LOBACHEVSKY STATE UNIVERSITY
of NIZHNI NOVGOROD
National Research University

Computing Mathematics and Cybernetics faculty
Software department

Computer Graphics. Introduction Course

Введение в язык шейдеров OpenGL

Белокаменская А.А., Васильев Е.П.

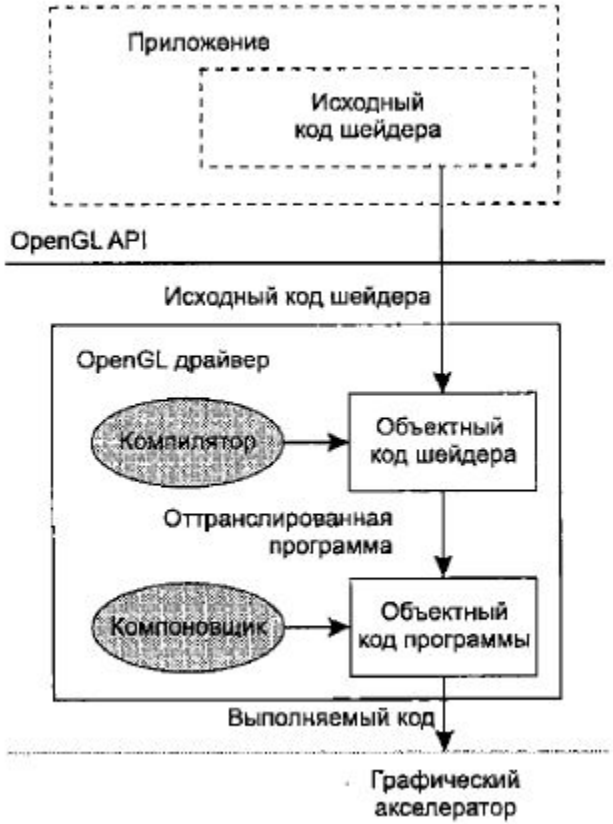
Использование программируемости

- Рендеринг *намного* более реалистичных *материалов*: металлы, природные камни, дерево…
- Рендеринг различных *природных явлений*: огонь, облака, дым, вода
- *Процедурное текстурирование*: полоски, кружочки, кирпичи, звездочки…
- Создание *нефотореалистичных (NPR) эффектов*: имитация живописи, рисование пером, эффект мультфильма, техническая иллюстрация
- Создание новых *эффектов с использованием текстур*: нанесение микрорельефа, моделирование отражений, сложное текстурирование
- Создание *намного* более реалистичных *эффектов освещения*: Global illumination, Ambient Occlusion, Soft Shadows, Caustics
- Реализация улучшенных алгоритмов сглаживания: Stochastic sampling, Adaptive prefiltering, Analytic integration, Frequency clamping

GLSL (OpenGL Shading Language)

- Язык высокого уровня для программирования шейдеров. Номер версии GLSL соответствует версии OpenGL.
- Тесная интеграция с OpenGL API
  - GLSL был спроектирован для совместного использования с OpenGL. GLSL имеет встроенные возможности доступа к состоянию OpenGL
- Открытый межплатформенный стандарт
  - Нет других шейдерных языков, являющихся частью межплатформенного стандарта. GLSL может быть реализован разными производителями на произвольных платформах
- Компиляция исходного кода во время выполнения
- Отсутствие дополнительных библиотек и программ
  - Все необходимое – язык шейдеров, компилятор и компоновщик – определены как часть OpenGL

