Лекция 0xA

11 марта

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

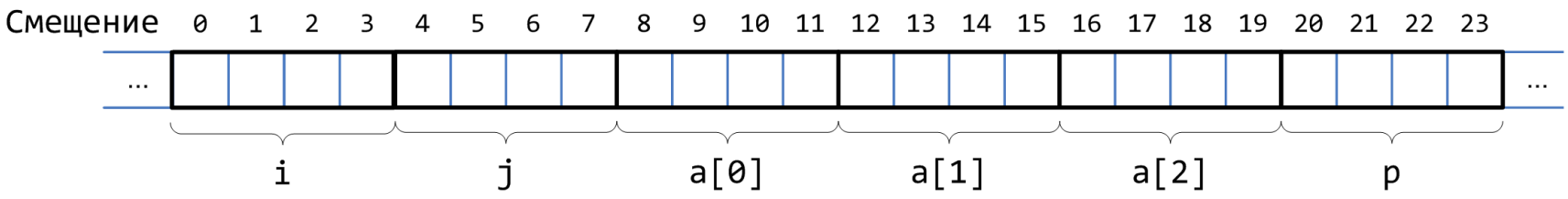
- `char`
- Стандартные знаковые целочисленные типы
  - `signed char`
  - `short int`
  - `int`
  - `long int`
  - `long long int`
- Стандартные беззнаковые целочисленные типы
  - `_Bool`
- Перечисление
- Типы чисел с плавающей точкой
  - `float`
  - `double`
  - `long double`
  - `_Complex`
- Производные 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

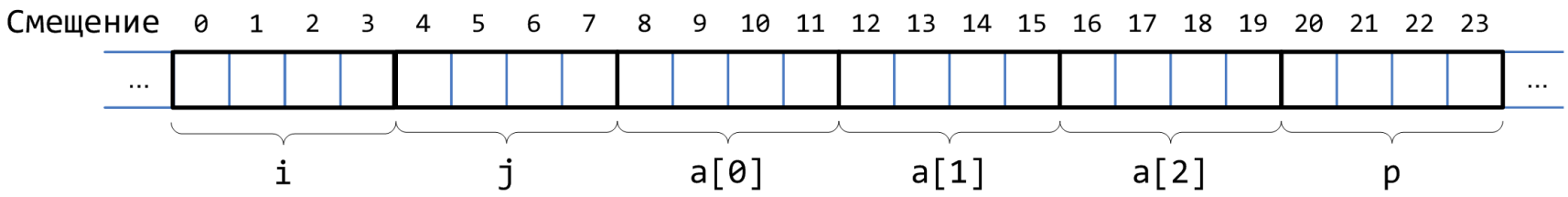
Расположение в памяти



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;
```

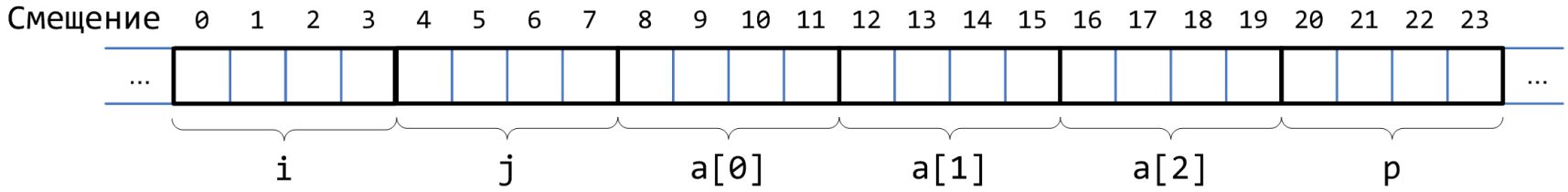
```
mov edx, dword [x]          ; (1)
mov eax, dword [edx]        ; (2)
mov dword [edx + 4], eax    ; (3)
```

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]);
```



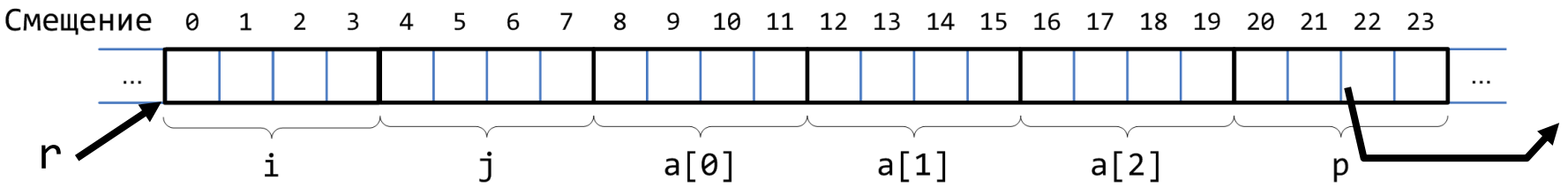

```
mov edx, dword [i]              ; (1)
mov eax, dword [x]              ; (2)
lea eax, [eax + 4 * edx + 8] ; (3)
```

- 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;
}
```

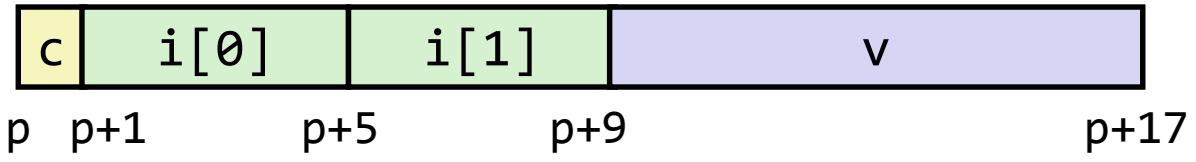
Регистр	Переменная
edx	r
ecx	val




