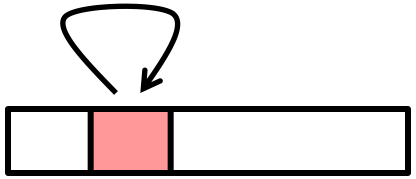
Лекция 20

18 апреля

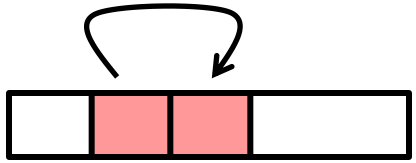
Локальность

- Основной принцип локальности: программа стремится использовать данные и инструкции с адресами близкими (либо точно такими же) к тем, которые использовались ранее.

- Временная локальность:
  - Повторные обращения



- Пространственная локальность:
  - В некоторый малый промежуток времени используются ячейки памяти с близкими адресами



Пример

```
sum = 0;
for (i = 0; i < n; i++)
    sum += a[i];
return sum;
```

- Выборка данных
  - Последовательные обращения к элементам массива. **Пространственная локальность**
  - Переменная `sum` используется на каждой итерации. **Временная локальность**
- Выборка инструкций
  - Последовательная выборка инструкции. **Пространственная локальность**
  - Повторное выполнение инструкций в цикле. **Временная локальность**

Оценка качества локальности

- Утверждение: способность беглым взглядом определить характер локальности кода является одним из необходимых навыков профессионального программиста.

- Вопрос: Достигается ли в функции `sum_array_rows` локальность обращений к массиву a?

```
int sum_array_rows(int a[M][N]) {
    int i, j, sum = 0;

    for (i = 0; i < M; i++)
        for (j = 0; j < N; j++)
            sum += a[i][j];
    return sum;
}
```

Еще один пример

- Вопрос: достигается ли в функции `sum_array_cols` локальность обращений к массиву a?

```
int sum_array_cols(int a[M][N]) {
    int i, j, sum = 0;

    for (j = 0; j < N; j++)
        for (i = 0; i < M; i++)
            sum += a[i][j];
    return sum;
}
```

Третий пример

- Вопрос: Как преобразовать гнездо циклов, что бы проход по 3-мерному массиву выполнялся с шагом 1 (и т.о. достичь пространственной локальности)?

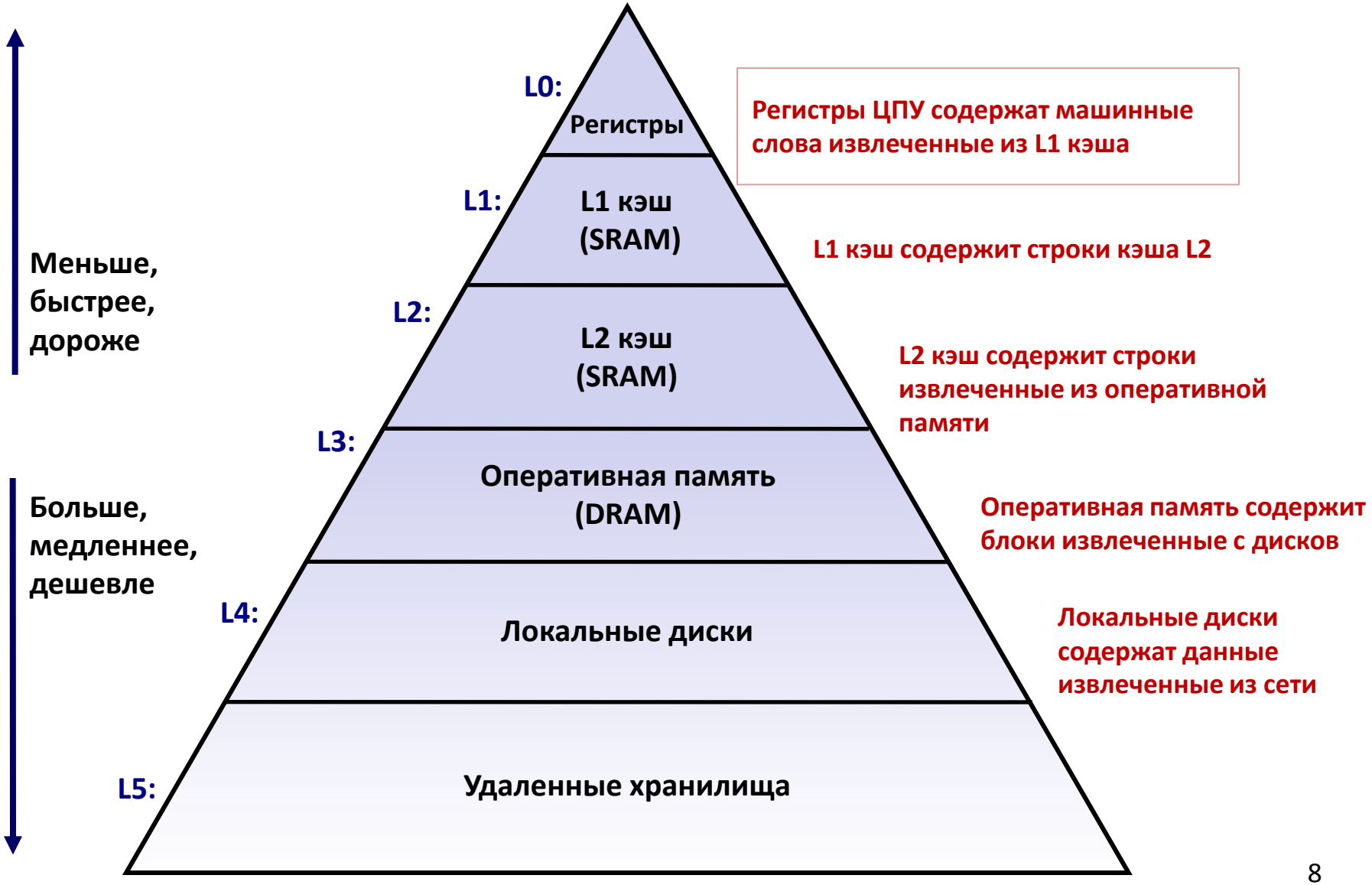
```
int sum_array_3d(int a[M][N][N]) {
    int i, j, k, sum = 0;

    for (i = 0; i < M; i++)
        for (j = 0; j < N; j++)
            for (k = 0; k < N; k++)
                sum += a[k][i][j];
    return sum;
}
```

Иерархия памяти

- Ряд фундаментальных свойств аппаратуры и ПО:
  - Более быстрые устройства хранения стоят дороже, имеют меньший объем и потребляют больше энергии.
  - Разрыв в скорости работы между ЦПУ и оперативной памятью увеличивается.
  - В хорошо написанных программах демонстрируется хорошая локальность.
- Данные свойства дополняют друг друга и …
- … выводят на идею иерархической организации памяти.

