LIGHT0|GL_LIGHT1|...}  
    param = {GL_AMBIENT|GL_DIFFUSE|GL_SPECULAR}  
    value = float[4] // RGBA
```

Установка параметров освещения. Часть 2.

- Задаем положение источника освещения:

```
void glLightfv(GLenum light, GL_POSITION, GLfloat *value);  
face = {GL_LIGHT0|GL_LIGHT1|...}  
value = float[4] // x,y,z,w
```

Координаты источника освещения преобразуются текущей матрицей модельного преобразования!

- Включаем расчет освещенности

```
void glEnable(GLenum type); type = GL_LIGHTING;
```

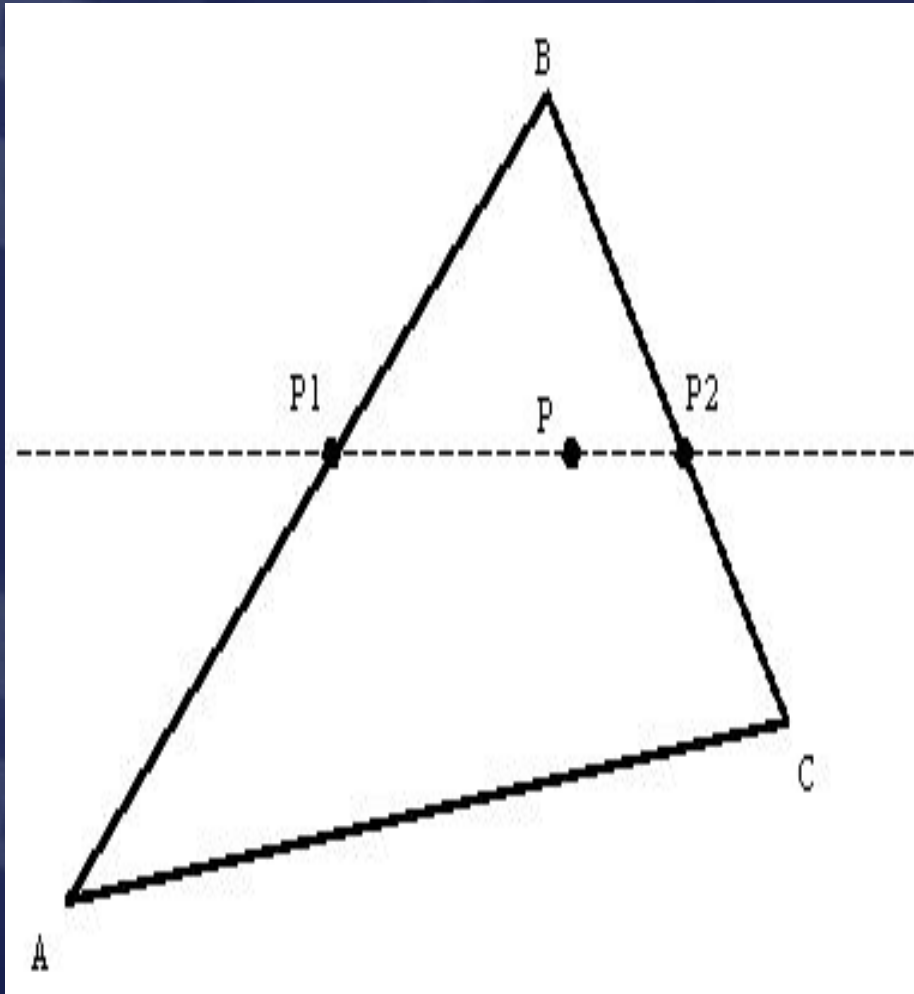
- Включаем требуемые источники освещения

```
void glEnable(GLenum type); type = GL_LIGHT0;
```

- Включаем требуемые источники освещения

```
void glShadeModel(GLenum type);  
type = GL_FLAT; - плоская закраска грани  
type = GL_SMOOTH - закраска по Гуро
```

Интерполяция цвета



- Вычислить цвет (RGB) в каждой вершине.
- Вычислить цвет в точках P1 и P2:

$$s = \|P1 - B\| / \|A - B\|$$

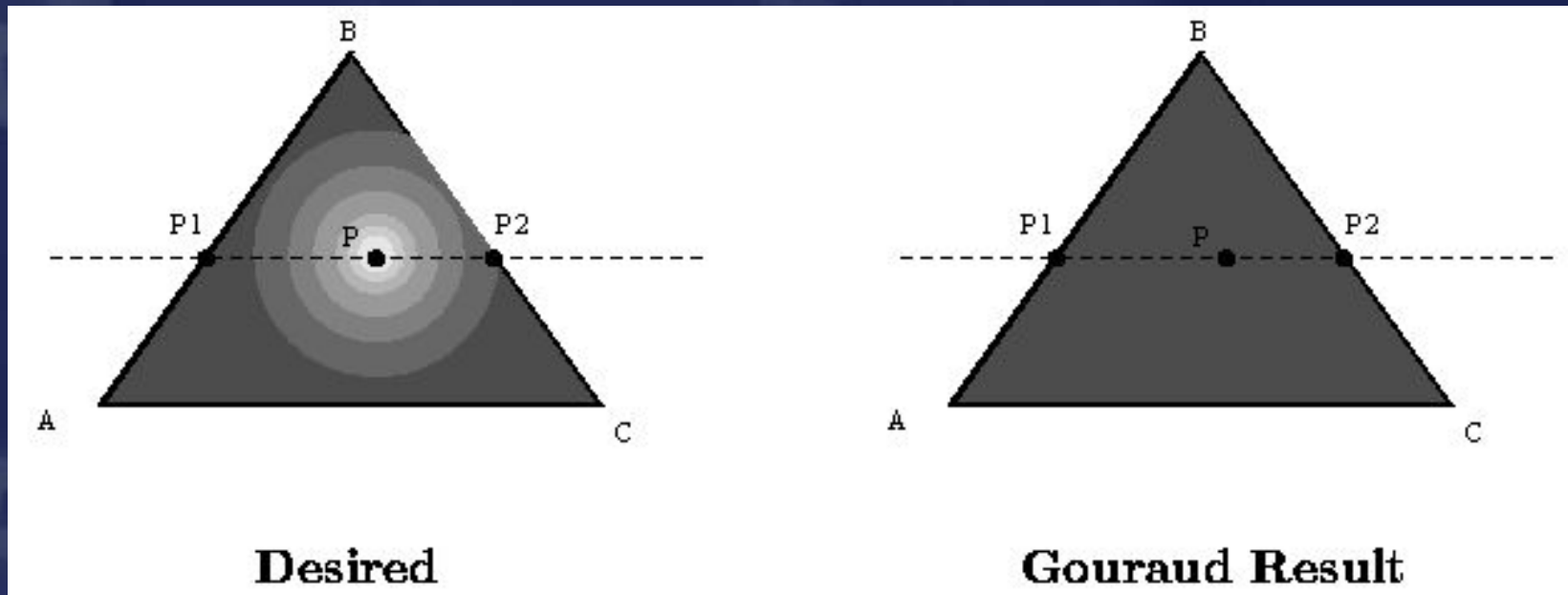
$$C(P1) = s(C(A)) - (1-s)(C(B))$$

- Вычислить цвет в т. P:

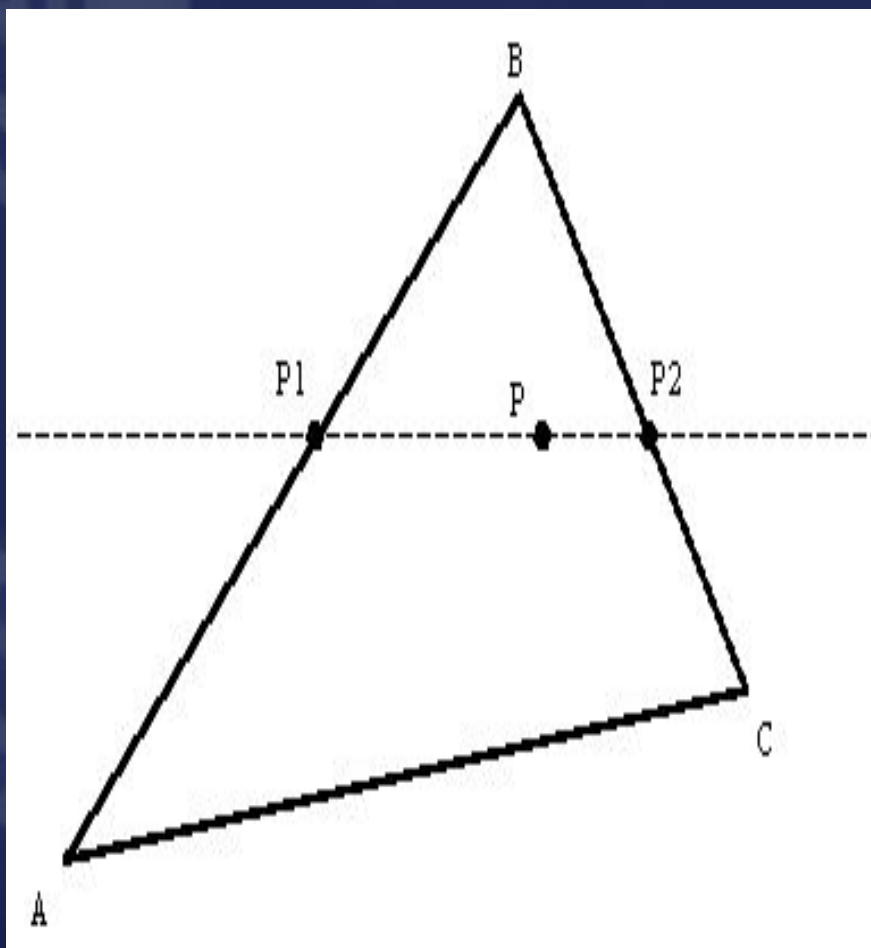
$$s = \|P - P2\| / \|P1 - P2\|$$

$$C(P) = s(C(P1)) - (1-s)(C(P2))$$

Недостатки закраски по Гуро



Интерполяция нормали




- Вычислить нормали (RGB) в каждой вершине.
- Вычислить нормаль в точках P1 и P2:
$$s = \|P1 - B\| / \|A - B\|$$
$$N(P1) = s(N(A)) + (1-s)(N(B))$$
- Вычислить нормаль в т. P:
$$s = \|P - P2\| / \|P1 - P2\|$$
$$N(P) = s(N(P1)) + (1-s)(N(P2))$$
- Вычислить цвет в точке P.

Массивы вершин

- Задаем массив вершин, нормалей и текстурных координат:

```
void glVertexPointer(GLint size, GLenum type,  
                    GLsizei stride, const GLvoid *pointer);
```



1	1	-1
1	-1	-1
-1	-1	-1
-1	1	-1
1	1	1
1	-1	1
-1	-1	1
-1	1	1

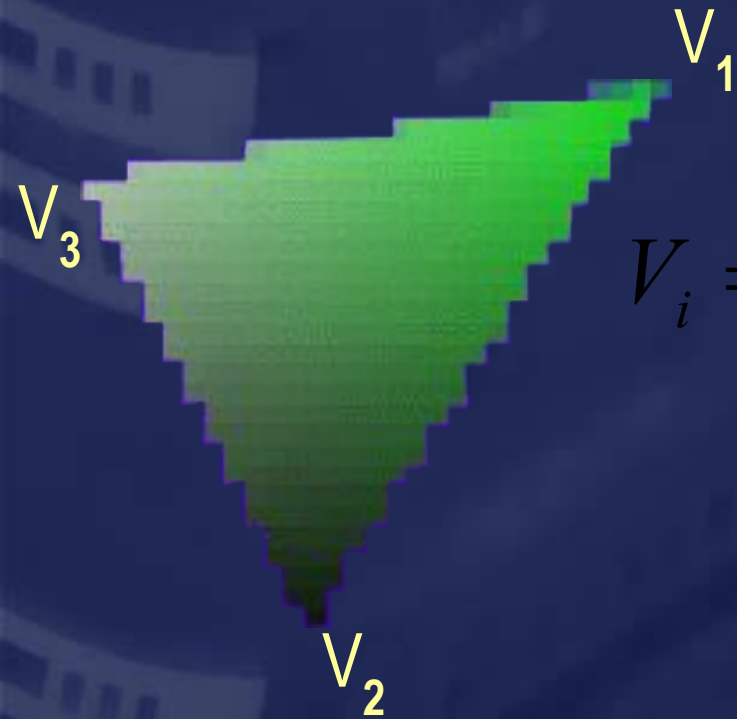


- Задаем последовательность номеров вершин

