Связывание

Основы информатики

Компьютерные основы программирования

u.to/DbCmFA

На основе **CMU** 15-213/18-243:
Introduction to Computer Systems

u.to/XoKmFA

Лекция 11, 22 апреля 2024

Лектор:

Дмитрий Северов, кафедра информатики 608 КПМ

cs.mipt.ru/wp/?page_id=346

Пример Си-программы

main.c

```
int buf[2] = {1, 2};

int main()
{
  swap();
  return 0;
}
```

swap.c

```
extern int buf[];

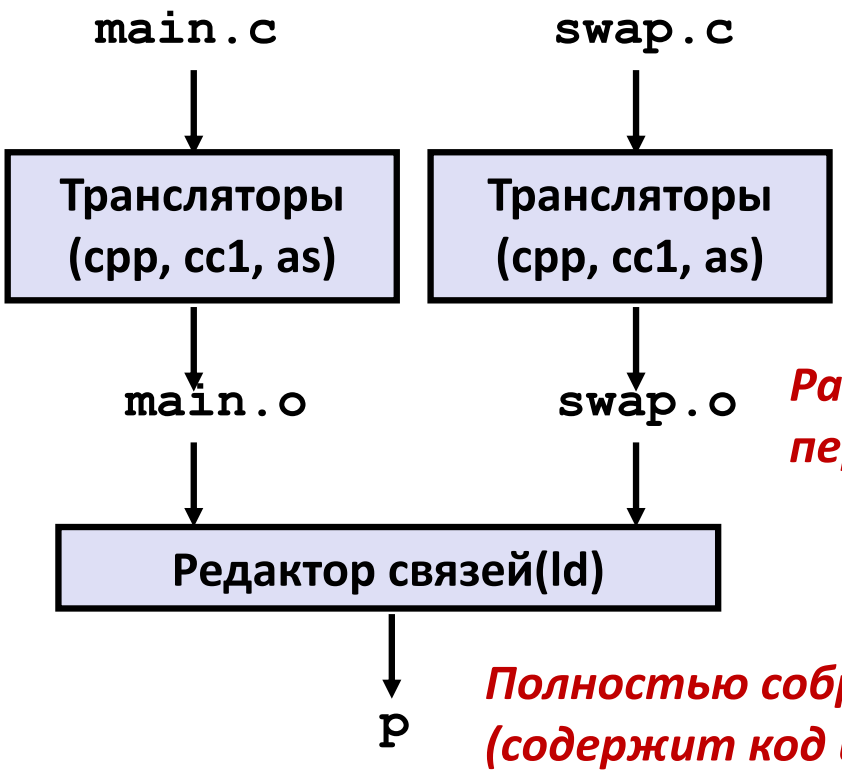
int *bufp0 = &buf[0];
static int *bufp1;

void swap()
{
  int temp;

  bufp1 = &buf[1];
  temp = *bufp0;
  *bufp0 = *bufp1;
  *bufp1 = temp;
}
```

Статическое связывание

- **Трансляция и связывание *управляющей программой* :**
  - `unix> gcc -O2 -g -o p main.c swap.c`
  - `unix> ./p`



Исходные файлы

Раздельно скомпилированные перемещаемые объектные файлы

Полностью собранный исполняемый файл (содержит код и данные для всех функций упомянутых в `main.c` и `swap.c`)

Цели связывания – 1

- **Модульность**
  - Программы могут создаваться не как один монолитный файл, а как набор небольших исходных файлов.
  - Возможно создание библиотек общих функций
    - например , библиотека math, стандартная библиотека Си

Цели связывания – 2

- **Эффективность**
  - Время: раздельная компиляция
    - изменение одного исходного файла, его компиляция и пересборка
    - нет необходимости перекомпилировать другие исходные файлы
  - Пространство: библиотеки
    - Общие функции могут быть собраны в общий файл...
    - При этом исполняемые файлы и исполняющийся фрагмент памяти содержат только код фактически используемых функций

Задачи связывания - 1

- **Разрешение символов**
  - В программах определяются и упоминаются *символы* (переменные и функции):
    - `void swap() {…}  /* определяется символ swap */`
    - `swap();  /* упоминается символ swap */`
    - `int *xp = &x;  /* определяется xp, упоминается x */`
  - Определения символов сохраняются компилятором в *таблице символов*
    - Таблица символов – это массив записей-структур
    - Каждая запись включает имя, размер и положение символа.
  - Редактор связей ставит в соответствие каждому упоминанию символа ровно одно определение этого символа.

Задачи связывания – 2

- **Перемещение кода**
  - Слияние множественных разделов кода и данных в единственные общие разделы
  - Перемещение символов из их относительных позиций, указанных в объектных (.o) файлах, в окончательные абсолютные позиции, указанные в исполняемом файле.
  - Редактирование всех ссылок на символы чтобы указать новое положение.

Три вида двоичных файлов (модулей)

- **Перемещаемые объектные файлы (`.o`)**
  - Содержат код и данные в форме, позволяющей комбинировать их с другими перемещаемыми объектными файлами при формировании исполняемого файла.
    - Каждый файл `.o` создаётся в точности из одного исходного (`.c`) файла
- **Исполняемые файлы (`a.out`)**
  - Содержат код и данные в форме, позволяющей непосредственно копировать их содержимое в память и затем исполнять.
- **Файлы переиспользуемых модулей (`.so`)**
  - Специальный тип перемещаемых объектных файлов, которые могут загружаться в память и связываться динамически во время загрузки и исполнения
  - В Windows называются *Dynamic Link Libraries* (DLLs)

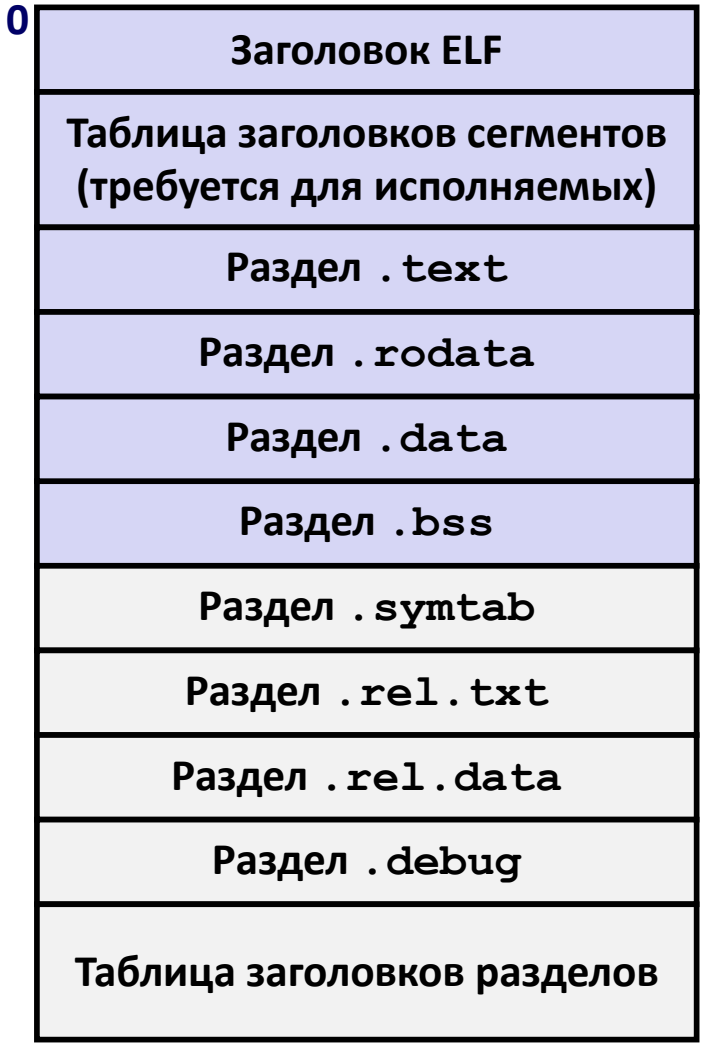
Executable and Linkable Format (ELF)

