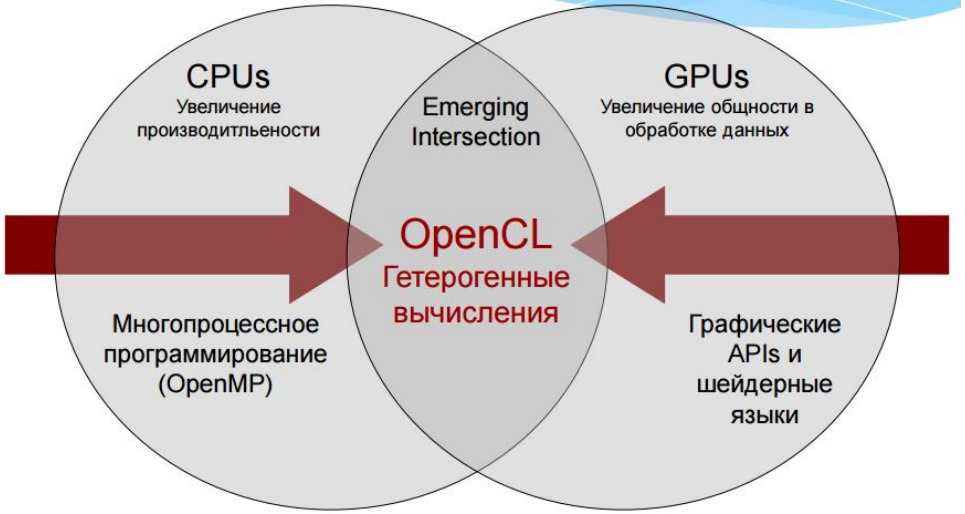


Параллельное и распределенное программирование.

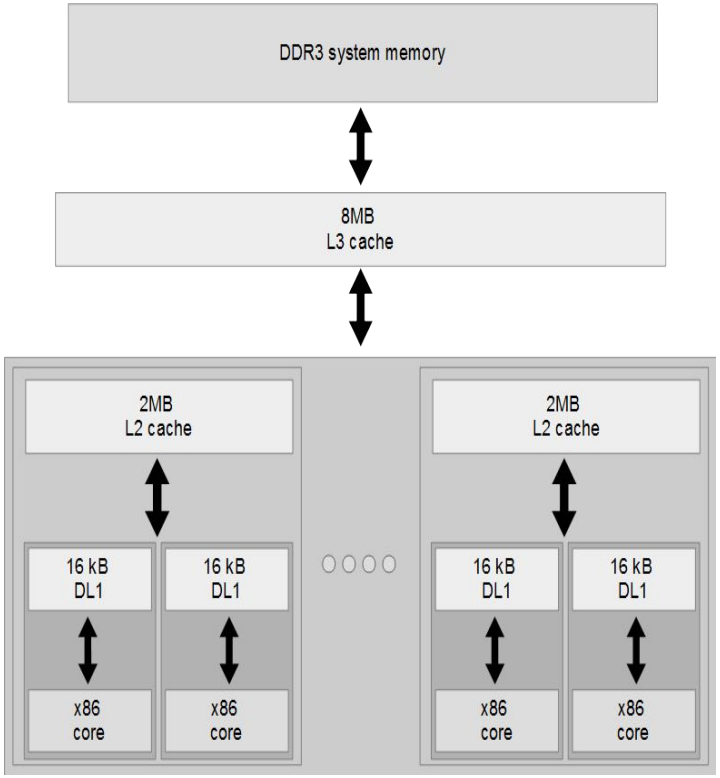
Технология программирования гетерогенных систем OpenCL.

Лекция 3

Архитектура GPU

Традиционная архитектура CPU

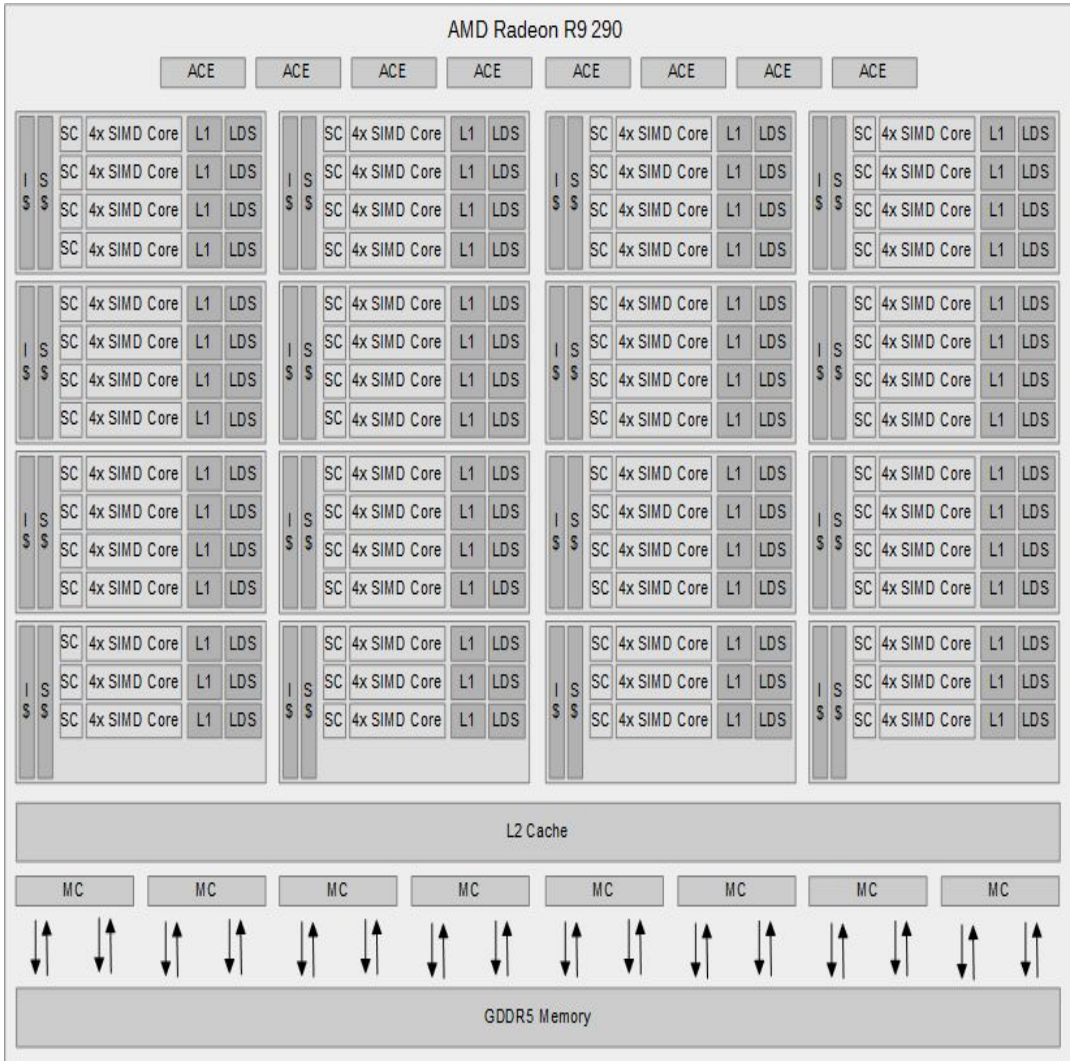
- CPU оптимизированы для минимизации задержки одного потока
  - Может эффективно обрабатывать рабочие нагрузки с интенсивным потоком управления
- Большая часть аппаратного пространства занято логикой кэширования и управления
  - Многоуровневые кеши, используемые для предотвращения задержки
- Ограниченное количество регистров из-за меньшего количества активных потоков