```
void glDrawElements(GLenum mode, GLsizei count,  
                   GLenum type, const GLvoid *indices);
```

- Возможно полностью избежать дублирования вершин

Растреризация



$$V_i = \{x_i, y_i, z_i, RGBA_i, \dots\}, i = 1, 2, 3$$

- Интерполяция координаты z

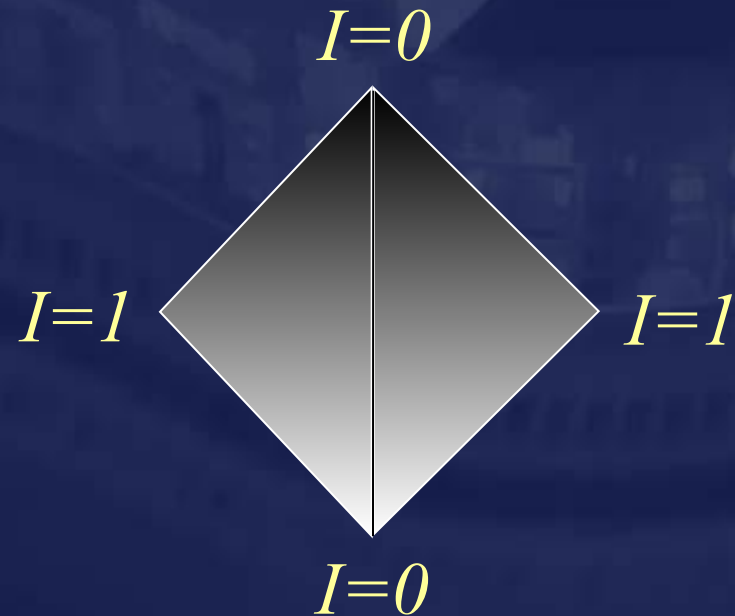
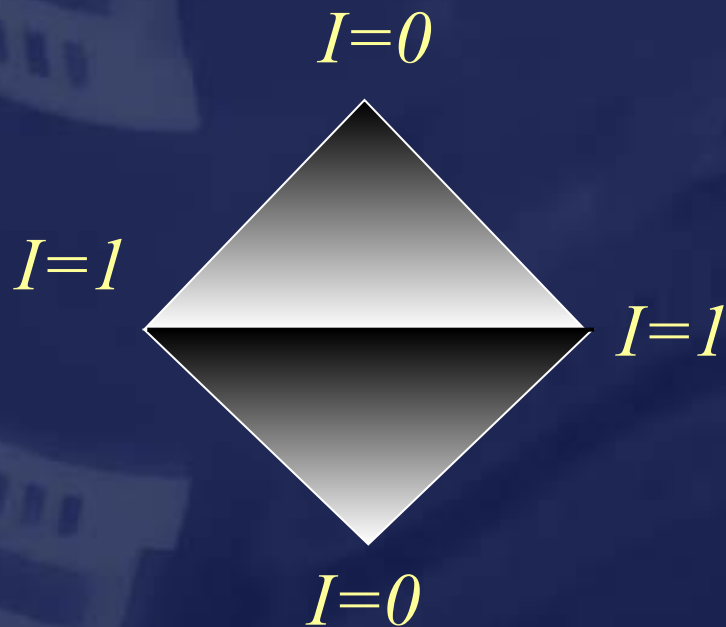
$$z(x, y) = L(x, y, z_i)$$

- Интерполяция цвета вдоль примитива - закраска по Гуро

$$RGBA(x, y) = L(x, y, RGBA_i)$$

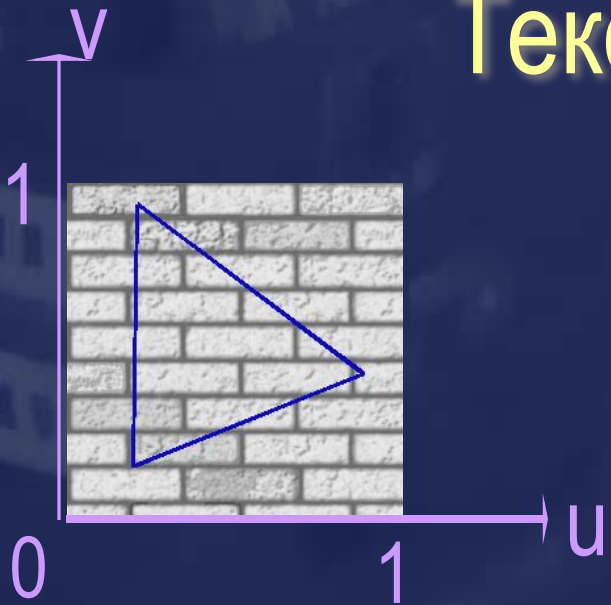
Ошибки линейной интерполяции

- ❑ Освещенность зависит от способа разбиения на примитивы



- ❑ Поле нормалей лучше задавать в виде текстуры!

Текстурирование



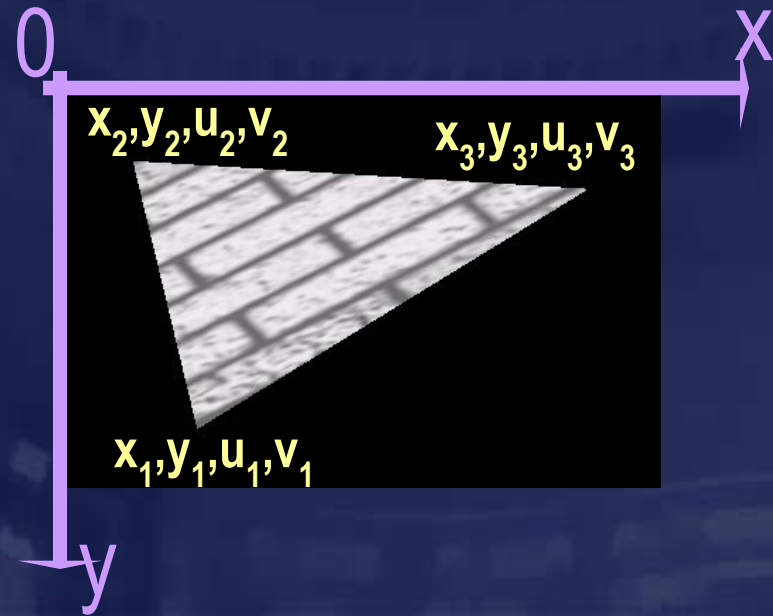
$$V_i = \{P_i, n_i, u_i, v_i, \dots\}, i = 1, 2, 3$$

$$V_i' = \{x_i, y_i, u_i, v_i, \dots\}, i = 1, 2, 3$$

“Перспективное” текстурирование:

$$u(x, y) = \frac{Ax + By + C}{Px + Qy + R}$$

$$v(x, y) = \frac{Dx + Ey + F}{Px + Qy + R}$$



Текстурирование в OpenGL

- Создаем текстуру - прямоугольный массив с цветами пикселей. Высота и ширина должны быть степенями двойки.

RGB ₀₀	RGB ₁₀	...	RGB _{N0}
RGB ₀₁	RGB ₁₁	...	RGB _{N1}
...
RGB _{0M}	RGB _{1M}	...	RGB _{NM}

$$N = 2^n - 1,$$

$$M = 2^m - 1.$$

- Получаем номер текстурного объекта:

```
GLuint texture;  
glGenTextures(1, &texture);
```

- Активизируем текстурный объект:

```
glBindTexture(texture);
```

Текстурирование в OpenGL: часть 2

- ❑ Загружаем текстуру из памяти в текстурный объект:

```
glPixelStorei(GL_UNPACK_ALIGNMENT,1);
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D,
             0, // Mip-level
             GL_RGB, // Формат текстуры
             tex_width, tex_height,
             0, // Ширина границы
             GL_RGB, // Формат исходных данных
             GL_UNSIGNED_BYTE, // Тип данных
             tex_bits); // Исходные данные
```

- ❑ Устанавливаем режимы текстурирования:

```
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D,
                GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_REPEAT);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D,
                GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_REPEAT);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D,
                GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D,
                GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_LINEAR);
```


Текстурирование в OpenGL: часть 3

- ❑ Разрешаем текстурирования

```
glEnable(GL_TEXTURE_2D);
```

- ❑ Задаем текстурные координаты (обычно для каждой вершины)

```
glTexCoord2d(u, v);
```

- ❑ Возможно, потребуется включить режим перспективного текстурирования

```
glHint(GL_PERSPECTIVE_CORRECTION_HINT, GL_NICEST);
```

- ❑ Возвращаем номер текстурного объекта в список свободных

```
glDeleteTextures(1, &texture);
```

Как загрузить картинку из файла?

- ❑ Функции BmpLoad из примеров:

```
unsigned char *LoadIndexedBMPFile  
    (const char *path,int *width,int *height);  
unsigned char *LoadTrueColorBMPFile  
    (const char *path,int *width,int *height);
```

- ❑ Классы из NV SDK:

```
namespace jpeg  
{  
    extern int read(const char *filename,  
        int *width,int *height,  
        unsigned char **pixels, int *components);  
}
```

- ❑ Воспользоваться любой другой сторонней библиотекой

Фильтрация текстур

$$s = 2^n u, \quad t = 2^m v$$

□ Выборка ближайшего текселя GL_NEAREST:

$$i = \lfloor s \rfloor, \quad j = \lfloor t \rfloor$$

$$\tau = \tau_{i,j}$$

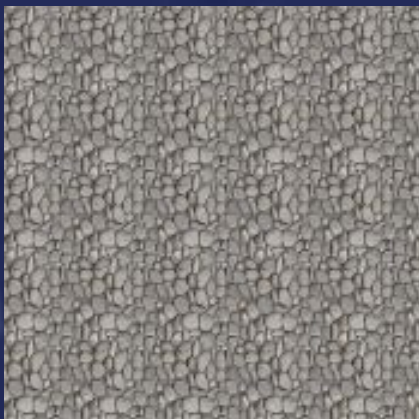
□ Линейная комбинация 4-х соседних пикселей GL_LINEAR:

$$\alpha = \text{frac}(s - 1/2), \quad \beta = \text{frac}(t - 1/2)$$

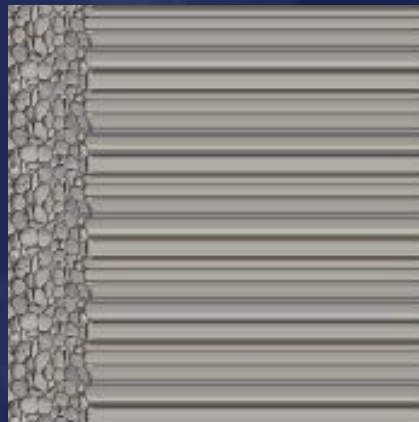
$$i_0 = \lfloor s \rfloor, \quad j_0 = \lfloor t \rfloor, \quad i_1 = i_0 + 1, \quad j_1 = j_0 + 1$$

$$\tau = (1 - \alpha)(1 - \beta)\tau_{00} + \alpha(1 - \beta)\tau_{10} + (1 - \alpha)\beta\tau_{01} + \alpha\beta\tau_{11}$$

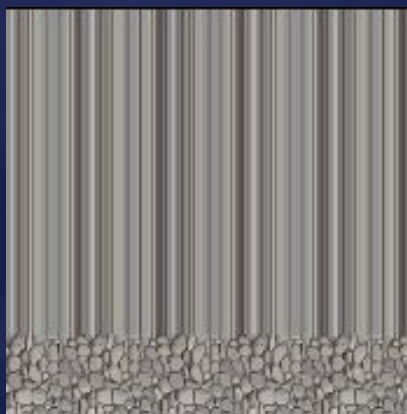
Свертка текстурных координат



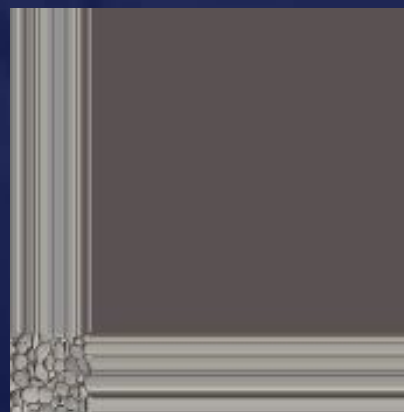
```
glTexParameteri(...,GL_REPEAT);  
glTexParameteri(...,GL_REPEAT);
```



