Лекция 3 Применение языка С для встраиваемых систем

План курса «Встраиваемые микропроцессорные системы»:

Лекция 1: Введение. Язык программирования С

Лекция 2: Язык программирования С. Стандартная библиотека языка С

Лекция 3: Применение языка С для встраиваемых систем

Лекция 4: Микроконтроллер

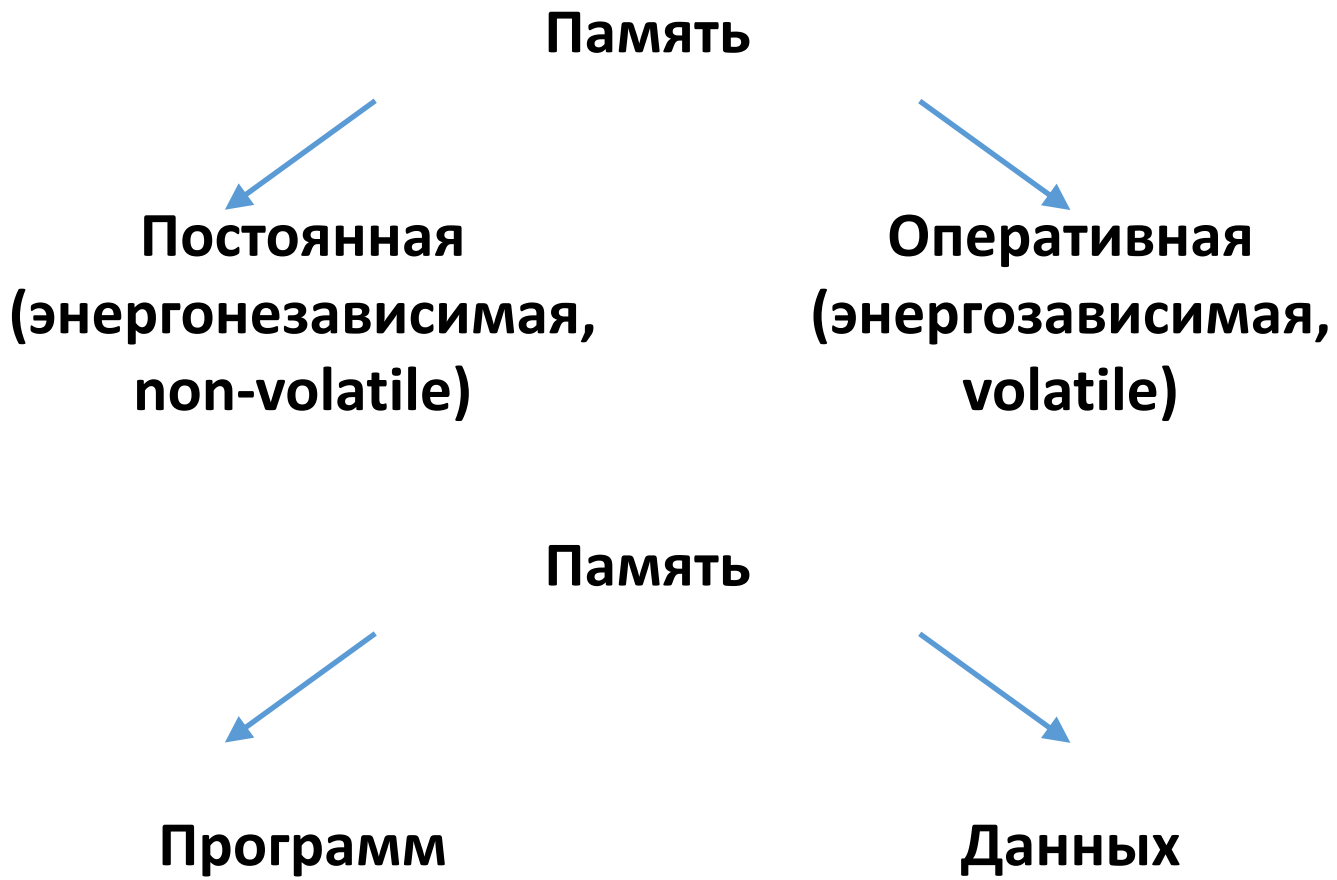
Лекция 5: Этапы разработки микропроцессорных систем

Лекция 6: Разработка и отладка программ для встраиваемых систем

Лекция 7: Архитектура программного обеспечения для встраиваемых систем

Лекция 8: Периферийные модули: DMA, USB, Ethernet

Классификация памяти



Постоянная память (ПЗУ) преимущественно используется как память программ, но также для данных – константы. Оперативная память (ОЗУ) преимущественно используется как память данных, но в высокопроизводительных системах и как память программ.

