Лекция 0x13

20 апреля

Работа с общими функциями

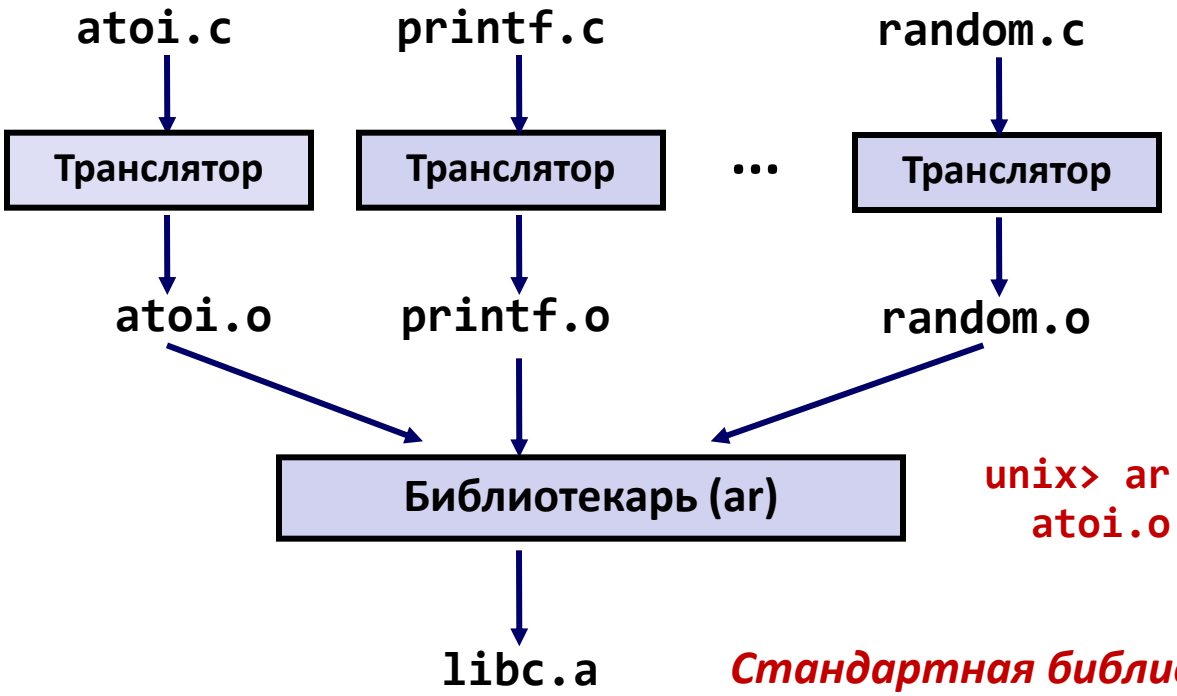
- Как следует размещать функции, часто используемые разными программами?
  - Математика, I/O, управление памятью, работа со строками, и т.д.

- Исходя из порядка компоновки:
  - **Вариант 1:** Поместить все функции в один файл
    - Компонуемся с одним большим объектным файлом
    - Неэффективно
  - **Вариант 2:** Поместить каждую функцию в отдельный файл
    - Во время компоновки явно указываем нужные объектные файлы
    - Более эффективно, но крайне неудобно для программиста

Решение: статические библиотеки

- Статические библиотеки (`.a` – файлы-архивы)
  - Близкие по смыслу перемещаемые объектные файлы группируются в одном файле, в т.н. называемом архиве.
  - Компоновщику указывают набор архивов для того, чтоб он попытался найти в них код с недостающими символами.
  - Если содержащийся в архиве файл помогает разрешить символ, то его автоматически включают в компоновку.

Создание статической библиотеки




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

Стандартная библиотека Си

- Библиотекарь позволяет выполнять инкрементальное обновление
- Повторная компиляция функции и замена соответствующего о-файла в библиотеке.

Часто используемые библиотеки

`libc.a` (Стандартная библиотека Си)

- 8 МБ архив из 1392 объектных файлов.
- I/O, управление памятью, работа со строками, даты и время, случайные числа, целочисленные математические функции