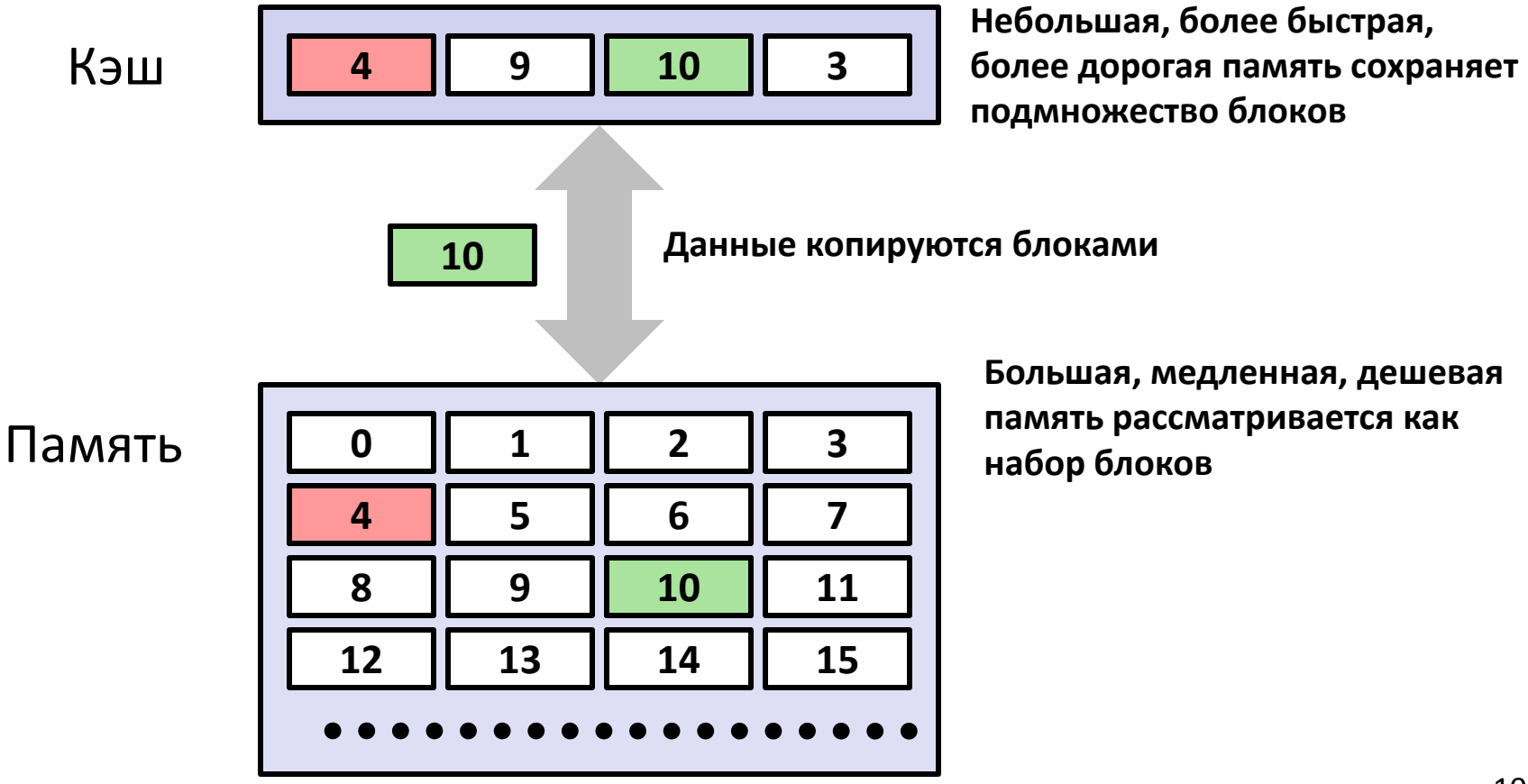
Иерархия памяти



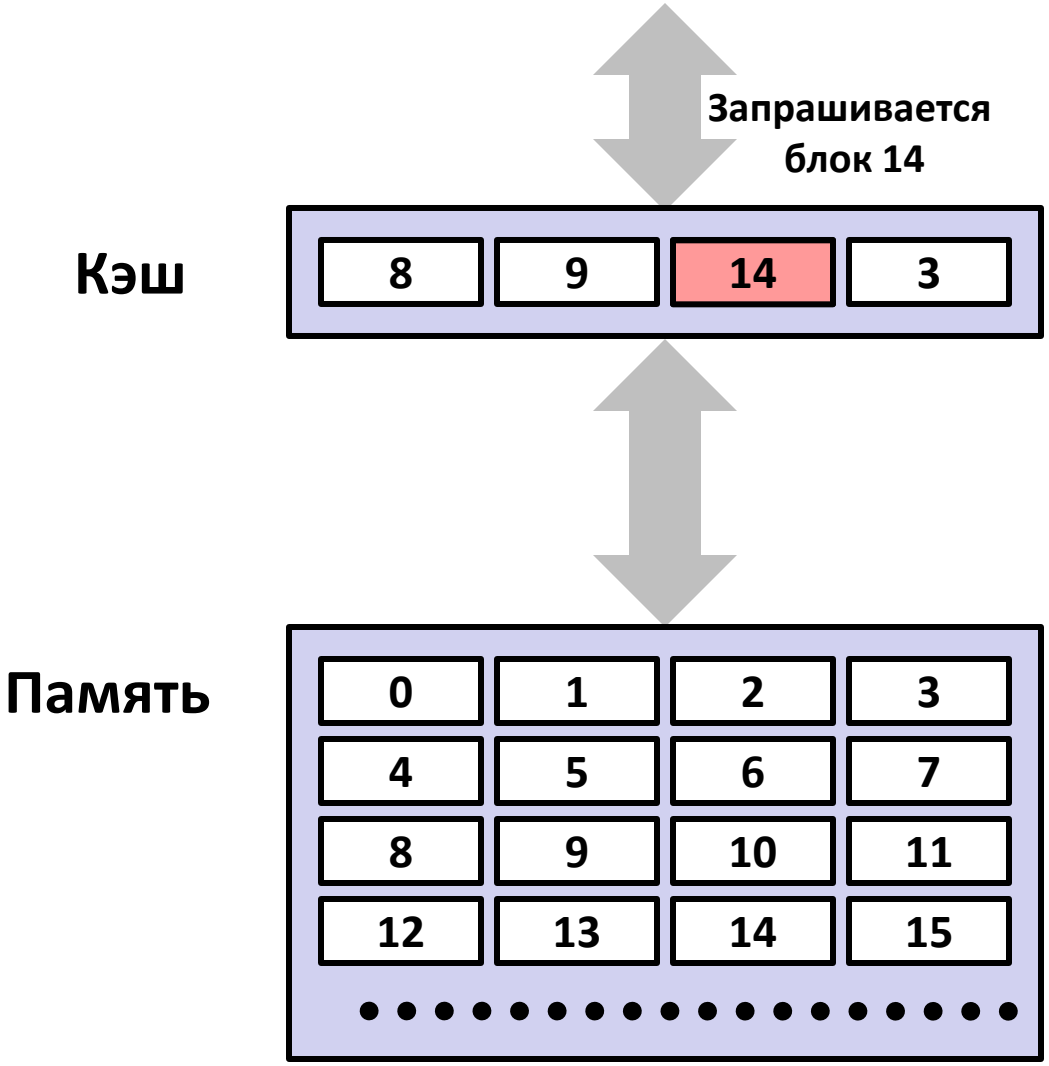
Кэш

- *Кэш:* меньшее объемом, но более быстрое устройство хранения, выступает в роли промежуточного хранилища для большего, но более медленного устройства.
- Основная идея иерархии памяти:
  - Для каждого k, более быстрое, меньшее устройство на уровне k выступает как кэш для большего, но более медленного устройства на уровне k+1.
- Почему это работает?
  - Из-за локальности программа обращается к данным на уровне k гораздо чаше чем к данным на уровне k+1.
  - Устройство уровня k+1 может быть более медленным → большего размера, более дешевым.
- *Результат:* Иерархическая память – большой объем данных, стоит сопоставимо с самой дешевой компонентой, работает с максимальной скоростью.