Модель памяти в языке С

Память данных

Статическая

выделение при компоновке,
глобальные переменные,
время жизни – время работы программы

```
int a;
int b = 42;
void main()
{
    static int j;
    …
}
```

Динамическая

выделение в процессе работы программы

Автоматическая

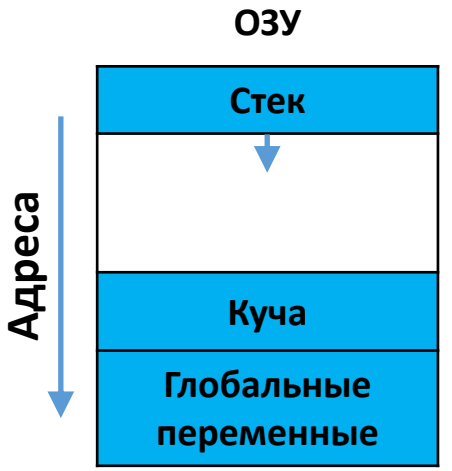
стековые переменные,
время жизни – внутри фигурных скобок

```
void main()
{
    int d;
    char e[100];
    …
}
```

Ручная

переменные из кучи,
время жизни – до вызова функции free

```
void main()
{
    char *p = malloc(100);
    …
    free(p);
}
```



Динамическая и статическая память

Статическая память

Выделение памяти при компоновке (Link Time).

+ Легко управлять. Быстрая инициализация.

+ Детерминированное поведение. Атомарность.

- Фиксированный размер.

Оптимально когда нужно использовать ресурсы одновременно.

```
#define ARR_SIZE 32
char x[ARR_SIZE]; // создание
char a[ARR_SIZE];
…
x = {…};          // инициализация
a = {…};
…
filter(x, a);     // исполнение
…
```

Динамическая память

Выделение памяти при исполнении (Run Time).

+ Совместное использование общих ресурсов.

+ Память может быть освобождена.

- Сложнее управлять.

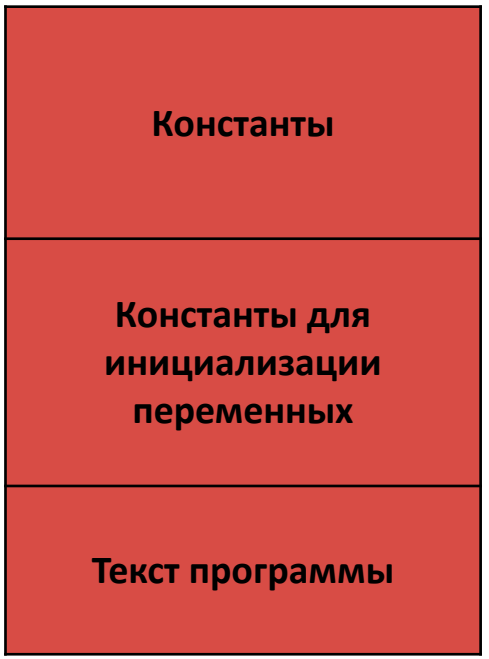
- Недетерминированное поведение. Не атомарность.

Оптимально когда неизвестен необходимый объем памяти или несколько задач использует одни и те же ресурсы.