- **Стандартный двоичный формат для объектных файлов**
- **Изначально предложен в AT&T System V Unix**
  - Позже адаптирован для вариантов BSD Unix и Linux
- **Один общий формат для**
  - перемещаемых объектных файлов (`.o`),
  - исполняемых файлов (`a.out`)
  - файлов переиспользуемых модулей (`.so`)

- **Общее название: ELF binaries**

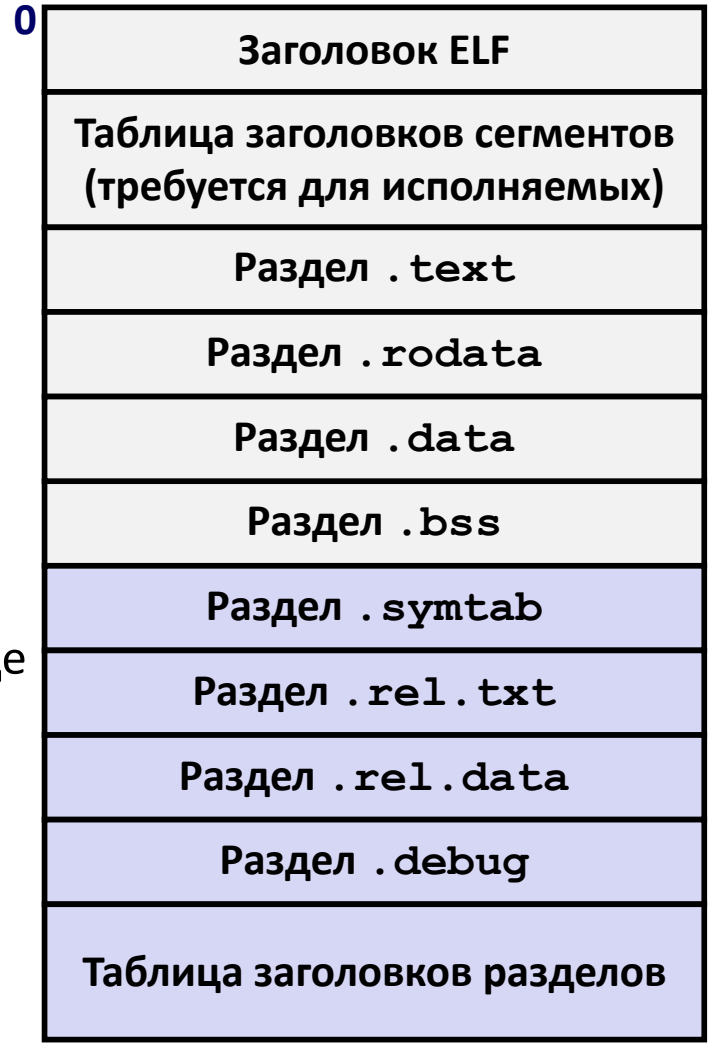
Объектный файл формата ELF - 1

- **Заголовок Elf**
  - Размер слова, порядок байт, тип файла (.o, exec, .so), тип машины, и т.п.
- **Таблица заголовков сегментов**
  - Размер страницы, сегменты виртуальных адресов памяти (разделы), размеры сегментов.
- **Раздел `.text`**
  - Код машинных команд
- **Раздел `.rodata`**
  - Данные только для чтения: таблицы переходов, ...
- **Раздел `.data`**
  - Инициализированные глобальные переменные
- **Раздел `.bss`**
  - Неинициализированные глобальные переменные
  - “Block Started by Symbol”
  - Имеет заголовок раздела, но не занимает места



Объектный файл формата ELF - 2

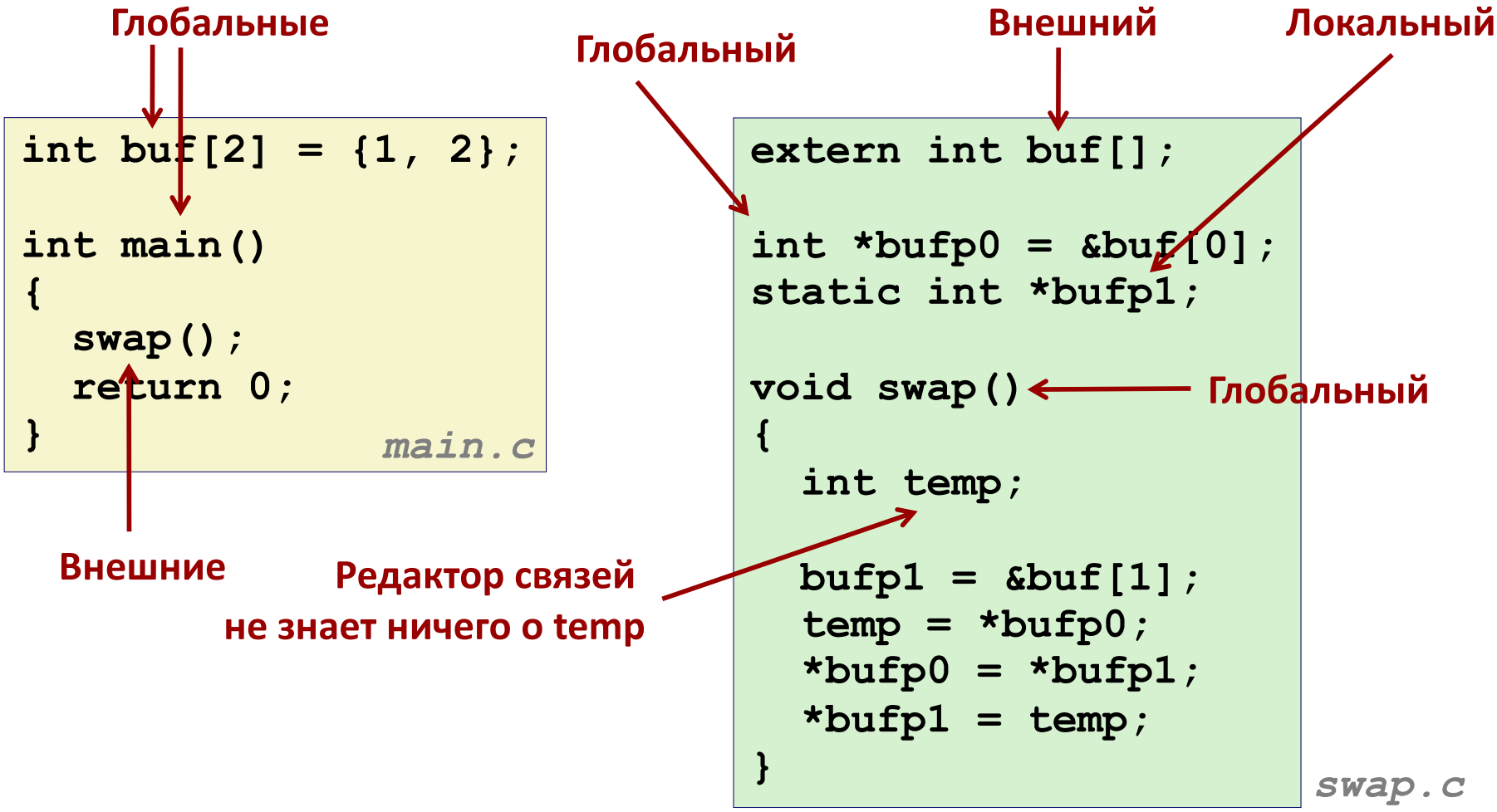
- **Раздел `.symtab`**
  - Таблица символов
  - Имена процедур и статических переменных
  - Имена и размещения разделов
- **Раздел `.rel.text`**
  - Информация для перемещения раздела **`.text`**
  - Адреса команд, изменяемых в исполняемом коде
  - Модифицируемые команды
- **Раздел `.rel.data`**
  - Информация для перемещения раздела **`.data`**
  - Адреса указателей, изменяемых в исполняемом коде
- **Раздел `.debug`**
  - Информация для символьной отладки (**`gcc -g`**)
- **Таблица заголовков разделов**
  - Смещения и размеры каждого раздела