Основная идея кэша



Попадание в кэш

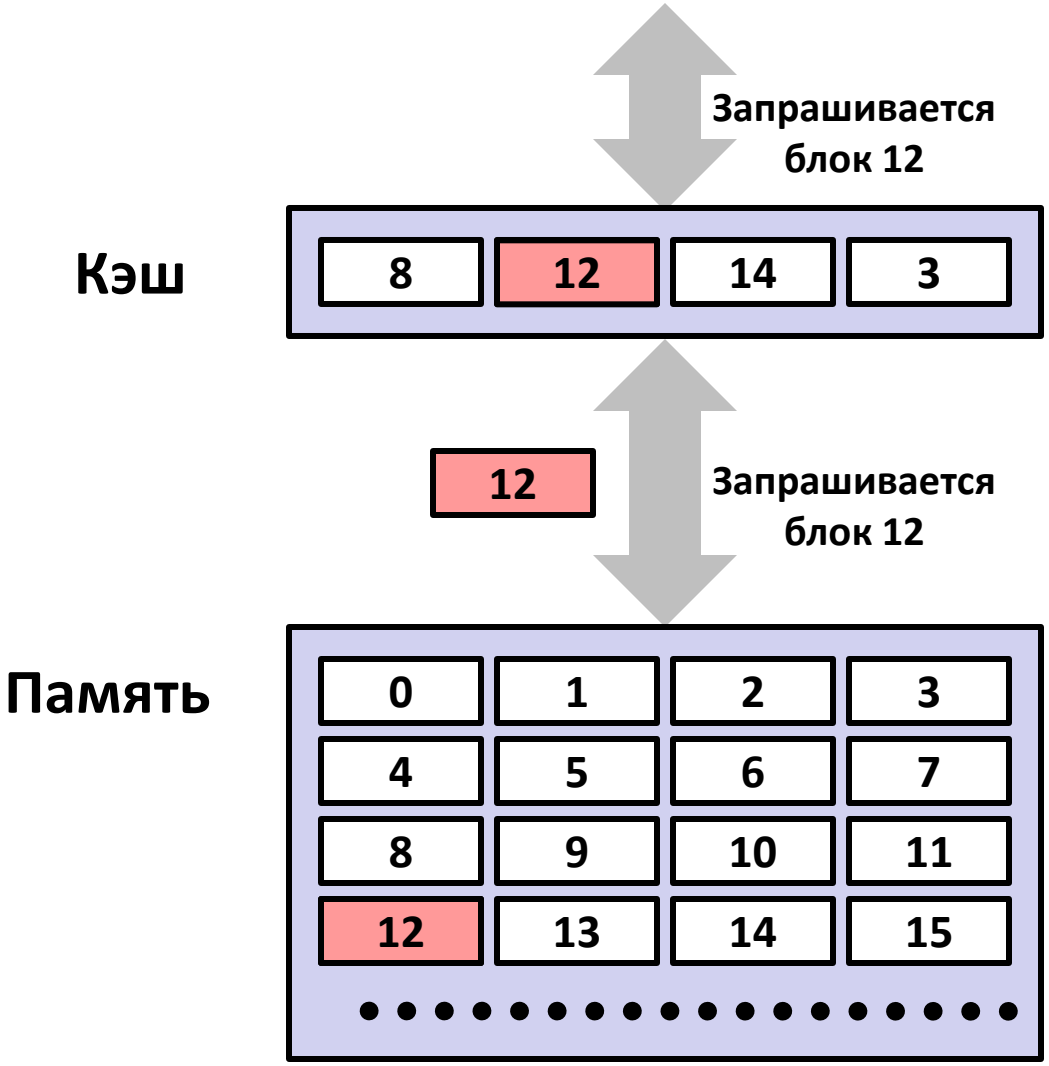


Запрашиваются данные из блока b

Блок b находится в кэше:

Попадание!

Промахи



Запрашиваются данные из блока b

Блока b нет в кэше: Промах!

Блок b извлекается из памяти

Блок b размещается в кэше

- Правила размещения определяют где будет находится блок b
- Правила замещения определяют какой блок будет исключен из кэша

Различные типы промахов

- Холодные (вынужденные) промахи
  - Причина – пустой кэш.
- Промахи из-за конфликтов
  - Количество мест размещения ограничено (может быть единственным)
    - Пример: блок i уровня k+1 размещается в блоке (i mod 4) на уровне k.
  - Промахи из-за конфликтов возникают когда несколько блоков размещаются на одном и том же месте.
    - Пример: запрос блоков 0, 8, 0, 8, 0, 8, ... Будет постоянно вызывать промахи.
- Промахи из-за нехватки емкости
  - Причина – используемых блоков (рабочее множество) больше, чем кэш может в себе вместить.

Примеры кэшей

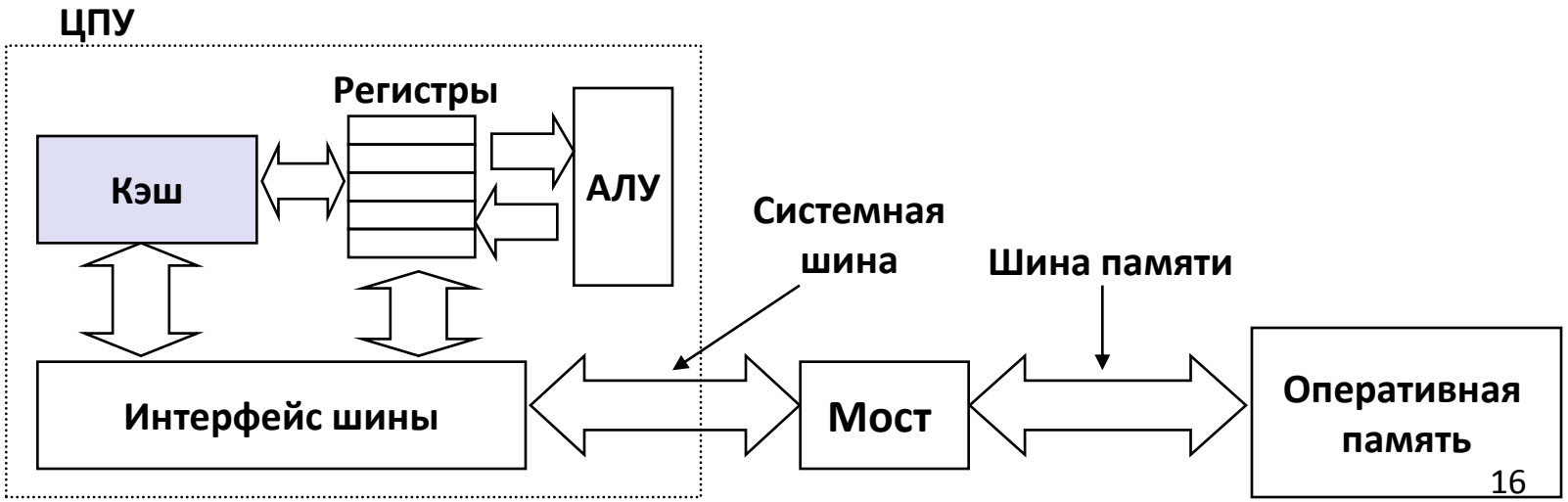
Тип кэша	Что кэшируется?	Где кэшировано?	Задержка (такты)	Управление
Регистры	Слова по 4-8 байт	Ядро ЦПУ	0	Компилятор
L1 кэш	Блок 64 байта	На кристалле, L1	1	Аппаратура
L2 кэш	Блок 64 байта	На/вне кристалла, L2	10	Аппаратура
Буфер ввода/вывода	Части файлов	Оперативная память	100	ОС
Кэш диска	Сектора диска	Контроллер диска	100,000	Прошивка диска
Сетевой кэш	Части файлов	Локальный диск	10,000,000	AFS/NFS клиент
Кэш браузера	Веб-страницы	Локальный диск	10,000,000	Веб браузер
Веб-кэш	Веб-страницы	Диск на удаленном сервере	1,000,000,000	Веб-прокси сервер