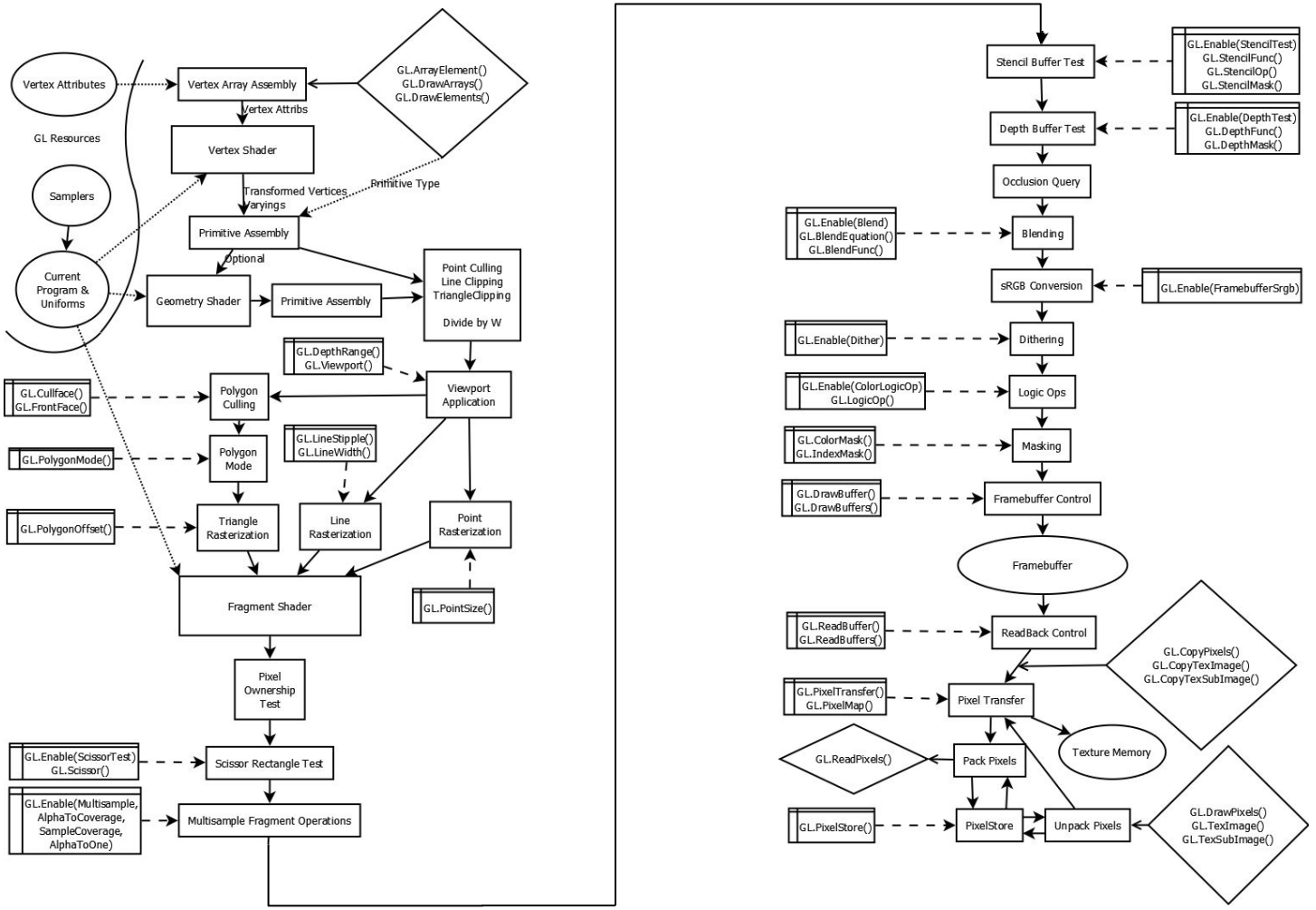
Модель выполнения OpenGL шейдеров



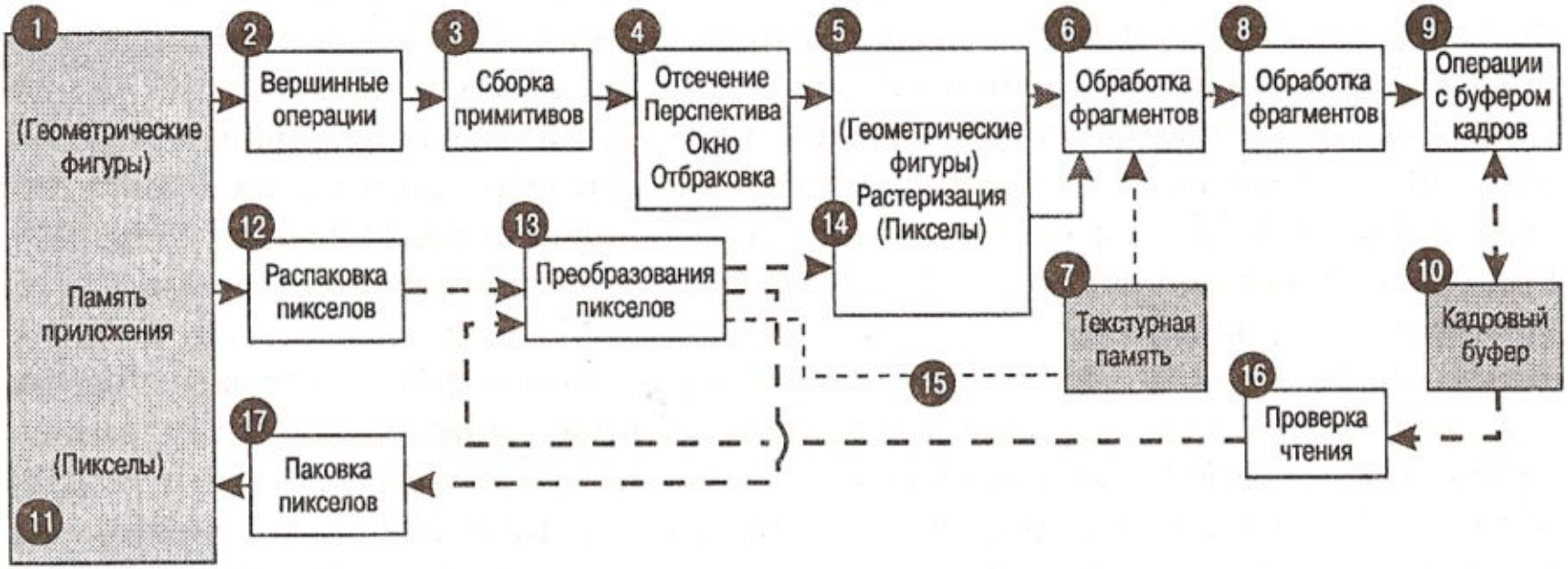
Графический конвейер

- На функционирование OpenGL можно смотреть как на *стандартную последовательность операций*, применяемую к геометрическим данным для вывода их на экран
- На различных этапах обработки графики разработчик может изменять массу параметров и получать различные результаты. *Однако нельзя изменить ни сами фундаментальные операции, ни их порядок*

