Лекция 0xA

16 марта

Матрица N X N

- Фиксированные размерности
  - Значение N известно во время компиляции

- Динамически задаваемая размерность. Требуется явное преобразование индексов
  - Традиционный способ реализации динамических массивов

- Динамически задаваемая размерность с неявной индексацией.
  - Поддерживается последними версиями gcc

```
#define N 16
typedef int fix_matrix[N][N];
/* Get element a[i][j] */
int fix_ele
  (fix_matrix a, int i, int j)
{
  return a[i][j];
}
```

```
#define IDX(n, i, j) ((i)*(n)+(j))
/* Get element a[i][j] */
int vec_ele
 (int n, int *a, int i, int j)
{
  return a[IDX(n,i,j)];
}
```

```
/* Get element a[i][j] */
int var_ele
 (int n, int a[n][n], int i, int j) {
  return a[i][j];
}
```

Матрица 16 X 16

- **Доступ к элементу матрицы**
  - Адрес **A** + *i* * (*C* * *K*) + *j* * *K*
  - C = 16, K = 4

```
/* Получение элемента a[i][j] */
int fix_ele(fix_matrix a, int i, int j) {
  return a[i][j];
}
```

```
  mov    edx, dword [ebp + 12]      ; i
  sal    edx, 6                     ; i*64
  mov    eax, dword [ebp + 16]      ; j
  sal    eax, 2                     ; j*4
  add    eax, dword [ebp + 8]       ; a + j*4
  mov    eax, dword [eax + edx]     ; *(a + j*4 + i*64)
```

Матрица n X n

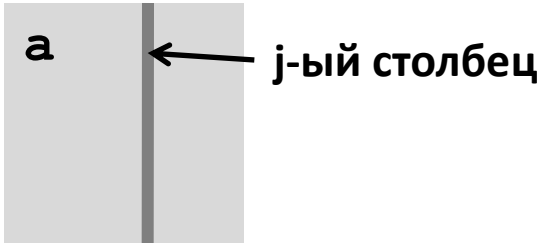
- **Доступ к элементу матрицы**
  - Адрес **A** + *i* * (*C* * *K*) + *j* * *K*
  - C = n, K = 4

```
sizeof(a) = ?
sizeof(a[i]) = ?
```

```
/* Получение элемента  a[i][j] */
int var_ele(int n, int a[n][n], int i, int j) {
  return a[i][j];
}
```

```
   mov    edx, dword [ebp + 8]      ; n
   sal    edx, 2                    ; n*4
   imul   edx, dword [ebp + 16]     ; i*n*4
   mov    eax, dword [ebp + 20]     ; j
   sal    eax, 2                    ; j*4
   add    eax, dword [ebp + 12]     ; a + j*4
   mov    eax, dword [eax + edx]    ; *(a + j*4 + i*n*4)
```

Оптимизация доступа к элементам массива




```
#define N 16
typedef int fix_matrix[N][N];
```

- Вычисления
  - Проход по всем элементам в столбце j
- Оптимизация
  - Выборка последовательных элементов из отдельного столбца

```
/* Выборка столбца j из массива */
void fix_column
  (fix_matrix a, int j, int *dest)
{
  int i;
  for (i = 0; i < N; i++)
    dest[i] = a[i][j];
}
```

Оптимизация доступа к элементам массива

- Оптимизация
  - Вычисляем `ajp = &a[i][j]`
    - Начальное значение `a + 4*j`
    - Шаг `4*N`

Регистр	Значение
ecx	ajp
ebx	dest
edx	i

```
/* Выборка столбца j из массива */
void fix_column
  (fix_matrix a, int j, int *dest)
{
  int i;
  for (i = 0; i < N; i++)
    dest[i] = a[i][j];
}
```

```
.L8:                                    ; loop:
   mov    eax, dword [ecx]              ; считываем *ajp
   mov    dword [ebx + 4 * edx], eax    ; сохраняем в dest[i]
   add    edx, 1                        ; i++
   add    ecx, 64                       ; ajp += 4*N
   cmp    edx, 16                       ; i vs. N
   jne    .L8                           ; if !=, goto loop
```

Оптимизация доступа к элементам массива

- Вычисляем `ajp = &a[i][j]`
  - Начальное значение `a + 4*j`
  - Шаг `4*n`

Регистр	Значение
ecx	ajp
edi	dest
edx	i
ebx	4*n
esi	n

```
/* Выборка столбца j из массива */
void var_column
  (int n, int a[n][n],
   int j, int *dest)
{
  int i;
  for (i = 0; i < n; i++)
    dest[i] = a[i][j];
}
```

```
.L18:                                   ; loop:
   mov    eax, dword [ecx]              ; считываем *ajp
   mov    dword [edi + 4 * edx], eax    ; сохраняем в dest[i]
   add    edx, 1                        ; i++
   add    ecx, ebx                      ; ajp += 4*n
   cmp    esi, edx                      ; n vs. i
   jg     .L18                          ; if (>) goto loop
```

Оптимизация доступа к элементам массива

- Изменение направления прохода по циклу
  - Выход из цикла по нулевому счетчику
  - Шаг отрицательный
  - Меняются начальные значения указателей
  - Достаточно вывести к нулю один из индексов

```
/* Выборка столбца j из массива */
void var_column
  (int n, int a[n][n],
   int j, int *dest) {

  int i;
  for (i = n-1; i >=0; i--) {
    dest[i] = a[i][j];
  }
}
```

```
.L18:                                   ; loop:
   mov    eax, dword [ecx]              ; считываем *ajp
   mov    dword [edi + 4 * edx], eax    ; сохраняем в dest[i]
   add    edx, 1                        ; i++
   add    ecx, ebx                      ; ajp += 4*n
   cmp    esi, edx                      ; n vs. i
   jg     .L18                          ; if (>) goto loop
```