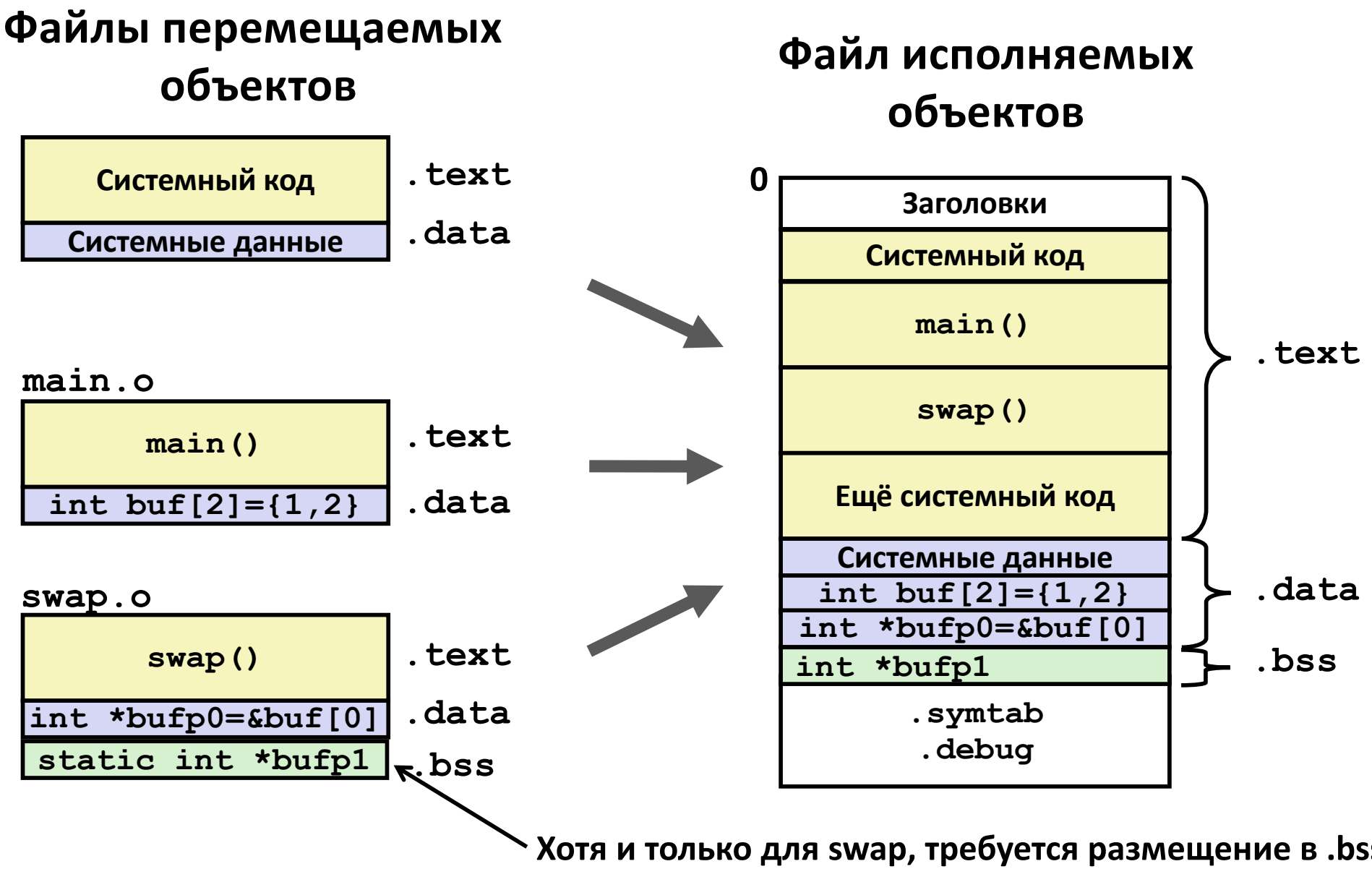
Связываемые символы

- **Глобальные символы**
  - Символы определённые данным модулем и упоминаемые другими
  - Примеры: не-**`static`** функции Си и не-**`static`** глобальные переменные
- **Внешние символы**
  - Глобальные символы упоминаемые данным модулем и определённые другими
- **Локальные символы**
  - Символы определяемые и упоминаемые только данным модулем
  - Примеры: функции и переменные Си определённые с атрибутом **`static`**
  - **Локальные связываемые символы *не есть* локальные переменные**

Разрешение символов



Перемещение кода и данных



Информация для перемещения (main)

main.c

```
int buf[2] =
  {1,2};

int main()
{
  swap();
  return 0;
}
```

main.o

```
0000000 <main>:
   0:   8d 4c 24 04          lea    0x4(%esp),%ecx
   4:   83 e4 f0             and    $0xfffffff0,%esp
   7:   ff 71 fc             pushl  0xfffffffc(%ecx)
   a:   55                   push   %ebp
   b:   89 e5                mov    %esp,%ebp
   d:   51                   push   %ecx
   e:   83 ec 04             sub    $0x4,%esp
  11:   e8 fc ff ff ff       call   12 <main+0x12>
                  12: R_386_PC32 swap
  16:   83 c4 04             add    $0x4,%esp
  19:   31 c0                xor    %eax,%eax
  1b:   59                   pop    %ecx
  1c:   5d                   pop    %ebp
  1d:   8d 61 fc             lea    0xfffffffc(%ecx),%esp
  20:   c3                   ret
```

Источник: `objdump -r -d`

```
Дизассемблирование секции .data:

00000000 <buf>:
   0:   01 00 00 00 02 00 00 00
```

Инф. для перемещения (swap, .text)

swap.c

```
extern int buf[];

int
  *bufp0 = &buf[0];

static int *bufp1;

void swap()
{
  int temp;

  bufp1 = &buf[1];
  temp = *bufp0;
  *bufp0 = *bufp1;
  *bufp1 = temp;
}
```

swap.o

```
Дизассемблирование раздела .text:

00000000 <swap>:
   0:   8b 15 00 00 00 00      mov    0x0,%edx
                2: R_386_32    buf
   6:   a1 04 00 00 00         mov    0x4,%eax
                7: R_386_32    buf
   b:   55                     push   %ebp
   c:   89 e5                  mov    %esp,%ebp
   e:   c7 05 00 00 00 00 04   movl   $0x4,0x0
  15:   00 00 00
                10: R_386_32   .bss
                14: R_386_32   buf
  18:   8b 08                  mov    (%eax),%ecx
  1a:   89 10                  mov    %edx,(%eax)
  1c:   5d                     pop    %ebp
  1d:   89 0d 04 00 00 00      mov    %ecx,0x4
                1f: R_386_32   buf
  23:   c3                     ret
```