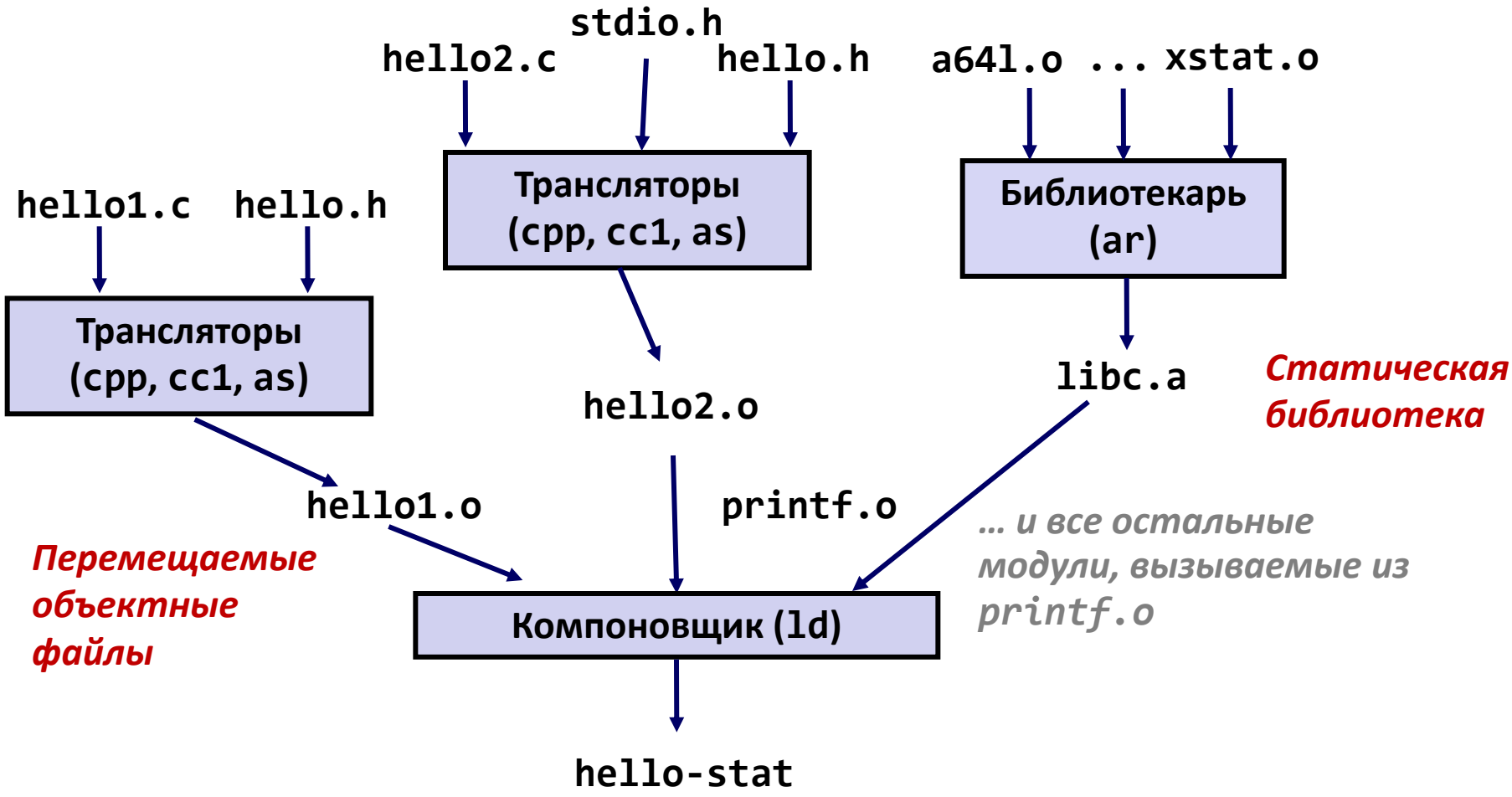
`libm.a` (Математическая библиотека Си)

- 1 МБ архив из 401 объектных файлов.
- Математические функции над числами 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
…
```

Компоновка со статическими библиотеками



Использование статических библиотек

- Алгоритм компоновщика для разрешения внешних ссылок :
  - Просматриваем **.o** файлы и **.a** файлы в порядке их следования в командной строке.
  - В процессе просмотра, поддерживаем список неразрешенных в данный момент символов.
  - Как только появляется новый **.o** или **.a** файл, пытаемся разрешить каждый еще неразрешенный символ среди символов, определенных в найденном файле.
  - Ошибка линковки, если по окончании просмотра остался хоть один неразрешенный символ.
- Проблема:
  - Важен порядок объектных файлов в командной строке!
  - Решение: помещать все библиотеки в конец командной строки.

```
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 исполняемого объектного файла