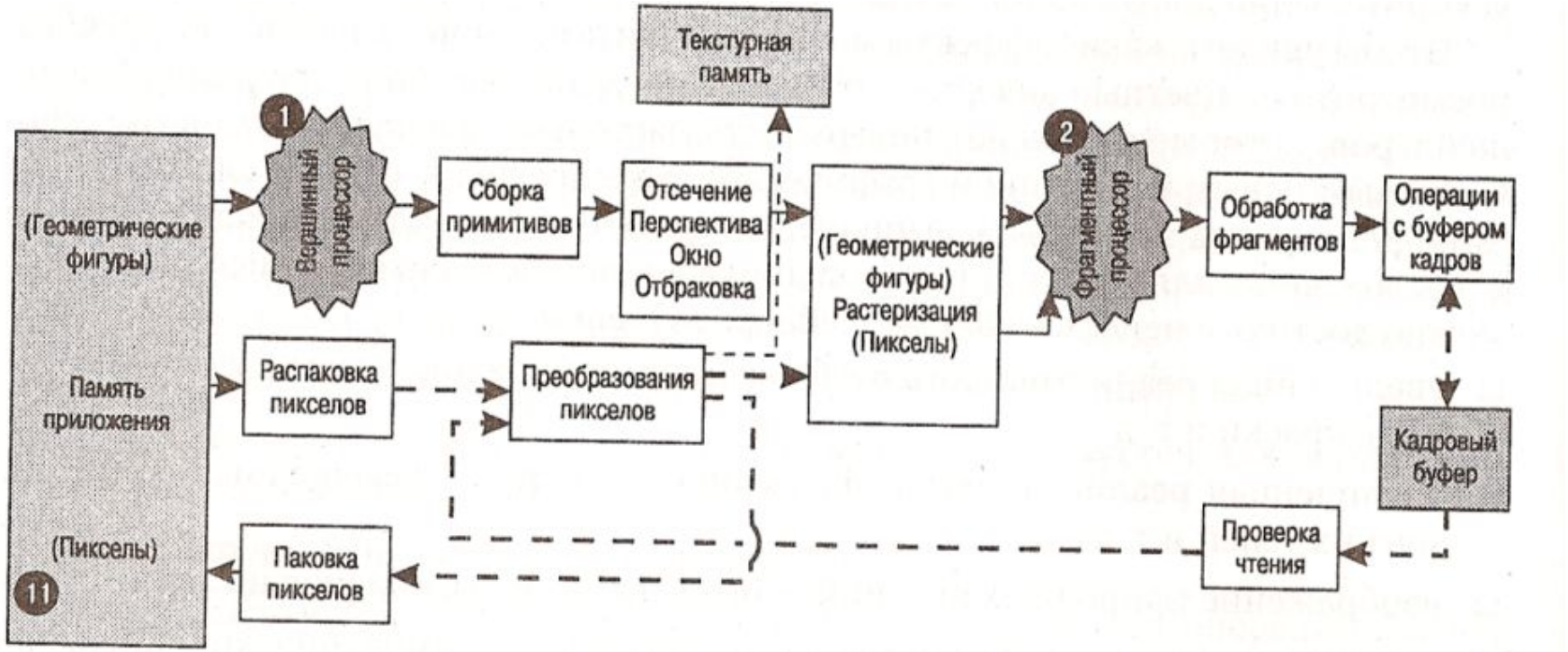
Графический конвейер



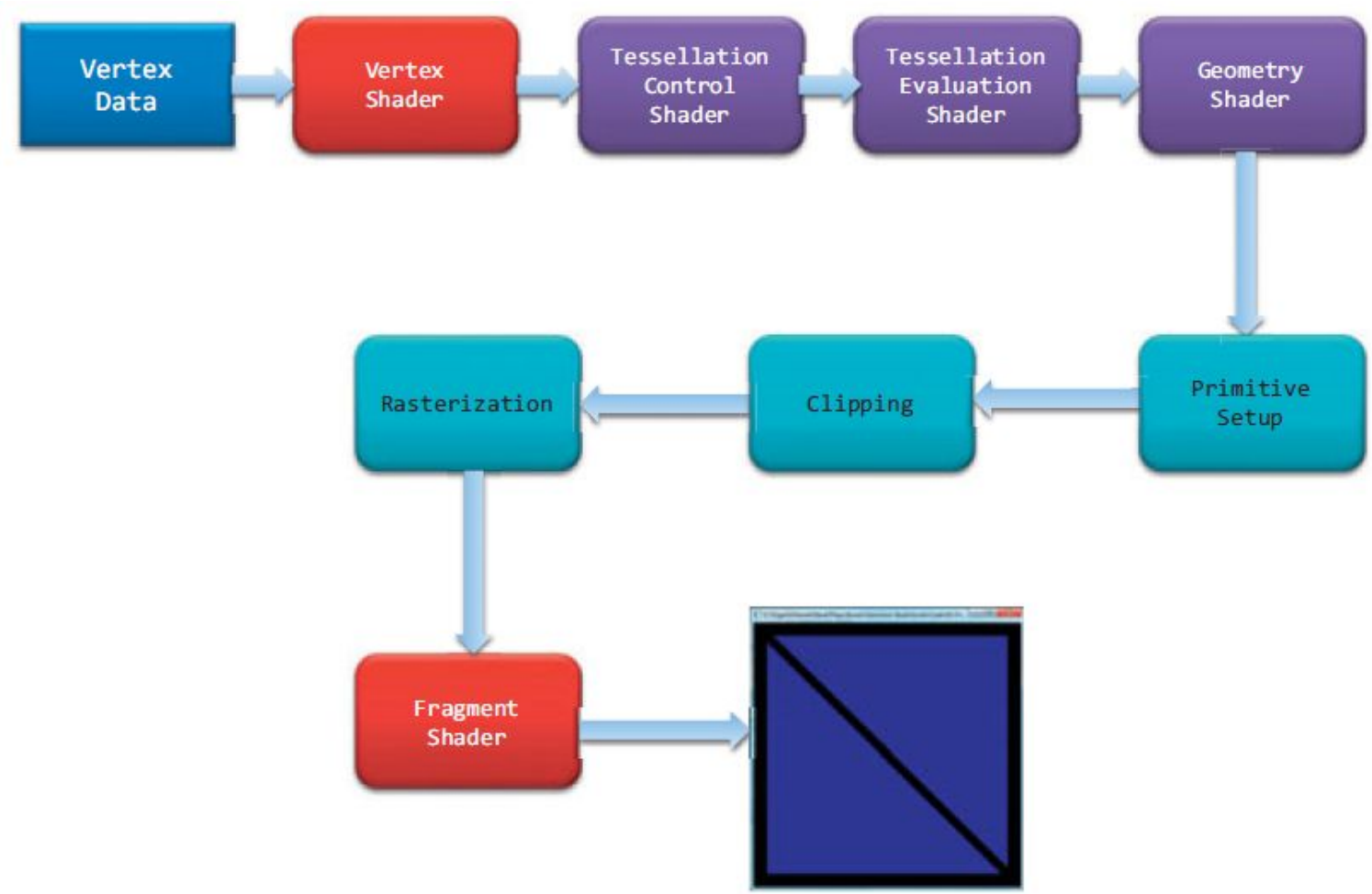
Стандартный конвейер операций OpenGL



Стандартный конвейер операций OpenGL с программируемыми стадиями



Графический конвейер 4.3



Вершинный процессор

- это *программируемый модуль*, который выполняет операции над входными значениями *вершин* и *связанными с ними данными*
- Вершинный процессор предназначен для следующих *традиционных* операций:
  - Преобразование вершин и нормалей
  - Генерирование и преобразование текстурных координат
  - Расчет освещения
  - Наложение цвета материала
- Шейдеры, предназначенные для выполнения на этом процессоре, называются *вершинными*

Вершинный процессор

- Вершинные шейдеры, выполняющие *часть операций* из списка, обязаны выполнять и *остальные операции*
- Вершинный шейдер ***не может*** заменить операции, которым требуются знания о *нескольких* вершинах или о *топологии* геометрического объекта
- Вершинный шейдер ***не заменяет*** стандартные операции, выполняемые в конце обработки вершин

Фрагментный процессор

- *программируемый модуль*, который выполняет операции над *фрагментами* (или пикселями) и *связанными с ними данными*
- Фрагментный процессор может выполнять следующие стандартные операции:
  - Операции над интерполированными значениями
  - Доступ к текстурам
  - Наложение текстур
  - Создание эффекта дымки
  - Наложение цветов

Фрагментный процессор

- Шейдеры, предназначенные для выполнения на этом процессоре, называются *фрагментными*
- Фрагментные шейдеры, которым нужно выполнять *часть операций* из этого списка, должны выполнять и *остальные операции*
- Фрагментный шейдер ***не может***
  - выполнять операции, требующие знаний о *нескольких* фрагментах
  - изменить *координаты* (пара *x* и *y*) фрагмента
- Фрагментный шейдер ***не заменяет*** стандартные операции, выполняемые в конце обработки пикселей

Фрагментный процессор

- Фрагментный шейдер обрабатывает входной поток данных и производит выходной поток данных – пикселов изображения
- Фрагментный шейдер получает следующие данные:
  - *varying переменные* от вершинного шейдера – как встроенные, так и определенные разработчиком
  - *uniform переменные* для передачи произвольных относительно редко меняющихся параметров

Квалификаторы типов

- Для управления *входными* и *выходными* данными шейдеров используются *квалификаторы типов:*
  - *Attribute переменные* – передаются вершинному шейдеру от приложения для описания свойств каждой вершины
  - *Uniform переменные* используются для передачи данных как вершинному, так и фрагментному процессору. Не могут меняться чаще, чем один раз за полигон – относительно постоянные значения
  - *Varying переменные* служат для передачи данных от вершинного к фрагментному процессору. Могут быть различными для разных вершин, и для каждого фрагмента будет выполняться интерполяция

Типы данных

- ***Скалярные типы данных***. В OpenGL предусмотрены следующие скалярные типы данных:
  - **float** – одиночное вещественное число
  - **int** – одиночное целое число
  - **bool** – одиночное логическое значение
- Переменные объявляются также, как на языках C/C++:

```
float f;
float g, h = 2.4;
int NumTextures = 4;
bool skipProcessing;
```

Векторные типы данных

- ***Векторные типы данных***. В OpenGL предусмотрены базовые векторные типы данных:
  - **`vec2`** – вектор из двух вещественных чисел
  - **`vec3`** – вектор из трех вещественных чисел
  - **`vec4`** – вектор из четырех вещественных чисел
  - **`ivec2`** – вектор из двух целых чисел
  - **`ivec3`** – вектор из трех целых чисел
  - **`ivec4`** – вектор из четырех целых чисел
  - **`bvec2`** – вектор из двух булевых значений
  - **`bvec3`** – вектор из трех целых значений
  - **`bvec4`** – вектор из четырех целых значений

Векторные типы данных

- Их можно использовать для задания цвета, координат вершины или текстуры и т.д.
- Аппаратное обеспечение обычно поддерживает операции над векторами, соответствующие определенным в языке шейдеров OpenGL
- Для доступа к компонентам вектора можно воспользоваться двумя способами:
  - обращение по индексу;
  - обращение к полям структуры (*x, y, z, w* или *r, g, b, a* или *s, t, p, q*)