Инф. для перемещения (swap, .data)

swap.c

```
extern int buf[];

int *bufp0 =
            &buf[0];
static int *bufp1;

void swap()
{
  int temp;

  bufp1 = &buf[1];
  temp = *bufp0;
  *bufp0 = *bufp1;
  *bufp1 = temp;
}
```

```
Дизассемблирование раздела .data:

00000000 <bufp0>:
   0:   00 00 00 00

         0: R_386_32 buf
```

Исполняемый до/после перемещ. (.text)

```
0000000 <main>:
   . . .
   e:   83 ec 04          sub    $0x4,%esp
  11:   e8 fc ff ff ff    call   12 <main+0x12>
                12: R_386_PC32 swap
  16:   83 c4 04          add    $0x4,%esp
   . . .
```

0x8048396 + 0x1a
= 0x80483b0

```
08048380 <main>:
 8048380:      8d 4c 24 04             lea    0x4(%esp),%ecx
 8048384:      83 e4 f0                and    $0xfffffff0,%esp
 8048387:      ff 71 fc                pushl  0xfffffffc(%ecx)
 804838a:      55                      push   %ebp
 804838b:      89 e5                   mov    %esp,%ebp
 804838d:      51                      push   %ecx
 804838e:      83 ec 04                sub    $0x4,%esp
 8048391:      e8 1a 00 00 00          call   80483b0 <swap>
 8048396:      83 c4 04                add    $0x4,%esp
 8048399:      31 c0                   xor    %eax,%eax
 804839b:      59                      pop    %ecx
 804839c:      5d                      pop    %ebp
 804839d:      8d 61 fc                lea    0xfffffffc(%ecx),%esp
 80483a0:      c3                      ret
```

```
 0:   8b 15 00 00 00 00      mov    0x0,%edx
                2: R_386_32   buf
 6:   a1 04 00 00 00         mov    0x4,%eax
                7: R_386_32   buf
 ...
 e:   c7 05 00 00 00 00 04   movl   $0x4,0x0
15:   00 00 00
                10: R_386_32  .bss
                14: R_386_32  buf
 . . .
1d:   89 0d 04 00 00 00      mov    %ecx,0x4
                1f: R_386_32  buf
23:   c3                     ret
```

```
080483b0 <swap>:
 80483b0:      8b 15 20 96 04 08      mov    0x8049620,%edx
 80483b6:      a1 24 96 04 08         mov    0x8049624,%eax
 80483bb:      55                     push   %ebp
 80483bc:      89 e5                  mov    %esp,%ebp
 80483be:      c7 05 30 96 04 08 24   movl   $0x8049624,0x8049630
 80483c5:      96 04 08
 80483c8:      8b 08                  mov    (%eax),%ecx
 80483ca:      89 10                  mov    %edx,(%eax)
 80483cc:      5d                     pop    %ebp
 80483cd:      89 0d 24 96 04 08      mov    %ecx,0x8049624
 80483d3:      c3                     ret
```

Исполняемый после перемещения (.data)

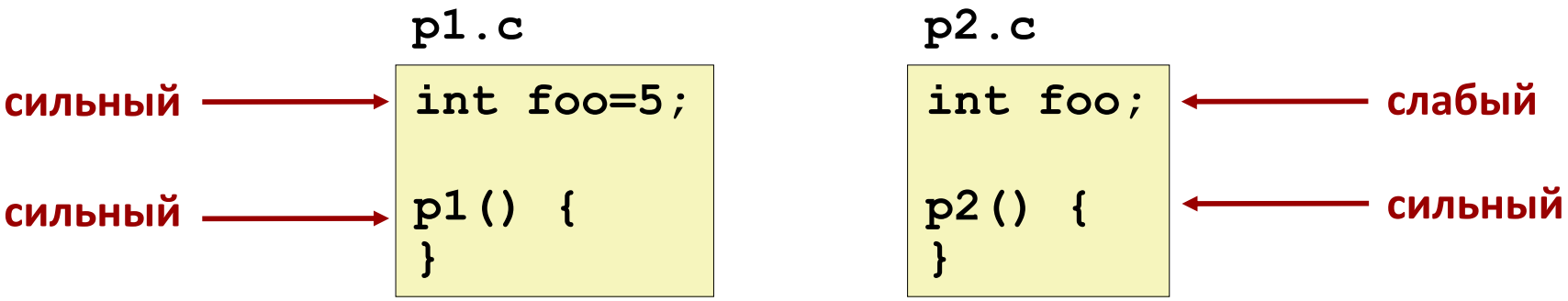
```
Дизассемблирование раздела .data:

08049620 <buf>:
 8049620:        01 00 00 00 02 00 00 00

08049628 <bufp0>:
 8049628:        20 96 04 08
```

Сильные и слабые символы

- **Символы программы…**
  - либо ***сильные***: процедуры и инициализированные глобальные
  - либо ***слабые***: неинициализированные глобальные



Правила разрешения символов

- **Правило 1: не допускаются несколько определений сильного символа**
  - Каждый символ определяется лишь однажды
  - Иначе: ошибка связывания

- **Правило 2: из нескольких определений символа выбирается сильное**
  - Определения слабых символов ассоциируются с сильным

- **Правило 3: из нескольких слабых определений символа выбирается любое**
  - Может отменяться с помощью `gcc -fno-common`

Головоломки связывания

```
int x;
p1() {}
```

```
p1() {}
```

Ошибка связывания: два сильных символа (**p1**)

```
int x;
p1() {}
```

```
int x;
p2() {}
```

Упоминания **x** обратятся к одной целочисленной неинициализированной ячейке
Это то, что вы хотели?

```
int x;
int y;
p1() {}
```

```
double x;
p2() {}
```

Запись в **x** в **p2** перезапишет **y** в **p1**!
Беда!

```
int x=7;
int y=5;
p1() {}
```

```
double x;
p2() {}
```

Запись **x** в **p2** перезапишет **y** в **p1**!
Опасность!

```
int x=7;
p1() {}
```

```
int x;
p2() {}
```

Упоминания **x** обратятся к одной целочисленной инициализированной ячейке.