Оптимизация доступа к элементам массива

Регистр	Начальное значение
ecx	a+4*n*(n-1)+4*j
edi	dest – 4
edx	n
ebx	4*n
esi	освободился

```
/* Выборка столбца j из массива */
void var_column
  (int n, int a[n][n],
   int j, int *dest) {

  int i;
  dest--;
  for (i = n; i != 0; i--)
    dest[i] = a[i-1][j];
}
```

```
.L18:                                   ; loop:
   mov    eax, dword [ecx]              ; считываем *(ajp+…)
   mov    dword [edi + 4 * edx], eax    ; сохраняем в dest[i]
   sub    ecx, ebx                      ; ajp -= 4*n
   sub    edx, 1                        ; i--
   jnz    .L18                          ; if (!=) goto loop
```

Обратная задача

M = ?, N = ?

```
; пролог функции пропущен
mov  ecx, dword [ebp + 8]       ; 1
mov  edx, dword [ebp + 12]      ; 2
lea  eax, [8 * ecx]             ; 3
sub  eax, ecx                   ; 4
add  eax, edx                   ; 5
lea  edx, [edx + 4 * edx]       ; 6
add  edx, ecx                   ; 7
mov  eax, dword [m1 + 4 * eax] ; 8
add  eax, dword [m2 + 4 * edx] ; 9
; эпилог функции пропущен
```

```
int m1[M][N];
int m2[N][M];

int sum_element(int i, int j) {
   return m1[i][j] + m2[j][i];
}
```

Типы данных языка Си
Далее

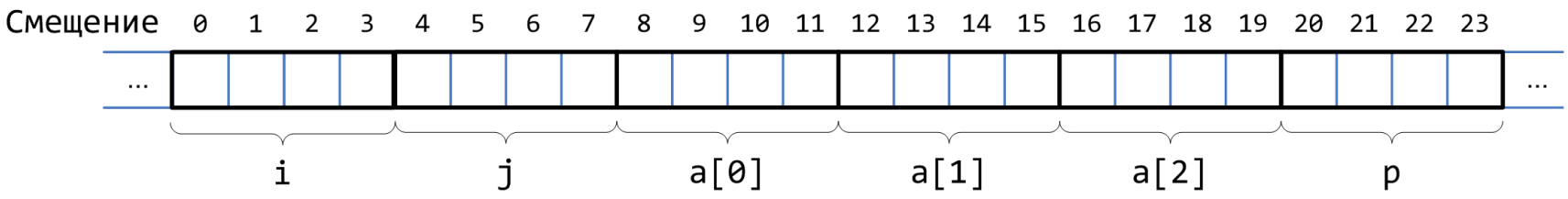
- `char`
- Стандартные знаковые целочисленные типы
  - `signed char`
  - `short int`
  - `int`
  - `long int`
  - `long long int`
- Стандартные беззнаковые целочисленные типы
  - `_Bool`
- Перечисление
- Типы чисел с плавающей точкой
  - `float`
  - `double`
  - `long double`
  - `_Complex`
- Производные типы
  - Массивы
  - **Структуры**
  - **Объединения**
  - Указатели
  - Указатели на функции

Структуры

```
struct rec {
   int i;
   int j;
   int a[3];
   struct rec *p;
}
```

- Непрерывный блок памяти
- Обращение к полям структуры осуществляется по их именам
- Поля могут быть разных типов

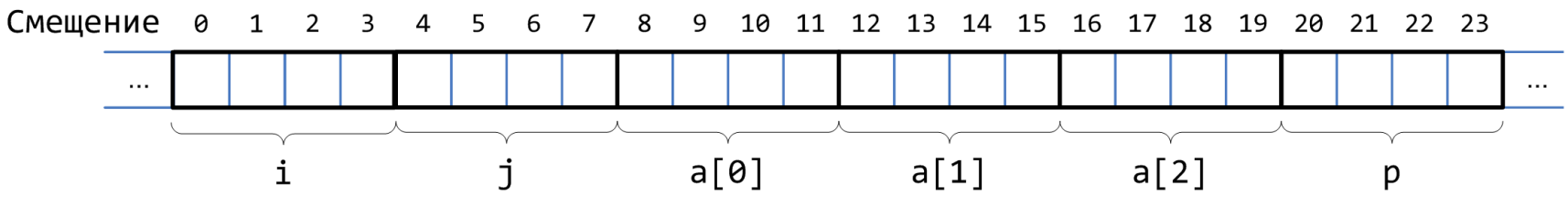
Расположение в памяти



Доступ к полям

```
struct rec {
    int i;
    int j;
    int a[3];
    struct rec *p;
}
```

- `struct rec *x` – указатель на первый байт структуры
- Каждое поле расположено на определенном смещении от начала структуры




```
static struct rec *x;
...
x->j = x->i;
```