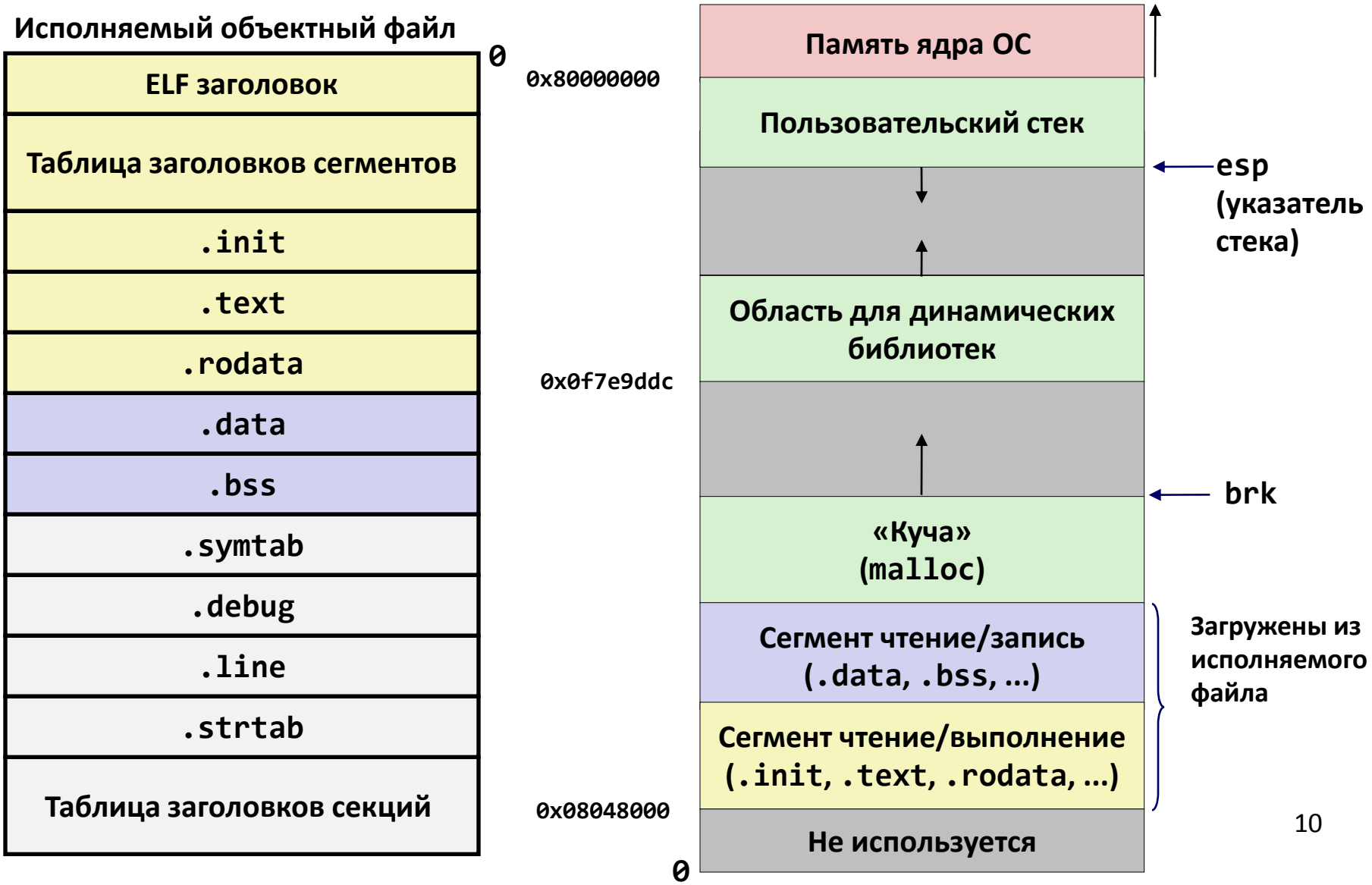
- Подготовка адресного пространства для запускаемой программы
- Просмотр у заданного файла таблицы заголовков сегментов
  - Для каждого сегмента типа LOAD загружаем указанные байты из файла на указанные адреса памяти
- Передаем управление на точку входа в программу (символ `_start`)

```
typedef struct {
   Elf32_Word p_type;   /* LOAD, DYNAMIC, INTERP, PHDR, NULL, ... */
   Elf32_Off  p_offset; /* Смещение от начала файла */
   Elf32_Addr p_vaddr;  /* Начальный (базовый) адрес в памяти */
   Elf32_Addr p_paddr;  /* Не используется */
   Elf32_Word p_filesz; /* Размер в файле в байтах */
   Elf32_Word p_memsz;  /* Размер в памяти в байтах */
   Elf32_Word p_flags;  /* R/W/X */
   Elf32_Word p_align;  /* Величина выравнивания*/
} Elf32_Phdr;
```

Связь секций и сегментов

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ readelf -l hello-static

Elf file type is EXEC (Executable file)
Entry point 0x8048a8d
There are 6 program headers, starting at offset 52

Program Headers:
  Type           Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD           0x000000 0x08048000 0x08048000 0xa3a31 0xa3a31 R E 0x1000
  LOAD           0x0a3f3c 0x080ecf3c 0x080ecf3c 0x01124 0x02608 RW  0x1000
  NOTE           0x0000f4 0x080480f4 0x080480f4 0x00044 0x00044 R   0x4
  TLS            0x0a3f3c 0x080ecf3c 0x080ecf3c 0x00010 0x00028 R   0x4
  GNU_STACK      0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00000 0x00000 RW  0x10
  GNU_RELRO      0x0a3f3c 0x080ecf3c 0x080ecf3c 0x000c4 0x000c4 R   0x1

 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     ... .init .text .fini .rodata ...
   01     ... .init_array .fini_array .data .bss
```

Загрузка исполняемого объектного файла



Динамические (разделяемые) библиотеки

- Статические библиотеки имеют следующие недостатки:
  - Многократное копирование кода в построенных исполняемых файлах (всем нужно std libc)
  - Копии кода в исполняющихся программах
  - Любое исправление в системных библиотеках требует повторной компоновки для **всех** приложений

```
snoop@earth:~/samples$ gcc -static -o hello-static hello1.o hello2.o
snoop@jezek:~/samples$ ls -l hello-static
-rwxrwxr-x 1 snoop snoop 743476 Apr 12 09:15 hello-static
snoop@earth:~/samples$ gcc -o hello hello1.o hello2.o
snoop@jezek:~/samples$ ls -l hello
-rwxrwxr-x 1 snoop snoop 7404 Apr 12 09:06 hello
```

- Способ преодолеть эти недостатки: динамические библиотеки (shared libraries)
  - Объектные файлы, в которых содержатся код и данные компонуются с приложением *динамически*, либо во время *загрузки*, либо во время *выполнения*
  - Практикуются названия: DLL-ки, `.so`-шники

Drepper U. How To Write Shared Libraries. — 2011. https://www.akkadia.org/drepper/dsohowto.pdf

Динамические (разделяемые) библиотеки

- Динамическая компоновка происходит когда исполняемый файл в первый раз загружается и начинает работать (компоновка во время загрузки).
  - В Linux наиболее распространено, автоматически выполняется динамическим компоновщиком (`ld-linux.so`).
  - Стандартная библиотека языка Си (`libc.so`) обычно компонуется динамически.
- Динамическая компоновка может происходить когда программа уже работает (динамическая загрузка библиотек).