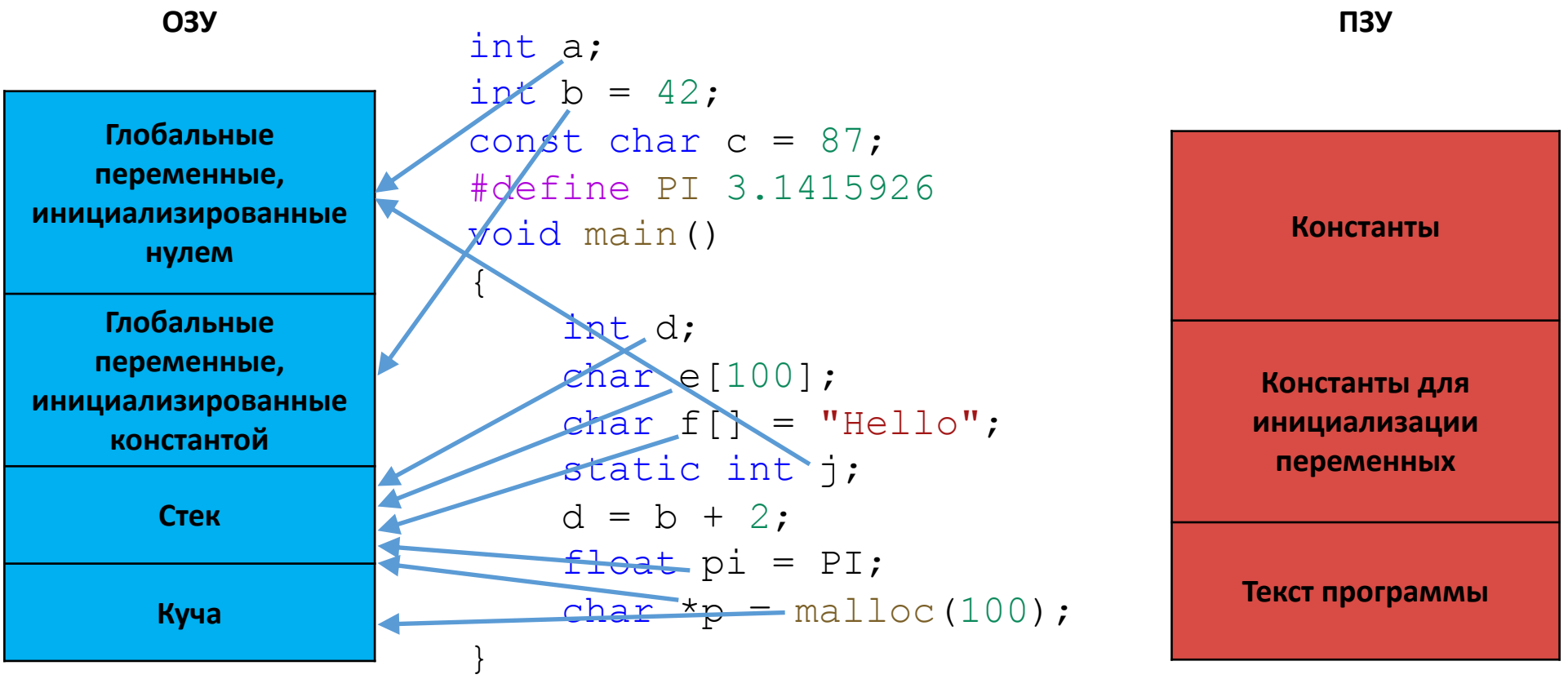
```
#define ARR_SIZE 32
char* x = malloc(ARR_SIZE); // создание
char* a = malloc(ARR_SIZE);
…
x = {…};                    // инициализация
a = {…};
…
filter(x, a);               // исполнение
…
free(x);                    // освобождение
free(a);
```