Иерархическая память: промежуточные итоги

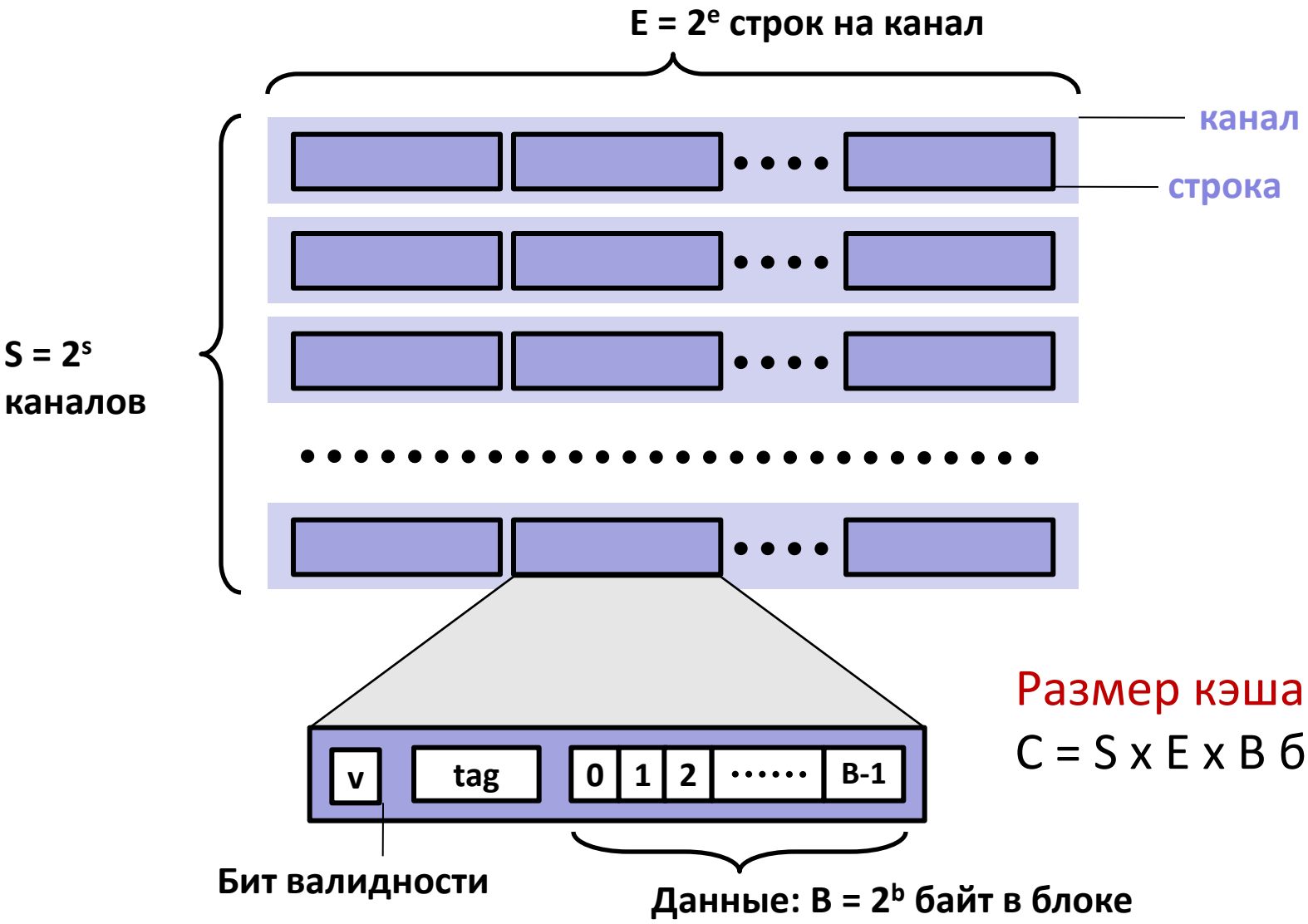
- Разрыв в скорости работы между ЦПУ и оперативной памятью продолжает увеличиваться.
- Хорошо написанные программы имеют хорошую локальность.
- Иерархическая организация памяти, основанная на кэшировании, позволяет эффективно бороться с разрывом в скорости с помощью локальности.

Кэш памяти

- Кэш оперативной памяти – небольшая, быстрая память (SRAM). Управление кэшем аппаратное.
  - Хранит в себе часто используемые блоки оперативной памяти
- ЦПУ сперва ищет требуемые данные в кэше (L1, L2 и L3), и только потом в оперативной памяти.



Организация кэша (S, E, B)