```
#include <dlfcn.h>
void *dlopen(const char *filename, int flag);
```

- Функции динамических библиотек могут одновременно использоваться несколькими процессами.

Проблемы

- Динамическая библиотека может быть размещена в произвольном месте памяти
- Как обращаться из основной программы к переменным и функциям, размещение которых в памяти будет известно только в момент запуска программы?
  - До момента компоновки неизвестно, куда ведет ссылка – в перемещаемый код другой единицы трансляции или в динамическую библиотеку
  - Перемещаемый код с ссылками уже построен, в нем могут меняться только значения операндов (перебазируемые ссылки)
    - В случае динамической загрузки, адреса размещения будут определены еще позже – в уже работающей программе
- Как строить код динамической библиотеки, когда до момента начала выполнения ее кода неизвестно, по каким адресам будут размещены ее собственные функции и данные

hello1.c

```
#include "hello.h"

char *buf = "Hello, world!\n";

int main() {
  int ret_code = 0;
  func();
  return ret_code;
}
```

hello2.c

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

void func() {
   printf("%s", buf);
}
```

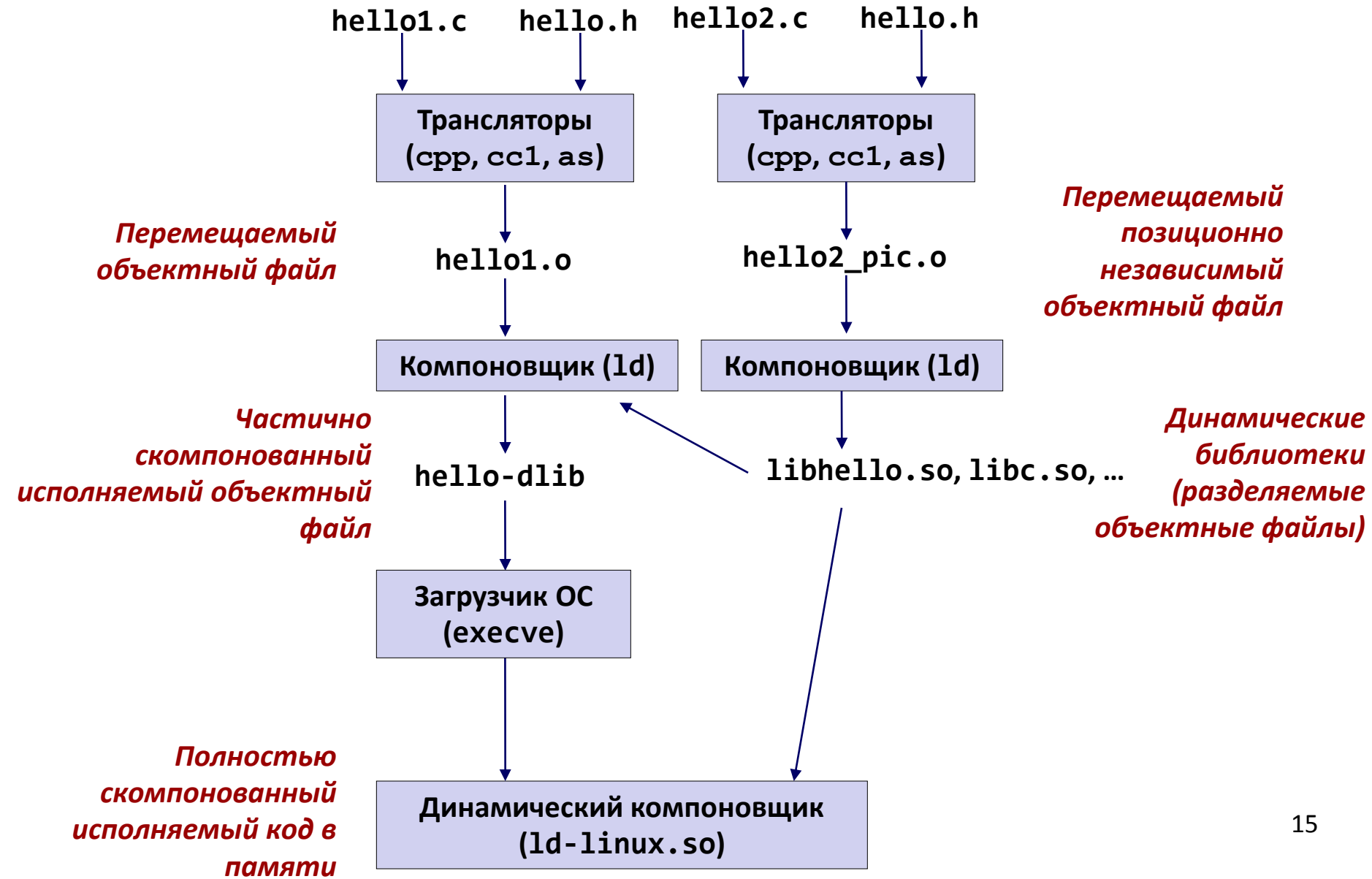
hello.h

```
extern void func();

extern char* buf;
```