Модель памяти в языке С

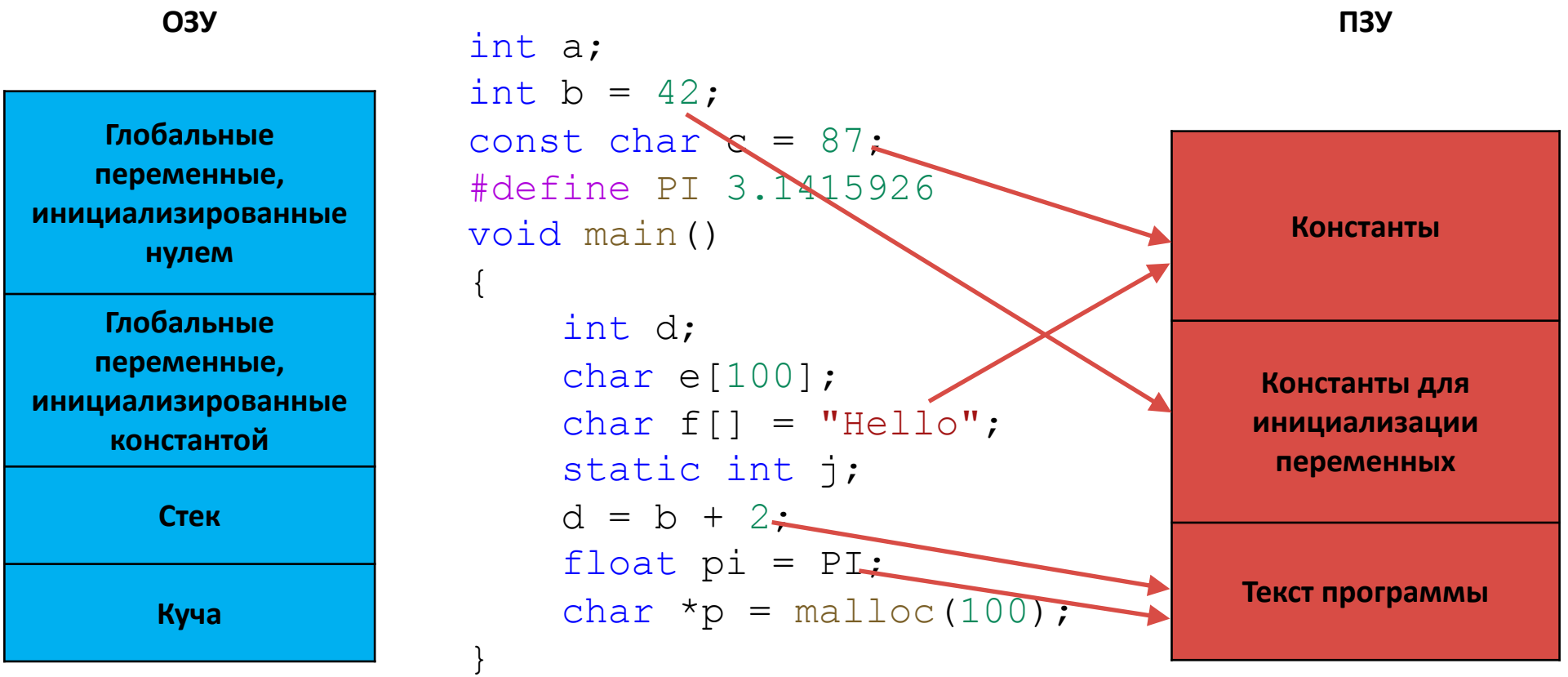

```c
int a;
int b = 42;
const char c = 87;
#define PI 3.1415926
void main()
{
    int d;
    char e[100];
    char f[] = "Hello";
    static int j;
    d = b + 2;
    float pi = PI;
    char *p = malloc(100);
}
```