Векторные типы данных

- В языке шейдеров OpenGL не существует способа указать, какая именно информация содержится в векторе – цвет, координаты нормали или расположение вершины, поэтому разные поля для доступа к компонентам предназначены для удобства

```
vec3 position;
vec3 lightDir;

float x = position[0];
float y = lightDir.y;
vec2 xy = position.xy;
vec3 zxy = lightDir.zxy;
```

Матричные типы данных

- В GLSL предусмотрены матричные типы данных:
  - **`mat2`** – 2 x 2 матрица вещественных чисел
  - **`mat3`** – 3 x 3 матрица вещественных чисел
  - **`mat4`** – 4 x 4 матрица вещественных чисел
- При выполнении операций над этими типами данных они всегда рассматриваются как *математические матрицы*. В частности, при перемножения матрицы и вектора получаются правильные с математической точки зрения результаты
- Матрица хранится по столбцам и может рассматриваться как массив столбцов-векторов

Дискретизаторы

- OpenGL предоставляет некоторый абстрактный “черный ящик” для доступа к текстуре – *дискретизатор* или *сэмплер*
  - **`sampler1D`** – доступ к одномерной текстуре
  - **`sampler2D`** – доступ к двухмерной текстуре
  - **`sampler3D`** – доступ к трехмерной текстуре
  - **`samplerCube`** – доступ к кубической текстуре
- При инициализации дискретизатора реализация OpenGL записывает в него все необходимые данные. Шейдер не может его модифицировать. Он только получает дискретизатор через uniform-переменную и использует в функциях для доступа к текстурам

Структуры

- Структуры на языке шейдеров OpenGL похожи на структуры языка C/C++:

```
struct Light
{
    vec3 position;
    vec3 color;
}
...

Light pointLight;
```

- Все прочие особенности работы со структурами такие же, как в C. Ключевые слова **union**, **enum** и **class** не используются, но зарезервированы для возможного применения в будущем

Массивы

- ***Массивы.*** В языке шейдеров OpenGL можно создавать массивы любых типов:

```
float values[10];

vec4 points[];
vec4 points[5];
```

- Принципы работы с массивами те же, что и в языках C/C++

Тип данных void

- Тип данных **void** традиционно используется для объявления того, что функция не возвращает никакого значения:

```
void main()
{
    ...
}
```

- Для других целей этот тип данных не используется

Объявление переменных

- Переменные GLSL такие же, как в C++ : могут быть объявлены по необходимости и имеют ту же область видимости:

```
float f;
f = 3.0;
vec4 u, v;
for (int i = 0; i < 10; ++i)
    v = f * u + v;
```

- В именах учитывается регистр, они должны начинаться с буквы или подчеркивания. Определенные разработчиком переменные не могут начинаться с префикса **gl_**, т.к. все эти имена являются зарезервированными

Инициализаторы и конструкторы

- При объявлении переменных их можно *инициализировать* начальными значениями, подобно языкам C/C++:

```
float f = 3.0;
bool b = false;
int i = 0;
```

- При объявлении сложных типов данных используются *конструкторы*. Они же применяются для преобразования типов:

```
vec2 pos = vec2(1.0, 0.0);
vec4 color = vec4(pos, 0.0, 1.0);
vec3 color3 = vec3(color);
bool b = bool(1.0);
```

Спецификаторы и интерфейс шейдера

- При объявлении переменных или параметров функции можно указывать спецификаторы. Существует два вида спецификатора:
  - Для указания вида входных параметров функции (**`in`**, **`out`**, **`inout`**)
  - Для формирования интерфейса шейдера (**`attribute`**, **`uniform`**, **`varying`**, **`const`**)
- Рассмотрим спецификаторы второго типа. Данные спецификаторы можно использовать *вне* формальных параметров функций. С помощью данных спецификаторов определяется вся функциональность конкретного шейдера

Спецификаторы и интерфейс шейдера

- Пример:

```
uniform vec3   LightPosition;

uniform vec3   CameraPosition;
uniform vec3   UpVector;
uniform vec3   RightVector;
uniform vec3   ViewVector;

uniform float  VerticalScale;
uniform float  HorizontalScale;

varying vec2   ScreenPosition;

void main() {   ... }
```