Makefile

```
all: hello-dlib

hello-dlib: hello1.o libhello.so
	gcc -o hello-dlib hello1.o libhello.so

libhello.so: hello2_pic.o
	gcc -shared -o libhello.so hello2_pic.o

hello2_pic.o: hello.h hello2.c
	gcc -c -fPIC -O3 -D_FORTIFY_SOURCE=0 -o hello2_pic.o hello2.c

hello1.o: hello.h hello1.c
	gcc -c -O3 -D_FORTIFY_SOURCE=0 -o hello1.o hello1.c
```

Динамическая компоновка времени загрузки



Позиционно независимый код в IA-32

- Абсолютные адреса неизвестны, но известны смещения.
  - Можно обращаться к функциям своего модуля.
  - В IA-32 нет возможности обратиться к данным по смещению относительного текущего значения счетчика команд. Такая возможность появится в x86_64.
- Код и данные размещаются в памяти друг за другом, в сегмент данных входит служебная таблица – Global Offset Table (GOT).
- GOT содержит указатели (абсолютные адреса) на внешние функции и переменные. Их адреса становятся известны не ранее этапа динамической компоновки при запуске программы.
- Динамический компоновщик заполняет GOT необходимыми значениями.

Как заставить ассемблер построить позиционно независимый код?

hello.h

```
extern void func();

extern char* buf;
```

hello2.c

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

void func() {
   printf("%s", buf);
}
```

Синтаксис ассемблера gas оставлен без изменений.

```
func:
   push    ebx
   call    __x86.get_pc_thunk.bx
   add     ebx, OFFSET FLAT:_GLOBAL_OFFSET_TABLE_
   sub     esp, 16
   mov     eax, DWORD PTR buf@GOT[ebx]
   push    DWORD PTR [eax]
   lea     eax, .LC0@GOTOFF[ebx]
   push    eax
   call    printf@PLT
   add     esp, 24
   pop     ebx
   ret
```

Определенные ключевые слова указывают ассемблеру на необходимость создания ссылок типа ***R_386_GOTPC***, ***R_386_GOT32***, ***R_386_GOTOFF***, ***R_386_PLT***

```
...
hello2_pic.s: hello.h hello2.c
	gcc -S -masm=intel -fPIC -O3 -D_FORTIFY_SOURCE=0 -o hello2_pic.s hello2.c

hello2_pic.o: hello2_pic.s
	gcc -c -o hello2_pic.o hello2_pic.s
...
```

Makefile был модифицирован для получения ассемблерного кода

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -r -M intel hello2_pic.o
hello2_pic.o:     file format elf32-i386


Disassembly of section .text:

00000000 <func>:
   0:   53                      push   ebx
   1:   e8 fc ff ff ff          call   2 <func+0x2>
                        2: R_386_PC32   __x86.get_pc_thunk.bx
   6:   81 c3 02 00 00 00       add    ebx,0x2
                        8: R_386_GOTPC  _GLOBAL_OFFSET_TABLE_
   c:   83 ec 10                sub    esp,0x10
   f:   8b 83 00 00 00 00       mov    eax,DWORD PTR [ebx+0x0]
                        11: R_386_GOT32 buf
  15:   ff 30                   push   DWORD PTR [eax]
  17:   8d 83 00 00 00 00       lea    eax,[ebx+0x0]
                        19: R_386_GOTOFF        .LC0
  1d:   50                      push   eax
  1e:   e8 fc ff ff ff          call   1f <func+0x1f>
                        1f: R_386_PLT32 printf
  23:   83 c4 18                add    esp,0x18
  26:   5b                      pop    ebx
  27:   c3                      ret
```

Как обратиться к данным по известному смещению относительно счетчика команд, если это не x86_64?

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -r -M intel hello2_pic.o
hello2_pic.o:     file format elf32-i386


Disassembly of section .text:

00000000 <func>:
   0:   53                      push   ebx
   1:   e8 fc ff ff ff          call   2 <func+0x2>
                        2: R_386_PC32   __x86.get_pc_thunk.bx
   6:   81 c3 02 00 00 00       add    ebx,0x2
                        8: R_386_GOTPC  _GLOBAL_OFFSET_TABLE_
   c:   83 ec 10
   f:   8b 83 00 00 0

  15:   ff 30
  17:   8d 83 00 00 0

  1d:   50
  1e:   e8 fc ff ff f

  23:   83 c4 18
  26:   5b
  27:   c3                      ret
```

- Тип перебазирования R_386_GOTPC
  новое значение ссылки = GOT + A – P
- *GOT* – абсолютный адрес памяти, связанный с некоторым элементом глобальной таблицы смещений
- *A* – дополнительное слагаемое (*addend*), хранимое непосредственно в байтах ссылки
- *P* – абсолютный адрес ссылки
- Наличие такого типа перебазирования в файле требует от компоновщика создавать GOT
- Новое значение ссылки – расстояние до GOT. После сложения EBX будет указывать на некоторый элемент GOT.

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -r -M intel hello2_pic.o
hello2_pic.o:     file fo



Disassembly of section .t

00000000 <func>:
   0:   53                      
   1:   e8 fc ff ff ff          
                        2
   6:   81 c3 02 00 00 00
                        8
   c:   83 ec 10                        sub    esp,0x10
   f:   8b 83 00 00 00 00               mov    eax,DWORD PTR [ebx+0x0]
                        11: R_386_GOT32 buf
  15:   ff 30                           push   DWORD PTR [eax]
  17:   8d 83 00 00 00 00               lea    eax,[ebx+0x0]
                        19: R_386_GOTOFF        .LC0
  1d:   50                              push   eax
  1e:   e8 fc ff ff ff                  call   1f <func+0x1f>
                        1f: R_386_PLT32 printf
  23:   83 c4 18                        add    esp,0x18
  26:   5b                              pop    ebx
  27:   c3                              ret
```