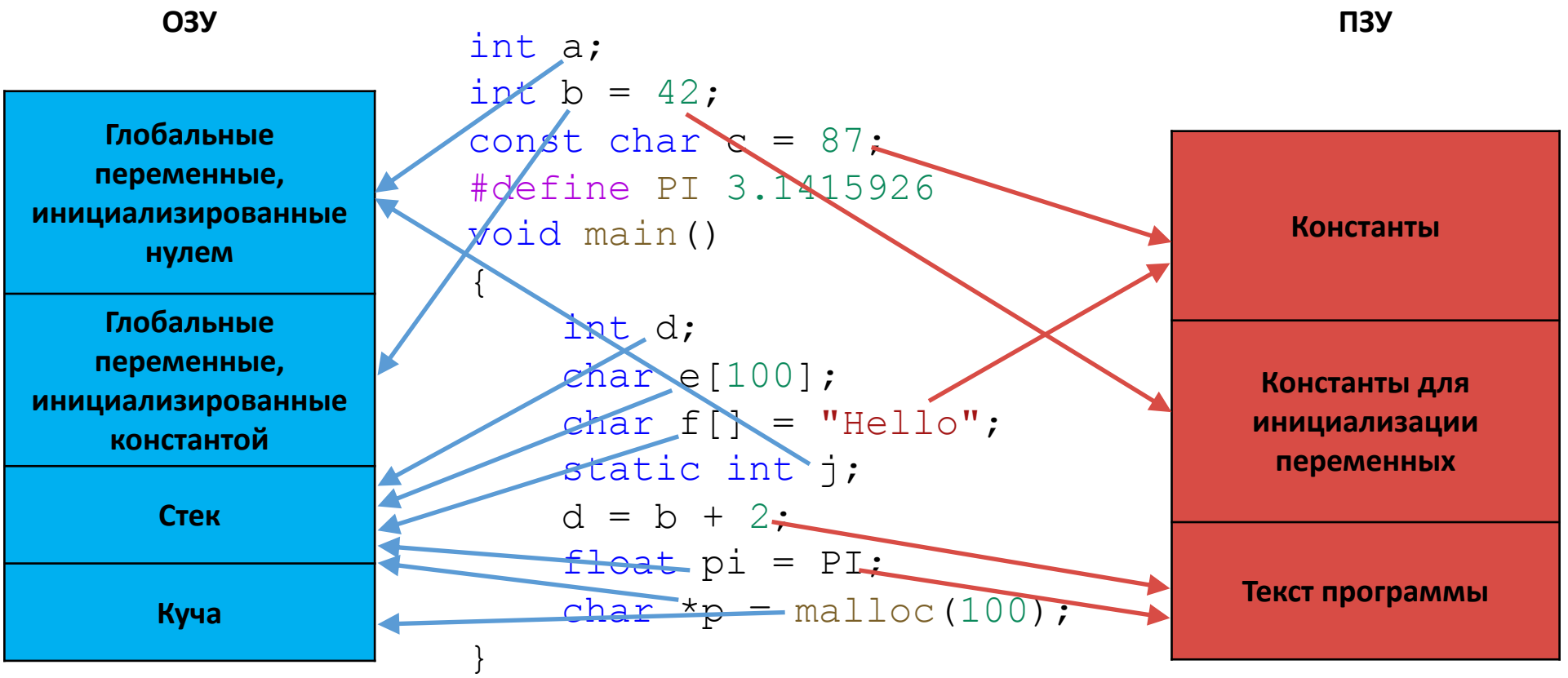
Модель памяти в языке С



Модель памяти в языке С



Модель памяти в языке С



Применение языка С для встраиваемых систем

- Обращение к регистрам специальных функций периферийных модулей;
- Обработка прерываний;
- Ассемблерные вставки.

Уровни абстракции: Обращение к регистрам специальных функций

1. Язык С + документация

```
#define PORTC *((volatile unsigned int *)(0x400B8000))
...
PORTC = PORTC | 1; /* Установить 1 в PC0 */
```