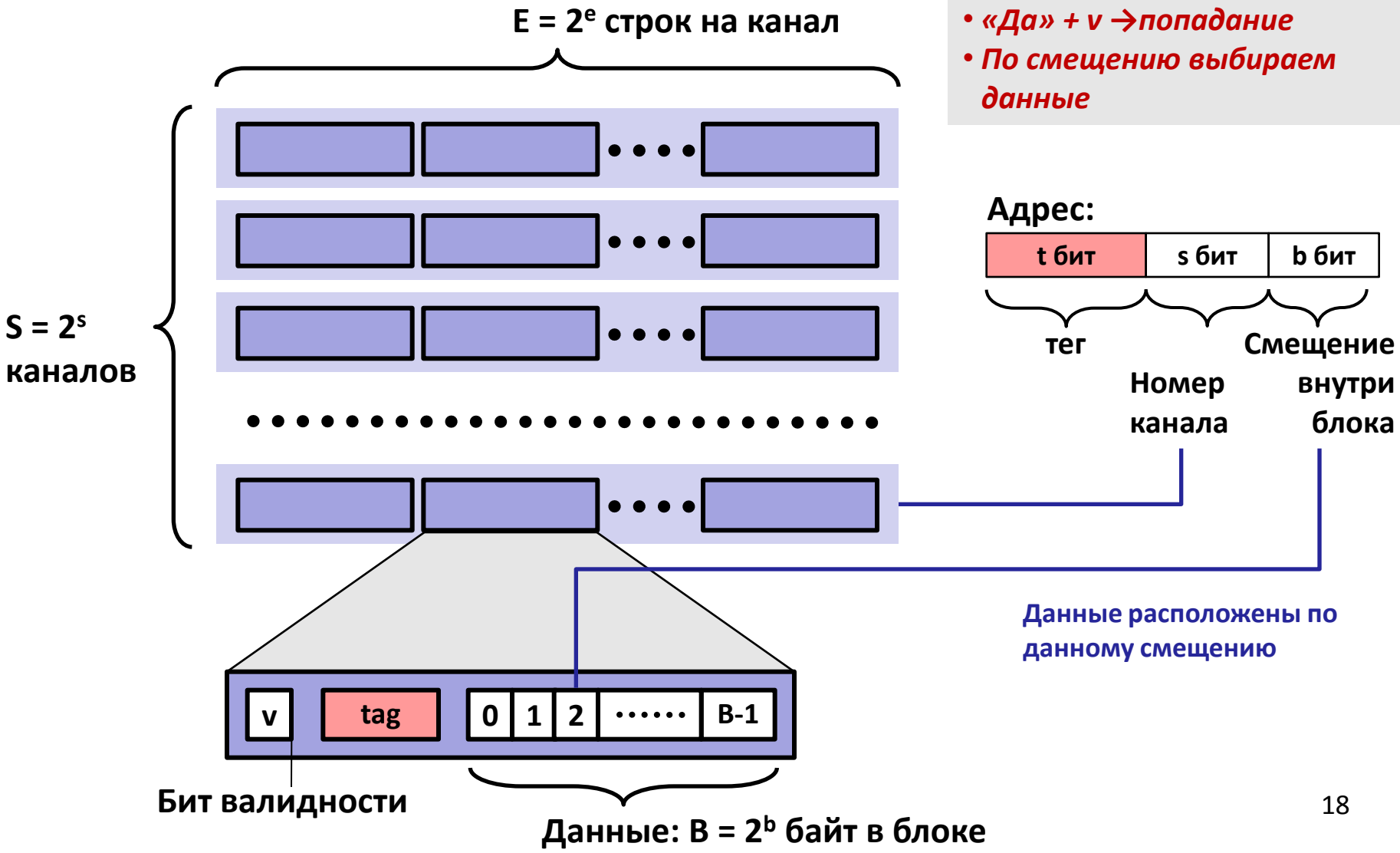


Размер кэша:

C = S x E x B байт

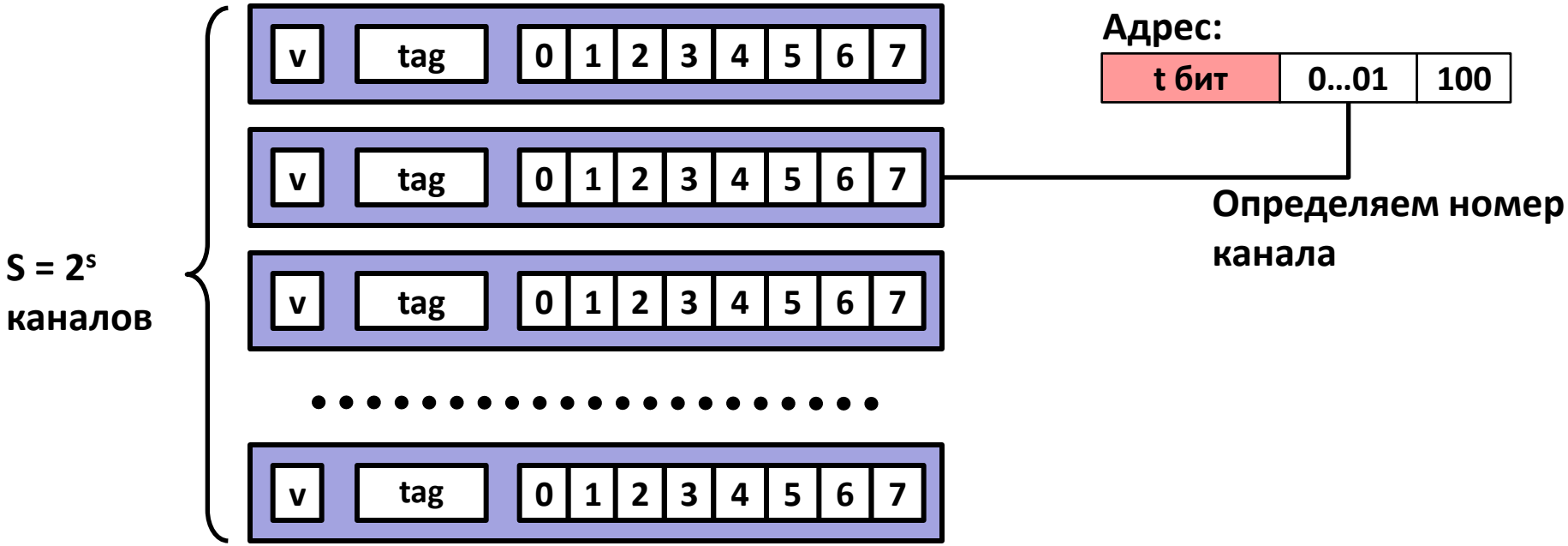
Чтение данных из кэша

- *Определяем канал*
- *Проверяем на совпадение тега по всем строкам*
- *«Да» + v →попадание*
- *По смещению выбираем данные*



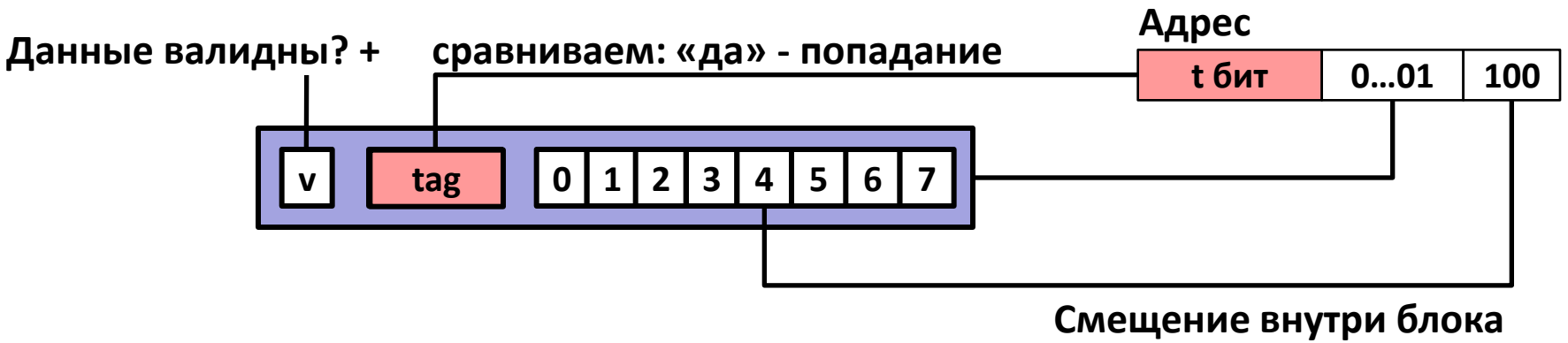
Пример: Кэш прямого отображения (E = 1)

Прямое отображение: одна строка на канал
Для данного примера: размер блока 8 байт