Example Piledriver-based CPU architecture

Современная архитектура GPGPU

- Массив независимых «ядер», называемых Compute Units (AMD) или потоковых мультипроцессоров (NVIDIA)
- Высокая пропускная способность, кэшированные L2 кэши и основная память
  - Банки позволяют осуществлять множественный доступ параллельно
  - 100 ГБ / с
- Память и кеши, как правило, не являются когерентными



Современная архитектура GPGPU

- Вычислительные устройства основаны на оборудовании SIMD
  - Как у AMD, так и у NVIDIA есть 16-ти SIMD-секции
- Большие файлы регистров используются для быстрого переключения контекста
  - Состояние сохранения / восстановления
  - Данные постоянны для выполнения всего потока
- Оба производителя (AMD и NVIDIA) имеют комбинацию автоматического кеша L1 и управляемой локальной памятью
  - Scratchpad называется локальной коллекцией данных (LDS) от AMD и разделяемой памятью от NVIDIA
- Блок Scratchpad имеет большую плотность и очень высокую пропускную способность (~ TB / s)

Современная архитектура GPGPU

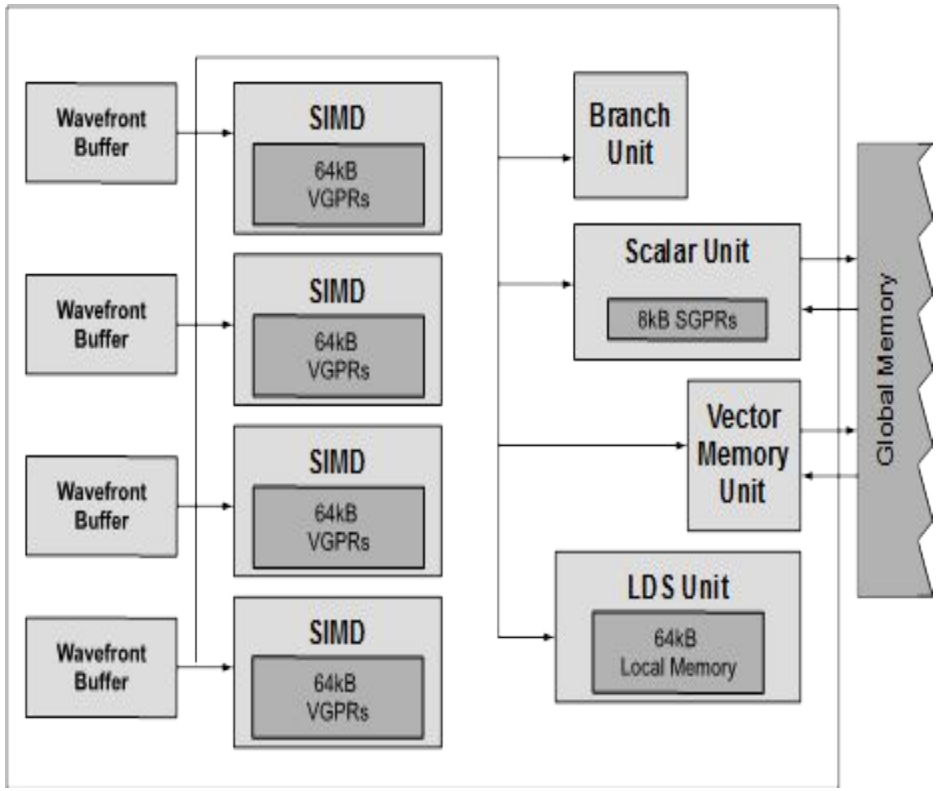
- Рабочие элементы автоматически группируются в аппаратные потоки, называемые «wavefronts» (AMD) или «warps» (NVIDIA)
  - Один поток команд, выполняемый на SIMD-оборудовании
  - 64 рабочих элемента в wavefront, 32 в warp
- Управляющий поток обрабатывается путем маскировки SIMD-секции

SIMT и SIMD

- NVIDIA придумала «Single Instruction Multiple Threads» (SIMT) для обозначения нескольких (программных) потоков, совместно используемых потоком команд
- Хотя каждый рабочий элемент имеет свой собственный счетчик программ (ПК), они выполняют блокировку на SIMD-оборудовании
  - Несколько потоков программного обеспечения выполняются на одном аппаратном потоке
- Расхождение между потоками, обрабатываемыми с помощью маскирования или предикации
  - Дивергенция между рабочими элементами прозрачна для модели OpenCL и кажется, что рабочий элемент имеет свой собственный вычислитель
- Производительность сильно зависит от адаптации рабочих элементов под SIMD-обработку