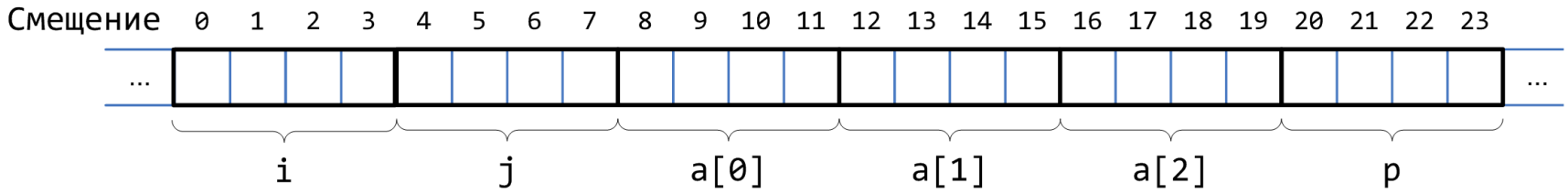
```
mov edx, dword [x]          ; (1)
mov eax, dword [edx]        ; (2)
mov dword [edx + 4], eax    ; (3)
```

Указатель на поле структуры

```
struct rec {
    int i;
    int j;
    int a[3];
    struct rec *p;
}
```

- Смещение каждого поля известно во время компиляции

```
static struct rec *x;
static int i;
...
&(x->a[i]);
```



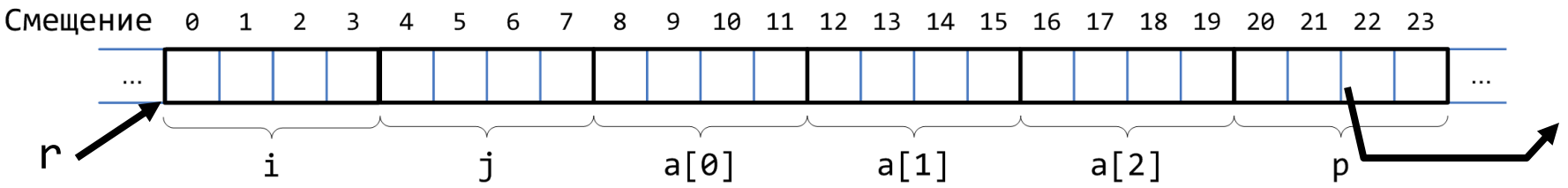

```
mov edx, dword [i]              ; (1)
mov eax, dword [x]              ; (2)
lea eax, [eax + 4 * edx + 8] ; (3)
```

- Проход по связанному списку

```
void set_val (struct rec *r, int val) {
  while (r) {
    int i = r->i;
    r->a[i] = val;
    r = r->p;
  }
}
```

```
struct rec {
    int i;
    int j;
    int a[3];
    struct rec *p;
}
```

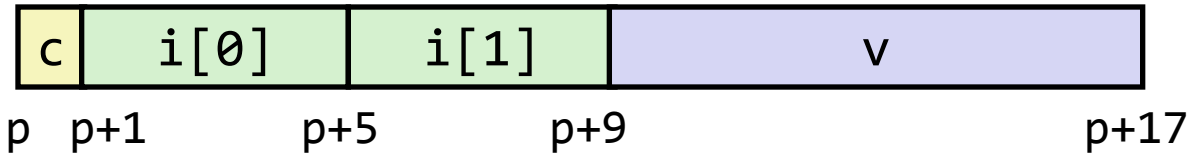
Регистр	Переменная
edx	r
ecx	val




```
.L17: ; цикл
   mov  eax, [edx]                  ; r->i
   mov  [edx + 4 * eax + 8], ecx    ; r->a[i] = val
   mov  edx, [edx + 20]             ; r = r->p
   test edx, edx                    ; r?
   jne  .L17                        ; If != 0 goto .L17
```