- Тип перебазирования R_386_GOT32 ***новое значение ссылки = G + A***
- *G* – смещение в GOT, по которому должен быть размещен адрес символа
- *A* – дополнительное слагаемое (addend), хранимое непосредственно в байтах ссылки
- Наличие такого типа перебазирования в файле требует от компоновщика создавать GOT
- Новое значение ссылки – смещение от базового адреса _GLOBAL_OFFSET_TABLE_ до необходимого элемента

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -r -M intel hello2_pic.o
hello2_pic.o:     file fo


Disassembly of section .t

00000000 <func>:
   0:   53
   1:   e8 fc ff ff ff
                        2
   6:   81 c3 02 00 00 00
                        8
   c:   83 ec 10
   f:   8b 83 00 00 00 00
                        1
  15:   ff 30                   push   DWORD PTR [eax]
  17:   8d 83 00 00 00 00       lea    eax,[ebx+0x0]
                        19: R_386_GOTOFF        .LC0
  1d:   50                      push   eax
  1e:   e8 fc ff ff ff          call   1f <func+0x1f>
                        1f: R_386_PLT32 printf
  23:   83 c4 18                add    esp,0x18
  26:   5b                      pop    ebx
  27:   c3                      ret
```

- Тип перебазирования R_386_GOTOFF
  новое значение ссылки = S + A – GOT
- *S* – абсолютный адрес памяти, которому символ соответствует после перемещения
- GOT – абсолютный адрес памяти, связанный с некоторым элементом глобальной таблицы смещений
- *A* – дополнительное слагаемое (addend), хранимое непосредственно в байтах ссылки
- Наличие такого типа перебазирования в файле требует от компоновщика создавать GOT
- Новое значение ссылки – смещение от базового адреса _GLOBAL_OFFSET_TABLE_ до адреса символа

```
noop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -M intel libhello.so
...
00000570 <func>:
 570:   53                      push   ebx
 571:   e8 ba fe ff ff          call   430 <__x86.get_pc_thunk.bx>
 576:   81 c3 8a 1a 00 00       add    ebx,0x1a8a
 57c:   83 ec 10                sub    esp,0x10
 57f:   8b 83 f4 ff ff ff       mov    eax,DWORD PTR [ebx-0xc]
 585:   ff 30                   push   DWORD PTR [eax]
 587:   8d 83 ac e5 ff ff       lea    eax,[ebx-0x1a54]
 58d:   50                      push   eax
 58e:   e8 6d fe ff ff          call   400 <printf@plt>
 593:   83 c4 18                add    esp,0x18
 596:   5b                      pop    ebx
 597:   c3                      ret
```

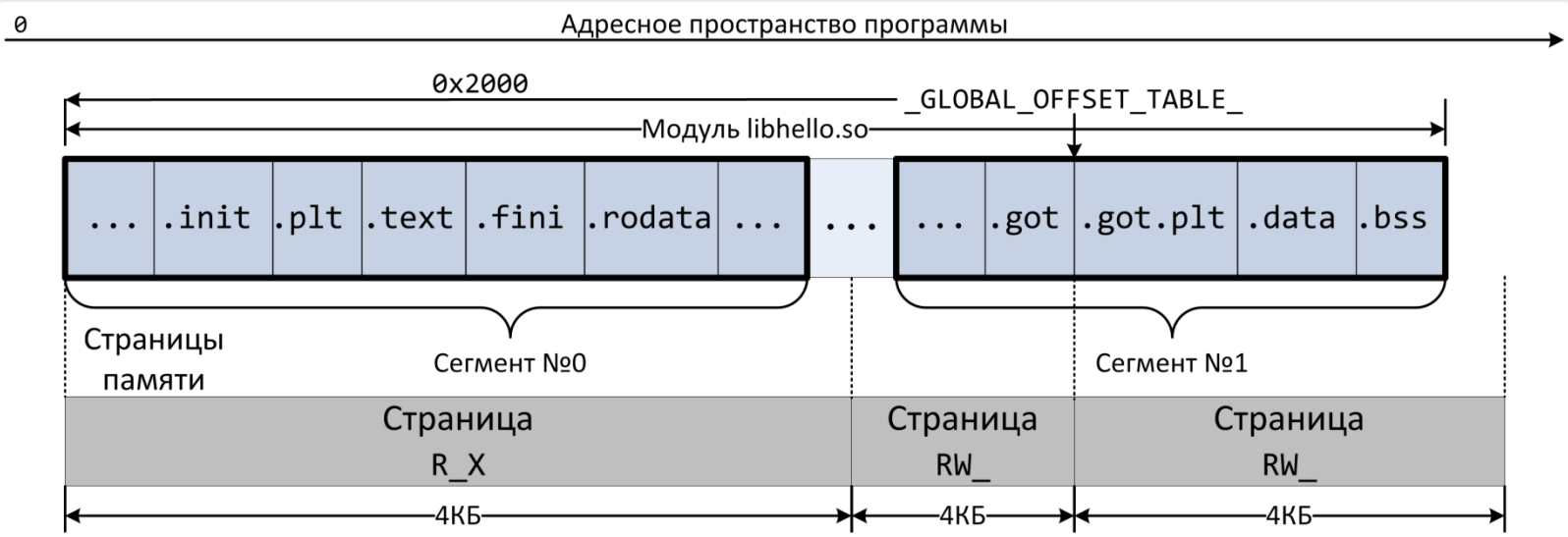
- Компоновщик создает GOT
- Все ссылки в коде обновляются
- Создается секция `.dynsym`, в которой собраны описания символов, используемых в динамической компоновке
- Создается секция `.rel.dyn`, в которой собраны описания новых ссылок, размещенных в GOT

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ readelf -s libhello.so

Symbol table '.dynsym' contains 14 entries:
   Num:    Value  Size Type    Bind   Vis      Ndx Name
...
     5: 00000000     0 NOTYPE  GLOBAL DEFAULT  UND buf
...
    13: 00000570    40 FUNC    GLOBAL DEFAULT   11 func
...

snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ readelf -r libhello.so

Relocation section '.rel.dyn' at offset 0x360 contains 9 entries:
 Offset     Info    Type            Sym.Value  Sym. Name
...
00001ff4  00000506 R_386_GLOB_DAT    00000000   buf
...
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -r -s -j .got libhello.so

libhello.so:     file format elf32-i386

Contents of section .got:
 1fe8 00000000 00000000 00000000 00000000  ................
 1ff8 00000000 00000000                    ........
```