AMD R9 290X

- Архитектура вычислений

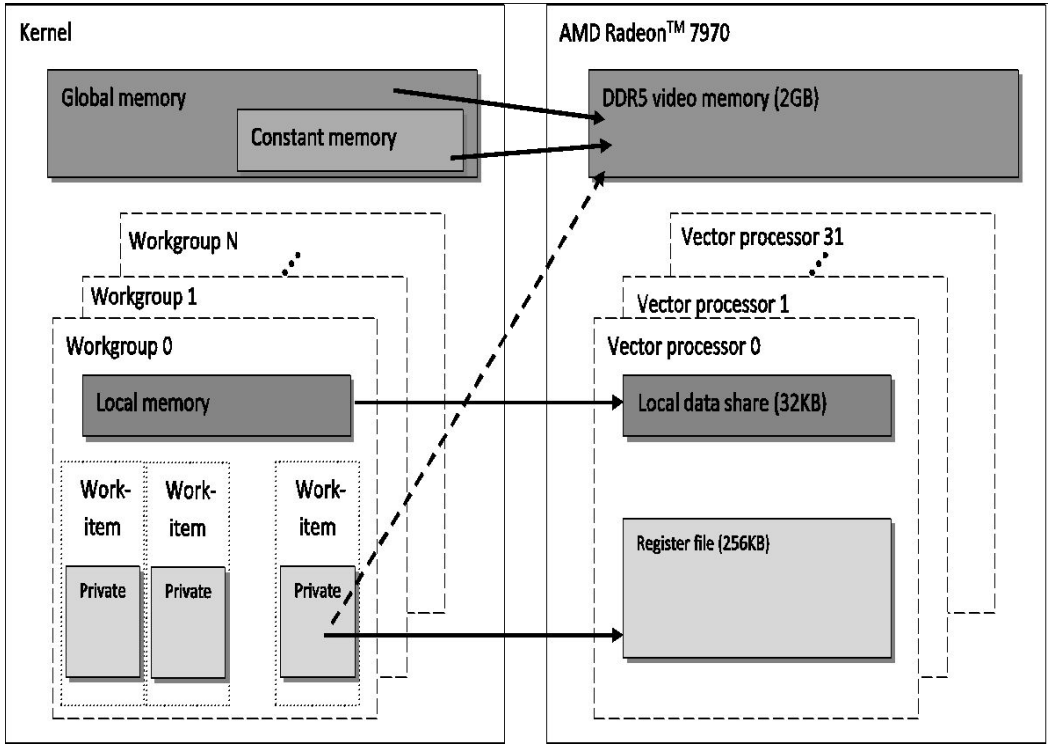


AMD R9 290X

- Wavefronts связаны с модулем SIMD и подмножеством векторных регистров
  - С каждым SIMD может быть связано до 10 wavefronts
  - 4 SIMD
  - 40 wavefronts могут быть активны на единицу измерения
- Все аппаратные блоки, за исключением SIMD, совместно используются всеми wavefronts на вычислительном блоке

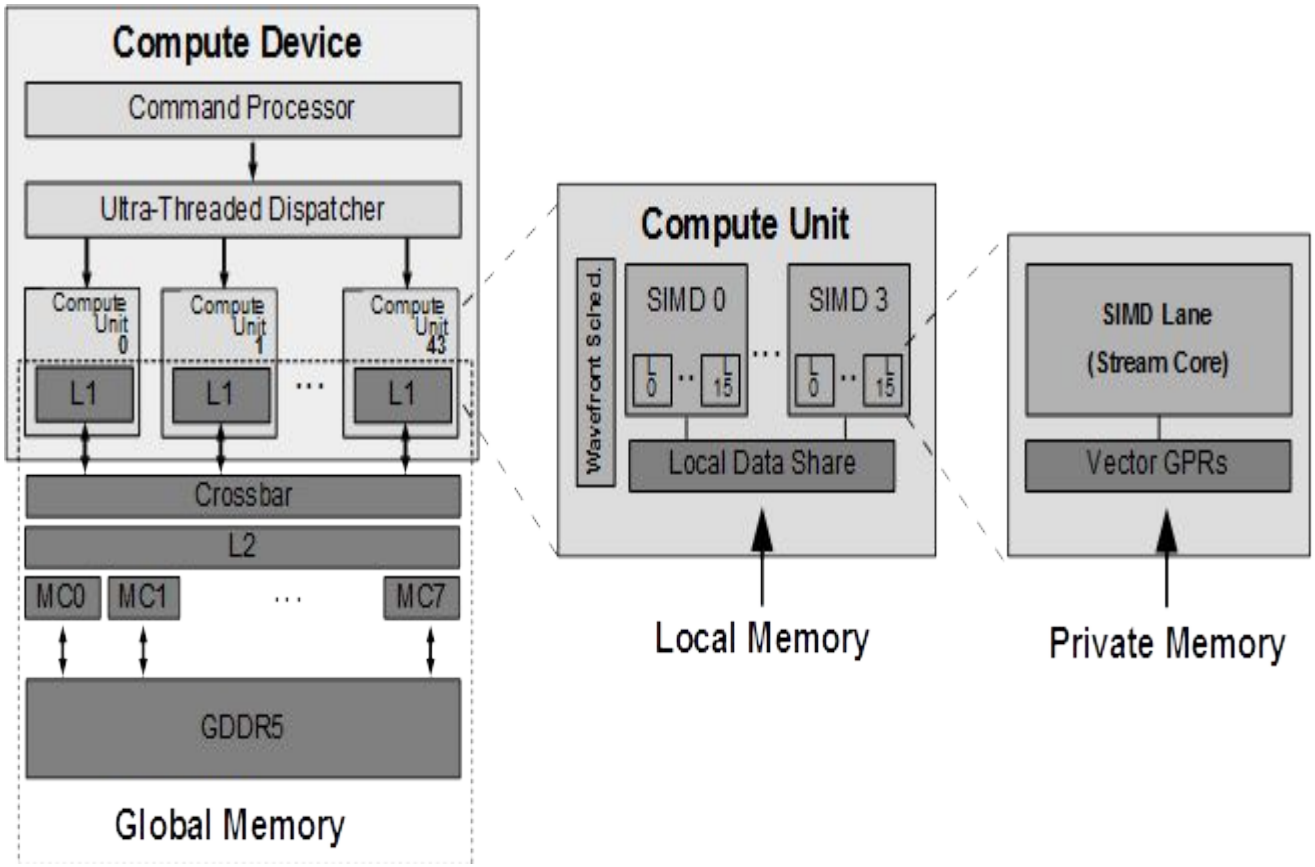
Модель памяти в OpenCL

- Глобальная память
  - для кэширования
- Основная память GDDR5
  - Константная память
  - Память скалярного блока
  - Локальная память
- Карты в LDS
  - Общие данные между рабочими элементами рабочей группы
  - Доступ с высокой пропускной способностью для SIMD
- Закрытая память
  - Регистровая память