Кошмарный случай: две одноимённых слабых структуры, компилированные разными компиляторами с различными правилами выравнивания

Роль .h файлов – 1

c1.c

```
#include "global.h"

int f() {
  return g+1;
}
```

global.h

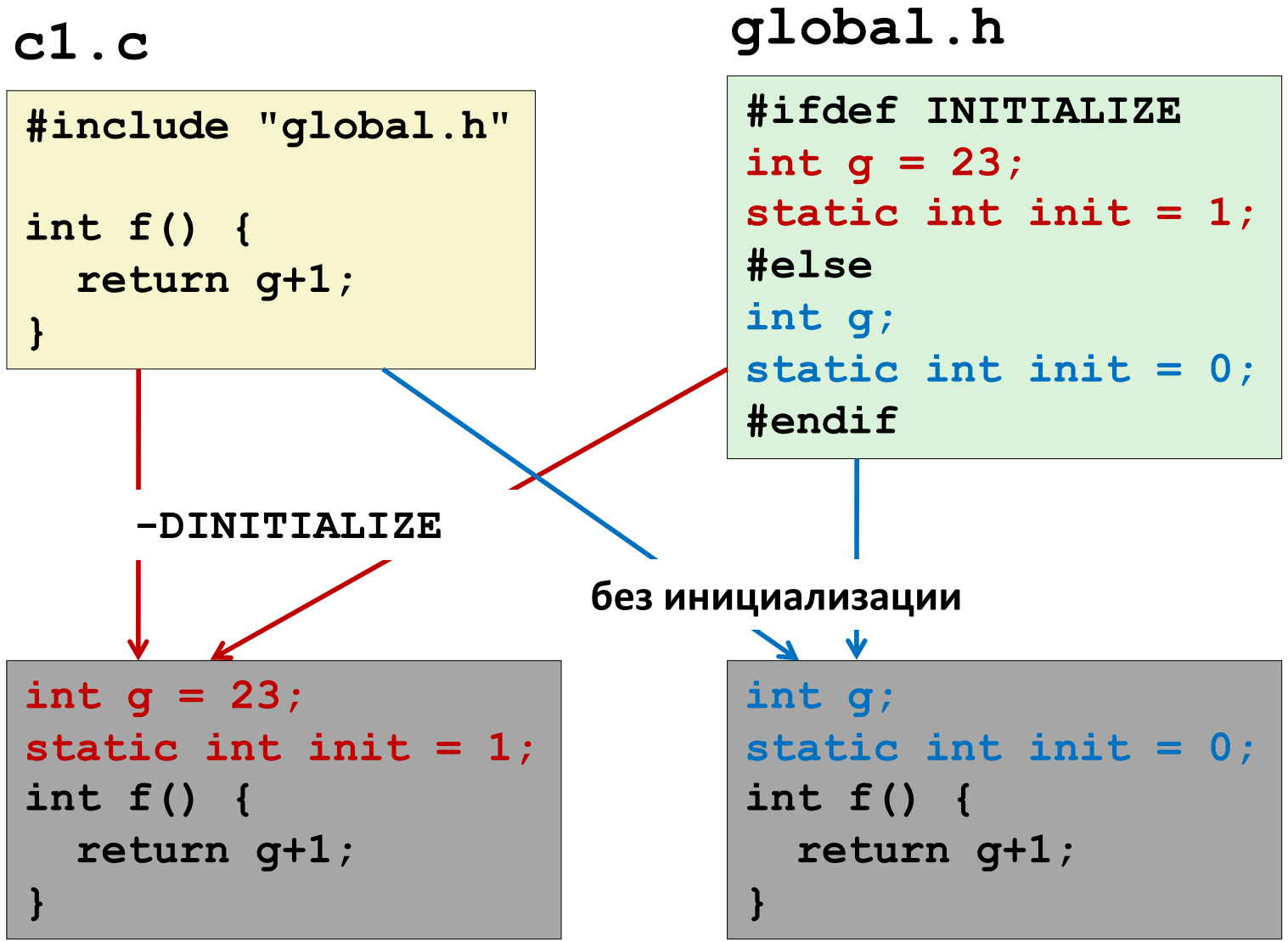
```
#ifdef INITIALIZE
int g = 23;
static int init = 1;
#else
int g;
static int init = 0;
#endif
```

c2.c

```
#include <stdio.h>
#include "global.h"

int main() {
  if (!init)
    g = 37;
  int t = f();
  printf("Calling f yields %d\n", t);
  return 0;
}
```

Запуск препроцессора



#include заставляет препроцессор Си вставить файл буквально

Роль .h файлов – 2

c1.c

```
#include "global.h"

int f() {
  return g+1;
}
```

global.h

```
#ifdef INITIALIZE
int g = 23;
static int init = 1;
#else
int g;
static int init = 0;
#endif
```

c2.c

```
#include <stdio.h>
#include "global.h"

int main() {
  if (!init)
    g = 37;
  int t = f();
  printf("Calling f yields %d\n", t);
  return 0;
}
```

Что получится:

```
gcc -o p c1.c c2.c
   ??
gcc -o p c1.c c2.c \
  -DINITIALIZE
   ??
```

Глобальные переменные

- **Избегайте, где только можно**

- **Иначе**
  - Используйте **`static`** если возможно
  - Инициализируйте, если вы используете глобальную переменную
  - Используйте **`extern`** если если вы обращаетесь к внешней глобальной переменной

Упаковка популярных функций

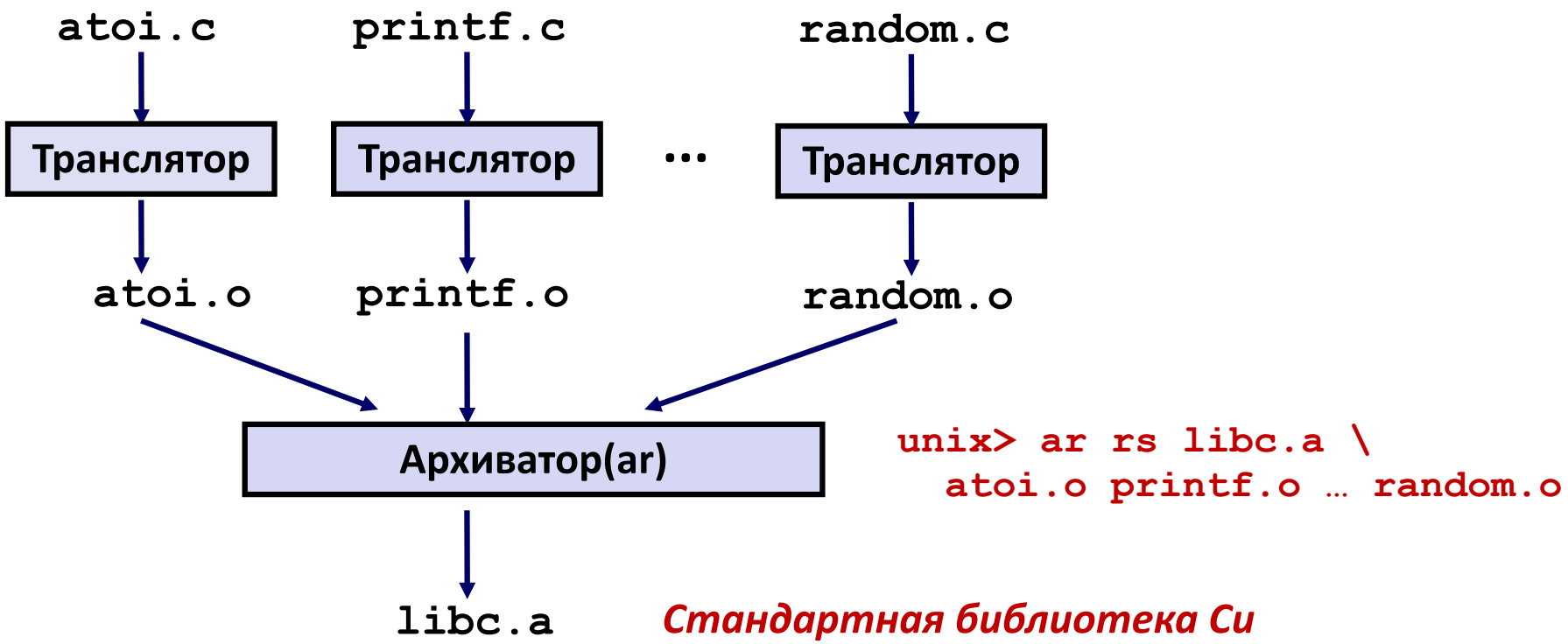
- **Как упаковать функции, обычно используемые программистами?**
  - Математика, ввод/вывод, управление памятью, работа со строками, и т.п.