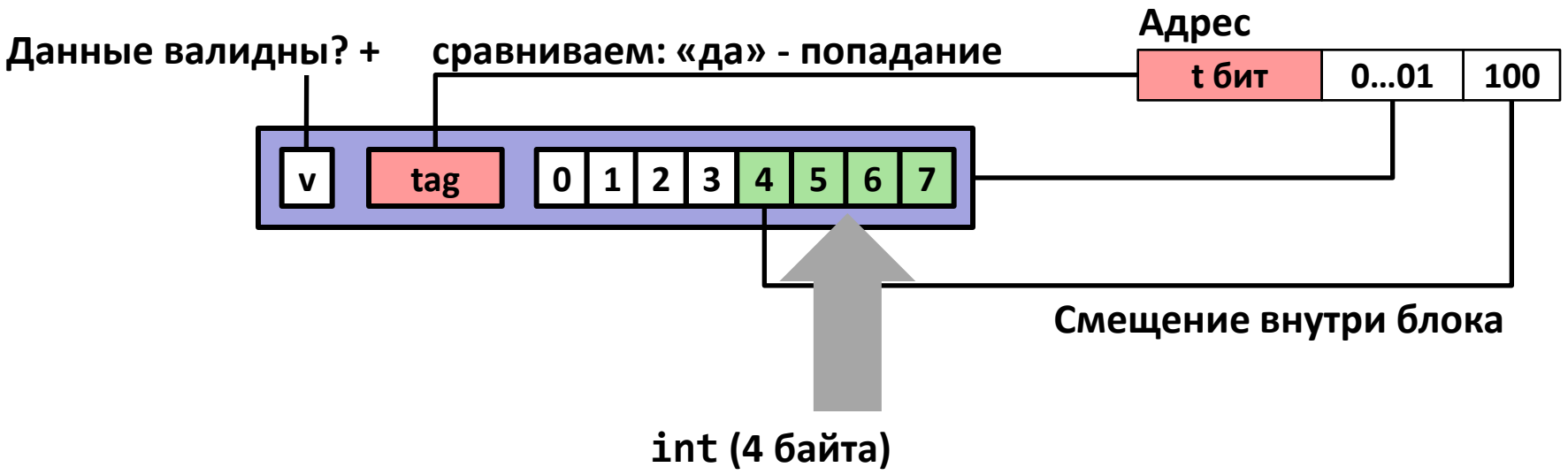
Пример: Кэш прямого отображения (E = 1)

Прямое отображение: одна строка на канал
Для данного примера: размер блока 8 байт



Пример: Кэш прямого отображения (E = 1)

Прямое отображение: одна строка на канал
Для данного примера: размер блока 8 байт



Тег не совпал: строка вытесняется из кэша

Моделируем кэш прямого отображения

t=1	s=2	b=1
x	xx	x

M=16 адресуемых байтов, B=2 байта в блоке,
S=4 канала, E=1 блок в канале

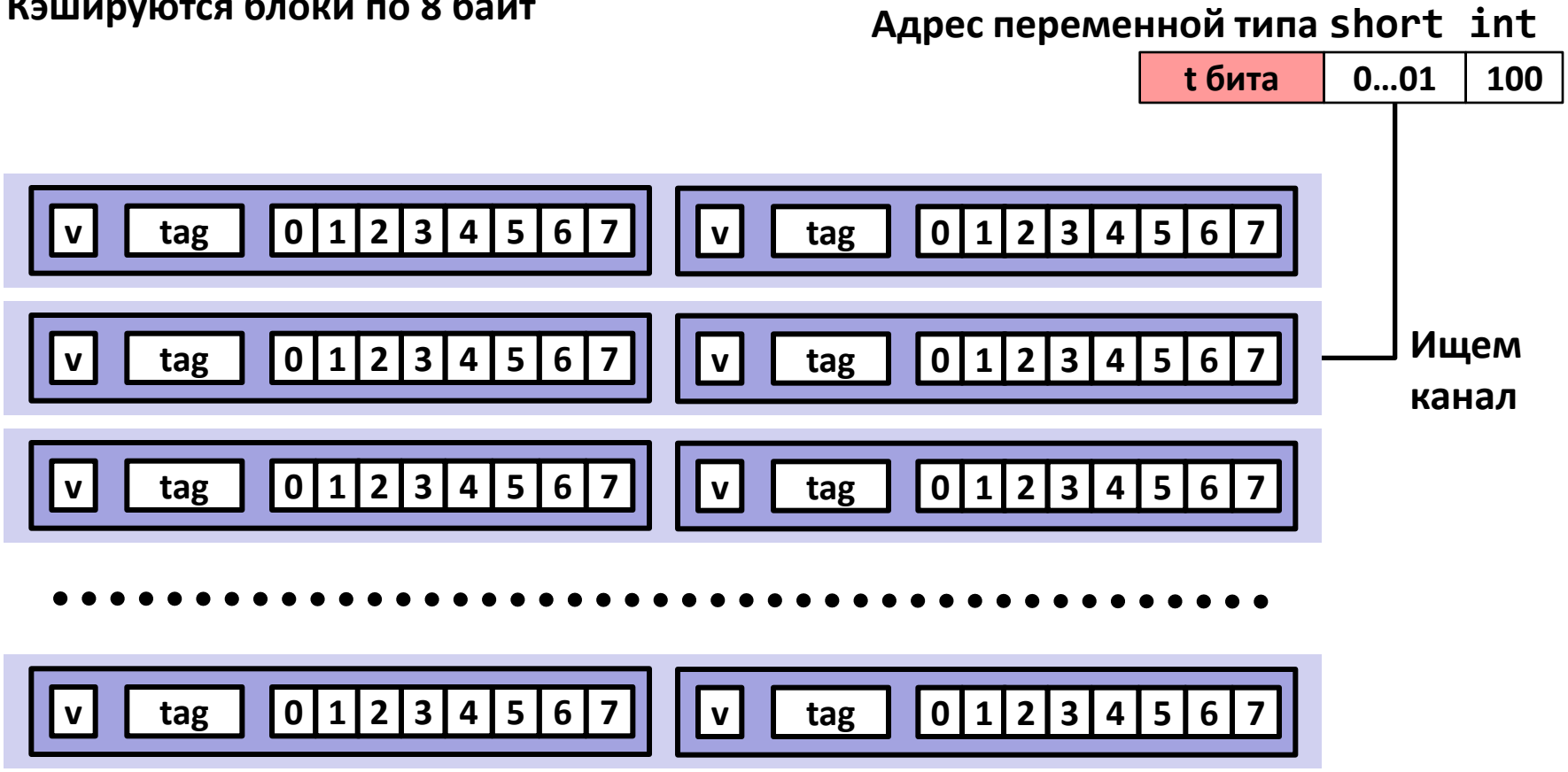
Последовательность (трасса)
запрашиваемых адресов (чтение одного байта):

0	**[0$\underline{00}$0$_2$],**	промах
1	**[0$\underline{00}$1$_2$],**	попадание
7	**[0$\underline{11}$1$_2$],**	промах
8	**[1$\underline{00}$0$_2$],**	промах
0	**[0$\underline{00}$0$_2$]**	промах

	v	Тег	Блок
Канал 0	1	0	M[0-1]
Канал 1			
Канал 2			
Канал 3	1	0	M[6-7]