AMD GPU архитектура in OpenCL

- R9 290X в OpenCL



Идеальное ядро GPGPU

- Идеальное ядро для GPU
  - Имеет тысячи самостоятельных вычислительные единицы
    - Использует все доступные вычислительные единицы
    - Позволяет переключать контекст для скрытия латентности
  - Подходит для обмена потоками команд
    - Локальная память для выполнения SIMD предотвращает расхождение между рабочими элементами
    - Обладает высокой арифметической интенсивностью
  - Временное соотношение математических операций с доступом к памяти является высоким
    - Не ограничено полосой пропускания памяти

Буферы

План

- Создание объектов памяти (например, буферов)
  - Параметры флага памяти
- Буферы записи и чтения
- Управление объектами памяти
- Перенос объектов памяти
- Память, доступная для хоста

Буферы

- Объекты памяти используются для передачи больших структур данных в ядра OpenCL
- Наиболее прямым объектом является буфер
  - Буфер представляет собой непрерывную последовательность адресных элементов, подобных массиву C
- На основе флагов памяти предоставляется опциональный указатель хоста для инициализации буфера или даже для хранения буфера
- Объект-буфер создается с помощью следующей функции:

```
cl_mem buffer = clCreateBuffer (
        cl_context context,   // Context object
        cl_mem_flags flags,   // Memory flags
        size_t size,          // Bytes to allocate
        void *host_ptr,       // Host data
        cl_int *errcode)      // Error code
```

Флаги памяти

- Поле флага памяти в clCreateBuffer () позволяет нам определять атрибуты буферного объекта:

Флаг	Поведение
CL_MEM_READ_WRITE	Указывает типы доступа, разрешенные ядром
CL_MEM_WRITE_ONLY	
CL_MEM_READ_ONLY	
CL_MEM_USE_HOST_PTR	Используйте указатель хоста в качестве хранилища для буфера. В памяти устройства используется кешированная копию во время выполнения ядра
CL_MEM_ALLOC_HOST_PTR	Выделяет буферное хранилище в доступной памяти хоста.
CL_MEM_COPY_HOST_PTR	Инициализировать буфер данными из ссылки host_ptr.
CL_MEM_HOST_WRITE_ONLY	Указывает типы доступа, разрешенные хостом для объекта памяти.
CL_MEM_HOST_READ_ONLY	
CL_MEM_HOST_NO_ACCESS	

Буферы

- Следующий код создает буфер только для чтения и инициализирует его данными из массива хоста
  - Предполагается, что контекст является допустимым контекстом OpenCL

```
cl_int err;
int a[16];

cl_mem newBuffer = clCreateBuffer(
    context,
    CL_MEM_READ_ONLY | CL_MEM_USE_HOST_PTR,
    16*sizeof(int),
    a,
    &err);

if( err != CL_SUCCESS ) {
    // Handle error as necessary
}
```

Буферы для записи

- OpenCL предоставляет команды для чтения или записи данных из буфера
  - Использование командной очереди также позволяет среде выполнения копировать буфер на устройство.
  - Создает событие для зависимостей или может быть использован блокирующий вызов
- Как только команда будет завершена, указатель хоста может быть повторно использован
  - Программист может указать, что хранилище данных буфера объекта находится на устройстве после завершения вызова, хотя это явно не требуется в спецификации OpenCL

```
cl_int clEnqueueWriteBuffer (
    cl_command_queue queue,             // command queue
    cl_mem buffer,                      // buffer object
    cl_bool blocking_write,             // blocking flag
    size_t offset,                      // offset into buffer to write
    size_t cb,                          // size of data to write
    void *ptr,                          // pointer to source data
    cl_uint num_in_wait_list,           // number of events to wait for
    const cl_event *  event_wait_list, // array of events to wait for
    cl_event *event)                    // event for this command
```

Буферы для записи

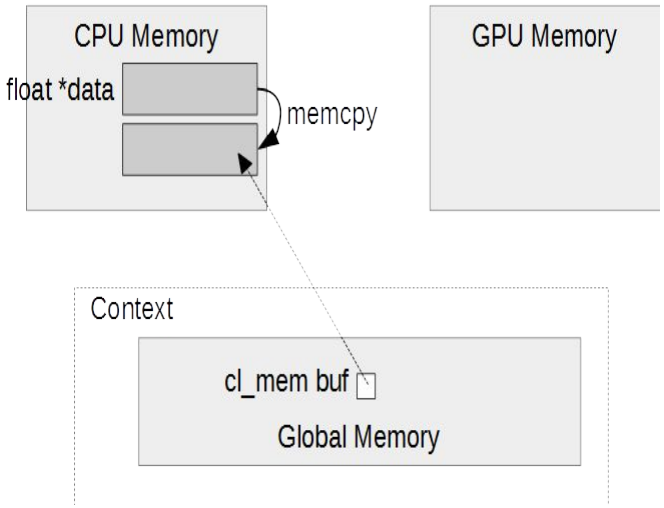
- Пример, показывающий создание и инициализацию буфера

```
cl_int err;
int a[16];

for (int i = 0; i < SIZE; i++) {
    a[i] = i;
}

// Create the buffer
cl_mem buffer = clCreateBuffer(context, CL_MEM_READ_WRITE, SIZE*sizeof(int),a, &err);

if( err != CL_SUCCESS ) {// Handle error as necessary }

// Initialize the buffer
err = clEnqueueWriteBuffer (
    queue,
    buffer, // destination
    CL_TRUE, // blocking write
    0, // don't offset into buffer
    SIZE*sizeof(int), // number of bytes to write
    a, // host data
    0, NULL, // don't wait on any events
    NULL); // don't generate an event
```

Буферы для записи

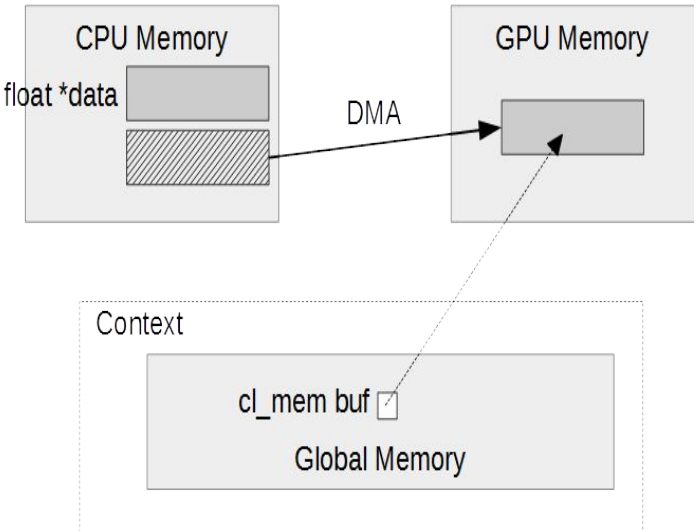
- В следующем примере показано создание и инициализация буфера, использование его в ядре без явного написания буфера

```
cl_mem buf = clCreateBuffer(…,
   CL_MEM_COPY_HOST_PTR,data,…);
```