```
glTexParameteri(...,GL_CLAMP);  
glTexParameteri(...,GL_REPEAT);
```



```
glTexParameteri(...,GL_REPEAT);  
glTexParameteri(...,GL_CLAMP);
```



```
glTexParameteri(...,GL_CLAMP);  
glTexParameteri(...,GL_CLAMP);
```

Фильтрация текстур: mipmapping

$$\rho = \max \left\{ \sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2}, \sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2} \right\}$$

$0 < \rho < 1$ увеличение текстуры

$\rho = 1$ масштаб 1:1

$\rho > 1$ уменьшение текстуры

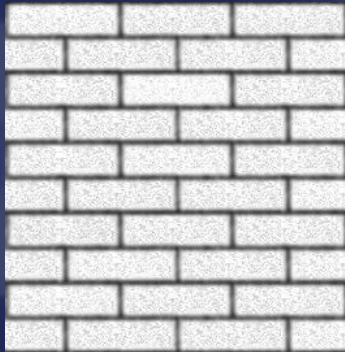
$$\lambda = \log_2 \rho$$

$\lambda < 0$ увеличение текстуры

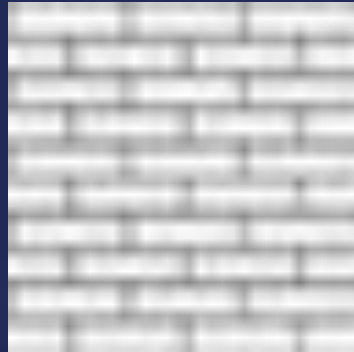
$\lambda = 0$ масштаб 1:1

$\lambda > 0$ уменьшение текстуры в 2^λ раз

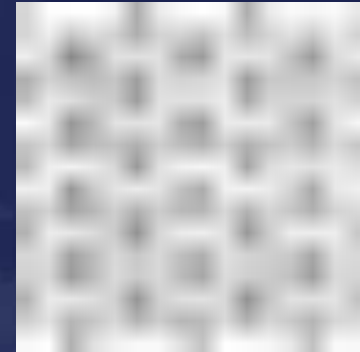
Фильтрация текстур: mipmaping. Часть 2



256x256, $\lambda=0$



64x64, $\lambda=2$



16x16, $\lambda=4$

□ Трилинейная фильтрация `GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR`

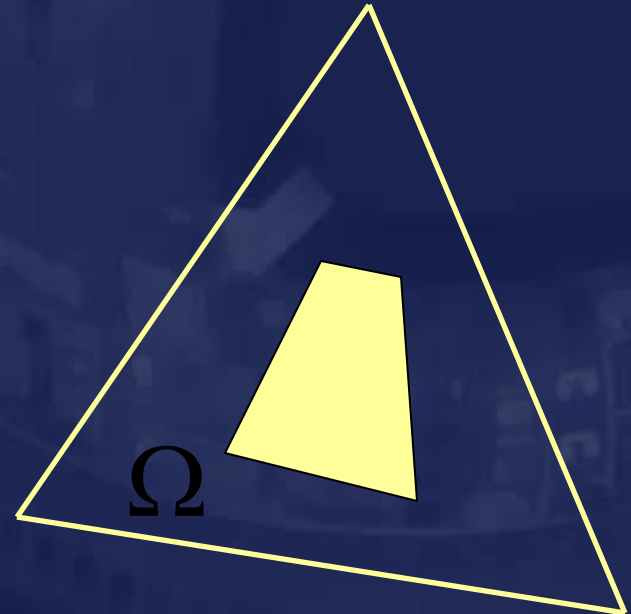
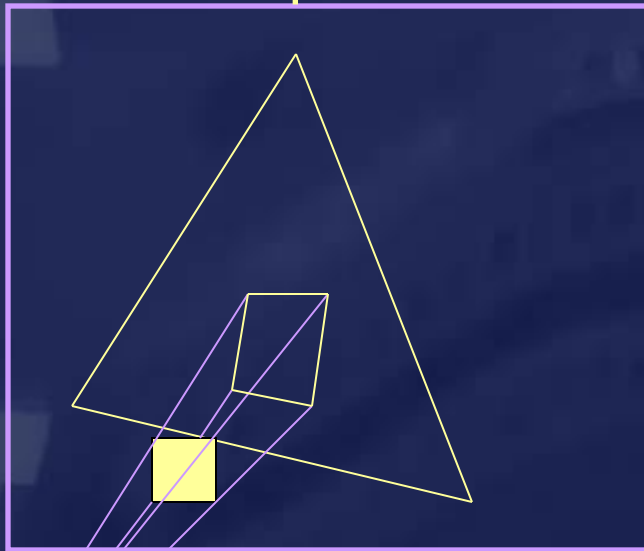
$0 \leq d - 1 \leq \lambda < d$, d – целое

$\alpha = \text{frac}(\lambda)$

$\tau = \alpha \tau_{d-1} + (1 - \alpha) \tau_d$

Анизотропная фильтрация

Экран

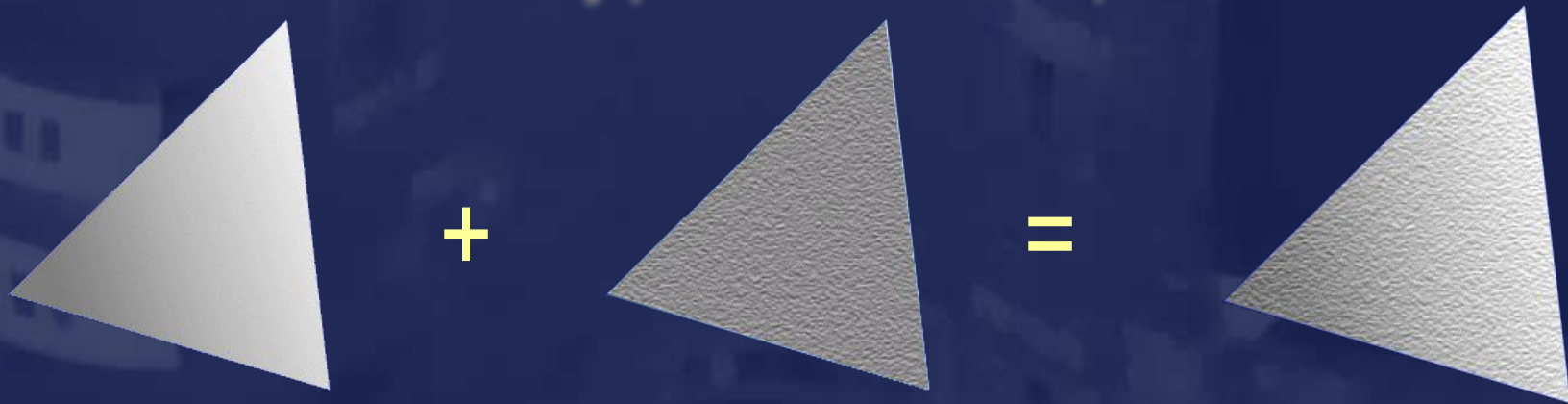


$$\tau = \sum_{i=0}^{15} \alpha_i \tau_{x_i y_i}, (x_i, y_i) \in \Omega$$



Расширение "GL_EXT_texture_filter_anisotropic"

Текстура и освещение



$RGBA_f$ из модуля T&L $RGBA_t$ текстуры $RGBA_c$ результат

- Замещение `GL_REPLACE`

$$R_c = R_t, G_c = G_t, B_c = B_t, A_c = A_t$$



Demo

- Модулирование `GL_MODULATE` (по умолчанию)

$$R_c = R_f R_t, G_c = G_f G_t, B_c = B_f B_t, A_c = A_f A_t$$

- Смешение `GL_DECAL, GL_BLEND`

$$R_c = R_f (1 - A_t) + R_t A_t, A_c = A_f$$

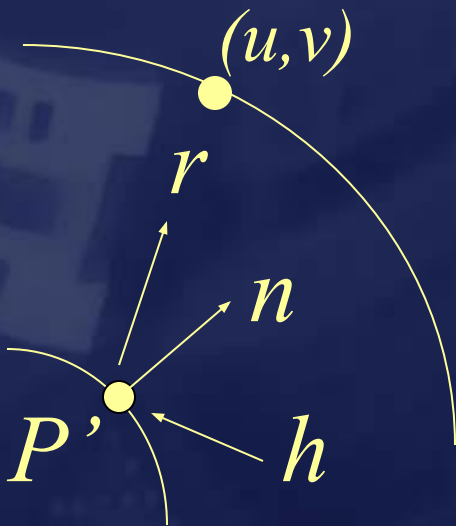
Генерация текстурных координат

□ Линейная зависимость

$$u = a_{11}P_x + a_{12}P_y + a_{13}P_z + a_{14}P_w$$

$$v = a_{21}P_x + a_{22}P_y + a_{23}P_z + a_{24}P_w$$

□ Environment mapping - эффект отражающей поверхности



$$r = u - 2(n, n^T)h$$

$$m = 2\sqrt{r_x^2 + r_y^2 + (r_z + 1)^2}$$

$$u = 1/2 + r_x / m$$

$$v = 1/2 + r_y / m$$

Генерация текстурных координат.

Продолжение

- ❑ Включаем автоматическую генерацию текстурных координат (для первых двух координат)

```
glEnable (GL_TEXTURE_GEN_S) ;  
glEnable (GL_TEXTURE_GEN_T) ;
```

- ❑ Включаем автоматическую генерацию текстурных координат (для первых двух координат)

```
glTexGeni (GL_S, GL_TEXTURE_GEN_MODE, GL_SPHERE_MAP) ;  
glTexGeni (GL_T, GL_TEXTURE_GEN_MODE, GL_SPHERE_MAP) ;
```

Использование текстуры как фонового изображения

- ❑ Устанавливаем ортогональную проекцию

```
glMatrixMode (GL_PROJECTION) ;  
glLoadIdentity () ;  
glOrtho (-1, 1, -1, 1, -1, 1) ;
```

- ❑ Устанавливаем ортогональную проекцию

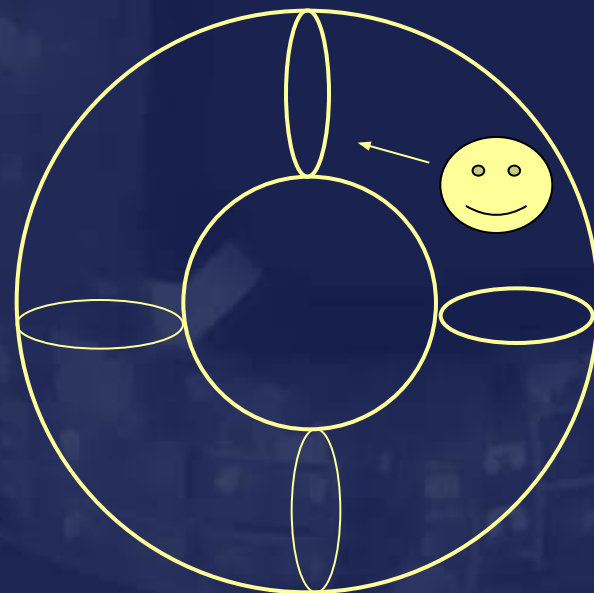
```
glMatrixMode (GL_MODELVIEW) ;  
glLoadIdentity () ;
```

- ❑ Рисуем прямоугольник