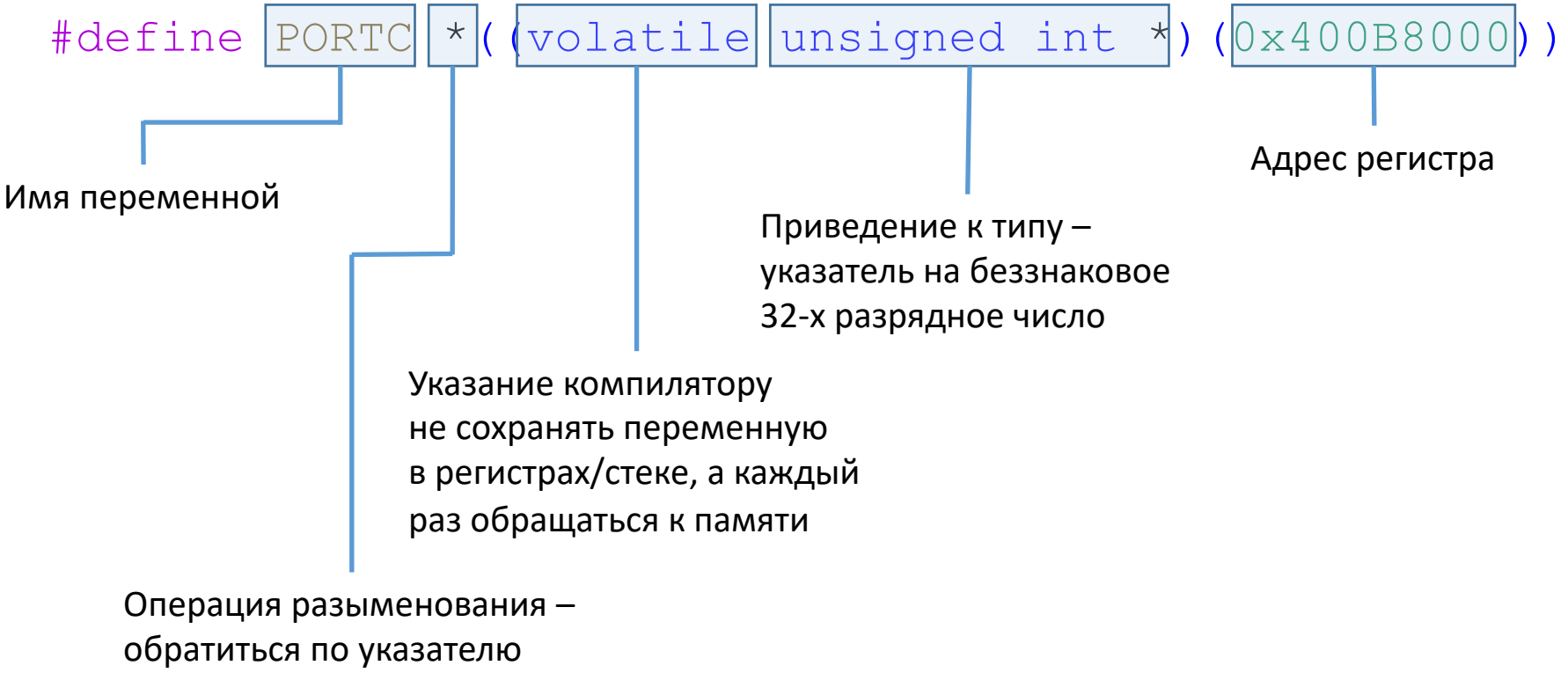
2. Язык С + заголовочные файл + документация

```
#include "MDR32Fx.h"
...
MDR_PORTC->RXTX = MDR_PORTC->RXTX | 1; /* Установить 1 в PC0 */
```

3. Язык С + библиотека (например, Standard Peripheral Library для К1986ВЕ92QI)

```
#include <MDR32F9Qx_port.h>
...
PORT_SetBits(MDR_PORTC, PORT_Pin_0); /* Установить 1 в PC0 */
```

Уровни абстракции:
Обращение к регистрам специальных функций



Первая программа на С для микроконтроллера. Версия 1

```
#define RST_CLK_PER  *((volatile unsigned int *)(0x4002001C))
#define PORTC_RXTX   *((volatile unsigned int *)(0x400B8000))
#define PORTC_OE     *((volatile unsigned int *)(0x400B8004))
#define PORTC_ANALOG *((volatile unsigned int *)(0x400B800C))
#define PORTC_PWR    *((volatile unsigned int *)(0x400B8018))

/* Функция main. Точка входа в программу */
int main(void)
{
    RST_CLK_PER = RST_CLK_PER | (1 << 23); /* Включаем тактирование порта C */

    PORTC_OE = PORTC_OE | 0x01;            /* Настраиваем ножку 0 порта C на вывод */
    PORTC_ANALOG = PORTC_ANALOG | 0x01;    /* Включаем цифровой режим работы ножки 0 */
    PORTC_PWR = PORTC_PWR | 0x02;          /* Настраиваем мощность выходного буфера ножки 0 */

    for (;;)
    {
        PORTC_RXTX = PORTC_RXTX ^ 0x01;   /* Инвертирование бита в регистре PORTC */
        for (int i = 0; i < 100000; i++); /* Программная задержка */
    }
}
```