а) Создание и инициализация буфера в памяти хоста (инициализация выполняется с использованием CL_MEM_COPY_HOST_PTR).

```
clSetKernelArg(…, &buf);
clEnqueueNDRangeKernel(gpuQueue,…);
```

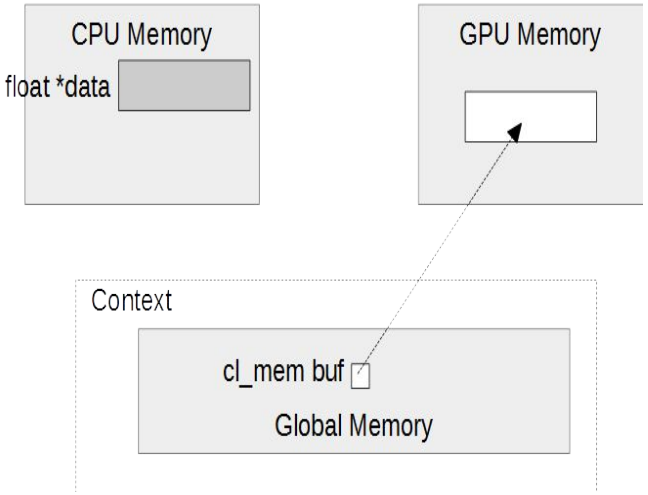


б) Неявная передача данных с хоста на устройство до выполнения ядра. Среда выполнения также может выбрать, чтобы устройство получало доступ к буферу непосредственно из памяти хоста.

Буферы для записи

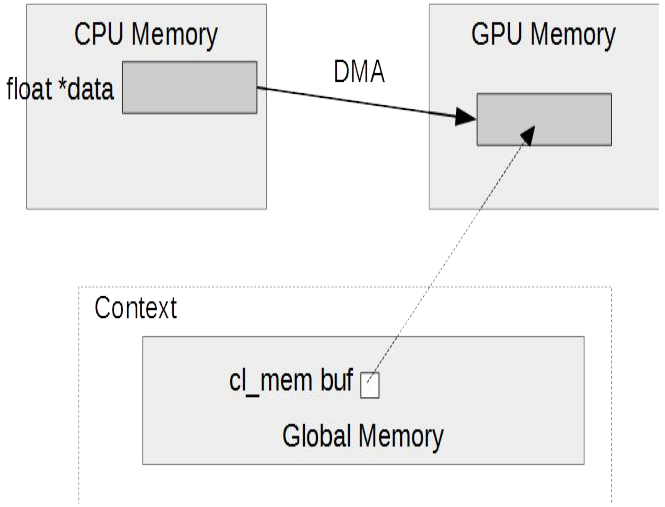
- В качестве альтернативы среда выполнения может решить создать буфер непосредственно в памяти устройства

```
cl_mem buf = clCreateBuffer(…);
```



a) Создание буфера в памяти устройства (по усмотрению среды выполнения)

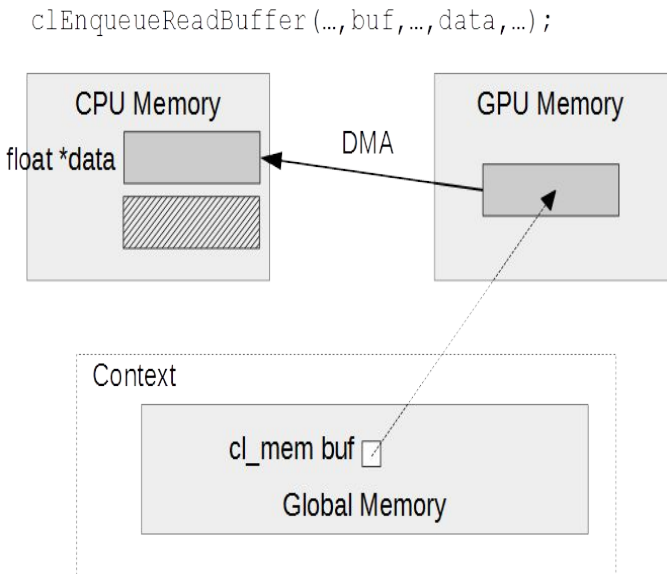
```
clEnqueueWriteBuffer(…,buf,…,data,…);
```



b) Копирование данных хоста в буфер непосредственно в памяти графического процессора

Буферы для чтения

- Бесплатный вызов для записи буфера (буфер считывается обратно в память хоста)
  - Следующая диаграмма предполагает, что данные буфера были перенесены на устройство по времени выполнения



c) Чтение выходных данных из буфера обратно в память хоста (продолжение с предыдущего слайда)

Перенос (миграция) объектов памяти

- OpenCL предоставляет вызов API для переноса объектов памяти между устройствами
  - В отличие от чтения и записи буфера этот вызов гарантирует, что объекты памяти будут расположены на устройстве, когда команда завершается
  - Позволяет переносить несколько объектов памяти с помощью одной команды

```
cl_int clEnqueueMigrateMemObjects (cl_command_queue command_queue,
                                   cl_uint num_mem_objects,
                                   const cl_mem *mem_objects,
                                   cl_mem_migration_flags flags,
                                   cl_uint num_events_in_wait_list,
                                   const cl_event *event_wait_list,
                                   cl_event *event)
```

Память, доступная с хоста

- При создании объекта памяти флаги могут указывать, что объект должен быть создан в доступной для хоста памяти
  - требует выделения в месте, которое может быть отображено в адресное пространство хоста
- CL_MEM_ALLOC_HOST_PTR
  - сообщает рабочей среде о создании буфера в доступной для хоста памяти
- CL_MEM_USE_HOST_PTR
  - Сообщает, что среда выполнения использует указатель на хост-носитель в качестве хранилища для буфера
- Для обоих вариантов реализация будет иметь доступ к буферу из памяти хоста (ЦП)
  - Это обычно называют памятью с нулевой копией
  - Это явно не требуется в спецификации OpenCL