```
glEnable (GL_TEXTURE_2D) ;  
glBindTexture (bktex) ;  
glBegin (GL_QUADS) ;  
glTexCoord2f (0, 0) ; glVertex2f (-1, -1) ;  
glTexCoord2f (1, 0) ; glVertex2f (1, -1) ;  
glTexCoord2f (1, 1) ; glVertex2f (1, 1) ;  
glTexCoord2f (0, 1) ; glVertex2f (-1, 1) ;  
glEnd () ;
```

Преобразование текстурных координат

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ p' \\ q' \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u \\ v \\ p \\ q \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} u' / q' \\ v' / q' \\ p' / q' \end{bmatrix}$$

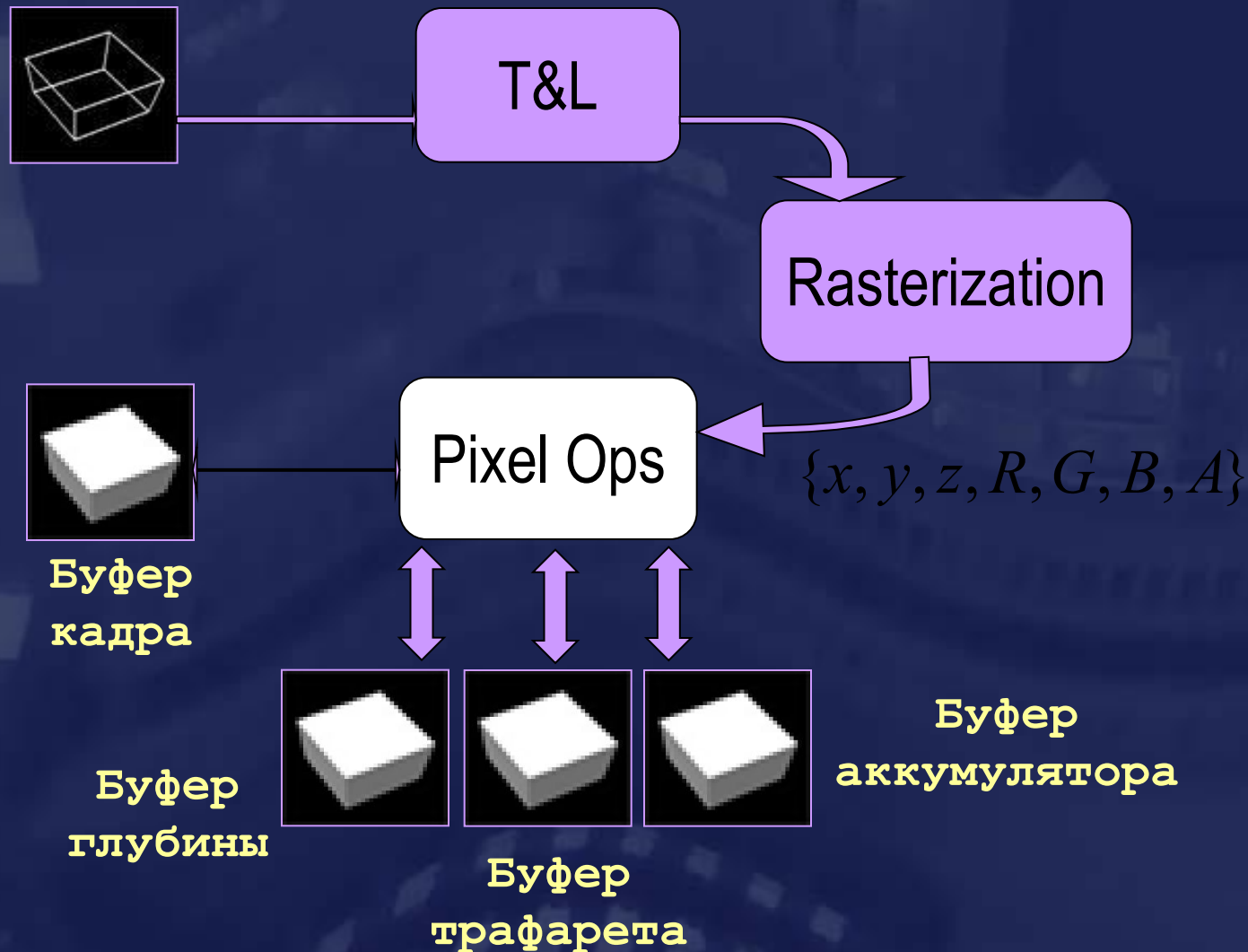


- Работаем с матрицей T точно также как с M и P .

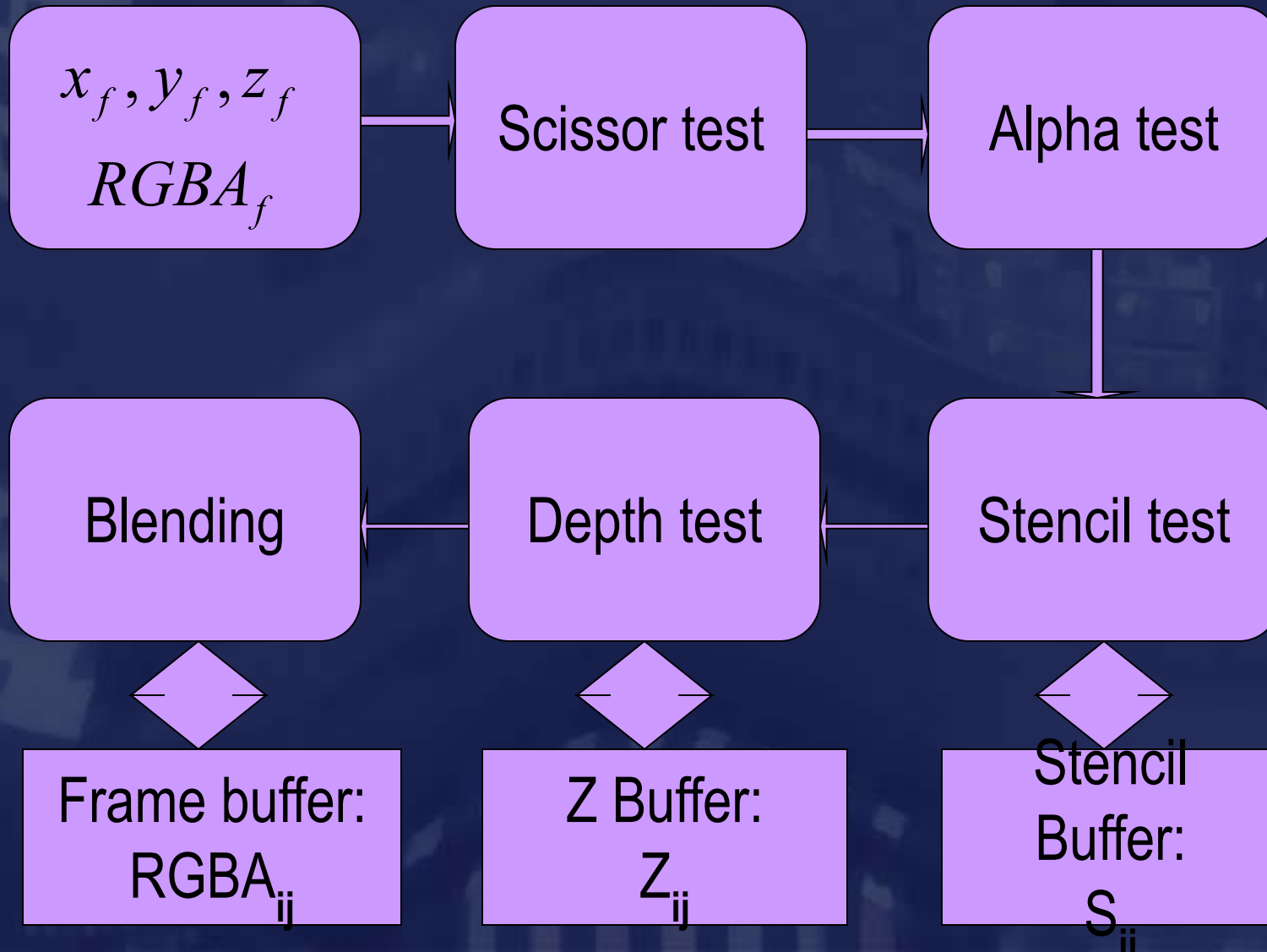
```
glMatrixMode(GL_TEXTURE);  
glLoadIdentity();  
glMultMatrix(...);
```

- Позволяет существенно изменять вид объекта не изменяя геометрии

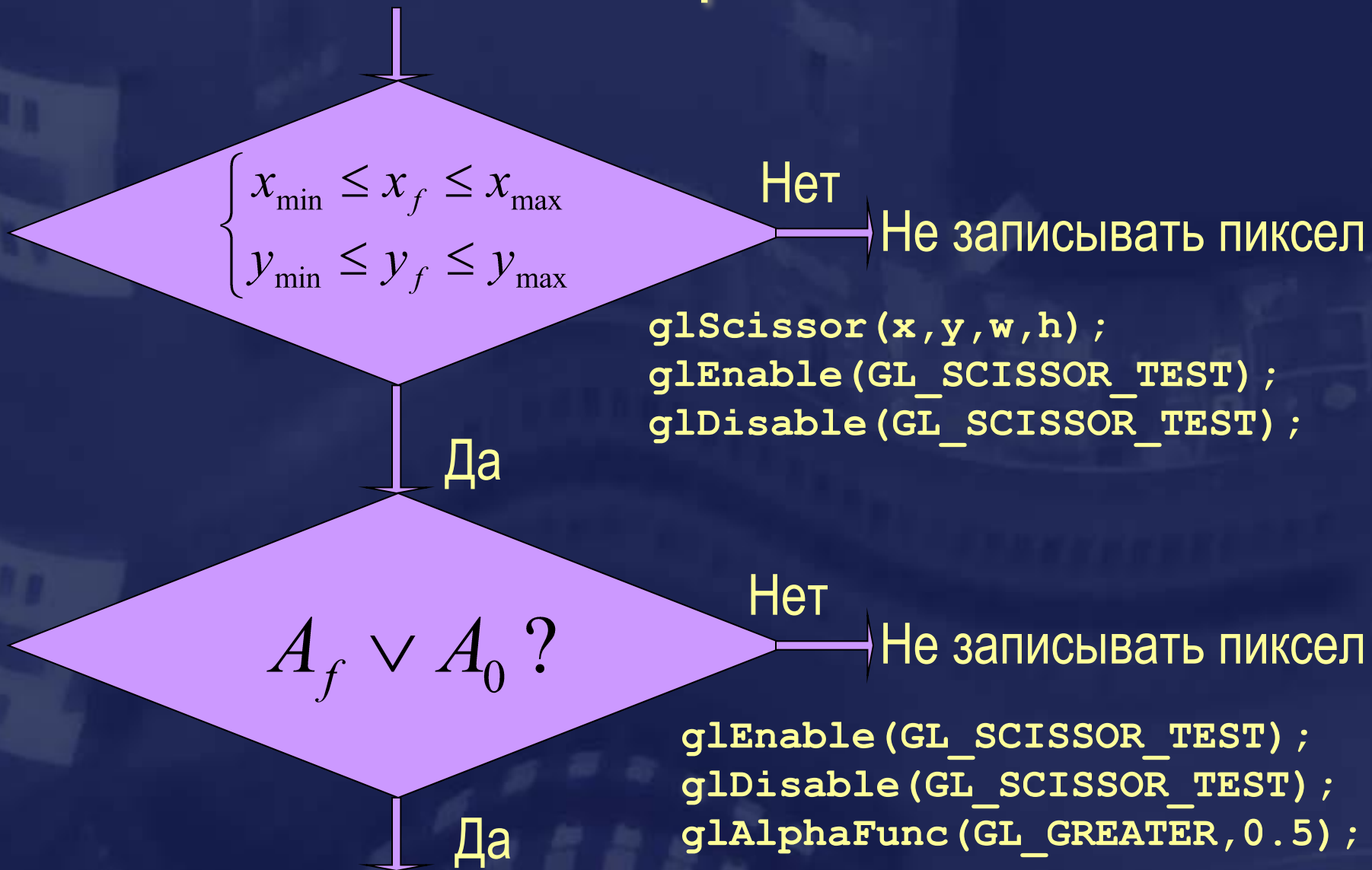
Пиксельные операции



Пиксельные операции. Продолжение.



Scissor & Alpha test



Смешение цветов

$$C_b = \{R_b, G_b, B_b, A_b\},$$

$$C_f = \{R_f, G_f, B_f, A_f\},$$

$$C_r = D \cdot C_b + S \cdot C_f.$$

□ Команды OpenGL:

```
glEnable(GL_BLEND);  
glDisable(GL_BLEND);  
glBlendFunc(sfactor, dfactor)
```

□ `glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA)`:

$$S = \{A_f, A_f, A_f, A_f\}, D = \{1 - A_f, 1 - A_f, 1 - A_f, 1 - A_f\}$$

□ `glBlendFunc(GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA, GL_SRC_ALPHA)`:

$$S = \{1 - A_f, 1 - A_f, 1 - A_f, 1 - A_f\}, D = \{A_f, A_f, A_f, A_f\}$$

□ `glBlendFunc(GL_ZERO, GL_SRC_COLOR)`:

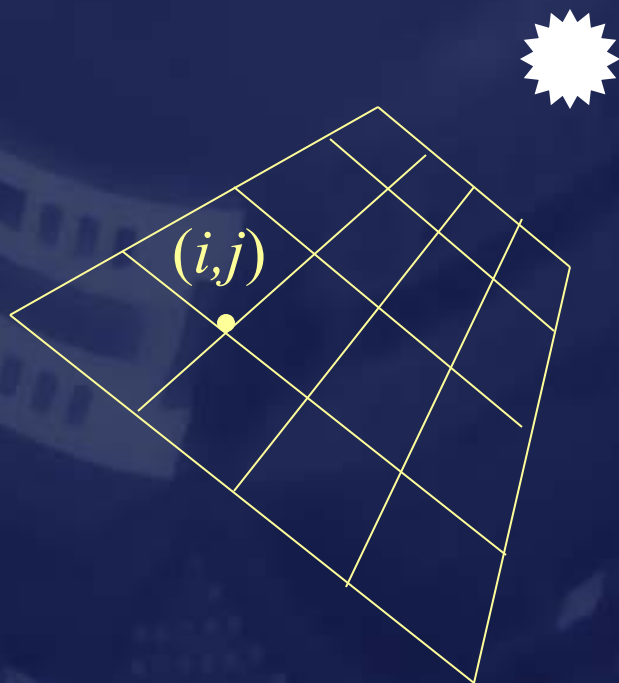
$$S = \{0, 0, 0, 0\}, D = \{R_f, G_f, B_f, A_f\}$$

Карты освещенности (lightmaps)

$$c = e_m + a_m a_s + \sum_{i=0}^{n-1} att_i \cdot spot_i \cdot (a_m a_i + d_m d_i (n \boxtimes l) + s_m s_i (n \boxtimes h)^{h_m})$$

Карта освещенности: $RGBA_{ij}, 0 \leq i < 4, 0 \leq j < 4$

Мультитекстурирование: $R_r = R_1 R_2, G_r = G_1 G_2, B_r = B_1 B_2$



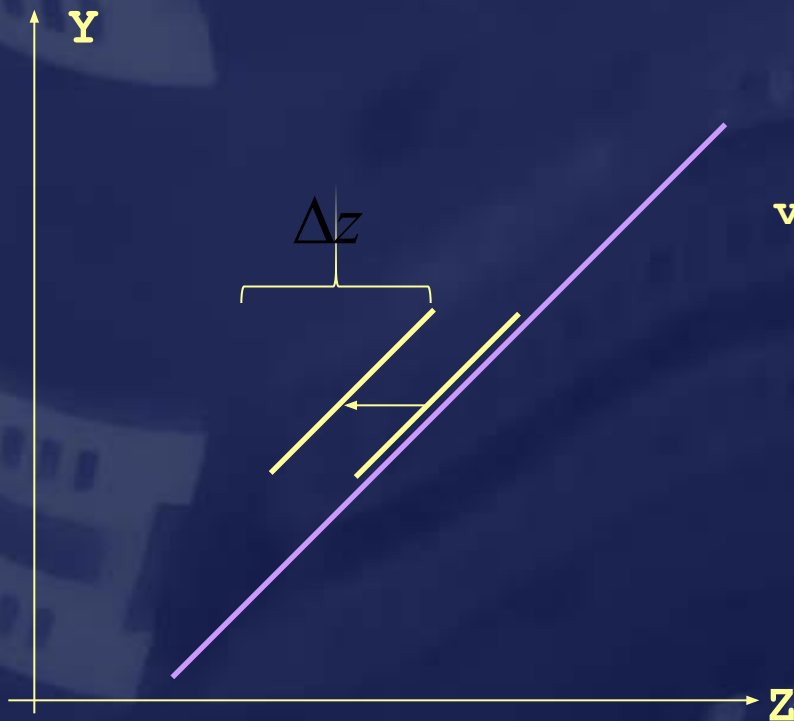
Возможен предварительный расчет освещения

Экономия количества примитивов при динамическом освещении

Экономия текстур при статическом освещении

Смещение вершин

- При использовании буфера глубины могут возникнуть проблемы с рисованием граней, лежащих в одной плоскости.

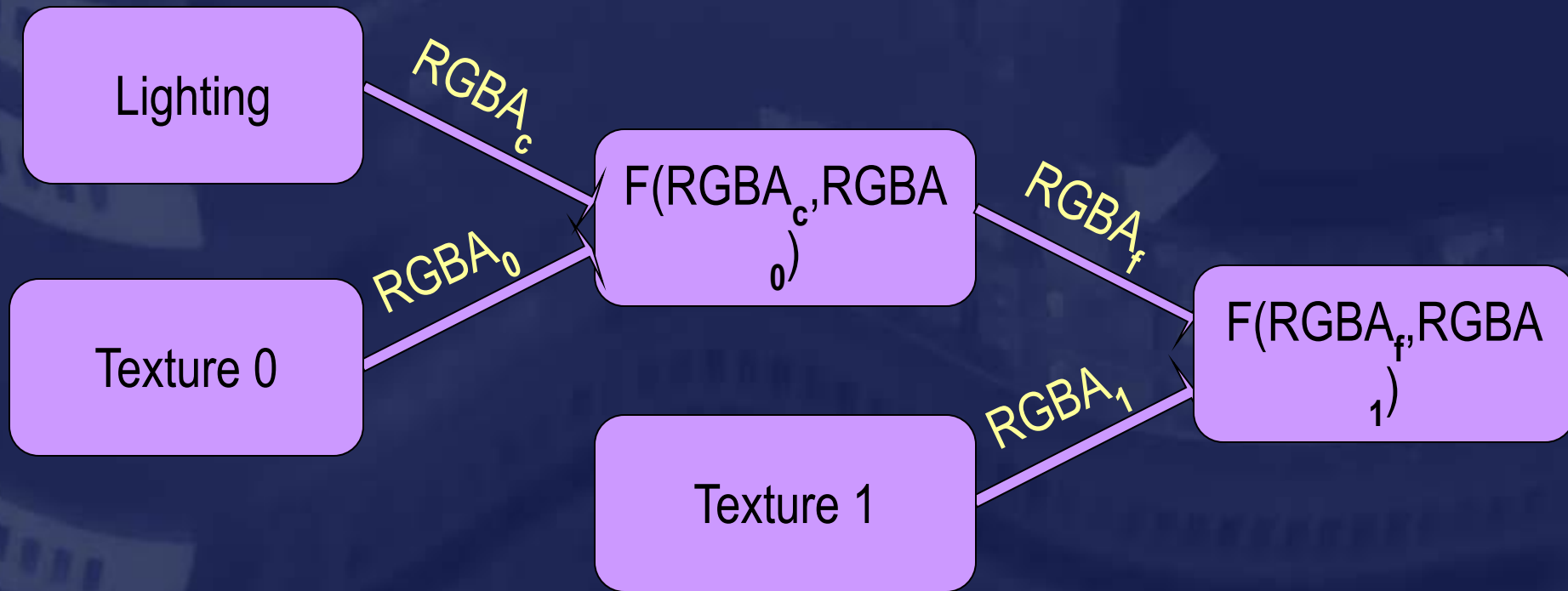


- Возможно задать смещение глубины для каждой вершины

```
void glPolygonOffset(GLfloat factor,  
                    GLfloat units);
```

$$z+ = units \cdot r + factor \cdot \Delta z$$

Мультитекстурирование



- Объединение текстуры объекта и текстуры среды

$$\text{RGBA}_r = \frac{1}{2}(\text{RGBA}_0 + \text{RGBA}_1)$$

Расширения OpenGL

❑ Читаем спецификацию расширения (ARB_multitexture)

❑ Определяем константы

```
...  
#define GL_TEXTURE0_ARB          0x84C0  
#define GL_TEXTURE1_ARB          0x84C1  
#define GL_TEXTURE2_ARB          0x84C2  
#define GL_TEXTURE3_ARB          0x84C3  
...
```

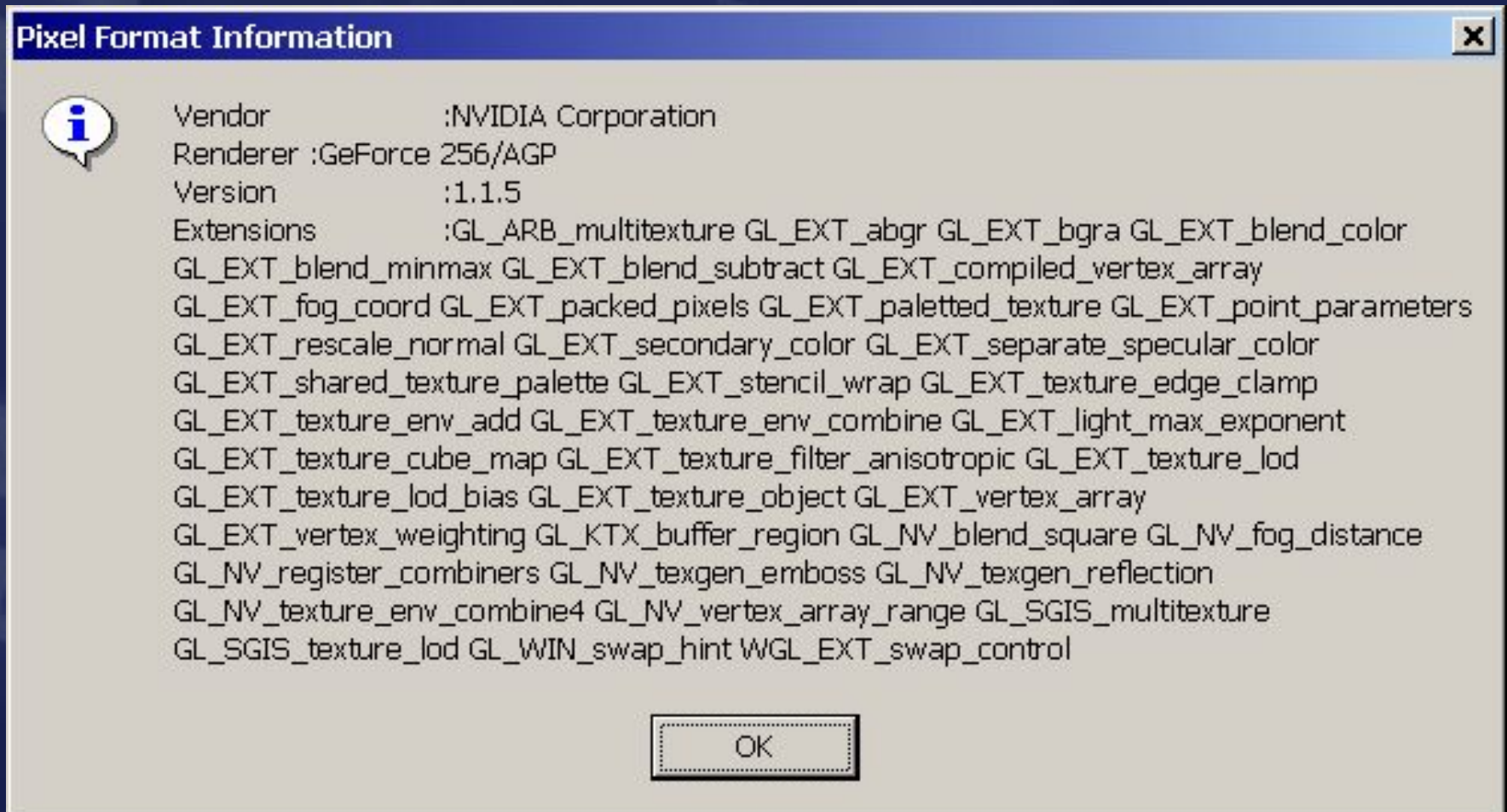
❑ Определяем указатели на функции

```
...  
void (APIENTRY * glMultiTexCoord2d) (GLenum target,  
                                       GLdouble s,  
                                       GLdouble t);  
void (APIENTRY * glActiveTexture) (GLenum target);  
...
```

Расширения OpenGL. Продолжение

- Получаем список доступных расширений

```
char *extensions = glGetString(GL_EXTENSIONS);
```



Расширения OpenGL. Часть 3.

- Получаем указатели на функции

```
...
    glActiveTexture = wglGetProcAddress("glActiveTextureARB");
    glMultiTexCoord2d =
    wglGetProcAddress("glMultiTexCoord2dARB");
...
```

- Задаем текстурные объекты для каждого текстурного блока

```
...
    (*glActiveTexture)(GL_TEXTURE0_ARB);
    glEnable(GL_TEXTURE_2D);
    glBindTexture(...);
...
    (*glActiveTexture)(GL_TEXTURE1_ARB);
    glEnable(GL_TEXTURE_2D);
    glBindTexture(...);
...
```

Расширения OpenGL. Часть 4.

- Задаем смешение цвета освещения и цвета первой текстуры

```
...  
(*glActiveTexture) (GL_TEXTURE0_ARB) ;  
glTexEnvf (...);  
...
```

- Задаем смешение цвета первого блока и второй текстуры