Первая программа на С для микроконтроллера. Версия 2

```c
#include <MDR32Fx.h>

/* Функция main. Точка входа в программу */
int main(void)
{
    /* Включаем тактирование порта С */
    MDR_RST_CLK->PER_CLOCK = MDR_RST_CLK->PER_CLOCK | (1 << 23);

    MDR_PORTC->OE = MDR_PORTC->OE | 0x01;          /* Настраиваем ножку 0 порта С на вывод */
    MDR_PORTC->ANALOG = MDR_PORTC->ANALOG | 0x01; /* Включаем цифровой режим работы ножки 0 */
    MDR_PORTC->PWR = MDR_PORTC->PWR | 0x02; /* Настраиваем мощность выходного буфера ножки 0 */

    for (;;)
    {
        MDR_PORTC->RXTX = MDR_PORTC->RXTX ^ 0x01; /* Инвертирование бита в регистре PORTC */
        for (int i = 0; i < 100000; i++); /* Программная задержка */
    }
}
```

Первая программа на С для микроконтроллера. Версия 3

```
#include <MDR32Fx.h>
#include <MDR32F9Qx_config.h>
#include <MDR32F9Qx_rst_clk.h>
#include <MDR32F9Qx_port.h>
int main() {
    RST_CLK_PCLKcmd(RST_CLK_PCLK_PORTC, ENABLE);
    PORT_InitTypeDef Port_InitStructure;
    PORT_StructInit(&Port_InitStructure);
    Port_InitStructure.PORT_Pin = PORT_Pin_0;
    Port_InitStructure.PORT_OE = PORT_OE_OUT;
    Port_InitStructure.PORT_FUNC = PORT_FUNC_PORT;
    Port_InitStructure.PORT_SPEED = PORT_SPEED_FAST;
    Port_InitStructure.PORT_MODE = PORT_MODE_DIGITAL;
    PORT_Init(MDR_PORTC, &Port_InitStructure);
    for(;;) {
        for (int i = 0; i < 100000; i++);
        PORT_SetBits(MDR_PORTC, PORT_Pin_0);
        for (int i = 0; i < 100000; i++);
        PORT_ResetBits(MDR_PORTC, PORT_Pin_0);
    }
}
```

Обработка прерываний в Cortex-M3

Файл startup_MDR32F9Qx.s:

```
...
DCD Timer1_IRQHandler ; IRQ14
DCD ADC_IRQHandler ; IRQ17
...
```

Файлы разработчика, например, main.c:

```
/* Обработка прерывания по Timer1 */
void Timer1_IRQHandler(void)
{
...
}
/* Обработка прерывания по ADC */
void ADC_IRQHandler(void)
{
...
}
```

Ассемблерные вставки

Использование ассемблера:

- Для оптимизации по скорости выполнения и размеру программы;
- Для прямого манипулирования регистрами;
- Для использования старого ассемблерного кода в новых проектах;
- Для специальных инструкций (WFI, BKP, SVC);
- Для учебных целей.

Ассемблерные вставки

```
/* Для IDE Keil uVision */
__asm void add(int x1, int x2, int x3)
{
    ADDS R0, R0, R1
    ADDS R0, R0, R2
    BX LR
}

int swap32(int i)
{
    int res;
    __asm {
        REVSH res, i
    }
    return res;
}

__asm("WFI"); /* Выполнение одной команды */
```

Результат компиляции: HCS08 (8-ми разрядный CISC)

Код на языке C

```
 1. void func(void)
 2. {
 3.   return;
 4. }
 5.
 6. void main(void)
 7. {
 8.     char i;
 9.
10.     i = 5;
11.     while (i > 0)
12.     {
13.         func();
14.         i--;
15.     }
16.     for (;;);
17. }
```

Результат компиляции для HCS08

```
...
 8:      char i;
 9:
10:      i = 5;
         LDA   #5
         TSX
         STA   ,X
         L5:
11:      while (i > 0)
12:      {
13:          func();
         BSR   func
14:          i--;
         TSX
         DEC   ,X
         TST   ,X
         BNE   L5
         LC:
15:      }
16:      for (;;);
         BRA   LC
17:  }
```

Результат компиляции: ARM Cortex-M3 (32-х разрядный RISC)