Память, доступная с хоста

- Специальная обработка флагов (AMD)
- CL_MEM_ALLOC_HOST_PTR и CL_MEM_USE_HOST_PTR
  - Если устройства поддерживают виртуальную память, хранилище будет создано в виде закрепленной памяти хоста и доступ к ней как к нулевым копиям
  - Без виртуальной памяти на устройстве будет выделено хранилище
- CL_MEM_USE_PERSISTENT_MEM_AMD
  - Специфическое для AMD расширение
  - Доступ к этому объекту памяти с хоста происходит непосредственно из памяти устройства
- Когда указываете, где должны храниться данные, необходимо оценить все последствия

Отображение данных в память хоста

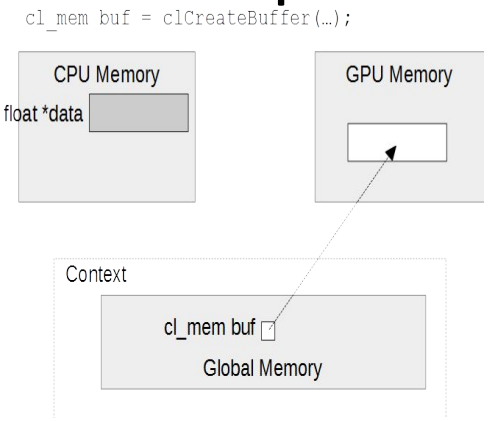
- OpenCL предоставляет API-вызовы для отображения и распаковки объектов памяти из пространства памяти хоста
- Когда объект памяти сопоставляется, возвращается верный указатель на хост
  - Параметры функции отображения такие же, как чтение / запись буфера

```
void * clEnqueueMapBuffer (cl_command_queue command_queue,
                           cl_mem buffer,
                           cl_bool blocking_map,
                           cl_map_flags map_flags,
                           size_t offset,
                           size_t size,
                           cl_uint num_events_in_wait_list,
                           const cl_event *event_wait_list,
                           cl_event *event,
                           cl_int *errcode_ret)
```

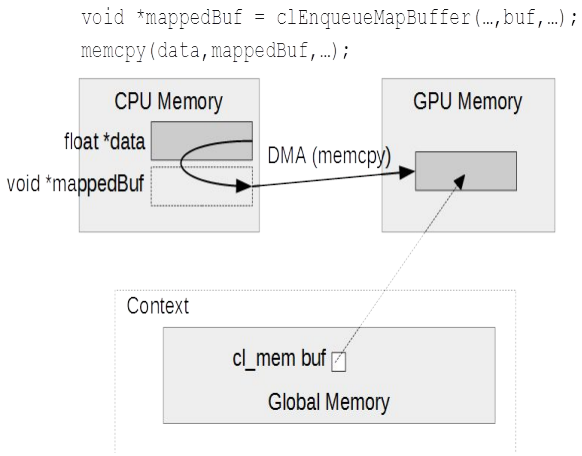
```
cl_int clEnqueueUnmapMemObject (cl_command_queue command_queue,
                                cl_mem memobj,
                                void *mapped_ptr,
                                cl_uint num_events_in_wait_list,
                                const cl_event *event_wait_list,
                                cl_event *event)
```

Отображение данных в память хоста

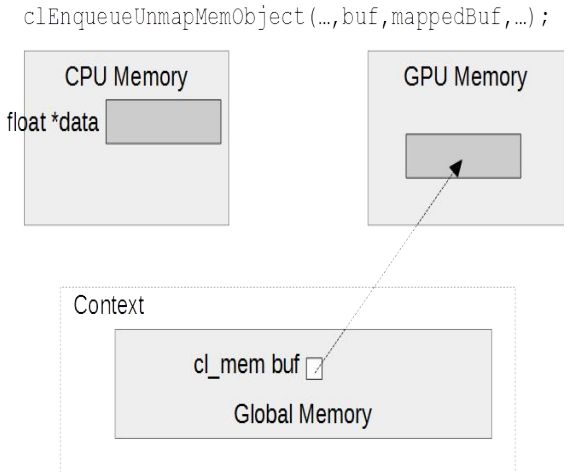
- В приведенном ниже примере показан один возможный сценарий для функций map и unmap



a) Создание неинициализированного буфера в памти устройства



b) Отображение буфера в адресное пространство хоста. Получение доступа к буферу с помощью указателя узла.



c) Unmap буфера из адресного пространства хоста

Выводы

- Объекты памяти создаются и управляются хостом с помощью вызовов OpenCL API
- Параметры, предоставленные во время создания, могут использоваться для описания намерений программиста во время выполнения
- Расположение данных влияет на время выполнения

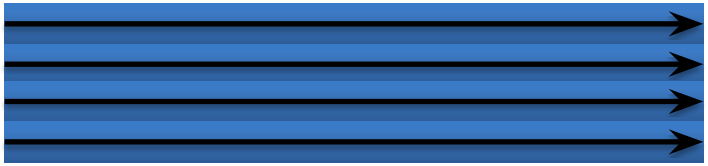
Изображения и каналы
Images и Pipes в OpenCL 2.0

План

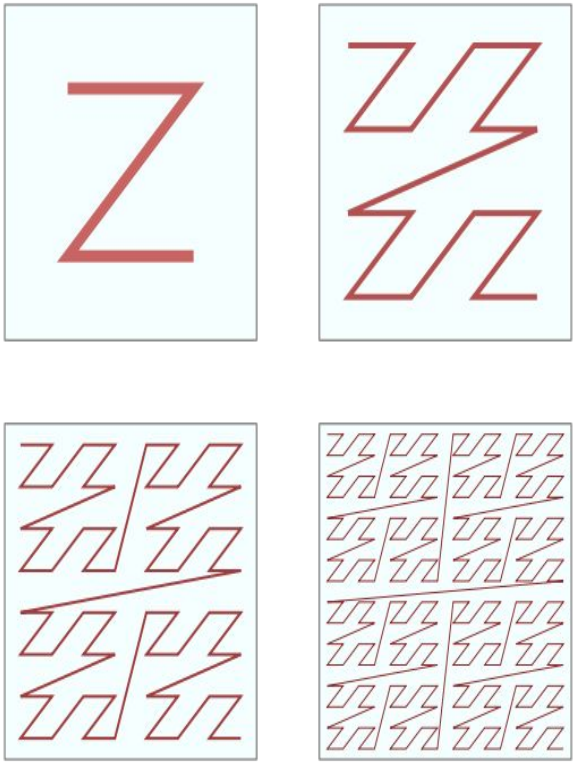
- Объекты памяти, введенные в спецификации OpenCL 2.0
  - Изображения
  - Каналы (pipes)
- Объекты памяти специального назначения и отличаются от C-подобных буферов
  - Изображения - абстрактная модель памяти для обеспечения простоты и оптимизации
  - Каналы используются для отправки данных между экземплярами ядра в FIFO порядке