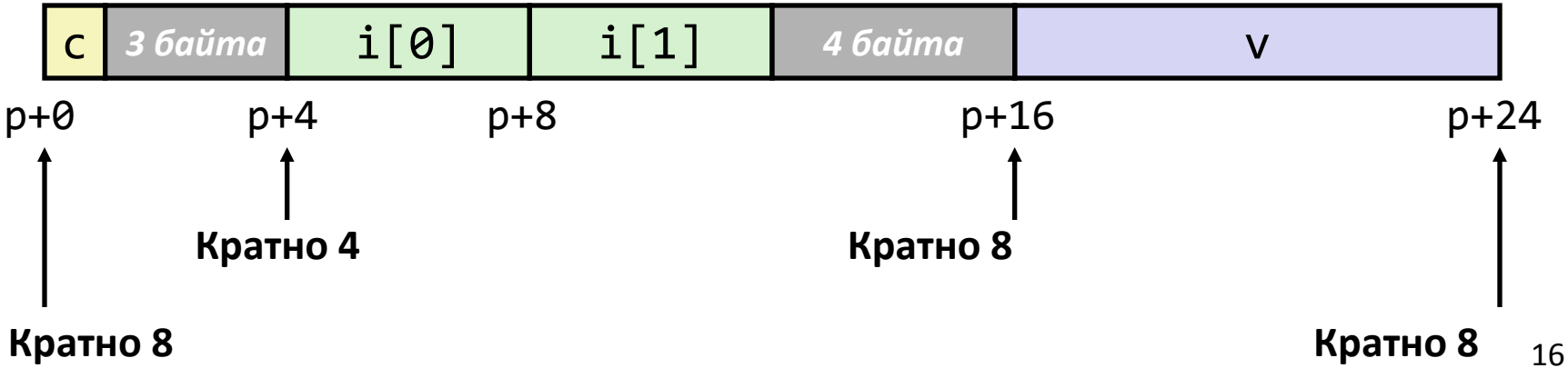
Выравнивание полей в структурах

- Невыровненные данные




```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```

- Выровненные данные
  - Если примитивный тип данных требует ***K*** байт
  - Адрес должен быть кратен ***K***



Почему выравнивают данные

- Выровненные данные
  - Размер примитивного типа данных ***K*** байт
  - Адрес должен быть кратен ***K***
  - Для некоторых архитектур это требование обязательно должно выполняться
  - Для IA-32 требование к выравниванию имеет рекомендательный характер
    - Требования различаются для IA-32/x86-64, Linux/Windows
- Причины
  - Доступ к физической памяти осуществляется блоками (выровненными) по 4 или 8 байт (зависит от аппаратуры)
    - Эффективность теряется при обращении к данным, расположенным в двух блоках
    - Виртуальная память…
- Компилятор
  - Расставляет пропуски между полями для сохранения выравнивания

Правила выравнивания (IA-32)

- 1 байт : char, …
  - Ограничений нет
- 2 байта : short, …
  - Младший бит адреса должен быть 0_2
- 4 байта : int, long, float, char *, …
  - Два младших бита адреса должны быть 00_2
- 8 байт : double, …
  - Windows (и другие …):
    - Младшие три бита адреса должны быть 000_2
  - Linux:
    - Два младших бита адреса должны быть 00_2
    - Т.е. рассматриваются как и 4-байтные примитивные типы данных
- 12 байт : long double (gcc)
  - Windows, Linux:
    - Два младших бита должны быть 00_2
    - Т.е. рассматриваются как и 4-байтные примитивные типы данных

Правила выравнивания (x86-64)

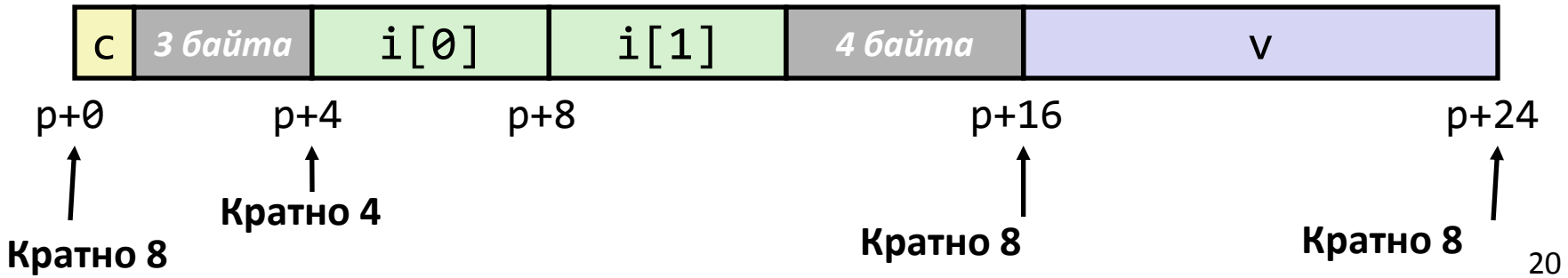
- 1 байт : char, …
  - Ограничений нет
- 2 байта : short, …
  - Младший бит адреса должен быть 0_2
- 4 байта : int, float, …
  - Два младших бита адреса должны быть 00_2
- 8 байт: double, long, char *, …
  - Windows & Linux:
    - Младшие три бита адреса должны быть 000_2
- 16 байт: long double
  - Linux:
    - Младшие три бита адреса должны быть 000_2
    - Т.е. рассматриваются как и 8-байтные примитивные типы данных

Тип long double в компиляторе MS VC
- 16-разрядная архитектура
  - sizeof(long double) = 10 // 80 бит
- 32-разрядная архитектура и далее …
  - long double ≡ double

Выполнение правил выравнивания для полей

```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```

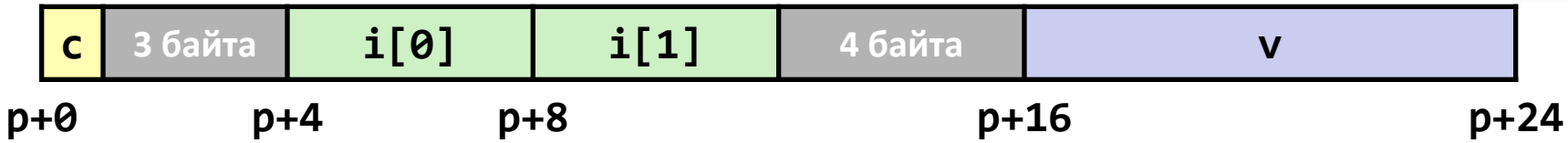
- Внутри структуры
  - Выравнивание должно выполняться для каждого поля
- Размещение всей структуры
  - Для каждой структуры определятся требование по выравниванию в **K** байт
    - **K** = Наибольшее выравнивание среди всех полей
  - Начальный адрес структуры и ее длина должны быть кратны **K**
- Пример (для Windows или x86-64):
  - K = 8, из-за присутствия поля типа double