```
...  
(*glActiveTexture) (GL_TEXTURE1_ARB) ;  
glTexEnvf (...);  
...
```

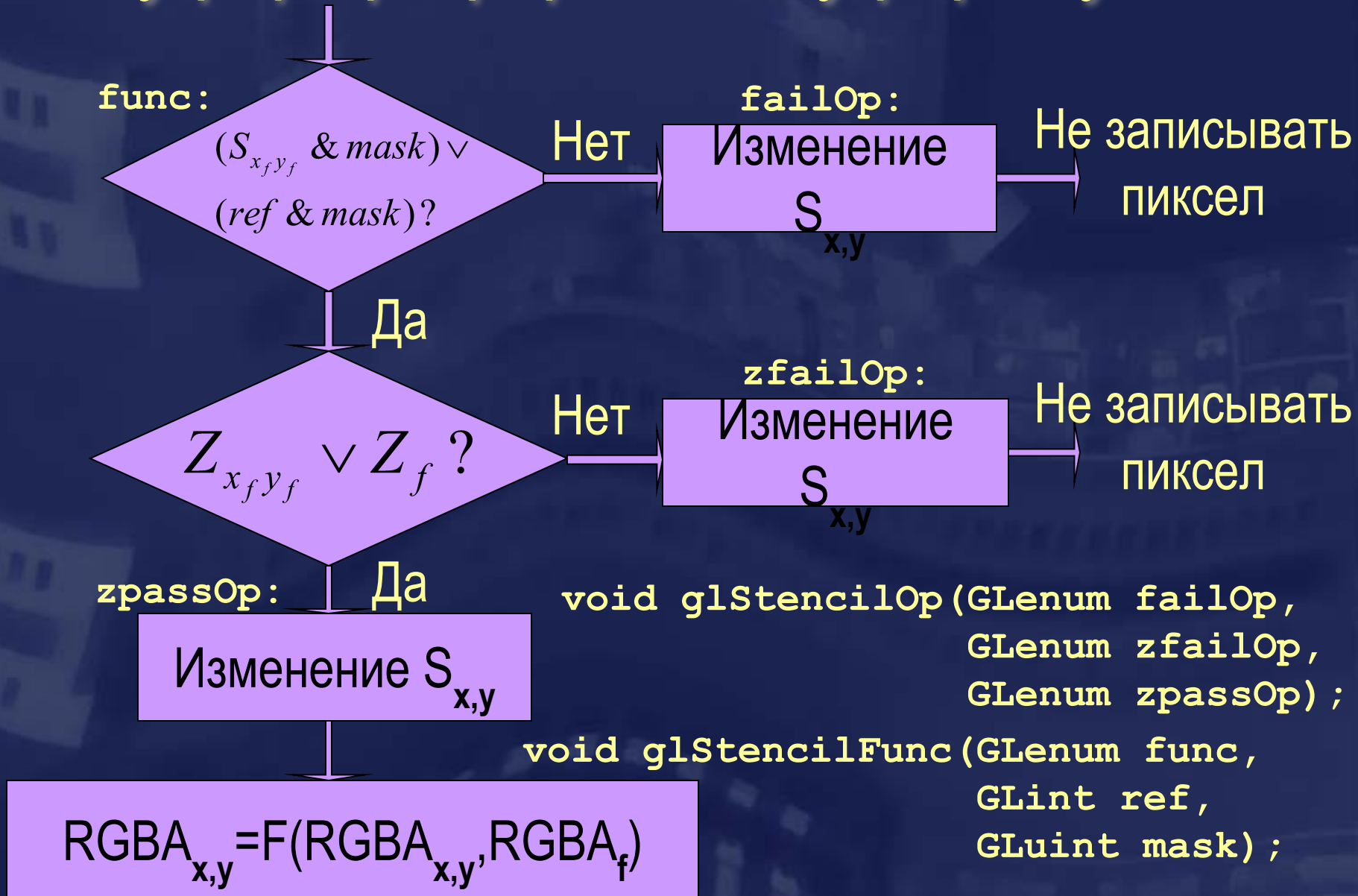
- Задаем текстурные координаты для каждого текстурного блока

```
...  
(*glMultiTexCoord2d) (GL_TEXTURE0_ARB, 0.5, 0.5) ;  
(*glMultiTexCoord2d) (GL_TEXTURE1_ARB, 0.2, 0.3) ;  
...
```

Полупрозрачные объекты

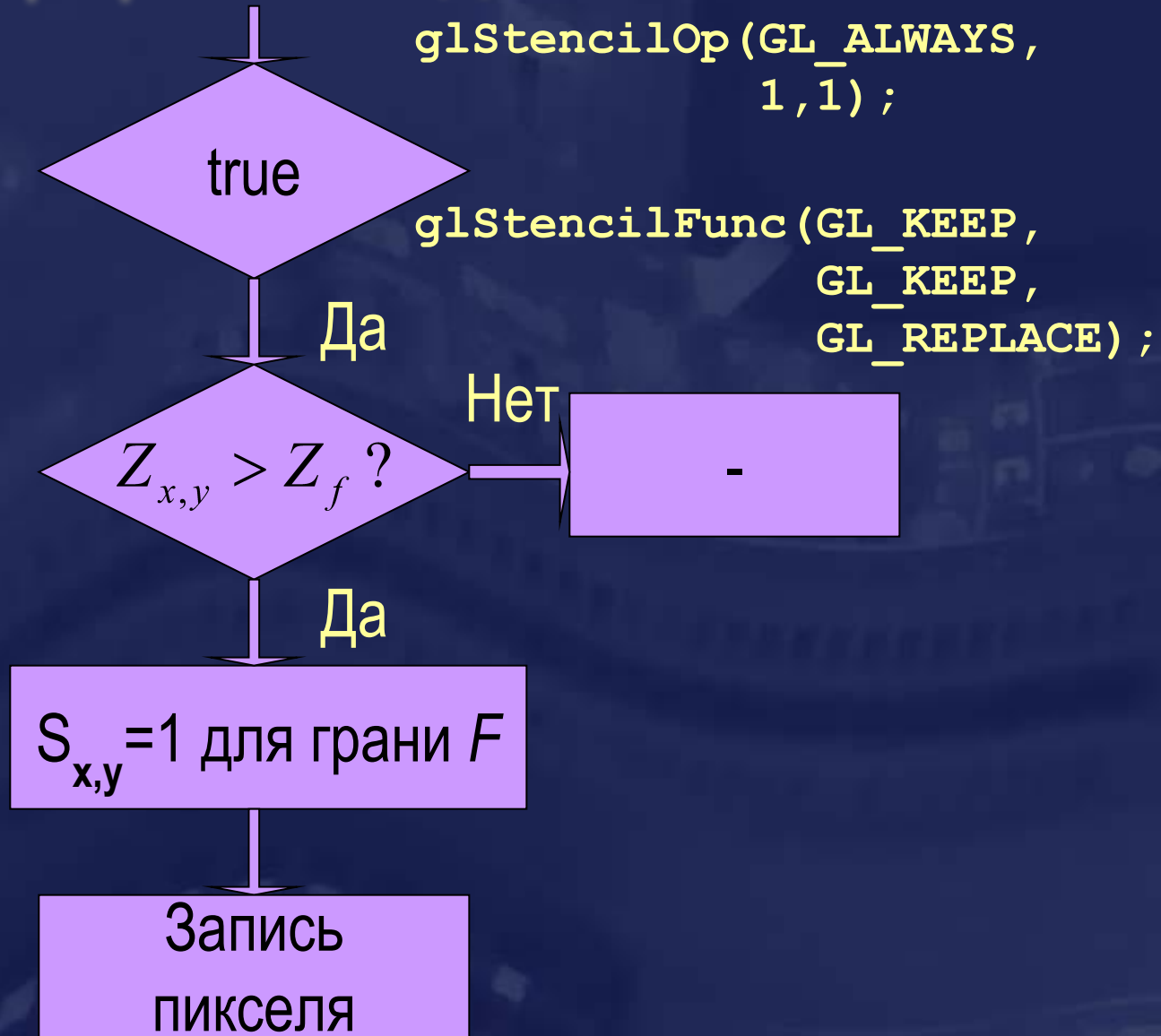
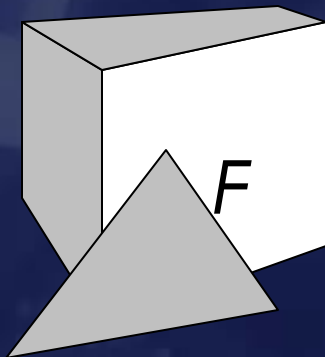
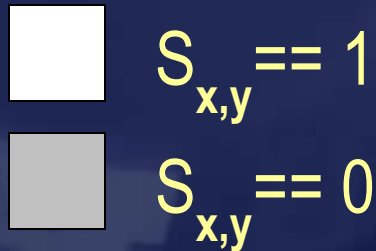
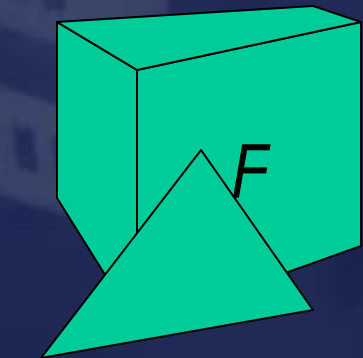
- ❑ Полупрозрачная грань - грань через часть пикселей которой видно лежащие за ней грани.
- ❑ Полупрозрачные грани необходимо выводить в порядке back-to-front. Применение метода Z-буфера ведет к визуальным артефактам - "глюкам" :)
- ❑ Для выпуклых объектов можно выводить сначала нелицевые грани, а затем - лицевые.
- ❑ Объекты можно выводить методом художника - сортировать по убыванию координат Z центров.

Буфер трафарета и буфер глубины

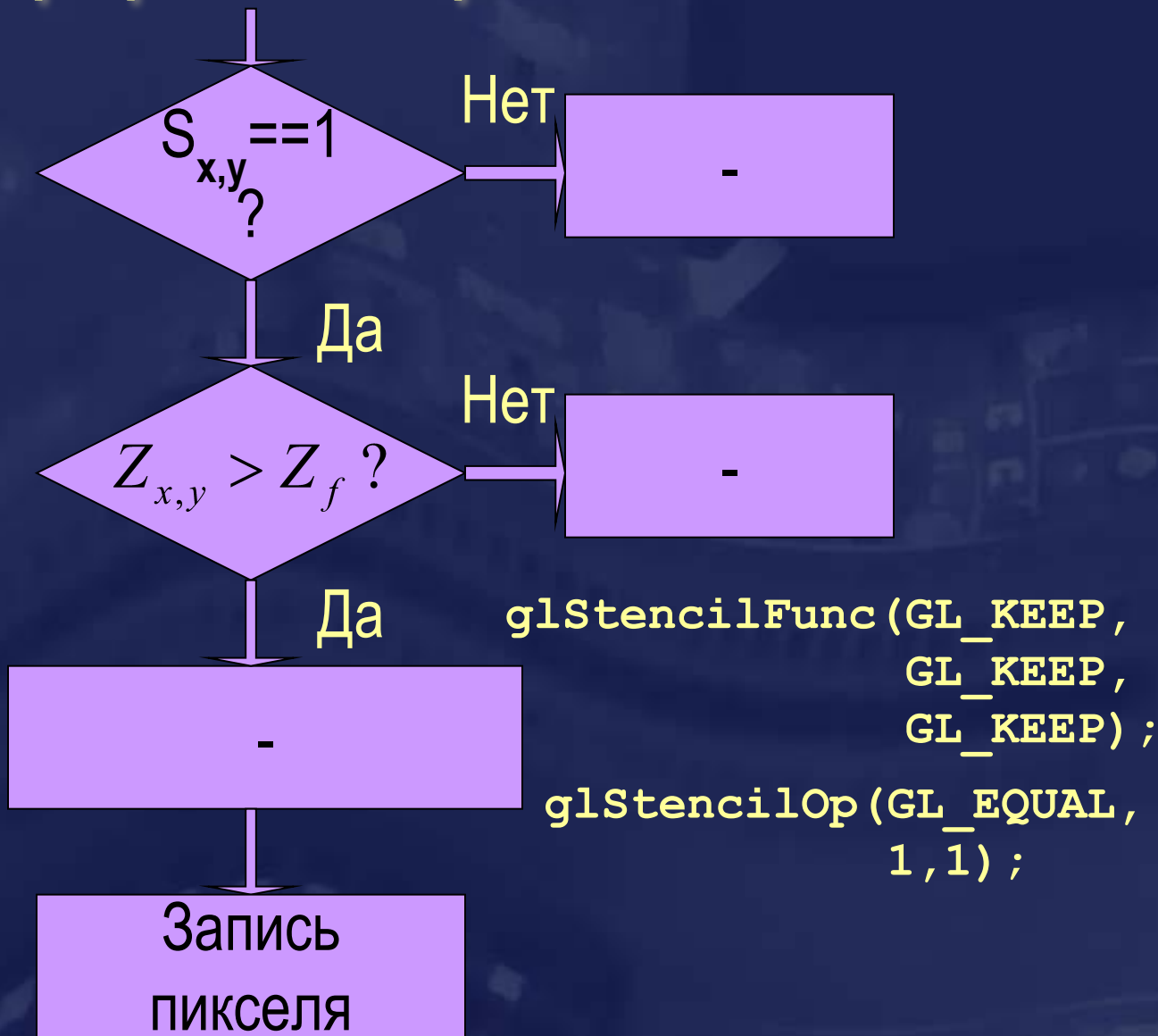
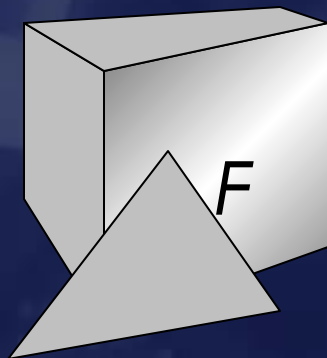
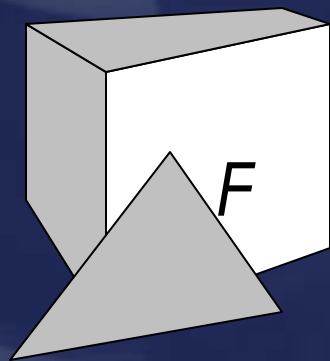
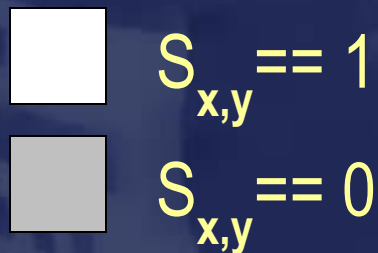