- **Очевидные и неудобные возможности связывания:**
  - **Вариант 1:** Поместить все функции в один исходный файл
    - Программисты привязывают большой объект к своим программам
    - Неэффективное использование времени и пространства
  - **Вариант 2:** Поместить каждую функцию в отдельный исходный файл
    - Программист явно связывает соответствующие файлы со своей программой
    - Более эффективно, но затруднительно

Решение: статические библиотеки

- **Статические библиотеки (архивные файлы `.a`)**
  - Связанные перемещаемые объектные модули стыкуются в один файл с индексом (*архив*).
  - Редактор связей расширяется так, чтобы разрешать неопределённые внешние ссылки в одном или нескольких архивах.
  - Если модуль из архива разрешает ссылку, то он связывается в исполняемый файл.

Создание статических библиотек




```
unix> ar rs libc.a \
  atoi.o printf.o … random.o
```

Стандартная библиотека Си

- Архиватор допускает помодульное изменение
- Перекомпиляция функции сопровождается изменением и заменой объектного файла в архиве.

Популярные библиотеки

`libc.a` (стандартная библиотека Си)

- Архив размером 8 MB из 1392 объектных файлов.
- ввод/вывод, распределение памяти, обработка сигналов, обработка строк, дата и время, случайные числа, целосисленная математика

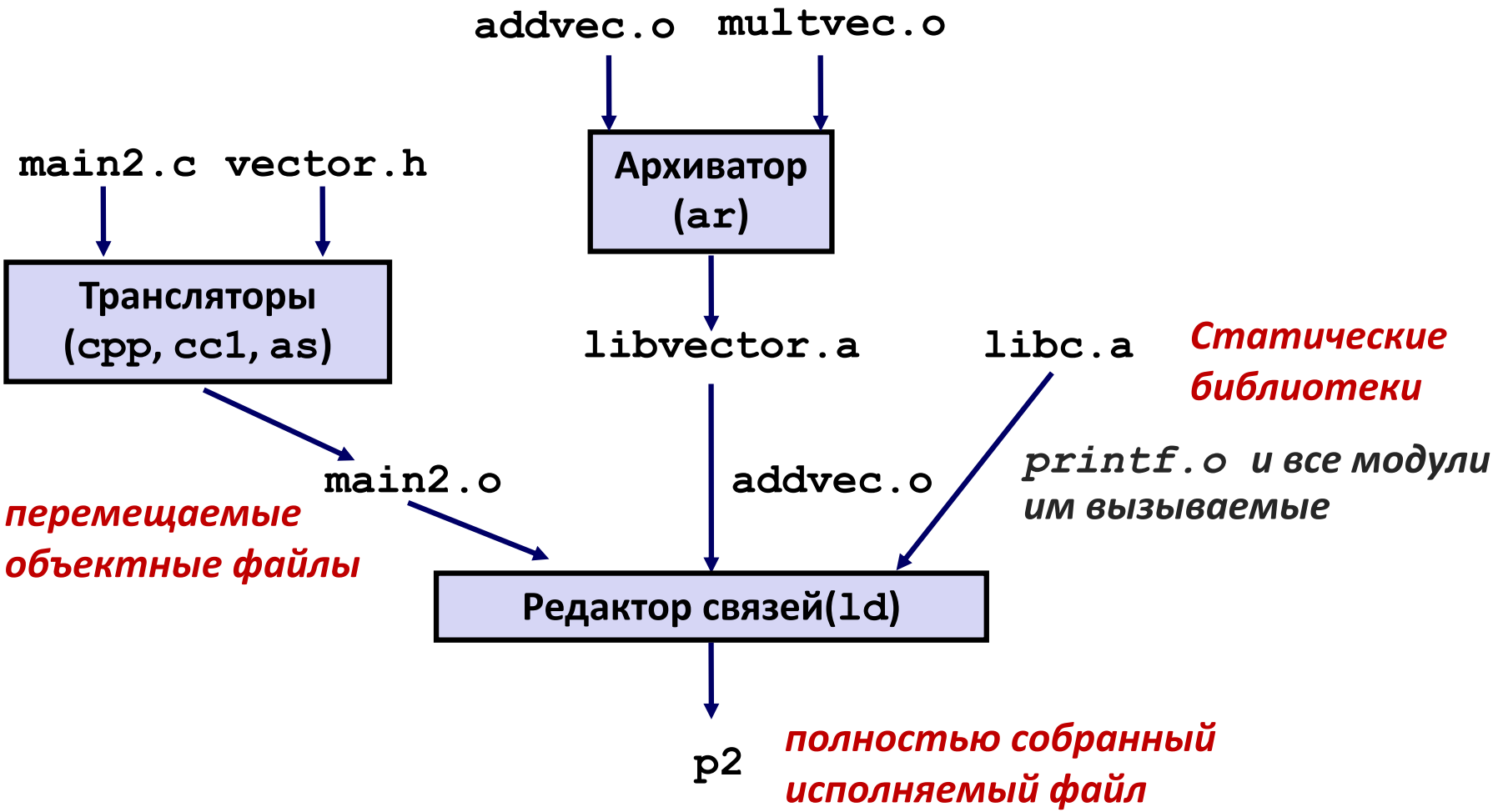
`libm.a` (математическая библиотека Си)

- Архив размером 1 MB из 401 объектного файла
- математика с плавающей точкой (sin, cos, tan, log, exp, sqrt, …)

```
% ar -t /usr/lib/libc.a | sort
…
fork.o
…
fprintf.o
fpu_control.o
fputc.o
freopen.o
fscanf.o
fseek.o
fstab.o
…
```

```
% ar -t /usr/lib/libm.a | sort
…
e_acos.o
e_acosf.o
e_acosh.o
e_acoshf.o
e_acoshl.o
e_acosl.o
e_asin.o
e_asinf.o
e_asinl.o
…
```