```
.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
```

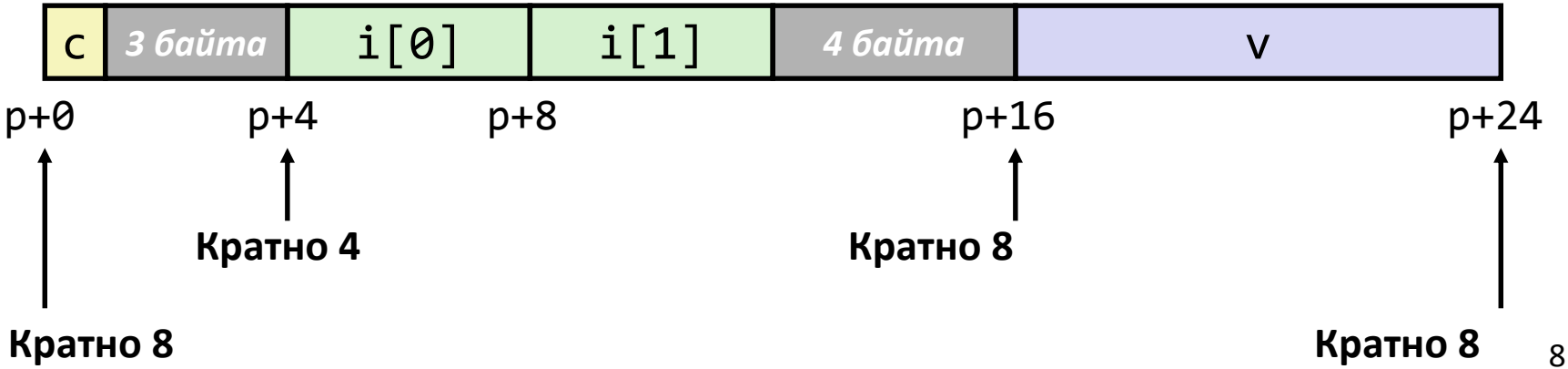
Выравнивание полей в структурах

- 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

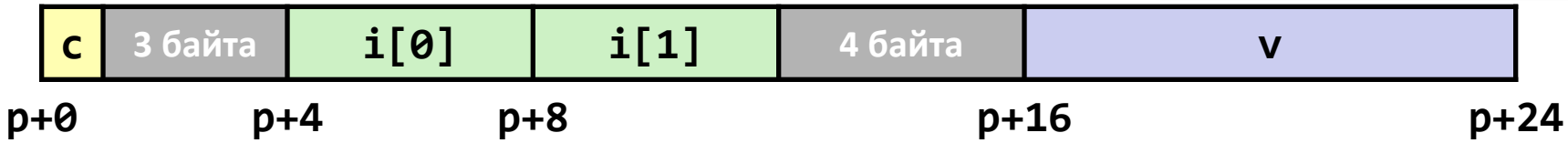
```
struct S1 {
  char c;
  int i[2];
  double v;
} *p;
```

- 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

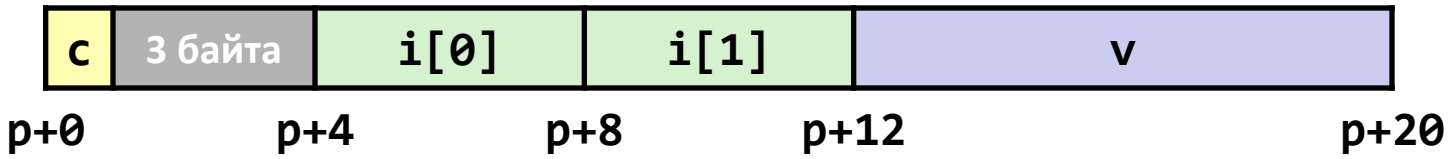
Различные соглашения о выравнивании

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

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



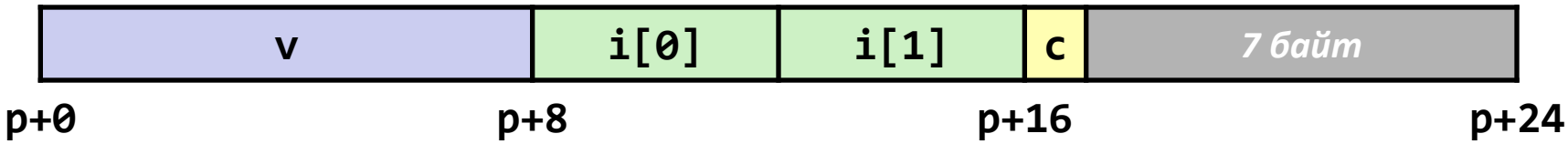
- IA-32 Linux
  - K = 4; `double` рассматривается аналогично 4-байтным типам данных



Выравнивание всей структуры

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

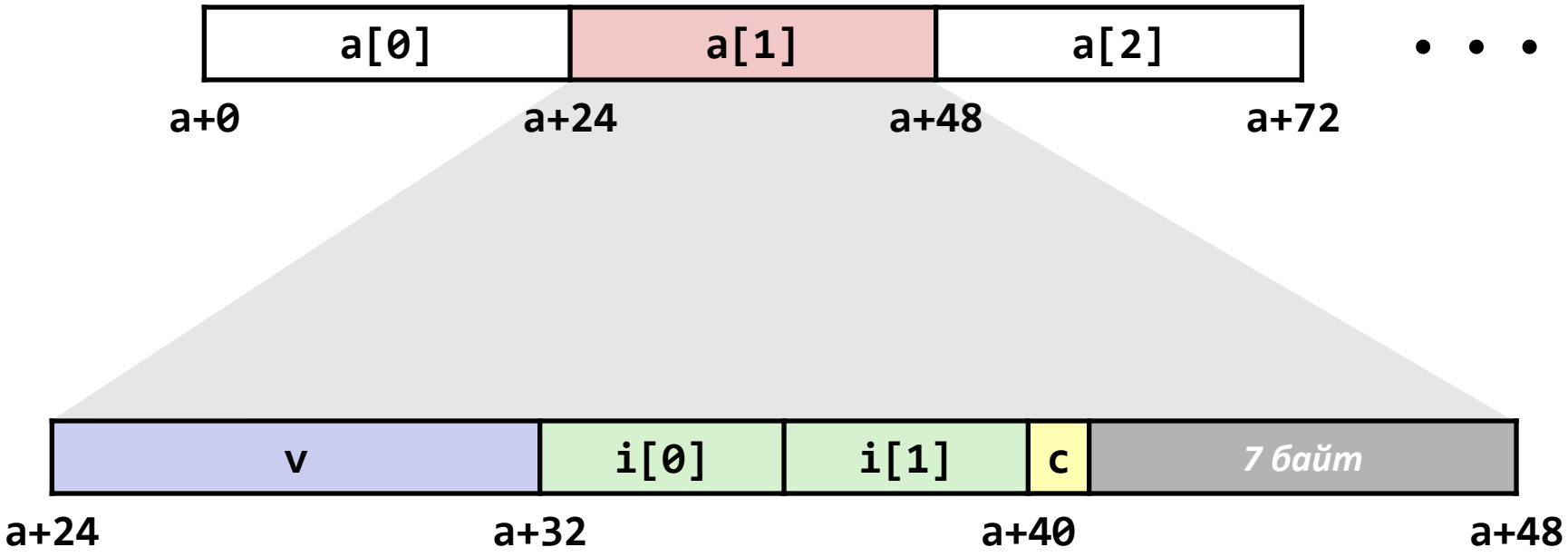
- Определяется требование к выравниванию в K байт
- Общий размер структуры должен быть кратен K



Массивы структур

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

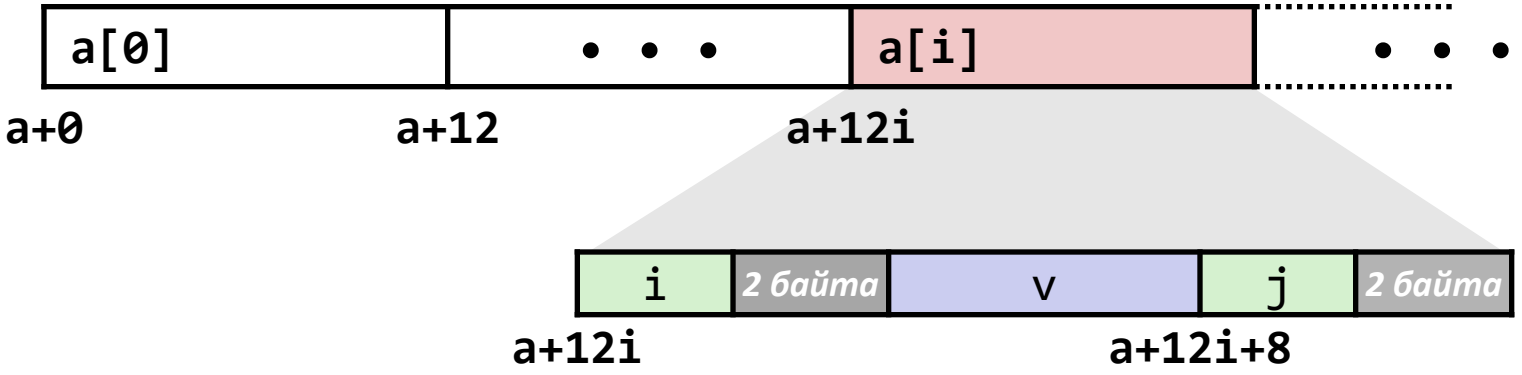
```
struct S2 {
  double v;
  int i[2];
  char c;
} a[10];
```



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]
```