Изображения

- Массивы C / C ++ и объекты буфера OpenCL (cl_mem) обеспечивают 1D локальность
- Графические процессоры содержат аппаратную поддержку для:
  - Кэширование и чтение многомерных данных (текстур)
  - Рисование интерполированных текстурных вершин
- Аппаратная поддержка этих функций предоставляется программистам через OpenCL-изображения
  - Изображения OpenCL - это объекты памяти, оптимизированные для 2D-локации
- Смежные элементы не гарантируют непрерывности в памяти
  - Структура кривой Z в текстурах в памяти обеспечивает двумерную локальность данных



C/C++ 1D locality (row major)layout



Z Curve - 2D locality in layout

Z Curve image from Wikipedia

Изображения

- Изображения специально разработаны для управления объектами графических данных
- Элементы изображений не могут быть доступны непосредственно из ядра
- Изображения отличаются от буферов данных следующими признаками:
  - Непрозрачный тип данных, который нельзя просматривать напрямую из устройства
  - Многомерные структуры
  - Ограничено набором типов данных, относящихся к графике
- Специальные ВУ обеспечивают различные операции, такие как преобразование данных и фильтрация
- В ядрах OpenCL вместо функции простого индексирования используется вызов функции read_image {type}, используя '[]'
  - Использование read_image и write_image описано дальше

Преимущества изображений

- Интерполяция
  - Доступ к изображениям осуществляется с помощью координат с плавающей запятой
  - Возвращается любой ближайший пиксель или выполняется линейная интерполяция
    - Указано в объекте cl_sampler
    - CL_FILTER_NEAREST (без интерполяции)
    - CL_FILTER_LINEAR (линейная интерполяция)
- Нормализованный типы данных
  - Уменьшает объем используемой памяти, поскольку эти типы данных сохраняют float как 16- или 8-битное целое число в текстуре
  - Использовать float в нормализованном диапазоне [0.0-1.0] (беззнаковые типы), [-1.0-1.0] (знаковые типы)

Преимущества изображений

- Обработка исключений
  - Поведение доступа за пределами границ обрабатывается аппаратными средствами
  - Флаги, указанные при создании cl_sampler
    - Примеры
    - CLK_ADDRESS_CLAMP - возврат 0
    - CLK_ADDRESS_CLAMP_TO_EDGE - вернуть цвет пикселя, ближайшего к местоположению вне пределов

Преимущества изображений

- Каналы в изображениях OpenCL относятся к основным цветам, которые составляют изображение
  - Каждый пиксель в текстуре может содержать от 1 до 4 каналов (от R до RGBA)
  - RGBA: красный, зеленый, синий, альфа
  - Информация о цвете хранится как данные с плавающей запятой / целыми числами
- При упаковке нескольких значений (каналов) в пикселе это может улучшить использование полосы пропускания памяти.
- Количество каналов определяется при создании изображения

Создание изображений

- Декларации изображений состоят из дескрипторов и форматов
- Использование изображений в ядрах требует объявления объекта сэмплера изображения

```
cl_mem clCreateImage (
            cl_context context,           // OpenCL Context
            cl_mem_flags flags,           // Memory Flags
            const cl_image_format *image_format,   // Image format
            const cl_image_desc *image_desc,       // Image descriptor
            void *host_ptr,               // Host Pointer
            cl_int *errcode_ret)          // Error code
```

Дескрипторы и форматы изображений

- Свойства изображения, указанные в структуре cl_image_desc, включая
  - Тип изображения - 1D, 2D или 3D изображение
  - Размер изображения - ширина, высота и глубина
  - Шаг строки и среза
- Формат изображения, описанный в структуре cl_image_format, определяет свойства канала и тип данных каждого элемента в канале
  - Свойства канала: количество каналов и макет памяти, в которых каналы хранятся в изображении
- Более подробный синтаксис можно найти в спецификации

Сэмплер изображения
(Image sampler)

- Image sampler описывает, как получить доступ к объекту изображения
- Сэмплеры указывают:
  - Тип системы координат для доступа к изображению
  - Параметры для обращения за пределами доступа
  - Параметры интерполяции, если доступ лежит между несколькими индексами
- Сэмплер передается ядру так же, как и обычные аргументы ядра, или может быть объявлен в ядре
- Создание сэмплера на хосте выполняется с помощью вызова clCreateSampler

```
cl_sampler   clCreateSampler (
   cl_context context,                    // OpenCL context
   cl_bool normalized_coords,             // Use normalized coords?
   cl_addressing_mode addressing_mode,    // Out-of-bounds access behavior
   cl_filter_mode filter_mode,            // Interpolation behavior
   cl_int *errcode_ret)                   // Error code
```