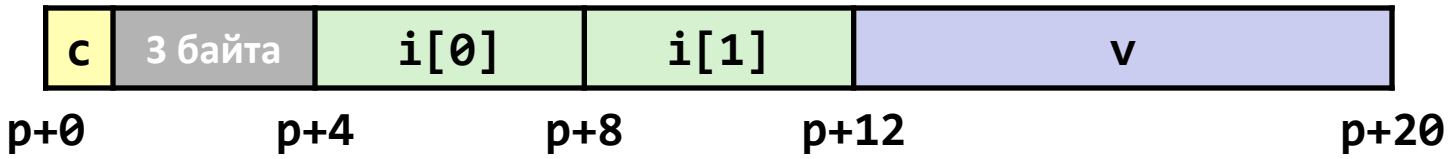
Различные соглашения о выравнивании

- x86-64 или IA-32 Windows:
  - K = 8, из-за наличия поля типа **`double`**

```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```



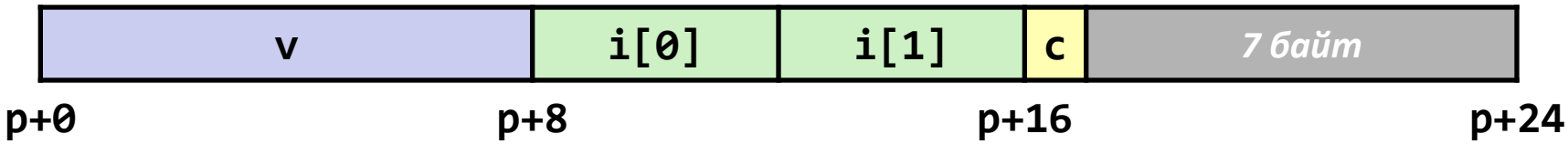
- IA-32 Linux
  - K = 4; `double` рассматривается аналогично 4-байтным типам данных



Выравнивание всей структуры

```
struct S2 {
  double v;
  int i[2];
  char c;
} *p;
```

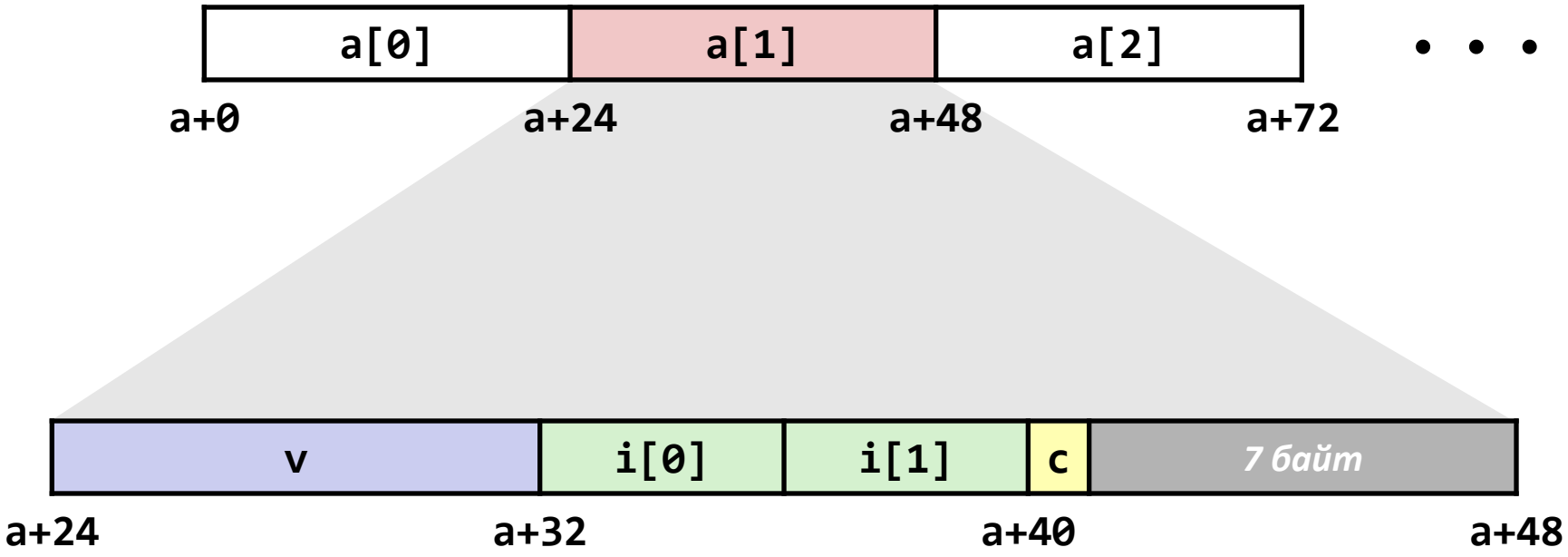
- Определяется требование к выравниванию в K байт
- Общий размер структуры должен быть кратен K



Массивы структур

- Размер всей структуры кратен K
- Для каждого элемента массива производится выравнивание

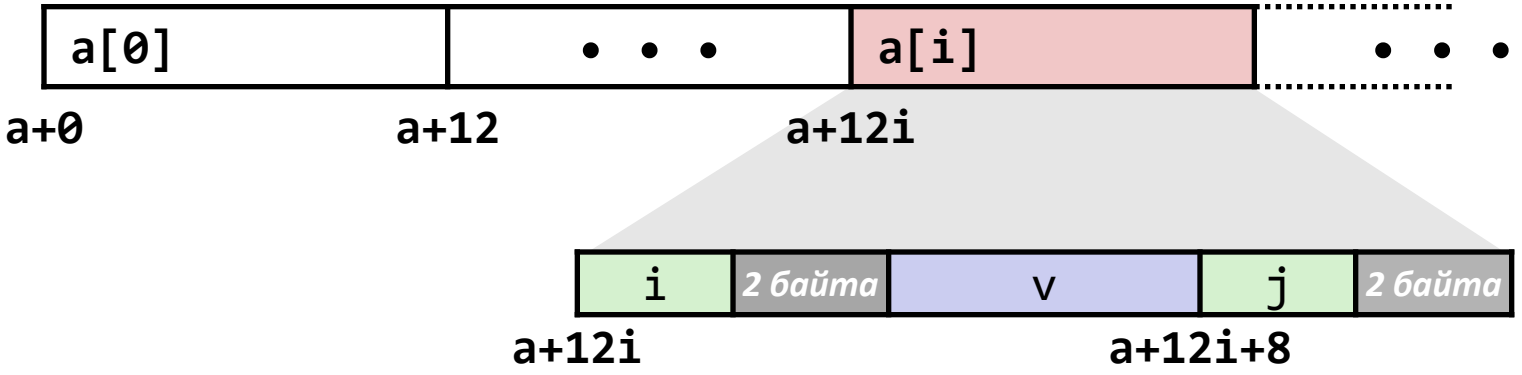
```
struct S2 {
  double v;
  int i[2];
  char c;
} a[10];
```



Доступ к элементам массива

- Вычисляем смещение в массиве
  - Вычисляем sizeof(S3), учитывая пропуски
- Вычисляем смещение внутри структуры
  - Поле j расположено со смещением 8 внутри структуры