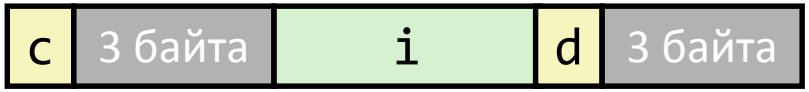
Как сохранить место

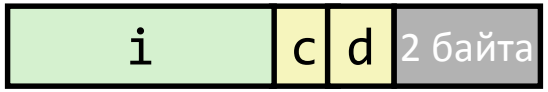
- Размещаем большие типы первыми

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

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

- Результат (K=4)

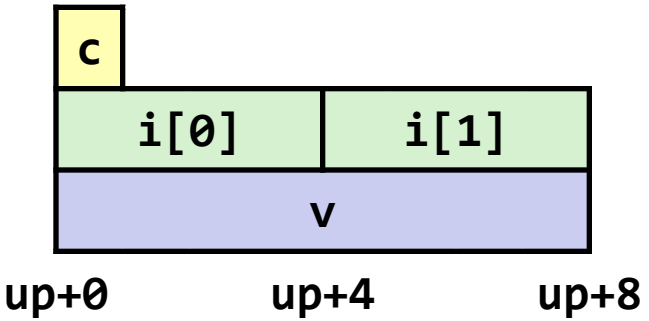




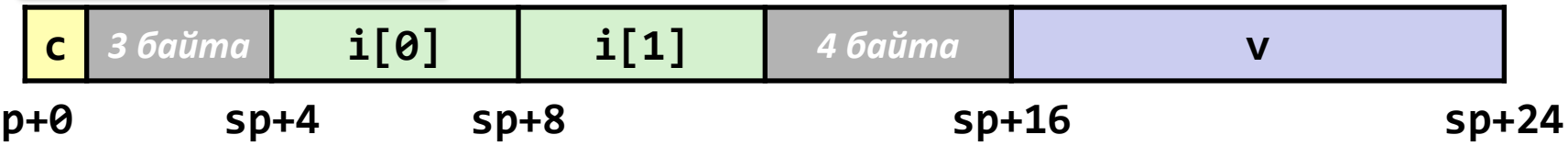
Размещение объединений

- 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;
};
```

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

В чем ошибка ?

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;
};
```