- Тип перебазирования R_386_GLOB_DAT ***новое значение ссылки = S***
- *S* – абсолютный адрес памяти, связанный с символом

_GLOBAL_OFFSET_TABLE_ - 0xc = 0x2000 – 0xc = 0x1ff4

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ readelf -l libhello.so

Elf file type is DYN (Shared object file)
Entry point 0x430
There are 7 program headers, starting at offset 52

Program Headers:
  Type    Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  LOAD    0x000000 0x00000000 0x00000000 0x00634 0x00634 R E 0x1000
  LOAD    0x000efc 0x00001efc 0x00001efc 0x00120 0x00124 RW  0x1000
...
 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
   00     ... .init .plt .text .fini .rodata ...
   01     ... .got .got.plt .data .bss
...
```



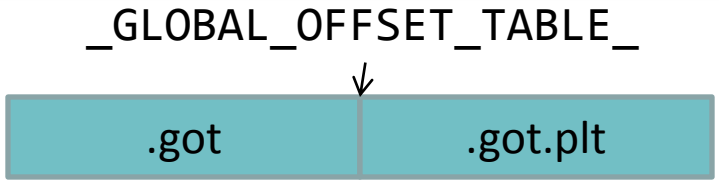
Procedure Linkage Table

- GOT должна быть полностью заполнена при динамической компоновке
  - Не все переменные могут реально использоваться
- Обращение к функциям происходит только через инструкцию `call` – возможно выполнить **ленивое связывание** (lazy binding)
  - В GOT вместо адреса реальной функции помещается адрес функции-заглушки
  - При первом вызове заглушка выполняет поиск адреса реальной функции, помещает его в GOT вместо своего и производит прыжок по этому адресу
  - Все следующие вызовы используют реальный адрес из GOT
- Заглушки размещаются в секции `.plt`
  - По соглашению при вызове заглушки `ebx` должен содержать базовый адрес GOT

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -r -M intel hello2_pic.o
hello2_pic.o:     file format elf32-i386


Disassembly of section .text:

00000000 <func>:
   0:   53 push   ebx
   1:   e8 fc ff ff ff
   2: R_386_PC32    __x
   6:   81 c3 02 00 00
   8: R_386_GOTPC   _GL
   c:   83 ec 10    sub
   f:   8b 83 00 00 00
  11: R_386_GOT32 buf
  15:   ff 30       push
  17:   8d 83 00 00 00
  19: R_386_GOTOFF .L
  1d:   50 push   eax
  1e:   e8 fc ff ff ff    call   1f <func+0x1f>
  1f: R_386_PLT32 printf
  23:   83 c4 18    add    esp,0x18
  26:   5b pop    ebx
  27:   c3 ret
```