```
struct S3 {
  short i;
  float v;
  short j;
} a[10];
```




```
short get_j(int idx) {
  return a[idx].j;
}
```

```
; eax = idx
  lea eax, [eax + 2 * eax] ; 3*idx
  movsx eax, word [a + 4 * eax + 8]
```

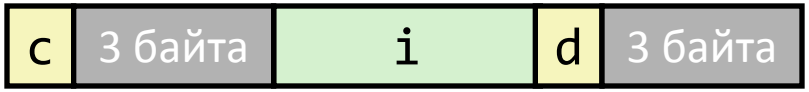
Как сохранить место

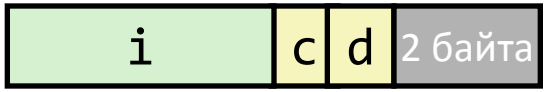
- Размещаем большие типы первыми

```
struct S4 {
  char c;
  int i;
  char d;
} *p;
```

```
struct S5 {
  int i;
  char c;
  char d;
} *p;
```

- Результат (K=4)

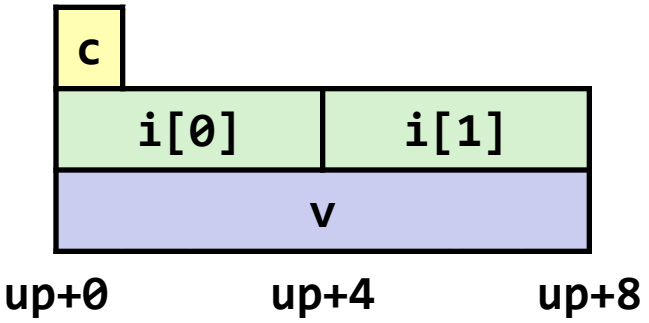




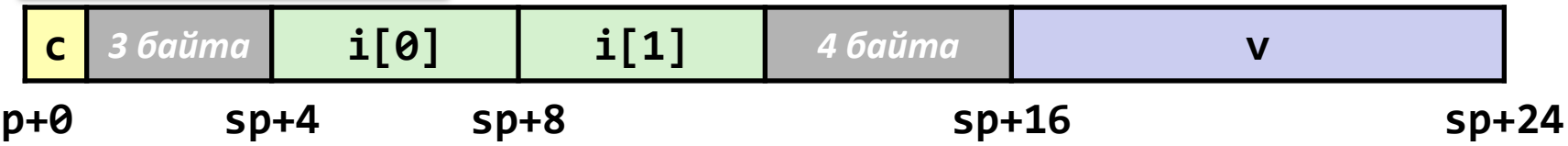
Размещение объединений

- Память выделяется исходя из размеров максимального элемента
- Используется только одно поле

```
union U1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *up;
```




```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *sp;
```



Пример: двоичное дерево

```
struct NODE_S {
   struct NODE_S *left;
   struct NODE_S *right;
   double data;
};
```

В чем ошибка ?

```
union NODE_U {
   struct {
      union NODE_U *left;
      union NODE_S *right;
   } internal;
   double data;
};
```

Пример: двоичное дерево

```
typedef enum {N_LEAF, N_INTERNAL} nodetype_t;


struct NODE_T {
   nodetype_t type;
   union NODE_U {
      struct {
         struct NODE_T *left;
         struct NODE_T *right;
      } internal;
      double data;
   } info;
};
```

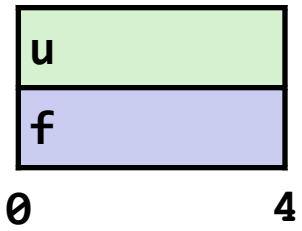
`sizeof(`**`struct NODE_T`**`) ?`

Какие смещения у полей?

`IA-32 Linux / IA-32 Windows`

Использование объединений для доступа к отдельным битам

```
typedef union {
  float f;
  unsigned u;
} bit_float_t;
```




```
float bit2float(unsigned u) {
  bit_float_t arg;
  arg.u = u;
  return arg.f;
}
```

Тоже самое, что и `(float) u`**?**