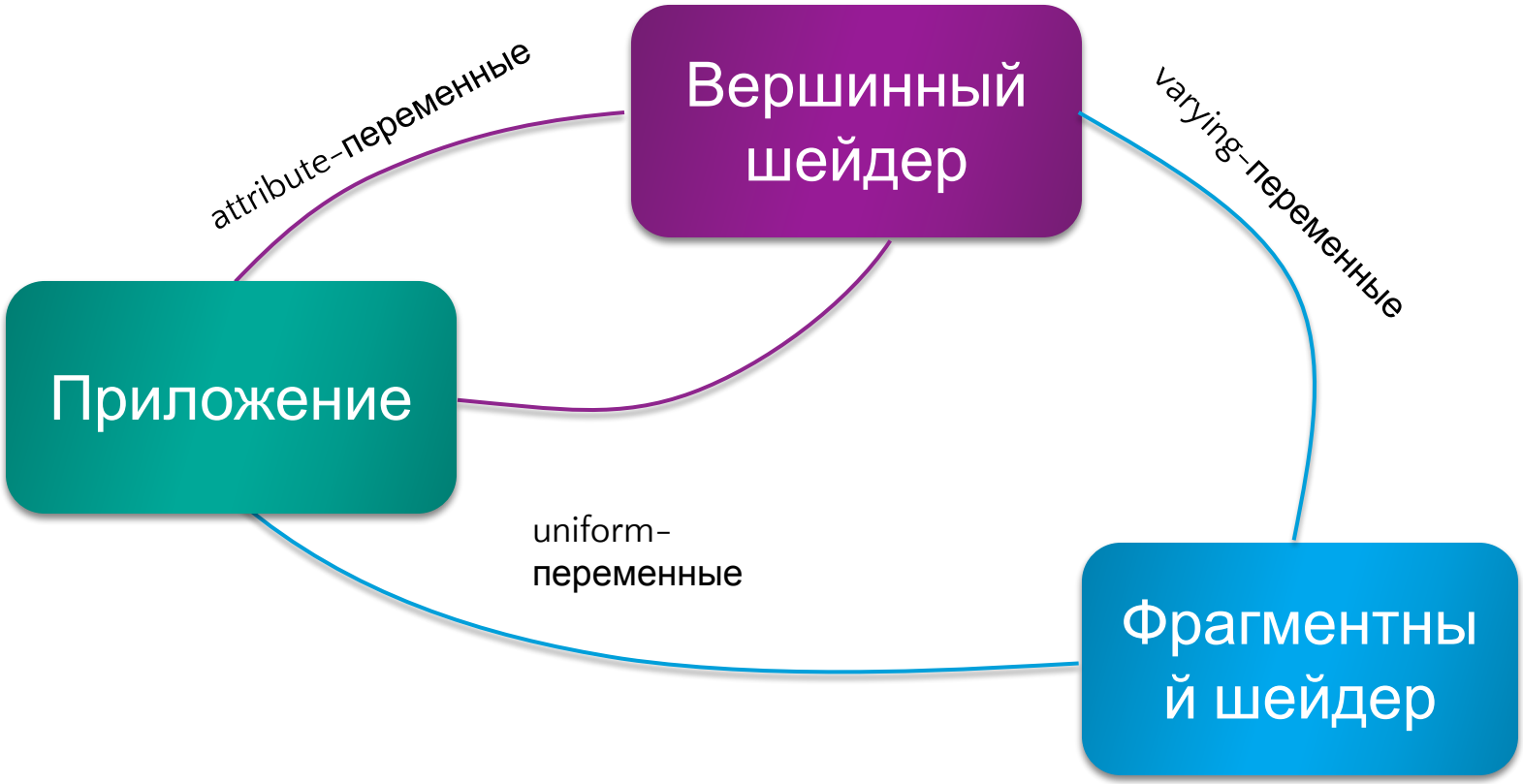
Спецификаторы и интерфейс шейдера

- **`attribute`**: для часто меняющейся информации, которую необходимо передавать *для каждой вершины* отдельно
- **`uniform`**: для относительно редко меняющейся информации, которая может быть использована как вершинным шейдером, так и фрагментным шейдером
- **`varying`**: для *интерполированной* информации, передающейся *от вершинного шейдера к фрагментному*
- **`const`**: для объявления *неизменяемых* идентификаторов, значения которых известны еще на этапе компиляции

- Для передачи информации в шейдер используются *встроенные* и *определенные разработчиком* **`attribute`**-, **`uniform`**-, **`varying`**-переменные

Спецификаторы и интерфейс шейдера

- Схема передачи данных



Спецификатор **`attribute`**

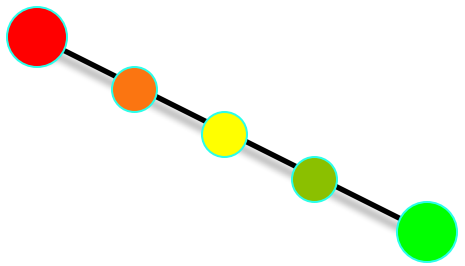
- Вершинному шейдеру передаются *стандартные* **`attribute`**-переменные (**`gl_Vertex`**, **`gl_Normal`**) для получения состояний OpenGL
- Разработчик может задавать свои **`attribute`**-переменные
- Возможные типы для attribute: вещественные числа, векторы вещественных чисел и матрицы
- Вершинный шейдер *не может* изменить **`attribute`**-переменные

Спецификатор `uniform`

- В качестве **`uniform`**-переменных можно использовать *любые типы данных* и *массивы*
- Шейдерам передаются *стандартные* **`uniform`**-переменные, с помощью которых можно получать доступ к состоянию OpenGL
- Все шейдеры, собранные в одну программу, используют одно *глобальное пространство имен* для **`uniform`**-переменных
- Шейдер *не может* изменять **`uniform`**-переменные

Спецификатор **`varying`**

- Из таких переменных во время выполнения формируется *интерфейс* между *вершинным* и *фрагментным* шейдером
- *Вершинный* шейдер устанавливает **`varying`**-переменную, а *фрагментный* шейдер ее использует, не имея возможности ее изменить
- При передачи **`varying`**-переменных происходит автоматическая *интерполяция* для каждого фрагмента



Спецификатор `const`

- Переменные, объявленные с ключевым словом **`const`**, являются *константами времени компиляции*
- Данные переменные *не видимы* вне шейдера, внутри которого объявлены
- Константные переменные *должны быть проинициализированы при объявлении*
- Примеры:

```
const int numIterations;
const float pi = 3.14159;

const vec2 v = vec2(1.0, 2.0);
const vec3 u = vec3(v, 3.0);
```