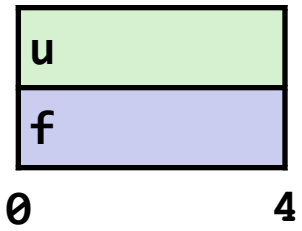
`sizeof(`**`struct NODE_T`**`) ?`

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`**?**

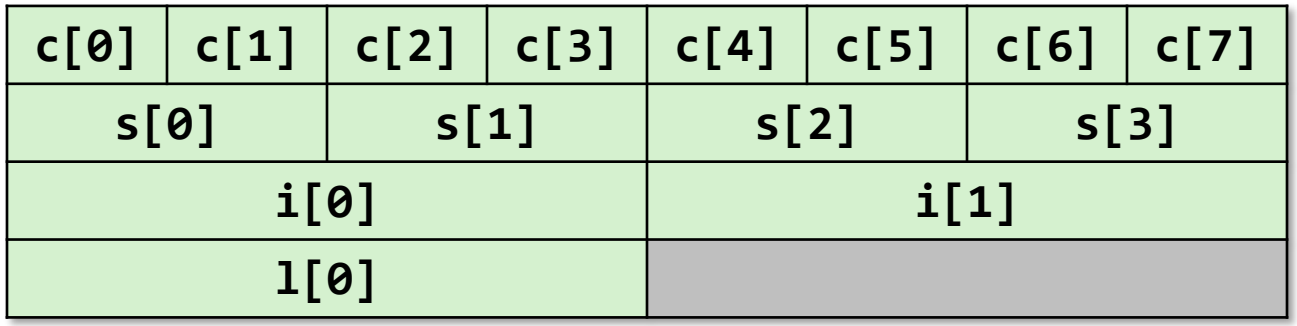
Порядок байт

- 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

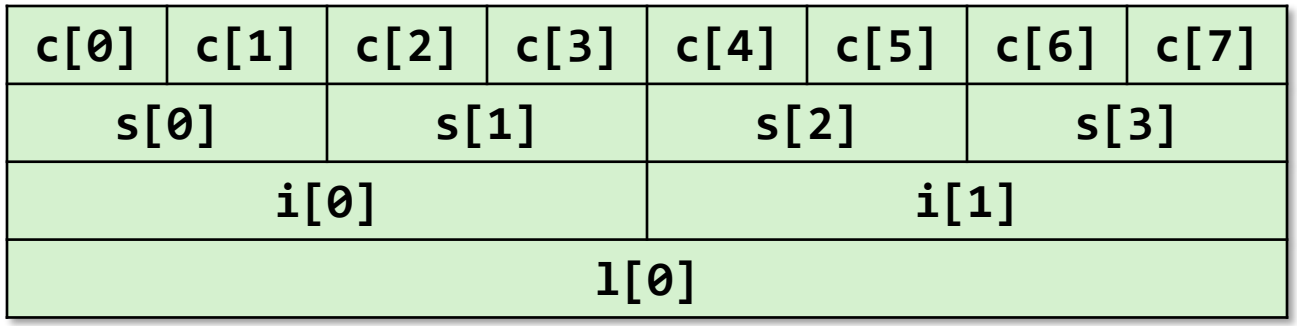
Пример

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

32 бита



64 бита

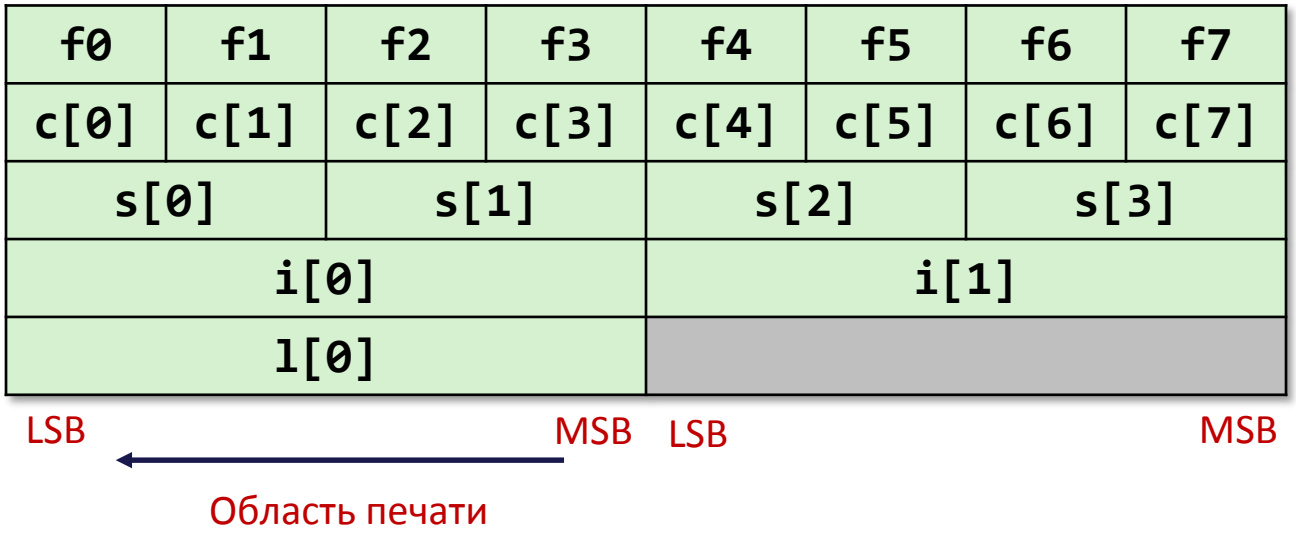


Пример (продолжение)

```
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

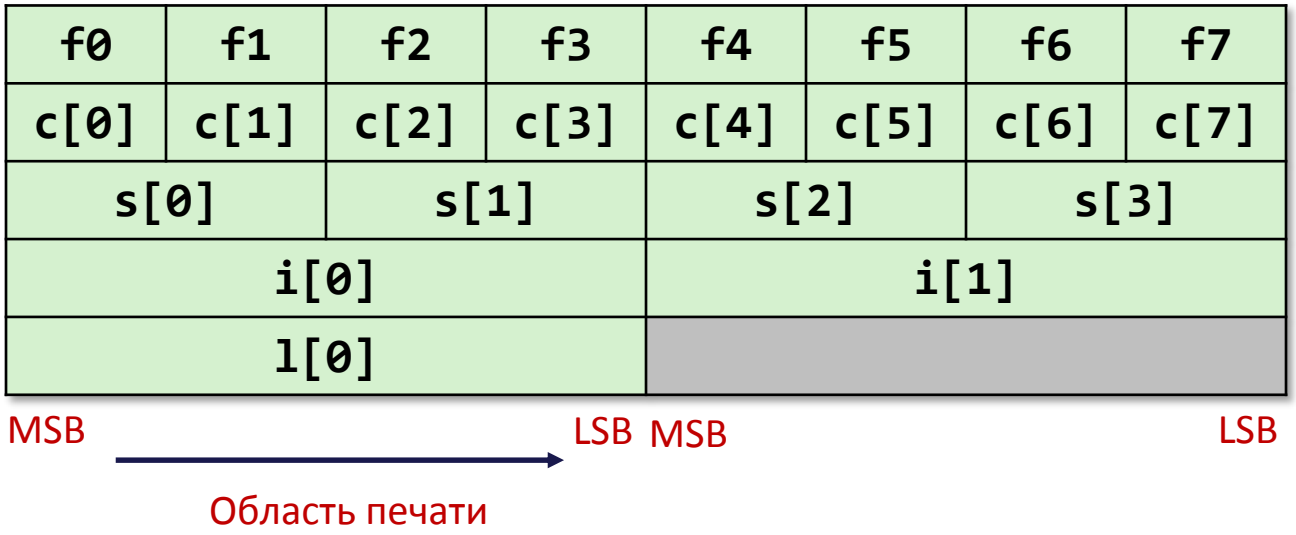


Вывод на консоль:

```
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:

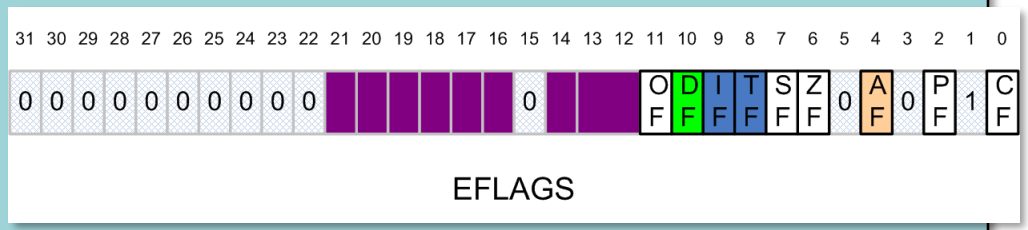
```
Characters 0-7 == [0xf0,0xf1,0xf2,0xf3,0xf4,0xf5,0xf6,0xf7]
Shorts     0-3 == [0xf1f0,0xf3f2,0xf5f4,0xf7f6]
Ints       0-1 == [0xf3f2f1f0,0xf7f6f5f4]
Long       0   == [0xf7f6f5f4f3f2f1f0]
```

Битовые поля

- Размещение битовых полей зависит от реализации
- Битовые поля могут размещаться как справа налево, так и наоборот, в зависимости от реализации
- Битовые поля могут пересекать границы машинных слов
- Выравнивание битовых полей зависит от реализации
- К битовым полям неприменима операция & и оператор `sizeof`
- Код непереносим между различными системами

```
typedef union {
   unsigned int raw;
   struct {
      int CF   : 1;
      int gap1 : 1;
      int PF   : 1;
      int gap2 : 1;
      int AF   : 1;
      int gap3 : 1;
      int ZF   : 1;
...
      int gap5 : 10;
   } fields;
} t_eflags;

int checkEflagsState(t_eflags *sw) {
   t_eflags andMask = {0};
   andMask.fields.gap2 = 1;
   andMask.fields.gap3 = 1;
   andMask.fields.gap4 = 1;
   andMask.fields.gap5 = -1;
   return !(sw->raw & andMask.raw) && (sw->raw & 2);
}
```

```
checkEflagsState:
   push ebp
   mov  ebp, esp
   mov  eax, dword [ebp+8]
   mov  edx, dword [eax]
   xor  eax, eax
   test edx, -4161496
     ; 11111111_11000000_10000000_00101000b
   jne  .L3
   mov  eax, edx
   shr  eax
   and  eax, 1
.L3:
   pop     ebp
   ret
```