```
void glStencilOp(GLenum failOp,  
                GLenum zfailOp,  
                GLenum zpassOp);  
  
void glStencilFunc(GLenum func,  
                  GLint ref,  
                  GLuint mask);
```

Буфер трафарета: видимость пикселей

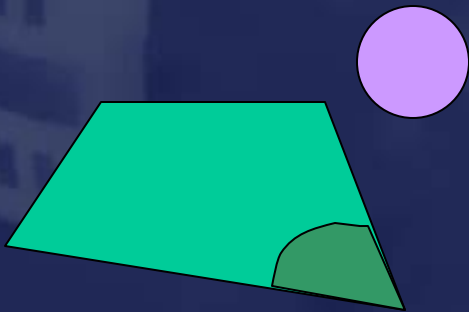


Буфер трафарета: обработка пикселей

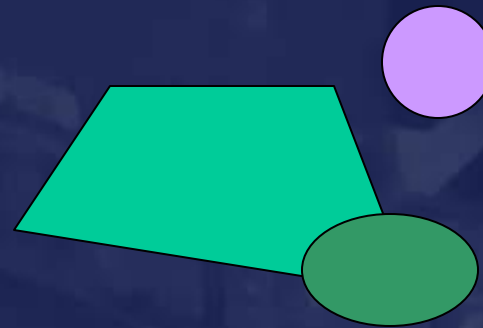


Буфер трафарета: тени и отражения

- ❑ Отбрасывание тени на плоскую грань

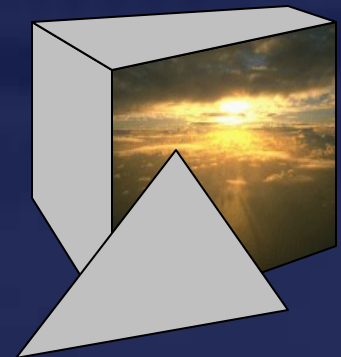
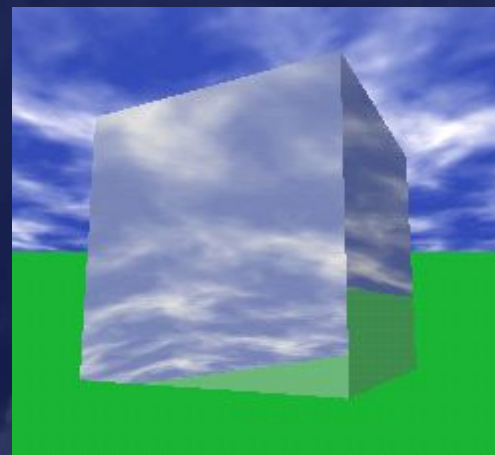


Правильно



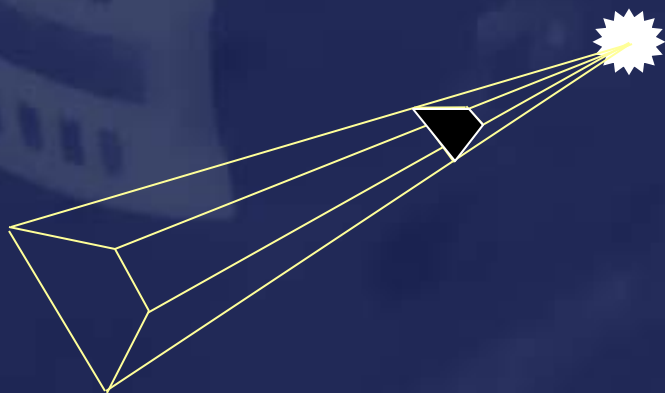
Неправильно

- ❑ Отражения и порталы



Буфер трафарета: теневые объемы

- Строим теневой объем



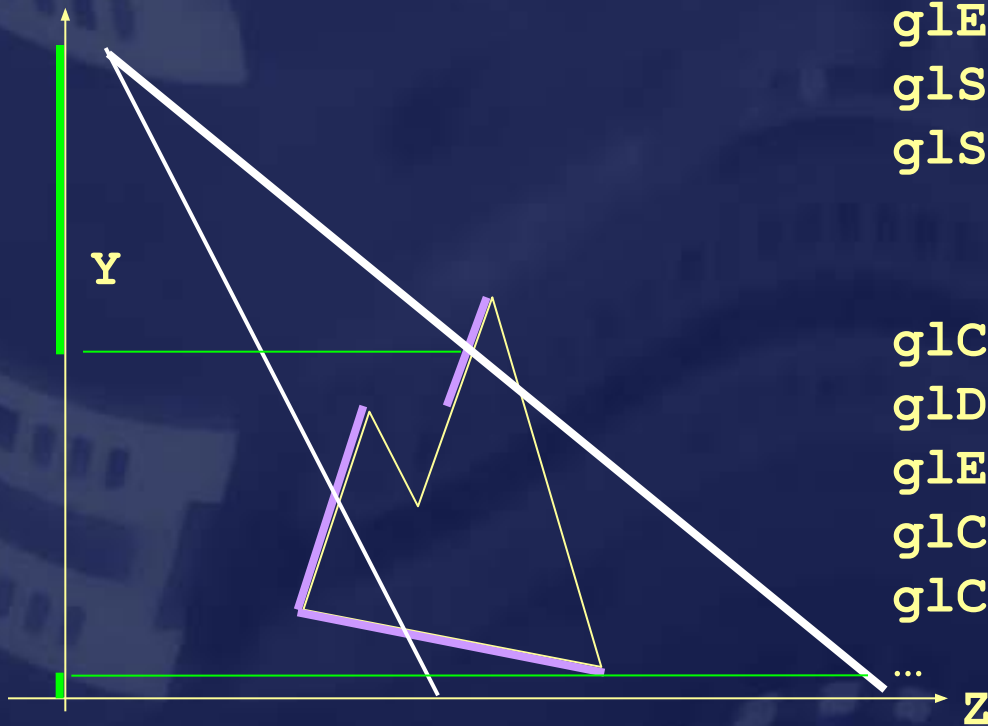
- Рисуем затеняемый объект со включенным Z-буфером



```
...  
glEnable(GL_DEPTH_TEST);  
glCallList(object);  
...
```

Теневые объемы. Продолжение.

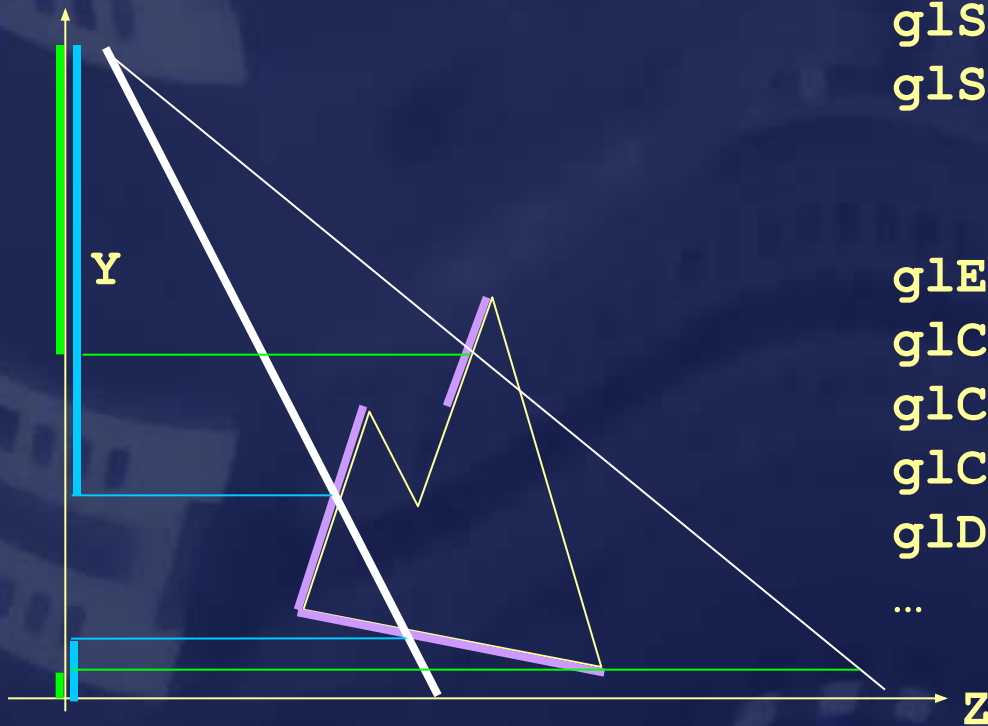
Рисуем нелицевые грани теневого объема



```
...  
glEnable(GL_STENCIL_TEST);  
glStencilFunc(GL_ALWAYS, 1, 1);  
glStencilOp(GL_KEEP,  
            GL_KEEP,  
            GL_REPLACE);  
glColorMask(0, 0, 0, 0);  
glDepthMask(0);  
glEnable(GL_CULL_FACE);  
glCullFace(GL_BACK);  
glCallList(shadow);
```

Теневые объемы. Часть 3.

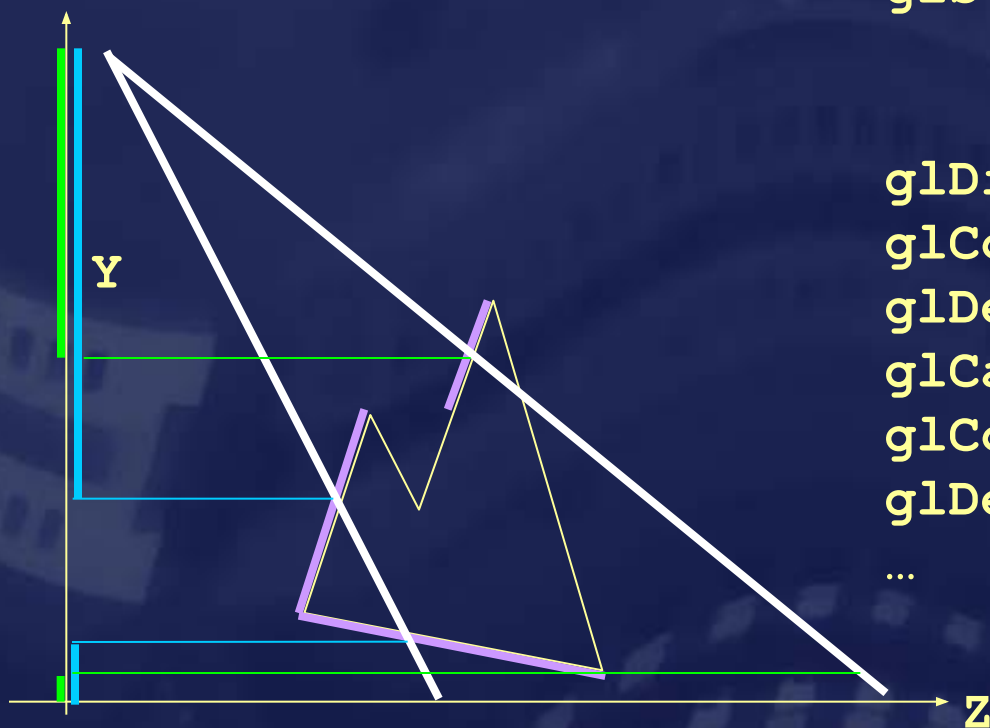
Рисуем лицевые грани теневого объема