Связывание со статическими библиотеками

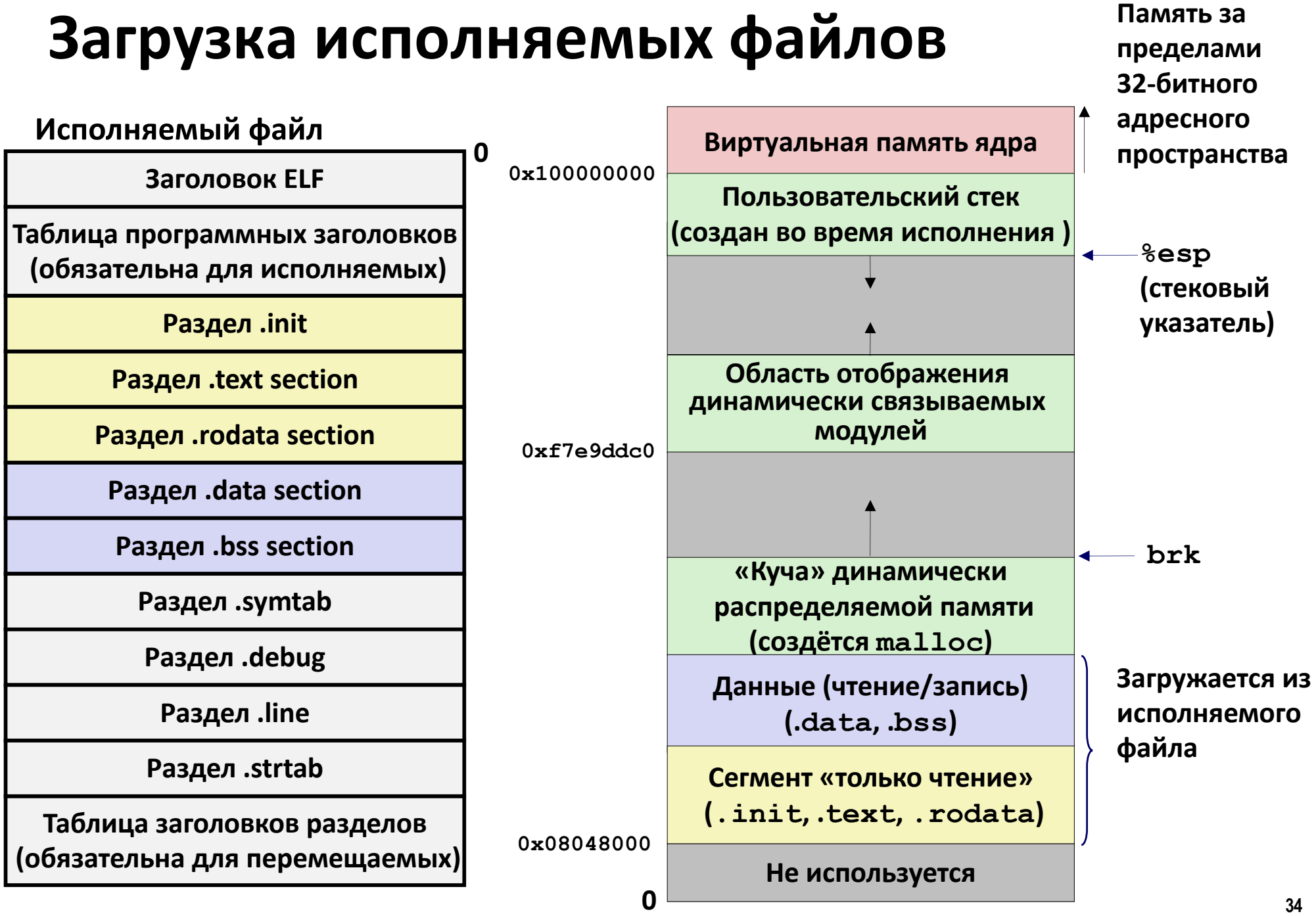


Использование статических библиотек

- **Алгоритм разрешения внешних ссылок редактором связей:**
  - Сканировать `.o` файлы и `.a` в порядке, указанном в командной строке.
  - Вести список неразрешённых ссылок.
  - В каждом новом `.o` или `.a` файле, пытаться разрешить каждую неразрешённую ссылку из списка символами определёнными в новом файле.
  - Если к завершению сканирования в списке неразрешённых останутся элементы, то выдать ошибку.

- **Проблема:**
  - Порядок указания в командной строке имеет значение!
  - ```
    unix> gcc -L. libtest.o -lmine
    unix> gcc -L. -lmine libtest.o
    libtest.o: In function `main':
    libtest.o(.text+0x4): undefined reference to `libfun'
    ```
    ```

Загрузка исполняемых файлов



Разделяемые библиотеки – 1

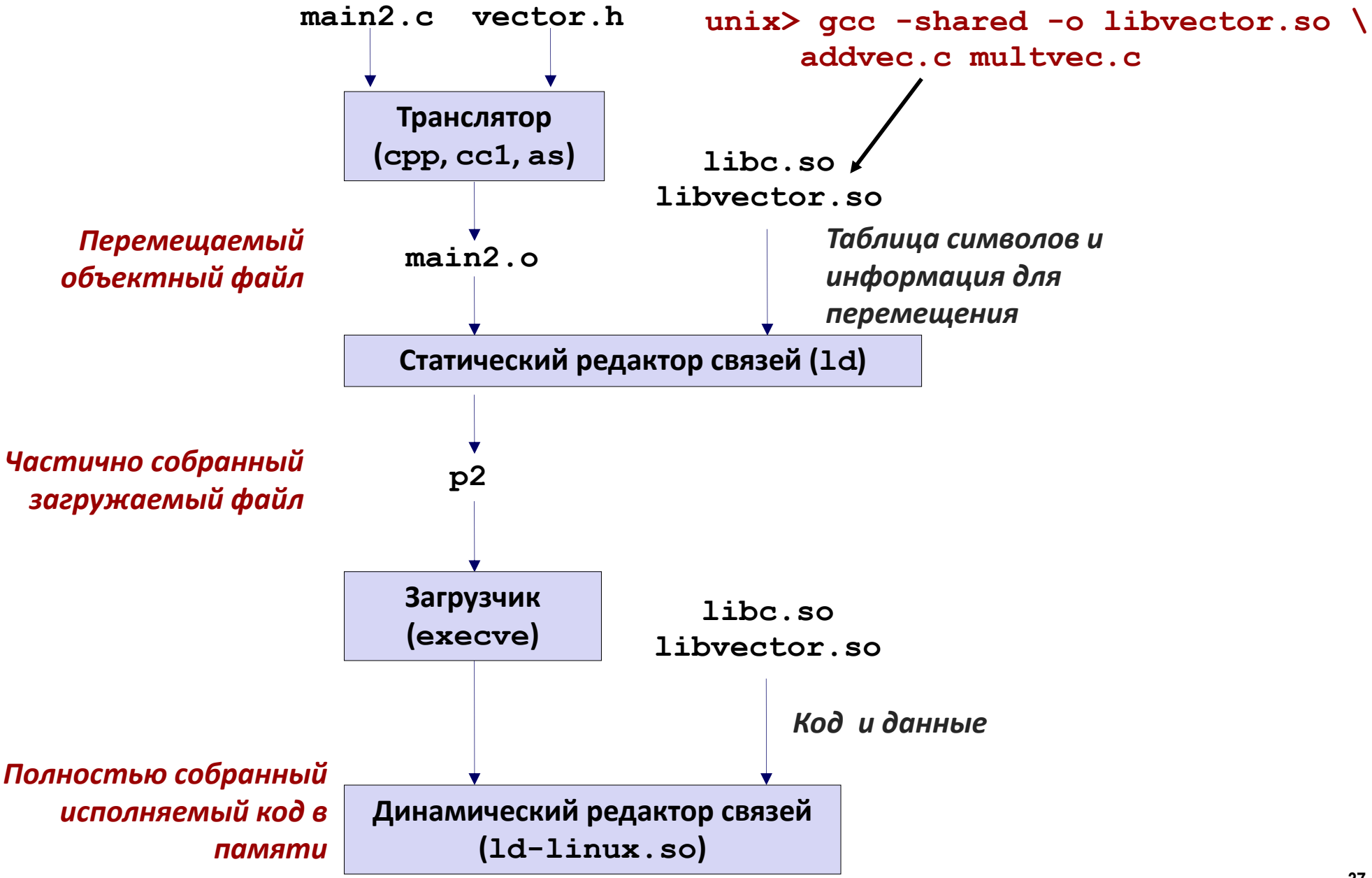
- **Статические библиотеки имеют недостатки:**
  - Тиражирование хранимого кода (каждой функции необходимы стандартная libc)
  - Тиражирование исполняемого кода
  - Небольшие исправления в системных библиотеках требуют явной пересборки каждого приложения

- **Решение: разделяемые библиотеки (Shared Libraries)**
  - Файлы содержащие код и данные, загружаемые и связываемые к приложением *динамически,* либо во *время загрузки*, либо во *время исполнения*
  - Другие названия: динамически связываемые бибилиотеки, DLL, `.so` файлы

Разделяемые библиотеки – 2

- **Динамическое связывание может производиться во время загрузки и начала исполнения.**
  - Обычный случай для Linux, выполняется автоматически динамическим редактором связей (**`ld-linux.so`**).
  - Стандартная библиотека Си (**`libc.so`**) связывается динамически.
- **Динамическое связывание может производиться во время исполнения.**
  - В Linux, это выполняется вызовами интерфейса **`dlopen()`**
    - Высокопроизводительные веб-сервера
    - Посредничество при вызове процедур во время исполнения.
- **Код и данные разделяемых библиотек могут переиспользоваться несколькими процессами**
  - С использованием механизмов виртуальной памяти

Динамическое связывание при загрузке



Динамическое связывание при исполнении