Типы данных языка Си
Итоги

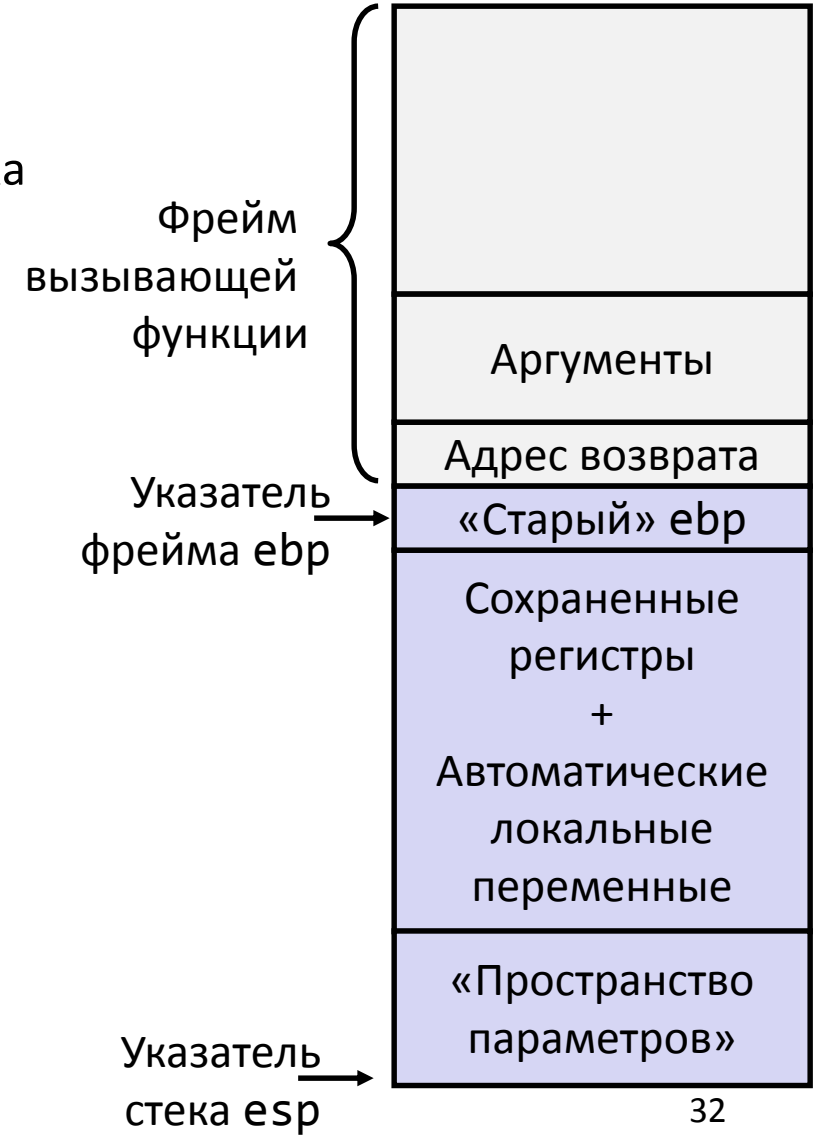
- Размещение переменных
  - Классы памяти: автоматическая, статическая, динамическая
  - Регистр вместо памяти (при определенных условиях)
- Массивы в языке Си
  - Непрерывная последовательность байт в памяти
  - Выравнивание всего массива удовлетворяет требования к выравниванию для каждого его элемента
  - 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

Поддержка функций на уровне аппаратуры

- Аппаратный стек
  - Регистр ESP указывает на верхушку стека
  - Стек растет вниз
  - Команды PUSH и POP, сложение и вычитание констант из ESP
- Вызов/возврат
  - Команды CALL и RET
- Состояния выполняющихся функций
  - На стеке размещаются фреймы
  - Каждый фрейм хранит текущее состояние вызова функции
  - На верхнюю границу указывает EBP
  - Содержимое
    - Фактические аргументы/формальные параметры
    - Адрес возврата
    - Автоматические локальные переменные
    - Вспомогательные переменные



Поддержка функций на уровне соглашений: соглашение CDECL

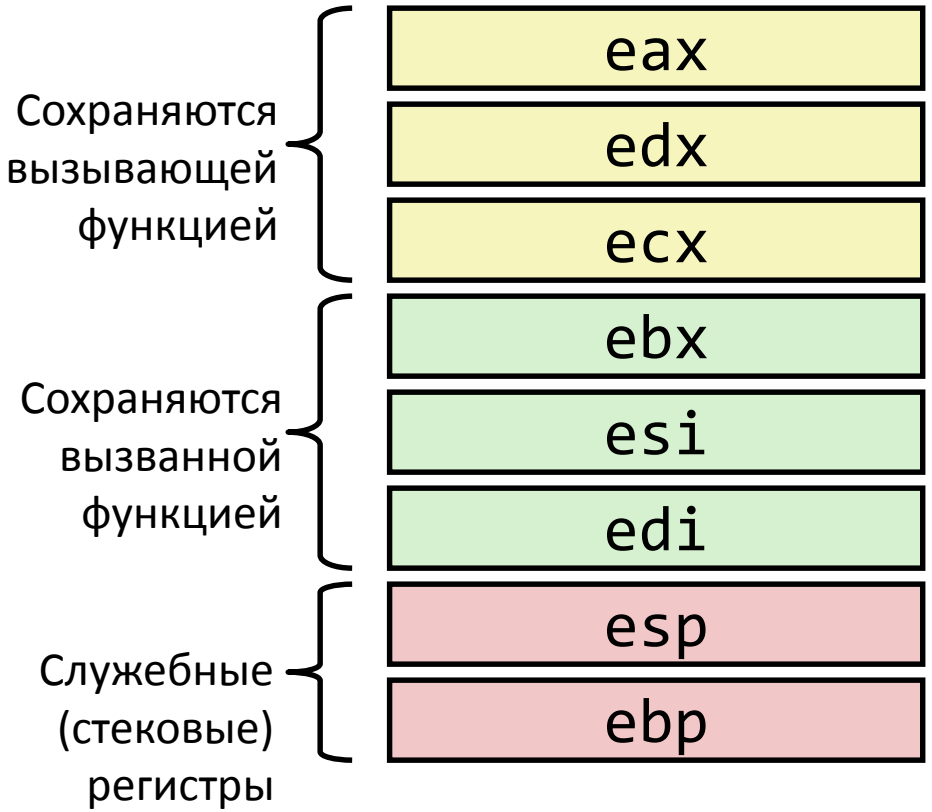
- Размещение параметров
  - На стеке, с обязательным выравниванием по 4-х байтной границе
- Порядок параметров
  - «Обратный», от «верхушки» стека ко «дну»: сразу над адресом возврата размещен первый параметр, затем второй, и т.д.
- Очистка стека от аргументов после вызова
  - Очищает вызывающая функция
  - Сохранность значений в пространстве аргументов после возврата в вызывающую функцию не гарантируется
  - Поскольку cdecl в большинстве случаев не предполагает изменение границ фрейма во время работы функции, очистка после возврата в вызывающую функцию фактически не выполняется, а переносится в эпилог
- Возвращаемое функцией значение
  - EAX
  - EDX:EAX
  - Через память