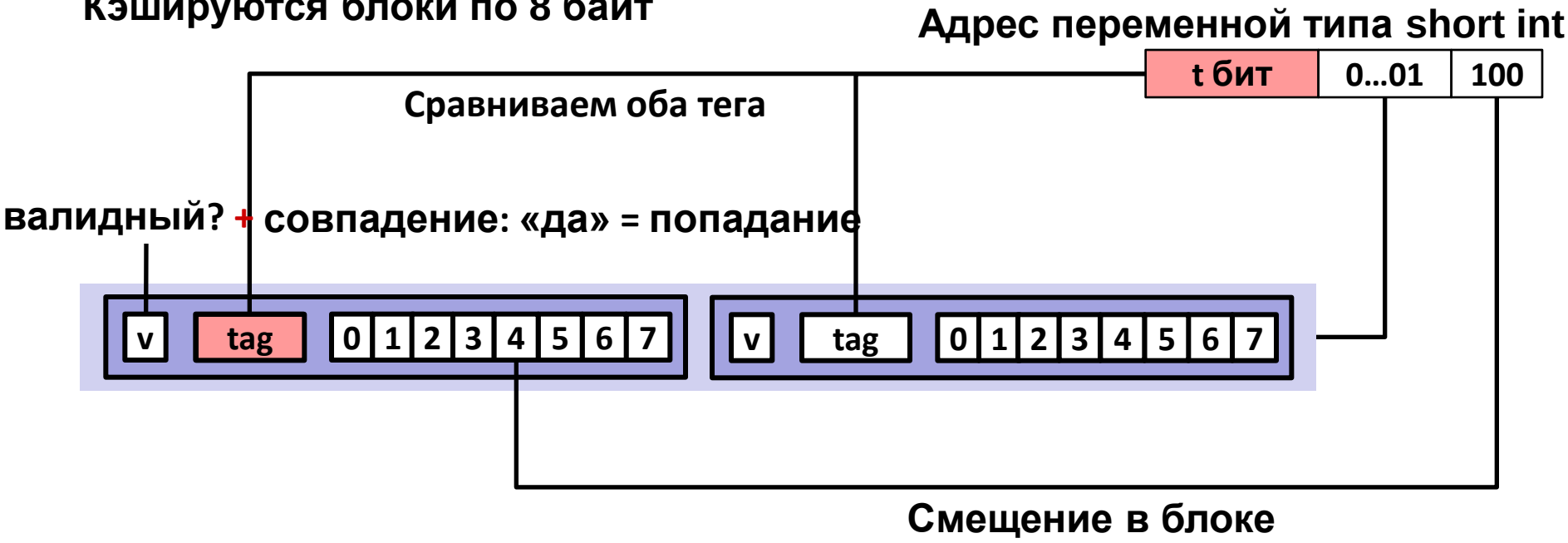
N-канальный ассоциативный кэш (N = 2)

N = 2: Две строки на канал
Кэшируются блоки по 8 байт



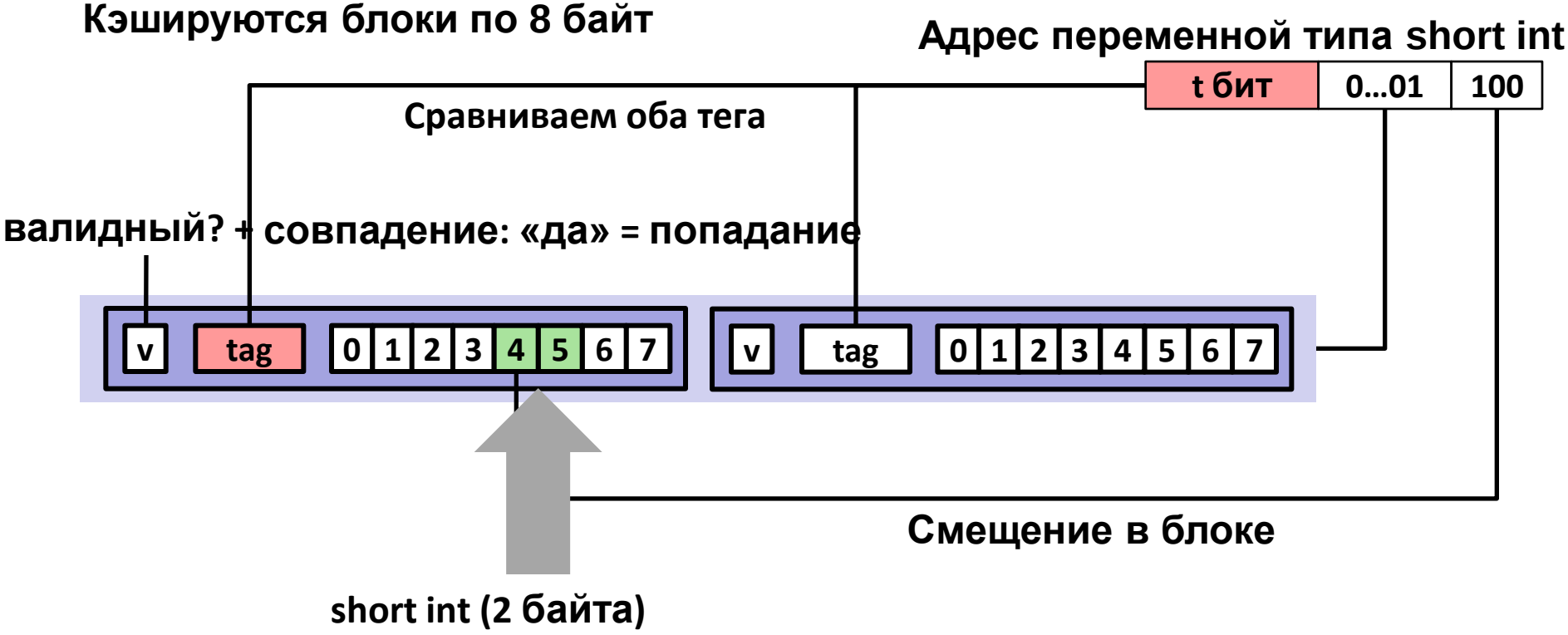
N-канальный ассоциативный кэш (N = 2)

N = 2: Две строки на канал
Кэшируются блоки по 8 байт



N-канальный ассоциативный кэш (N = 2)

N = 2: Две строки на канал
Кэшируются блоки по 8 байт



Совпадений нет:

- **Одна из строк будет вытеснена из кэша**
- **Стратегии замещения: произвольная, самая старая (LRU), …**

Моделируем 2-канальный ассоциативный кэш

t=2	s=1	b=1
xx	x	x

M=16 адресуемых байт, B=2 байта в блоке,
S=2 канала, E=2 блока в канале

Последовательность (трасса)
запрашиваемых адресов (чтение одного байта):