```
#include <stdio.h>
#include <dlfcn.h>

int x[2] = {1, 2};
int y[2] = {3, 4};
int z[2];

int main()
{
    void *handle;
    void (*addvec)(int *, int *, int *, int);
    char *error;

    /* Динамическая загрузка библиотеки содержащей addvec() */
    handle = dlopen("./libvector.so", RTLD_LAZY);
    if (!handle) {
        fprintf(stderr, "%s\n", dlerror());
        exit(1);
    }
```

Динамическое связывание при исполнении

```
    ...

    /* взятие указателя на только что загруженную addvec() */
    addvec = dlsym(handle, "addvec");
    if ((error = dlerror()) != NULL) {
        fprintf(stderr, "%s\n", error);
        exit(1);
    }

    /* теперь можно вызывать addvec() как любую другую функцию*/
    addvec(x, y, z, 2);
    printf("z = [%d %d]\n", z[0], z[1]);

    /* выгрузка разделяемой бибилиотеки */
    if (dlclose(handle) < 0) {
        fprintf(stderr, "%s\n", dlerror());
        exit(1);
    }
    return 0;
}
```

Пример: «библиотечное посредничество»

- **Library interpositioning - мощная техника связывания. Позволяет программисту перехватывать вызовы произвольных функций**
- **Посредничество может применяться во время…**

  …компиляции исходного кода,

  … статического связывания перемещаемых объектных файлов в исполняемый файл,

  …загрузки исполняемого файла в память, динамического связывания и исполнения

Некоторые применения посредничества

- **Безопасность**
  - Безопасный контейнер (песочница)
    - Опосредует обращения к стандартным функциям libc.
  - Фоновое шифрование
    - Автоматическое шифрование изначально нешифроввнных сетевых соединений.
- **Наблюдение и профилирование**
  - Подсчёт количества вызовов функций
  - Определение мест и аргументов вызова функций
  - Трассировка malloc
    - Обнаружение утечек памяти
    - **Трассировка адресов**

Пример программы

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <malloc.h>

int main()
{
    free(malloc(10));
    printf("hello, world\n");
    exit(0);
}
```

hello.c

- Цель: трассировка адресов и размеров выделяемых и освобождаемых блоков, без изменения исходного кода.
- Три решения: опосредование функций `malloc` и `free` во время компиляции, статического связывания и загрузки/исполнения.

Посредничество во время компиляции

```
#ifdef COMPILETIME
/* Посредничество при компиляции с использованием
 * препроцессора. Местный malloc.h определяет обёртки для
 * malloc (free) как mymalloc (myfree) соответственно.
 */

#include <stdio.h>
#include <malloc.h>

/*
 * mymalloc - обёртка функции malloc
 */
void *mymalloc(size_t size, char *file, int line)
{
    void *ptr = malloc(size);
    printf("%s:%d: malloc(%d)=%p\n", file, line, (int)size,
ptr);
    return ptr;
}
```

mymalloc.c

Посредничество во время компиляции

```
#define malloc(size) mymalloc(size, __FILE__, __LINE__ )
#define free(ptr) myfree(ptr, __FILE__, __LINE__ )

void *mymalloc(size_t size, char *file, int line);
void myfree(void *ptr, char *file, int line);
```

malloc.h

```
linux> make helloc
gcc -O2 -Wall -DCOMPILETIME -c mymalloc.c
gcc -O2 -Wall -I. -o helloc hello.c mymalloc.o
linux> make runc
./helloc
hello.c:7: malloc(10)=0x501010
hello.c:7: free(0x501010)
hello, world
```

Посредничество во время связывания

```
#ifdef LINKTIME
/* Посредничество во время связывания с использованием флага
 * статического редактора связей (ld) "--wrap symbol" */

#include <stdio.h>

void *__real_malloc(size_t size);
void __real_free(void *ptr);

/*
 * __wrap_malloc - обёртка функции malloc
 */
void *__wrap_malloc(size_t size)
{
    void *ptr = __real_malloc(size);
    printf("malloc(%d) = %p\n", (int)size, ptr);
    return ptr;
}
```

mymalloc.c

Посредничество во время связывания

```
linux> make hellol
gcc -O2 -Wall -DLINKTIME -c mymalloc.c
gcc -O2 -Wall -Wl,--wrap,malloc -Wl,--wrap,free \
-o hellol hello.c mymalloc.o
linux> make runl
./hellol
malloc(10) = 0x501010
free(0x501010)
hello, world
```

- **Флаг “`-Wl`” передаёт аргумент редактору связей**
- **“`--wrap,malloc`” требует разрешения ссылок особым образом :**
  - Упоминание `malloc` должно разрешаться как `__wrap_malloc`
  - Упоминание `__real_malloc` должно разрешаться как `malloc`

Посредничество во время загрузки/исполнения

```
#ifdef RUNTIME
 /* Опосредование malloc и free на основе LD_PRELOAD
  * механизма динамического редактора связей (ld-linux.so)
  */
#define _GNU_SOURCE
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dlfcn.h>

void *malloc(size_t size)
{
    static void *(*mallocp)(size_t size);
    char *error;
    void *ptr;

    /* получение адреса libc malloc */
    if (!mallocp) {
        mallocp = dlsym(RTLD_NEXT, "malloc");
        if ((error = dlerror()) != NULL) {
            fputs(error, stderr);
            exit(1);
        }
    }
    ptr = mallocp(size);
    printf("malloc(%d) = %p\n", (int)size, ptr);
    return ptr;
}
```

mymalloc.c

Посредничество при загрузке/исполнении

```
linux> make hellor
gcc -O2 -Wall -DRUNTIME -shared -fPIC -o mymalloc.so mymalloc.c
gcc -O2 -Wall -o hellor hello.c
linux> make runr
(LD_PRELOAD="/usr/lib64/libdl.so ./mymalloc.so" ./hellor)
malloc(10) = 0x501010
free(0x501010)
hello, world
```

- **Переменная среды `LD_PRELOAD` указывает динамическому редактору связей сначала разрешать упоминания (например для `malloc`) в `libdl.so` и `mymalloc.so`**
  - `libdl.so` необходима для разрешения символов функций **`dlopen`**

Посредничество: сводка

- **Во время компиляции**
  - Видимые вызовы malloc/free с помощью макрорасширений преобразуются в вызовы mymalloc/myfree
- **Во время связывания**
  - Используется трюк редактора связей для специального разрешения упоминаний
    - malloc → __wrap_malloc
    - __real_malloc → malloc
- **Во время загрузки/исполнения**
  - Реализует специальную версию malloc/free, которая использует динамическое связывание для загрузки библиотечных malloc/free с другими именами