Размещение параметров и возвращаемого значения

- `sizeof == 4`
  - Целиком занимает машинное слово, помещаемое на стек
  - `EAX`
- `sizeof < 4`
  - Занимает младшие байты слова на стеке
  - `AX`, `AL`
- `sizeof == 8` (`long long`)
  - Два машинных слова в естественном порядке
  - `EDX:EAX`
- Массивы ≡ указатели
- Структуры и объединения
  - В gcc используется *гибридное* соглашение вызова, совмещающее `cdecl` и `stdcall` (соглашение вызова 32-х разрядного WinAPI)

Сохранение регистров в IA32/Linux+Windows

- `eax`, `edx`, `ecx`
  - Вызывающая функция сохраняет эти регистры перед call, если планирует использовать позже
- `eax`
  - Используется для возврата значения, если возвращается целый тип
- `ebx`, `esi`, `edi`
  - Вызванная функция сохраняет значения этих регистров, если планирует ими воспользоваться
- `esp`, `ebp`
  - Сохраняются вызванной функцией
  - Восстанавливаются перед выходом из функции



Рекурсивная функция

```
/* Рекурсивный popcount */
int pcount_r(unsigned x) {
  if (x == 0)
    return 0;
  else return
    (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

- Регистры
  - eax, edx используются без предварительного сохранения
  - ebx используется, но предварительно сохраняется в начале функции и восстанавливается в конце

```
pcount_r:
    push   ebp
    mov    ebp, esp
    push   ebx
    sub    esp, 4
    mov    ebx, dword [ebp + 8]
    mov    eax, 0
    test   ebx, ebx
    je   .L3
    mov    eax, ebx
    shr    eax, 1
    mov    dword [esp], eax
    call   pcount_r
    mov    edx, ebx
    and    edx, 1
    lea    eax, [edx + eax]
.L3:
    add    esp, 4
    pop    ebx
    pop    ebp
    ret
```

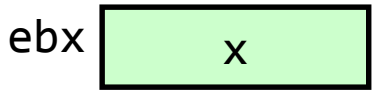
Рекурсивный вызов (1/5)

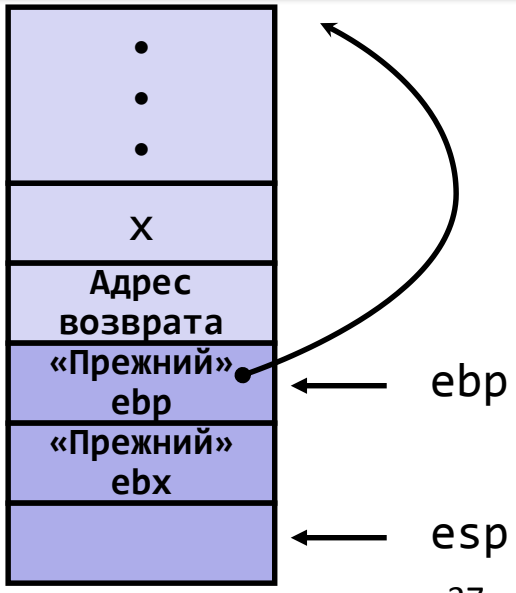
```
/* Рекурсивный popcount */
int pcount_r(unsigned x) {
  if (x == 0)
    return 0;
  else return
    (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

```
pcount_r:
    push   ebp
    mov    ebp, esp
    push   ebx
    sub    esp, 4

    mov    ebx, dword [ebp + 8]
    ...
```

Пролог функции

- Действия в прологе
  - Сохраняем и «переставляем» ebp
  - Сохраняем значение ebx на стеке
  - Расширяем фрейм: выделяем место для размещения аргумента рекурсивного вызова
- Размещаем значение x в ebx



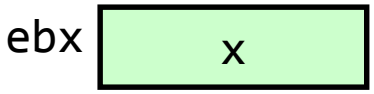


Рекурсивный вызов (2/5)

```
/* Рекурсивный popcount */
int pcount_r(unsigned x) {
  if (x == 0)
    return 0;
  else return
    (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