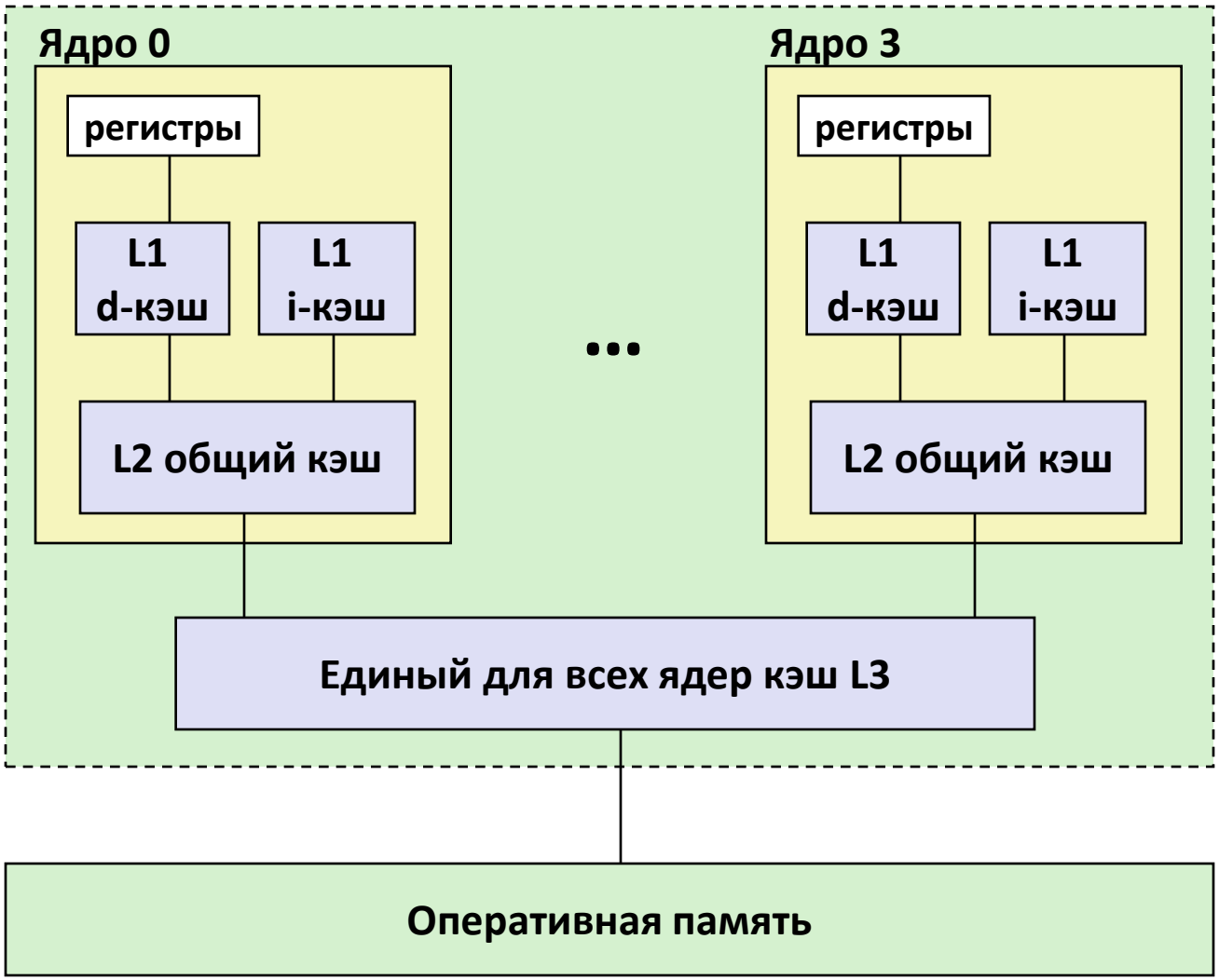
0	**[00$\underline{0}$0$_2$],**	промах
1	**[00$\underline{0}$1$_2$],**	попадание
7	**[01$\underline{1}$1$_2$],**	промах
8	**[10$\underline{0}$0$_2$],**	промах
0	**[00$\underline{0}$0$_2$]**	попадание

	v	Тег	Блок
Канал 0	1	00	M[0-1]
	1	10	M[8-9]
Канал 1	1	01	M[6-7]
	0		

Запись данных в память

- Несколько копий данных:
  - L1, L2, оперативная память, диск
- Как поступать при попадании?
  - Сквозная запись (пишем в память незамедлительно)
  - Отложенная запись (откладываем до момента вытеснения строки)
    - Требуется дополнительный бит-признак, что данные отличаются
- Как поступать при промахе?
  - Запись с размещением в кэше
    - Эффективно когда выполняется несколько записей в последовательные адреса
  - Запись без размещения в кэше
- Типичные комбинации политик управления кэшем
  - Сквозная запись + Запись без размещения
  - **Отложенная запись** + Запись с размещением

Иерархия кэшей в Intel Core i7



L1 i-кэш и d-кэш:
32 KB, 8-канальный,
Время доступа:
4 такта

L2 общий кэш:
256 KB, 8-канальный,
Время доступа:
11 тактов

L3 общий кэш:
8 MB, 16-канальный,
Время доступа:
30-40 тактов

Размер блока:
64 байта у всех кэшей.

Метрики производительности кэша

- Коэффициент промахов
  - Отношение количества промахов к общему числу обращений (промахи / обращения) = 1 – коэффициент попаданий
  - Характерные показатели (в процентах):
    - 3-10% для L1
    - Может быть достаточно малым (< 1%) для L2, зависит от размера и т.д.
- Время попадания
  - Длительность извлечения данных из кэша
    - Включает время определения того, есть ли требуемые данные в кэше
  - Характерные показатели:
    - 1-2 тактов для L1
    - 5-20 тактов для L2
- Накладные расходы при промахе
  - Дополнительное время из-за промаха
    - Обычно 50-200 тактов для обращения к памяти

Что означают перечисленные показатели?

- Гигантская разница по времени промахов и попаданий
  - Два порядка, для L1 и оперативной памяти

- Пример: 99% попаданий вдвое более эффективно чем 97%
  - Характеристики:
    время попадания 1 такт
    накладные расходы при промахе 100 тактов

  - Среднее время доступа к элементу кэша:
  - 97% попаданий: 1 такт + 0.03 * 100 тактов = 4 такта
  - 99% попаданий: 1 такт + 0.01 * 100 тактов = 2 такта

- Поэтому “коэффициент неудач” используется вместо “коэффициента попаданий”

Дружественный к кэшу код

- В первую очередь улучшать часто работающий код
  - Тела вложенных циклов, часто вызывающиеся функции
- Минимизировать промахи при обращении к кэшу в теле вложенного цикла
  - Повторяющеюся обращения к одним и тем же переменным (временная локальность)
  - Проход по массиву с шагом 1 (пространственная локальность)

Оценка производительности

- Численная характеристика относительной производительности
  - Всего компьютера в целом
  - Отдельных компонент
  - Генерируемого компилятором кода
- Классификация
  - Синтетические / основанные на реальных приложениях
  - Микробенчмарк
- Индустриальные бенчмарки
  - SPEC
  - LINPACK
    - Решает систему линейных алгебраических уравнений Ax = b

Измерение времени

- В Pentium появился регистр 64-разрядный регистр TSC, подсчитывающий количество выполнившихся тактов
- Инструкция `rdtsc` считывает значение регистра TSC и заносит его в `EDX:EAX`
- `rdtsc` может быть недоступна пользователям на некоторых системах

```
section .rodata
 format db ‘0x%08X 0x%08X’, 10, 0

section .text
global CMAIN
CMAIN:
   ...
   rdtsc
   mov     dword [esp + 8], eax
   mov     dword [esp + 4], edx
   mov     dword [esp], format
   call    printf
   ...
```