Последовательность выполнения

- Последовательность выполнения программы на языке шейдеров OpenGL похожа на последовательность выполнения программы на C/C++:
  - Точка входа в шейдер – функция **`void main()`**. Если в программе используется оба типа шейдеров, то имеется две точки входа main. Перед входом в функцию main выполняется инициализация глобальных переменных
  - Организация циклов выполняется с помощью операторов **`for`**, **`while`**, **`do-while`** – так же, как и в C/C++
  - Условия можно задавать операторами **`if`** и **`if-else`**. В данные операторы может быть передано только логическое выражение!
  - Существует специальный оператор **`discard`**, с помощью которого можно запретить записывать фрагмент в кадровый буфер

Функции

- Работа функций построена в языке шейдеров почти так же, как и в C/C++
- Функции можно *перегружать* по *количеству* и *типу* входных параметров, но не исключительно по возвращаемому типу
- Либо тело функции, либо ее объявление должны *находиться в области видимости* перед вызовом функции
- Выход из функции с помощью оператора **`return`** происходит так же, как в C/C++
- *Нельзя* вызывать функцию *рекурсивно* ни явно, ни косвенно!

Функции

- В языке шейдеров OpenGL параметры передаются в функцию *по значению*. Так как в языке *нет указателей*, то не следует беспокоиться о том, что функция случайно изменит какие-либо параметры
- Чтобы определить, когда какие параметры будут копироваться, нужно указать для них соответствующие спецификаторы – **`in`** (по умолчанию), **`out`** или **`inout`**
  - Если нужно, чтобы параметры копировались в функцию *только перед ее выполнением*, то используется спецификатор **`in`**
  - Если нужно, чтобы параметры копировались *только при выходе*, то указывается спецификатор **`out`**
  - Если параметр требуется скопировать и *при входе*, и *при выходе*, то следует указать спецификатор **`inout`**

Функции

- Пример

```
bool IntersectPlane(in Ray ray, Plane plane, out float t)
{
    t = (plane.D - dot(plane.Normal, ray.Origin)) /
            dot(plane.Normal, ray.Direction);

    if (t < 0.0)
    {
        return false;
    }
    else
    {
        return true;
    }
}
```

Встроенные функции

- В GLSL доступен большой набор встроенных функций:
  - Угловые и тригонометрические функции (**`sin`**, **`cos`**, **`asin`**, …)
  - Экспоненциальные функции (**`pow`**, **`exp2`**, **`log2`**, **`sqrt`**, …)
  - Общие функции (**`abs`**, **`sign`**, **`log2`**, **`floor`**, **`step`**, **`clamp`**, …)
  - Геометрические функции (**`length`**, **`distance`**, **`dot`**, **`cross`**, …)
  - Матричные функции (**`matrixcompmult`**)
  - Функции отношения векторов (**`lessThan`**, **`equal`**, …)
  - Функции доступа к текстуре (**`texture2D`**, **`textureCube`**, …)
  - Функции шума (**`noise1`**, **`noise2`**, …)

Вершинный шейдер…

- В *вершинном* шейдере должны выполняться операции *над каждой вершиной*. Чтобы создать вершинный шейдер для данного примера, необходимо ответить на следующие вопросы:
  - *Какие данные* необходимо передавать вершинному шейдеру *для каждой вершины* (через **`attribute`**-переменные)?
  - *Какие глобальные переменные состояния* потребуются вершинному шейдеру (**`uniform`**-переменные)?
  - Что является *результатом вычислений* в вершинном шейдере (**`varying`**-переменные)?
- Рассмотрим эти вопросы по отдельности

Вершинный шейдер…

- *Какие данные* необходимо передавать вершинному шейдеру *для каждой вершины*?
  - Если не задать *координаты вершины*, то вообще невозможно будет что-либо нарисовать. Освещение поверхности объекта не вычислить, если не задана *нормаль в каждой вершине*
  - Минимальными входными параметрами будут *координаты* вершины и *нормаль*
  - Эти параметры уже определены в OpenGL и доступны как встроенные переменные **`gl_Vertex`** и **`gl_Normal`**
  - Дополнительных **`attribute`**-переменных объявлять *не требуется*

Вершинный шейдер…

- *Какие глобальные переменные состояния* потребуются вершинному шейдеру?
  - Необходим доступ к параметрам состояния OpenGL, таким как текущая *матрица модели-вида-проекции* (**`gl_ModelViewProjectionMatrix`**), текущая *матрица модели-вида* (**`gl_ModelViewMatrix`**), текущая *матрица преобразования нормали* (**`gl_NormalMatrix`**)
  - Необходимо также знать *координаты источника освещения* в *пространстве обзора.* Для этого определим дополнительную **`uniform`**-переменную **`LightPosition`**
  - Необходимо определить количество *рассеиваемого* и *отражаемого* света. Для этого воспользуемся двумя *константными* значениями **`SpecularContribution`** и **`DiffuseContribution`** – просто для демонстрации возможностей языка

Вершинный шейдер…

- Что является результатом вычислений в вершинном шейдере?
  - *Любой вершинный шейдер* должен вычислить координаты вершины в *пространстве координат окна*. Для этого служит стандартная переменная **`gl_Position`**
  - Шаблон кирпичей будет вычисляться во *фрагментном* шейдере как *некоторая функция с аргументами x и y* – координатами объекта в *модельной системе координат*. Для передачи этих параметров объявим специальную **`varying`**-переменную **`MCPosition`**
  - Кроме того, в *вершинном* шейдере будет выполняться часть расчетов освещения – будет вычисляться *интенсивность света* для каждой вершины. Для сохранения результата объявим **`varying`**-переменную **`LightIntensity`**