```
    ...
    mov   eax, 0
    test   ebx, ebx
    je   .L3
    ...
.L3:
    ...
    ret
```

- Действия
  - Если `x == 0`, выходим из функции
    - Регистр `eax` содержит `0`

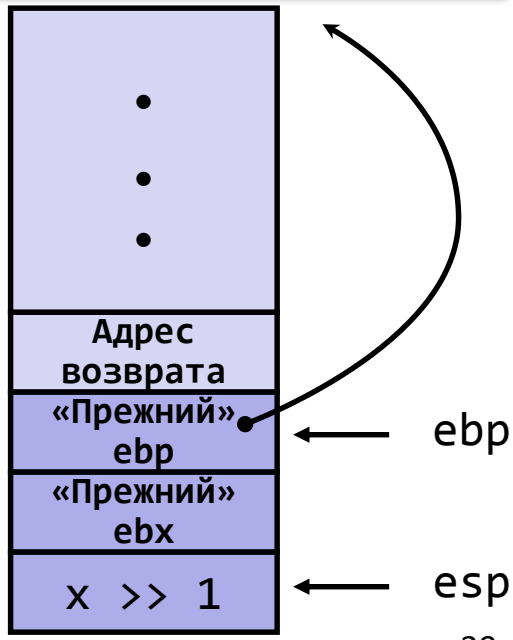


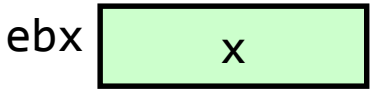
Рекурсивный вызов (3/5)

```
/* Рекурсивный popcount */
int pcount_r(unsigned x) {
  if (x == 0)
    return 0;
  else return
    (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

```
...
mov    eax, ebx
shr    eax, 1
mov    dword [esp], eax
call   pcount_r
...
```

- Действия
  - Сохраняем x >> 1 на стеке
  - Выполняем рекурсивный вызов
- Результат
  - eax содержит возвращенное значение
  - ebx содержит неизменное значение x



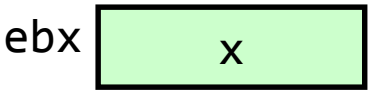


Рекурсивный вызов (4/5)

```
/* Рекурсивный popcount */
int pcount_r(unsigned x) {
  if (x == 0)
    return 0;
  else return
    (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

```
...
mov    edx, ebx
and    edx, 1
lea    eax, [edx + eax]
...
```

- Состояние регистров
  - eax содержит значение полученное от рекурсивного вызова
  - ebx содержит x
- Действия
  - Вычисляем `(x & 1)` + возвращенное значение
- Результат
  - Регистр eax получает результат работы функции



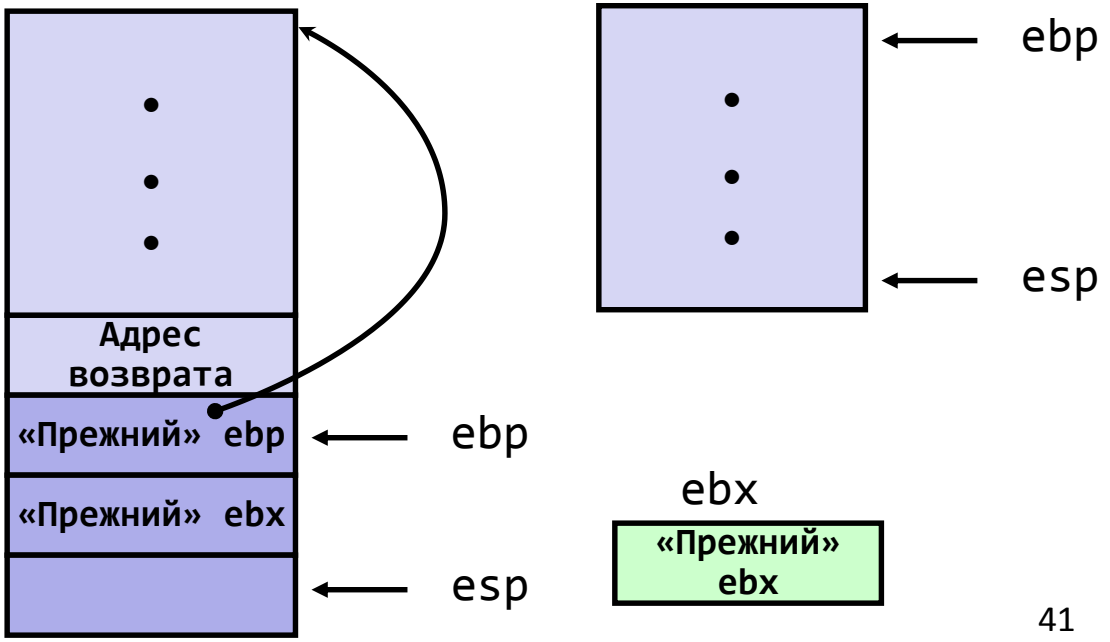
Рекурсивный вызов (5/5)

```
/* Рекурсивный popcount */
int pcount_r(unsigned x) {
  if (x == 0)
    return 0;
  else return
    (x & 1) + pcount_r(x >> 1);
}
```

```
    ...
L3:
    add esp,   4
    pop  ebx
    pop  ebp
    ret
```

Эпилог функции

- Действия в эпилоге
  - Восстанавливаем значения ebx и ebp
  - Восстанавливаем esp



Рекурсия – выводы

- Не используются дополнительные приемы
  - Создание фреймов гарантирует, что каждый вызов располагает персональным блоком памяти
    - Хранятся регистры и локальные переменные
    - Хранится адрес возврата
  - Общее соглашение о сохранении регистров препятствует порче регистров различными вызовами
  - Стековая организация поддерживается порядком вызовов и возвратов из функций
    - Если P вызывает Q, тогда Q завершается до того, как завершится P
    - Последним пришел, первым ушел
- Аналогично при неявной рекурсии
  - P вызывает Q; Q вызывает P