```
...  
glStencilFunc(GL_ALWAYS, 1, 1);  
glStencilOp(GL_KEEP,  
            GL_KEEP,  
            GL_INVERT);  
glEnable(GL_CULL_FACE);  
glCullFace(GL_FRONT);  
glCallList(shadow);  
glColorMask(1, 1, 1, 1);  
glDepthMask(1);  
...
```

Теневые объемы. Часть 4.

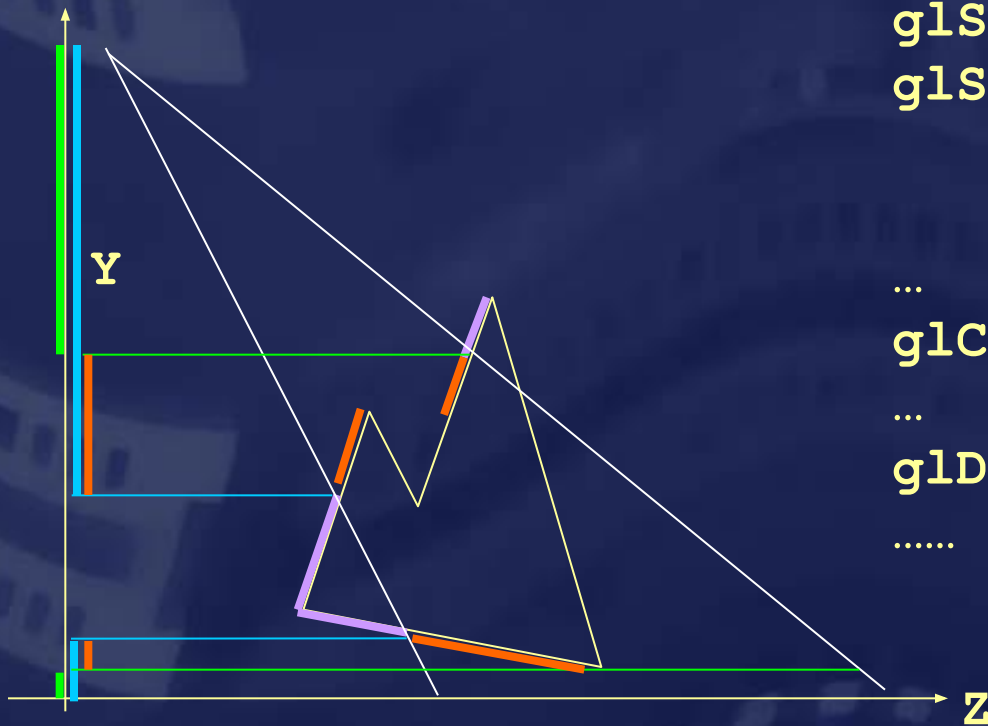
Возможен вывод граней теневого объема в произвольном порядке.



```
...  
glStencilFunc(GL_ALWAYS, 1, 1);  
glStencilOp(GL_KEEP,  
            GL_KEEP,  
            GL_INVERT);  
glDisable(GL_CULL_FACE);  
glColorMask(0, 0, 0, 0);  
glDepthMask(0);  
glCallList(shadow);  
glColorMask(1, 1, 1, 1);  
glDepthMask(1);  
...
```

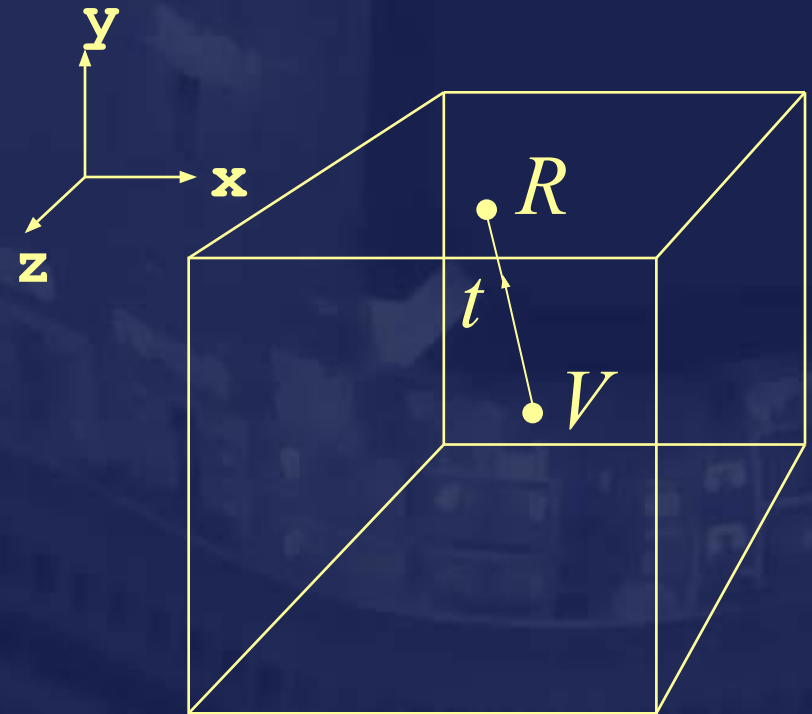
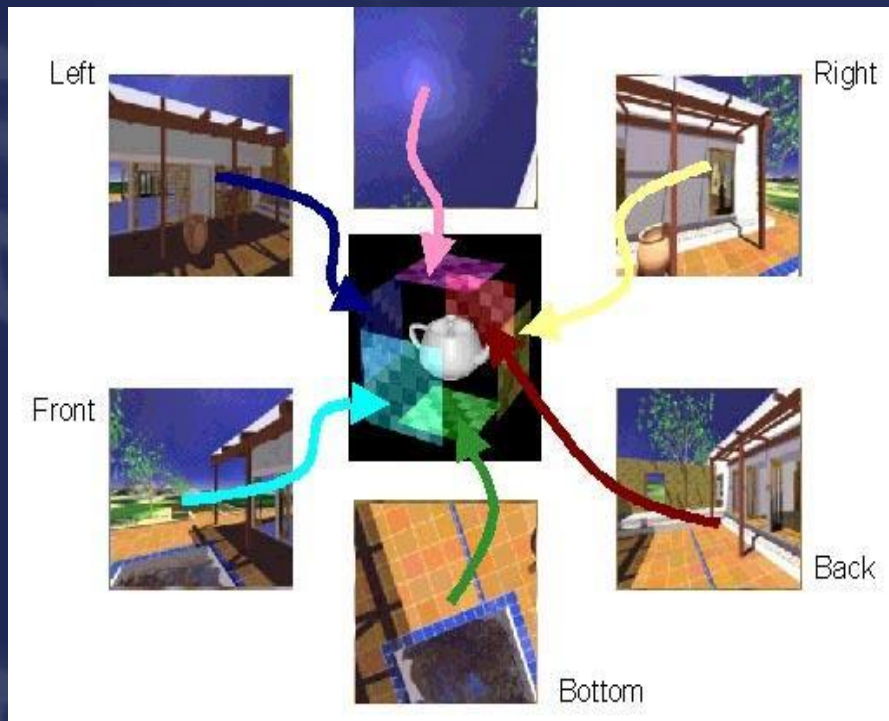

Теневые объемы. Часть 5.

Рисуем затененную часть объекта



```
...  
glStencilFunc (GL_EQUAL, 1, 1);  
glStencilOp (GL_KEEP,  
             GL_KEEP,  
             GL_KEEP);  
...  
glCallList (object);  
...  
glDisable (GL_STENCIL_TEST);  
.....
```

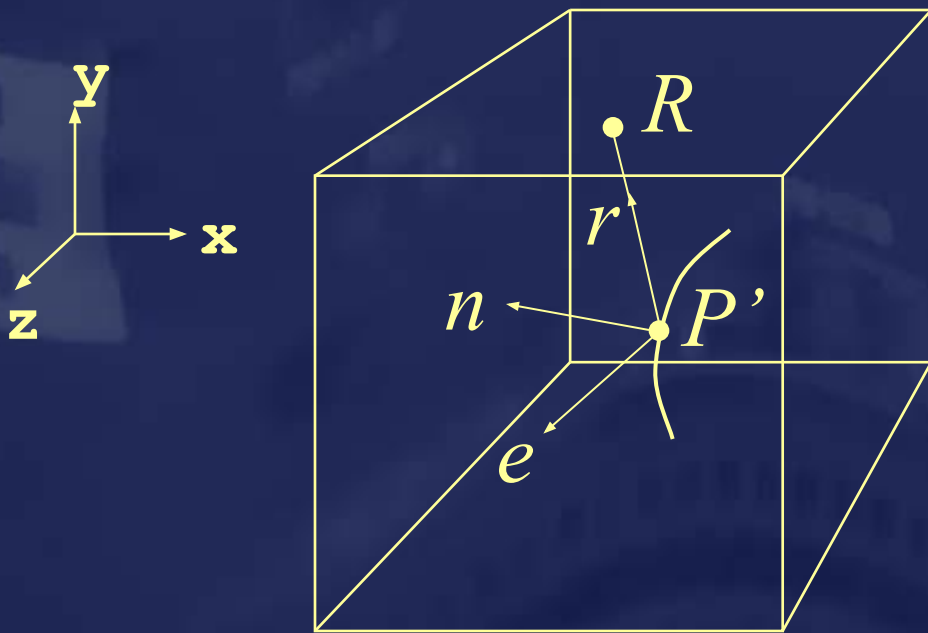
Кубические карты: определение.



- С вершиной V связано три текстурные координаты (p, q, r) .
- Точка $R = R(t)$, $t = (p, q, r)$ определяет одну из шести текстур и текстурные координаты. $(p, q, r) \rightarrow \text{RGBA}$

Расширение "GL_EXT_cube_map"

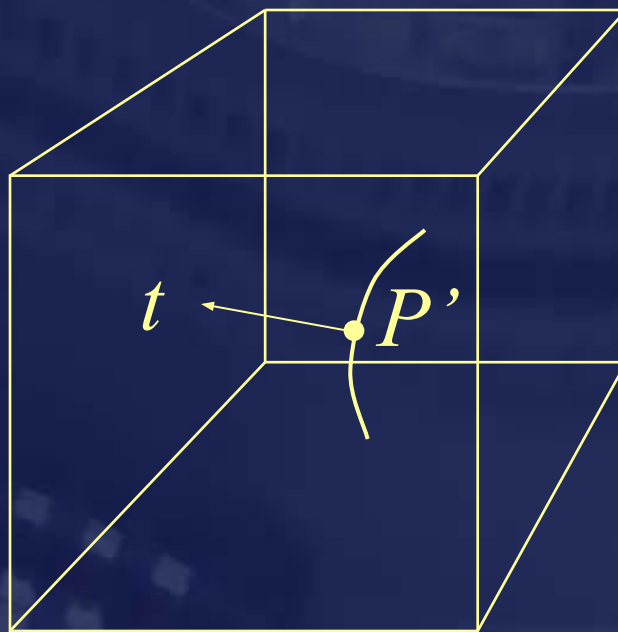
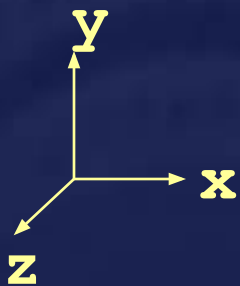
Кубические карты среды.



- Необходимо применить к текстурным координатам преобразование, обратное модельно-видовому!

Кубические карты освещения.

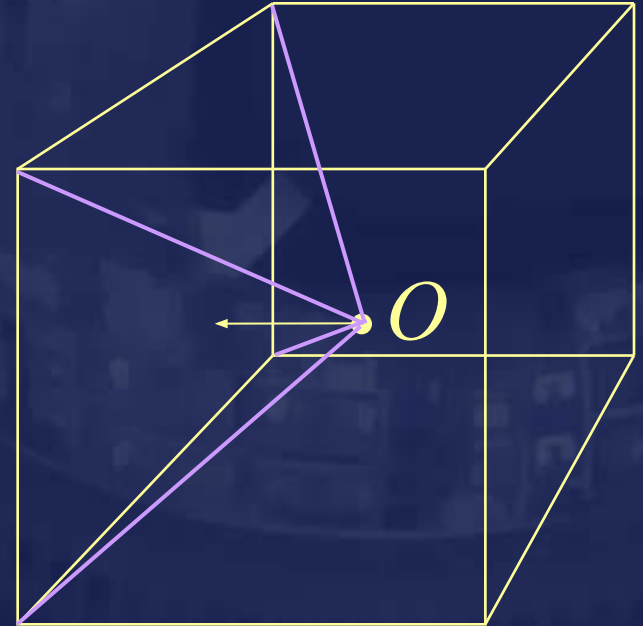
- Пусть источники освещения находятся далеко от объекта. Тогда освещение в точке объекта зависит только от нормали.
- Заранее запишем результат расчета освещенности для нормали n в элемент кубической текстуры с координатами n .



Построение отражающего объекта.

- ❑ Переносим наблюдателя в центр отражающего объекта и строим изображение, полученное при взгляде в направлении нормали к одной из сторон.
- ❑ Сохраняем изображение на экране как текстуру!

```
void glCopyTexImage2D(  
    GLenum target, GLint level,  
    GLenum internalFormat,  
    GLint x, GLint y, GLsizei width, GLsizei height,  
    GLint border );
```



- ❑ Рисуем объект с кубическими картами отражения.

cg@cs.msu.su