Использование изображений в ядре

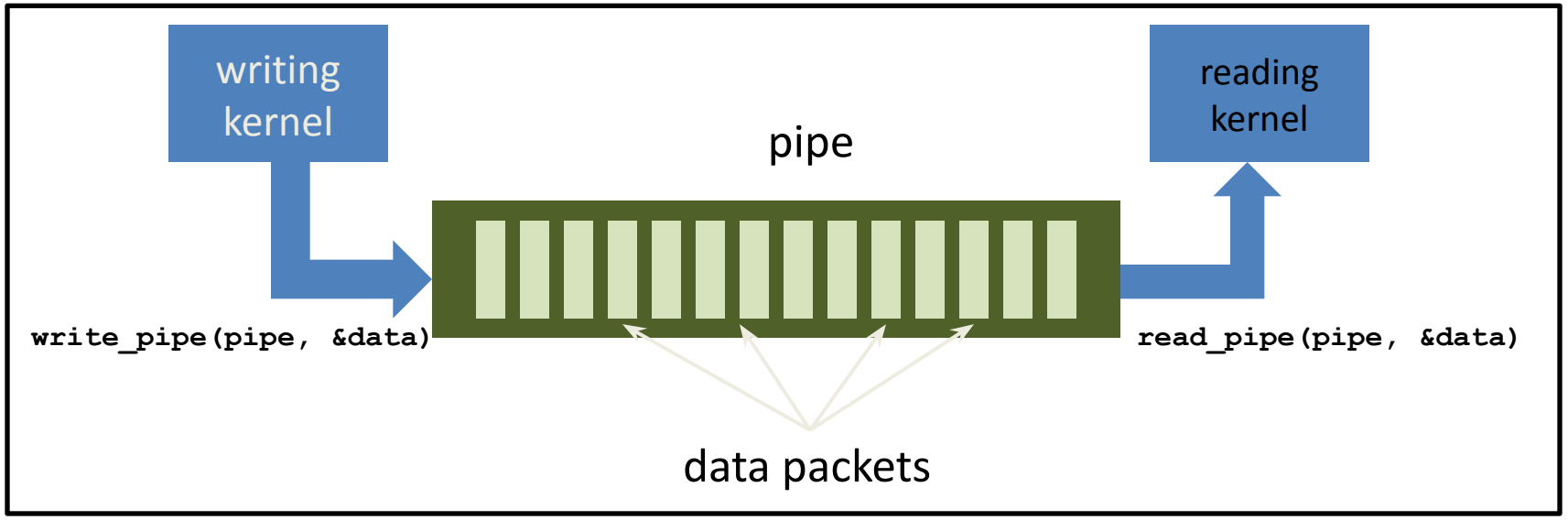
- Форматы изображений не такие, как базовые типы OpenCL (int, float, char и т. д.).
- Квалификаторы типов, используемые для изображений: image1d_t, image2d_t и image3d_t

Использование изображений в ядре

```
__kernel
void rotation(
    __read_only image2d_t inputImage, __write_only image2d_t outputImage,
    int imageWidth, int imageHeight, float theta)
   {
   // Declaring sampler
   __constant sampler_t sampler =
      CLK_NORMALIZED_COORDS_FALSE | CLK_FILTER_LINEAR | CLK_ADDRESS_CLAMP;

   /* Read the input image */
   float value;
   value = read_imagef(inputImage, sampler, readCoord).x;

   /* Write the output image */
   write_imagef(outputImage, (int2)(x, y), (float4)(value, 0.f, 0.f, 0.f));
}
```

Каналы (Pipes)

- Новый объект памяти, введенный в спецификации OpenCL 2.0
- Данные организованы как пакеты в структуре FIFO
- У Pipes есть один экземпляр ядра, который является писателем и другим экземпляром ядра, который является читателем
  - Одно и то же ядро не может писать и читать канал
  - Согласование памяти выполняется в точках синхронизации



Каналы (Pipes)

- Данные в канале организованы как пакеты
  - Пакет может иметь тип, поддерживаемый OpenCL C
  - Глубина канала определяется как количество пакетов, поддерживаемых каналом
- К каналу можно получить доступ через код ядра на устройстве
- Хост создает объект pipe, используя clCreatePipe ()
  - Передается как обычный аргумент ядра
  - Хост не разрешает читать или записывать данные в объект pipe

```
clCreatePipe(
    cl_context context,                     // Context
    cl_mem_flags flags,                     // Flags same as buffer
    cl_uint pipe_packet_size,               // Packet size
    cl_uint pipe_max_packets,               // Pipe depth
    const cl_pipe_properties *properties, // Pipe properties
    cl_int *errcode_ret)                    // Error code
```

Каналы (Pipes)

- В ядре каналы должны быть объявлены с использованием ключевого слова pipe, квалификатора доступа (read_only или write_only) и тип данных пакетов
- Пример сигнатуры ядра, который считывает pipe типа int и записывает в pipe типа float4:

```
kernel
void foo(read_only pipe int input_pipe,
         write_only pipe float4 output_pipe)
```

Каналы (Pipes)

- Подобно изображениям, каналы представляют собой непрозрачные объекты
- Доступ к каналу в ядре выполняется с помощью встроенных функций OpenCL C
- Существует несколько способов доступа к каналу; самым основным является использование функций
  - int write_pipe (pipe p, gentype * ptr)
  - int read_pipe (pipe p, gentype * ptr)
- Оба вызова принимают объект pipe и указатель в качестве параметра
- Оба вызова возвращают 0 при успешном завершении

Pipes – идентификатор резервирования

- Существуют функции OpenCL для резервирования места в канале заранее
  - Доступ гарантируется
  - Эти функции возвращают идентификаторы резервирования (reserve_id_t), которые определяют местоположения в пределах канала
- Несколько пакетов могут быть зарезервированы для одного и того же идентификатора резервирования, используя параметр num_packets

```
reserve_id_t
reserve_read_pipe(
   pipe gentype p,
   uint num_packets)
```

```
reserve_id_t
reserve_write_pipe(
   pipe gentype p,
   uint num_packets)
```

Pipes – идентификатор резервирования

- Идентификаторы резервирования передаются в перегруженные версии read_pipe () и write_pipe ()
  - дополнительно должен быть указан индекс, указывающий местоположение пакета в зарезервированном пространстве
- Когда используются идентификаторы резервирования, для обеспечения успешного завершения операции требуется дополнительный блокирующий вызов (commit_read_pipe () или cor

```
int
read_pipe(
   pipe gentype p,
   reserve_id_t reserve_id,
   uint index,
   gentype *ptr)
```

```
void
commit_read_pipe(
   pipe gentype p,
   reserve_id_t reserve_id)
```

Каналы (Pipes)

- Дополнительные версии вызовов резервирования и фиксации каналов существуют в детализации рабочей группы
  - work_group_reserve_read_pipe () и work_group_reserve_read_pipe ()
  - work_group_commit_read_pipe () и work_group_commit_read_pipe ()
- Существуют также вызовы OpenCL C для определения количества пакетов в канале (get_pipe_num_packet ()) и размера канала (get_pipe_max_packets ())

Выводы

- Изображение представляет собой тип данных, который позволяет эффективно выполнять операции
  - интерполирование
  - нормализации
  - Bounds-обращение
- Каналы упрощают передачу данных между экземплярами ядра для определенных классов алгоритмов
- Изображения и каналы являются непрозрачными типами, доступными только по внутренним функциям OpenCL C