```
unsigned float2bit(float f) {
  bit_float_t arg;
  arg.f = f;
  return arg.u;
}
```

Тоже самое, что и `(unsigned) f`**?**

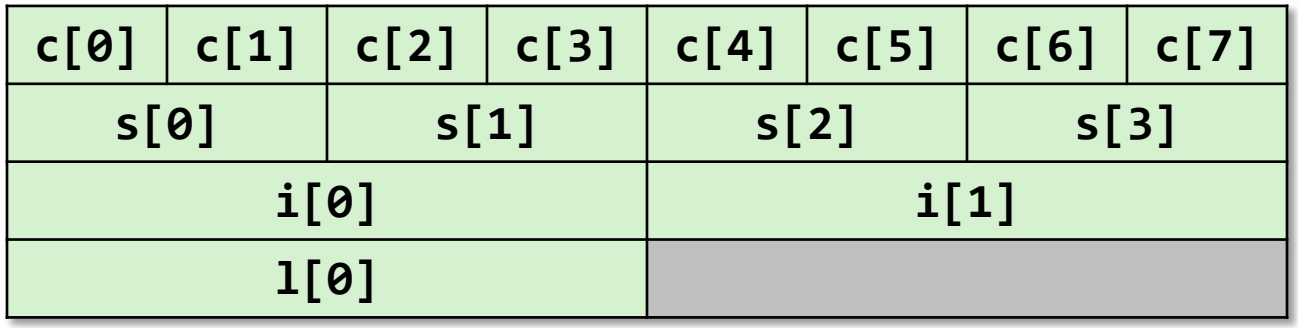
Порядок байт

- Основная идея
  - short/long/double хранятся в памяти как последовательности из 2/4/8 байт
  - Где именно расположен старший (младший) байт?
  - Может являться проблемой при пересылке двоичных данных между машинами разной архитектуры
- Big-endian / от старшего к младшему
  - Старший байт имеет наименьший адрес
  - Sparc (до V8)
- Little-endian / от младшего к старшему
  - Младший байт имеет наименьший адрес
  - Intel x86 (IA-32)
- Переключаемый порядок байт
  - ARM, PowerPC, Alpha, SPARC V9, MIPS, PA-RISC и IA-64

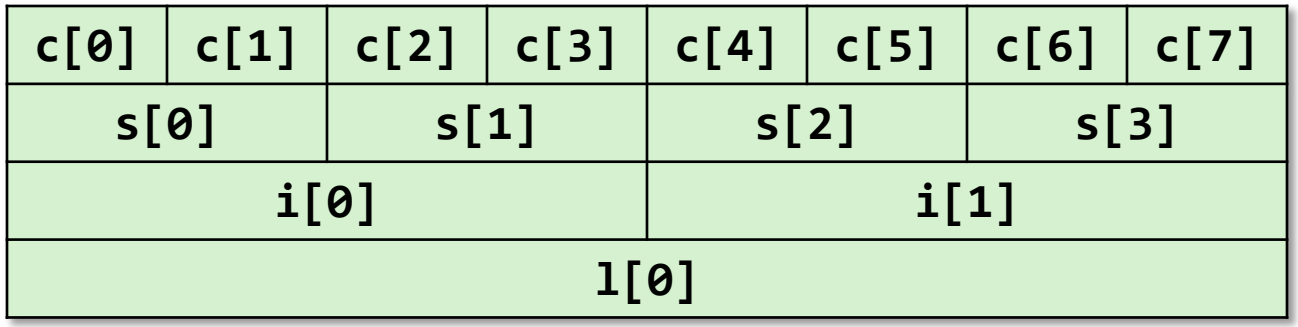
Пример

```
union {
  unsigned char c[8];
  unsigned short s[4];
  unsigned int i[2];
  unsigned long l[1];
} dw;
```

32 бита



64 бита

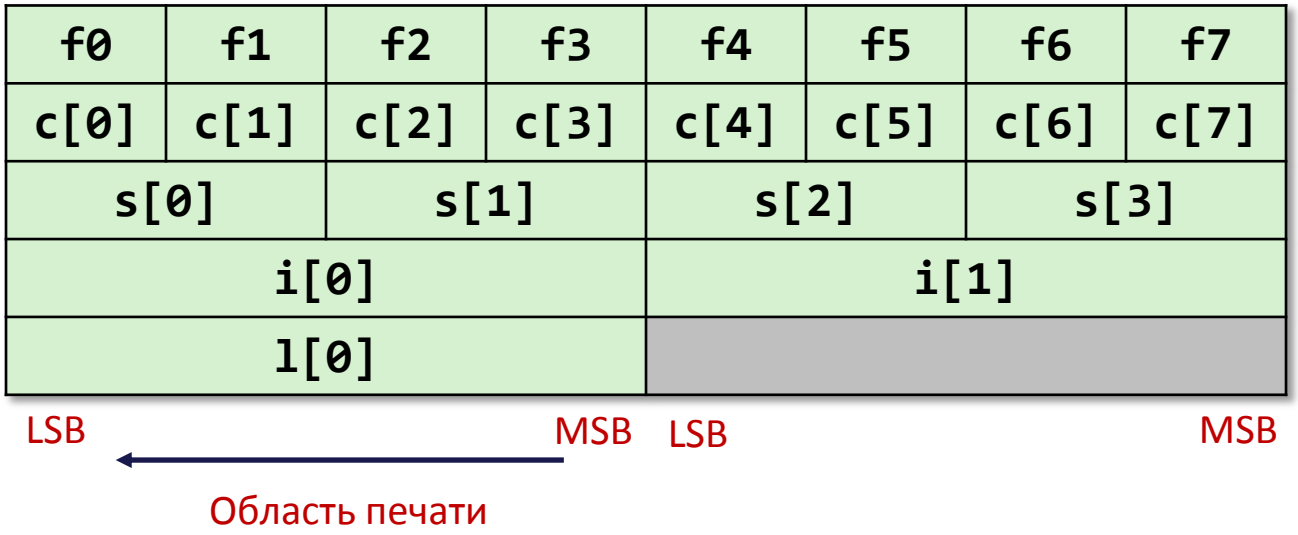


Пример (продолжение)