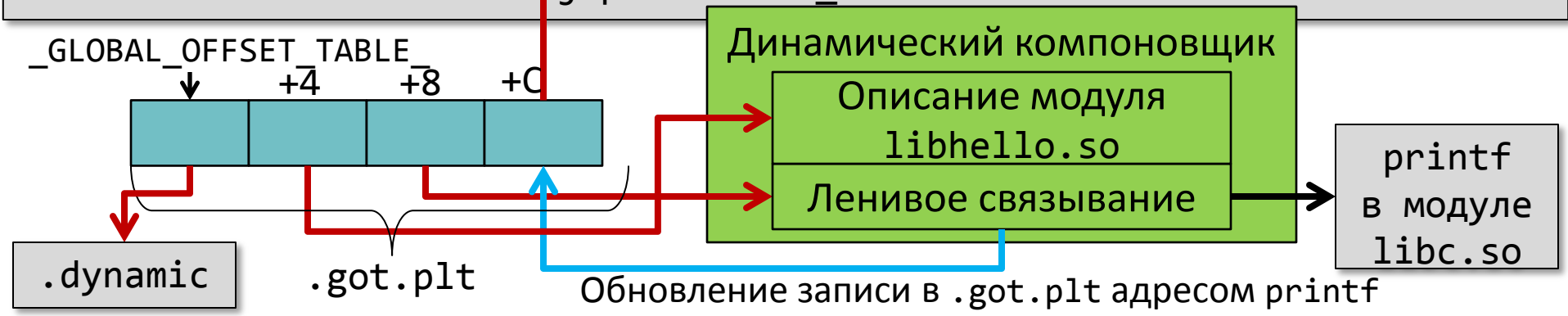
- Тип перебазирования R_386_PLT
  новое значение ссылки = L + A – P
- *L* – абсолютный адрес элемента PLT, используемого для вызова заданного символа
- *A* – дополнительное слагаемое (addend), хранимое непосредственно в байтах ссылки
- P – абсолютный адрес ссылки
- Наличие такого типа перебазирования в файле требует от компоновщика создавать PLT и дополнительный элемент в GOT
- Новое значение ссылки – смещение от данной инструкции до соответствующего элемента PLT

```
noop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -M intel libhello.so
...
00000400 <printf@plt>:
 400:   ff a3 0c 00 00 00jmp    DWORD PTR [ebx+0xc]
 406:   68 00 00 00 00   push   0x0
 40b:   e9 e0 ff ff ff   jmp    3f0 <_init+0x30>
...
00000570 <func>:
 570:   53 push   ebx
 571:   e8 ba fe ff ff   call   430 <__x86.get_pc_thunk.bx>
 576:   81 c3 8a 1a 00 00add    ebx,0x1a8a
 57c:   83 ec 10  sub    esp,0x10
 57f:   8b 83 f4 ff ff ffmov    eax,DWORD PTR [ebx-0xc]
 585:   ff 30     push   DWORD PTR [eax]
 587:   8d 83 ac e5 ff fflea    eax,[ebx-0x1a54]
 58d:   50 push   eax
 58e:   e8 6d fe ff ff   call   400 <printf@plt>
 593:   83 c4 18  add    esp,0x18
 596:   5b pop    ebx
 597:   c3 ret
```



Первый вызов функции printf

```
noop@jezek:~/samples/2017/linking$ objdump -d -M intel libhello.so
...
Disassembly of section .plt:

000003f0 <printf@plt-0x10>:
 3f0:   ff b3 04 00 00 00push   DWORD PTR [ebx+0x4]
 3f6:   ff a3 08 00 00 00jmp    DWORD PTR [ebx+0x8]
 3fc:   00 00           add    BYTE PTR [eax],al
 ...

00000400 <printf@plt>:
 400:   ff a3 0c 00 00 00jmp    DWORD PTR [ebx+0xc]
 406:   68 00 00 00 00   push   0x0
 40b:   e9 e0 ff ff ff   jmp    3f0 <_init+0x30>
```



```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ readelf -l hello-dlib

Elf file type is EXEC (Executable file)
Entry point 0x8048481
There are 9 program headers, starting at offset 52

Program Headers:
  Type    Offset   VirtAddr   PhysAddr   FileSiz MemSiz  Flg Align
  PHDR    0x000034 0x08048034 0x08048034 0x00120 0x00120 R E 0x4
  INTERP  0x000154 0x08048154 0x08048154 0x00013 0x00013 R   0x1
      [Requesting program interpreter: /lib/ld-linux.so.2]
  LOAD    0x000000 0x08048000 0x08048000 0x00708 0x00708 R E 0x1000
  LOAD    0x000f00 0x08049f00 0x08049f00 0x00124 0x00128 RW  0x1000
  DYNAMIC 0x000f0c 0x08049f0c 0x08049f0c 0x000f0 0x000f0 RW  0x4
...
 Section to Segment mapping:
  Segment Sections...
...
   02     .interp ... .plt .text .fini .rodata ...
   03     .init_array .fini_array .jcr .dynamic .got .got.plt .data .bss
   04     .dynamic
...
```

Загрузка динамически скомпонованного исполняемого файла

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ ldd hello-dlib
        linux-gate.so.1 =>  (0xb772d000)
        hello.so => /home/snoop/lib/hello.so (0xb7725000)
        libc.so.6 => /lib/i386-linux-gnu/libc.so.6 (0xb754f000)
        /lib/ld-linux.so.2 (0x80077000)
```

- Начальная часть загрузки происходит аналогично, но на `_start` не «идем»
- В секции `.interp` хранится имя программы-интерпретатора, т.е. динамического компоновщика.
  Указанный в секции интерпретатор загружается в память.
  - `ld-linux.so` скомпонован полностью статически
- Компоновщику передается адрес секции `.dynamic`, где собраны описания зависимостей, таблиц символов и других служебных данных, используемых в динамической компоновке.
  - Содержимое GOT, относящееся к переменным, обновляется при загрузке
- Необходимые динамические библиотеки ищутся по списку директорий из переменной окружения `LD_LIBRARY_PATH`
- Отработавший динамический компоновщик передает управление на точку входа

```
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ cp libhello.so $HOME/lib
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ export LD_LIBRARY_PATH=$HOME/lib
snoop@jezek:~/samples/2017/linking$ ./hello-dlib
Hello, world!
```

Далее: Аппаратура ЭВМ

- Организация аппаратного обеспечения компьютера
  - Физические основы, шины, периферийные устройства
- Организация памяти
  - НЖМД, кэш
  - Производительность
- Организация ЦПУ
  - Конвейер, система команд
- Многозадачная работа компьютера
  - Изоляция пользовательских программ