Использование шейдеров…

- В первую очередь, необходимо объявить глобальные переменные – идентификаторы вершинного шейдера, фрагментного шейдера и программного объекта:

```
int vertexShader = Gl.glCreateShader(Gl.GL_VERTEX_SHADER);
int fragmentShader = Gl.glCreateShader(Gl.GL_FRAGMENT_SHADER);
int program = Gl.glCreateProgram();
```

  При этом создается структура данных, которая затем используется OpenGL для хранения исходного кода шейдера

- После того, как шейдер создан, в него следует загрузить исходный код. Исходный код шейдера представлен в виде *массива строк*

Использование шейдеров…

- Для загрузки исходного кода из файла необходимо выполнить следующие шаги:

```
StreamReader sr = new StreamReader(vertexFileName);

Gl.glShaderSource(vertexShader, 1,
      new string[] { sr.ReadToEnd() }, null);

sr.Close();

sr = new StreamReader(fragmentFileName);

Gl.glShaderSource(fragmentFileName, 1,
      new string[] { sr.ReadToEnd() }, null);

sr.Close();
```

Использование шейдеров…

- После загрузки исходного кода в шейдерный объект этот исходный код необходимо *скомпилировать*:

```
Gl.glCompileShader(vertexShader);

int status = 0;

unsafe { Gl.glGetShaderiv(vertexShader,
                          Gl.GL_COMPILE_STATUS,
                          new IntPtr(&status)); }

Gl.glCompileShader(fragmentShader);

unsafe { Gl.glGetShaderiv(fragmentShader,
                          Gl.GL_COMPILE_STATUS,
                          new IntPtr(&status)); }
```

Использование шейдеров…

- В процессе компиляции могут возникнуть ошибки, описание которых будет занесено в *информационный журнал* шейдерного объекта. Чтобы загрузить информационный журнал, необходимо выполнить следующие команды:

```
int capacity = 0;

unsafe { Gl.glGetShaderiv(vertexShader, Gl.GL_INFO_LOG_LENGTH,
             new IntPtr(&capacity)); }

StringBuilder info = new StringBuilder(capacity);

unsafe { Gl.glGetShaderInfoLog(vertexShader, Int32.MaxValue,
                 null, info); }
```

Использование шейдеров…

- Чтобы использовать скомпилированные шейдеры их необходимо *скомпоновать в одну программу*:

```
Gl.glAttachShader(program, vertexShader);

Gl.glAttachShader(program, fragmentShader);

Gl.glLinkProgram(program);

int  status = 0;

unsafe
{
    Gl.glGetProgramiv(program, Gl.GL_LINK_STATUS,
                      new IntPtr(&status));
}
```

Использование шейдеров…

- При компоновке программы могут возникнуть ошибки (даже если все шейдеры по отдельности скомпилировались удачно). Чтобы получить информацию об ошибках, необходимо выполнить следующие шаги:

```
int capacity = 0;

unsafe { Gl.glGetProgramiv(program, Gl.GL_INFO_LOG_LENGTH,
                    new IntPtr(&capacity)); }

StringBuilder info = new StringBuilder(capacity);

unsafe { Gl.glGetProgramInfoLog(program, Int32.MaxValue,
                  null, info); }
```

Использование шейдеров…

- Скомпонованную программу можно установить в качестве состояния OpenGL. Сделать это необходимо перед отрисовкой геометрических объектов:

```
Gl.glUseProgram(program);
```

  Чтобы вернуться к стандартной функциональности OpenGL необходимо выполнить команду:

```
Gl.glUseProgram(0);
```

- При подключении программы все переменные, которые образуют интерфейс шейдера, получат неопределенные значения
- Рассмотрим основные функции, которые

Использование шейдеров...

- Для получения адреса какой-либо **uniform**-переменной служит следующая команда:

```
location = Gl.glGetUniformLocation(program, name);
```

Данная функция должна вызываться только *после успешной компоновки* программного объекта, поскольку адреса **uniform**-переменных *не определены* до этого момента

- Для установки значений **uniform**-переменных служат следующие методы:

```
Gl.glUniform{1234|fi}(location, value)
Gl.glUniform{1234|fi}v(location, count, value)
Gl.glUniformMatrix{234}fv(location, count, transpose, matrix)
```

Использование шейдеров...

- Для получения адреса какой-либо **attribute**-переменной служит следующая команда:

```
Gl.glBindAttribLocation(program, location, name);
int location = Gl.glGetAttribLocation(program, name);
```

Назначить адрес атрибута можно *только перед сборкой* программы. Иначе адреса будут назначены автоматически и их можно запросить

- Для установки значений **attribute**-переменных служат следующие методы:

```
Gl.glVertexAttrib{1234|fi}v(location, value)
```

Использование шейдеров…

- Для нашего простого примера передача данных в шейдер выглядит следующим образом:

```
Gl.glUniform3f(Gl.getUniLoc(brickProg, "BrickColor"),
               1.0, 0.3, 0.2);
Gl.glUniform3f(Gl.getUniLoc(brickProg, "MortarColor"),
               0.85,0.86,0.84);
Gl.glUniform2f(Gl.getUniLoc(brickProg, "BrickSize"),
               0.30, 0.15);
Gl.glUniform2f(Gl.getUniLoc(brickProg, "BrickPct"),
               0.90, 0.85);
Gl.glUniform3f(Gl.getUniLoc(brickProg, "LightPosition"),
               0.0,0.0,4.0);
```

- После установки всех переменных можно переходить к рисованию геометрических объектов