```
int j;
for (j = 0; j < 8; j++)
    dw.c[j] = 0xf0 + j;

printf("Characters 0-7 ==
[0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x,0x%x]\n",
    dw.c[0], dw.c[1], dw.c[2], dw.c[3],
    dw.c[4], dw.c[5], dw.c[6], dw.c[7]);

printf("Shorts 0-3 == [0x%x,0x%x,0x%x,0x%x]\n",
    dw.s[0], dw.s[1], dw.s[2], dw.s[3]);

printf("Ints 0-1 == [0x%x,0x%x]\n",
    dw.i[0], dw.i[1]);

printf("Long 0 == [0x%lx]\n",
    dw.l[0]);
```

Порядок байт IA-32 и многих других архитектур

Порядок байт от младшего к старшему

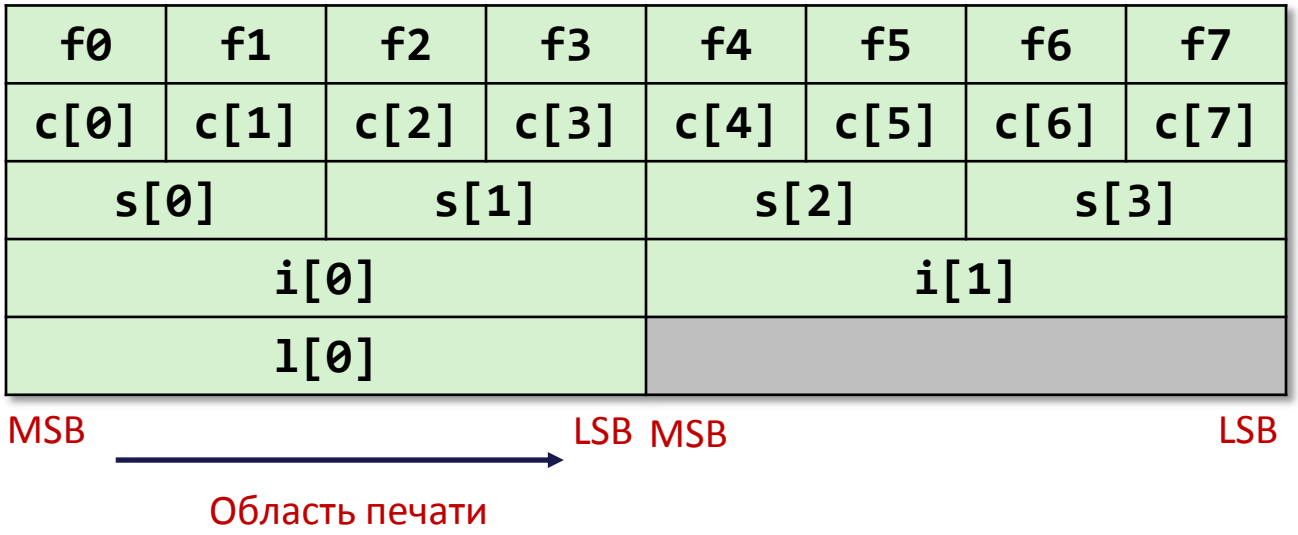


Вывод на консоль:

```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf1f0,0xf3f2,0xf5f4,0xf7f6]
Ints       0-1 == [0xf3f2f1f0,0xf7f6f5f4]
Long       0   == [0xf3f2f1f0]
```

Порядок байт SPARC, PPC, m68k и некоторых других архитектур

Порядок байт от старшего к младшему



Вывод на консоль:

```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf0f1,0xf2f3,0xf4f5,0xf6f7]
Ints       0-1 == [0xf0f1f2f3,0xf4f5f6f7]
Long       0   == [0xf0f1f2f3]
```

Порядок байт в x86-64

Порядок байт от младшего к старшему

Вывод на консоль:

```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf1f0,0xf3f2,0xf5f4,0xf7f6]
Ints       0-1 == [0xf3f2f1f0,0xf7f6f5f4]
Long       0   == [0xf7f6f5f4f3f2f1f0]
```

Типы данных языка Си
Итоги

- Размещение переменных
  - Классы памяти: автоматическая, статическая, динамическая
  - Регистр вместо памяти (при определенных условиях)
- Массивы в языке Си
  - Непрерывная последовательность байт в памяти
  - Выравнивание всего массива удовлетворяет требования к выравниванию для каждого его элемента
  - Имя массива – указатель на его первый элемент
  - Нет никаких проверок выхода за границы
- Структуры
  - Память под поля выделяется в порядке объявления этих полей
  - Помещаются пропуски между полями и в конце всей структуры с целью выравнивания данных
- Объединения
  - Объявленные поля перекрываются в памяти
  - Способ жестокого обмана системы типов языка Си

Далее…

- ***Функции***
  - ***Соглашение CDECL***
    - ***Рекурсия***
  - ***Что происходит в Си-программе до и после функции main***
  - ***Выравнивание стека***
  - ***Различные соглашения о вызове функций***
    - ***cdecl/stdcall/fastcall, отказ от указателя фрейма***
    - ***Соглашение вызова для x86-64***
  - ***Переполнение буфера, эксплуатация ошибок, механизмы защиты***
- Организация динамической памяти
- Числа с плавающей точкой