Код на языке C

```
 1. void func(void)
 2. {
 3.   return;
 4. }
 5.
 6. void main(void)
 7. {
 8.    char i;
 9.
10.    i = 5;
11.    while (i > 0)
12.    {
13.        func();
14.        i--;
15.    }
16.    for (;;);
17. }
```

Результат компиляции для ARM Cortex-M3

```
8000136:   b580        push    {r7, lr}
8000138:   b082        sub sp, #8
800013a:   af00        add r7, sp, #0
    char i;
    i = 5;
800013c:   2305        movs    r3, #5
800013e:   71fb        strb    r3, [r7, #7]
8000140:   e004        b.n 800014c <main+0x16>
    while (i > 0)
    {
        func();
8000142:   f7ff fff3   bl  800012c <func>
        i--;
8000146:   79fb        ldrb    r3, [r7, #7]
8000148:   3b01        subs    r3, #1
800014a:   71fb        strb    r3, [r7, #7]
    while (i > 0)
800014c:   79fb        ldrb    r3, [r7, #7]
800014e:   2b00        cmp r3, #0
8000150:   d1f7        bne.n   8000142 <main+0xc>
    }
    for (;;);
8000152:   e7fe        b.n 8000152 <main+0x1c>
```

МЭИ

Результат компиляции: RV32I (RISC-V, 32-х разрядный RISC)

Код на языке C

```
 1. void func(void)
 2. {
 3.   return;
 4. }
 5.
 6. void main(void)
 7. {
 8.    char i;
 9.
10.    i = 5;
11.    while (i > 0)
12.    {
13.        func();
14.        i--;
15.    }
16.    for (;;);
17. }
```

Результат компиляции для RISC-V

```
1014a:    1101              addi    sp,sp,-32
1014c:    ce06              sw      ra,28(sp)
1014e:    cc22              sw      s0,24(sp)
10150:    1000              addi    s0,sp,32
      char i;
      i = 5;
10152:    4795              li      a5,5
10154:    fef407a3          sb      a5,-17(s0)
      while (i > 0)
10158:    a039              j       10166 <main+0x1c>
      {
          func();
1015a:    37cd              jal     1013c <func>
          i--;
1015c:    fef44783          lbu     a5,-17(s0)
10160:    17fd              addi    a5,a5,-1
10162:    fef407a3          sb      a5,-17(s0)
      while (i > 0)
10166:    fef44783          lbu     a5,-17(s0)
1016a:    fbe5              bnez    a5,1015a <main+0x10>
      }
      for (;;);
1016c:    a001              j       1016c <main+0x22>
```

Образ программы

После компиляции набор инструментов создает образ программы (image). Внутри образа программы находятся следующие компоненты:

- Таблица векторов прерываний (vector table);
- Вектор сброса/код запуска (reset handler/startup code);
- Код запуска программы на C (C startup code);
- Прикладная программа (application code);
- Функции среды исполнения C (C runtime library functions);
- Функции стандартной библиотеки C (C standard library functions);
- Другие данные.

Перенаправление потоков ввода/вывода

Стандартная библиотека содержит функции ввода/вывода:
`printf`, `scanf`, `fopen`, `fprintf`, `fwrite`, `fread`, `fclose` и другие.

Функция `fopen` возвращает файловый дескриптор – `File* fd`.

Функции `printf`, `scanf` используют дескрипторы по умолчанию:
`stdin` – стандартный ввод, `stdout` – стандартный вывод, `stderr` – поток ошибок.

На устройствах без ОС требуется указать куда осуществляется ввод/вывод. Для этого следует переопределить функции `fputc` и `fgetc`.

```
int fputc(int c, FILE * stream)
{
  uart_write(c);
  return c;
}


int fgetc(FILE * stream)
{
  char c = uart_read();
  return c;
}
```

Для разных компиляторов и стандартных библиотек порядок перенаправления может отличаться.

Заключение

- Понимание модели памяти языка С позволяет писать оптимальный код.
- Язык С позволяет напрямую обращаться к памяти через указатели, но не позволяет обращаться к регистрам процессора.
- Применение для встраиваемых систем:
  - Обращение к регистрам специальных функций через указатели;
  - Обработка прерываний;
  - Ассемблерные вставки.