Введение в язык программирования C.

Лекция 4

Память. Массивы. Указатели.

Сергей Леонидович Бабичев

Функции printf и scanf.

- Почти всё, что мы делали до этого, обрабатывало какие-то данные.
- Каждая функция принимает какие-то аргументы и выдаёт какой-то результат.
- Для того, чтобы взаимодействовать с нами нужен свой набор действий.
- В Си это — тоже функции.
- В стандарте языка имеется набор функций для простого *текстового* взаимодействия с пользователями.
- Их прототипы собраны в *заголовочный файл* `<stdio.h>`.
- Для того, чтобы начать писать более сложные программы, познакомимся с двумя из них: `printf` и `scanf`.

Внутреннее и внешнее представления

- Внутри компьютера переменные хранятся в двоичном виде.
- Нам обычно интересно *десятичное* представление.
- В десятичном представлении мы и вводим, и выводим числа в виде набора *символов*.
- Для этого приходится на выводе *преобразовывать* данные из двоичного представления в десятичные символы, на на вводе — из десятичных символов во внутреннее двоичное представление.
- Мы так и говорим: *внутреннее представление* (для компьютера) и *внешнее представление* (для нас).

Функция printf — форматирование и вывод

- Как вывести значения нескольких переменных вместе с их именами?
- Разные языки это делают по-разному.

  Pascal: `writeln('a=', a, ' b=', b, ' c=', c, ' d=', d, ' e=', e);`
  Python: `print('a=',a,'b=',b, 'c=', c, 'd=',d, 'e=', e)`
  C: `printf("a=%d b=%d c=%d d=%d e=%d\n", a, b, c, d, e);`

  Первый аргумент даёт общий вид вывода: вместо %d подставятся десятичные значения соответствующих переменных.

Функция printf — форматирование и вывод

- Первый аргумент — *форматная строка* в которой имеется выводимый текст ("a=")и, возможно, несколько *шаблонов* или *спецификаций формата* ("%d").
- printf следует по строке слева направо, выводя символ за символом.
- Как только встречается *метасимвол* %, он начинает собирать *шаблон*.
- Шаблон заканчивается одной из предопределённых букв, например, d означает, что вывод должен производиться в десятичной (decimal) системе счисления.
- Перед буквой, определяющей формат вывода и тип посланного в printf значения может тоже что-то находиться.

Функция printf — примеры использования

```
int  i = 123; char c = 'a'; unsigned u = 256; unsigned long ul = 4095ul;
long long ll = 65535ll; unsigned long long ull = 1024ull;
float f = 123.456; double d = 12345678.9012345;

printf("i=%d i=%4d i=%04d i=%-4d", i); // "i=123 i= 123 i=0123 i=123 "
printf("c=%c c=%d", c); // "c=a c=66"

printf("u=%u u=%o u=%x u=%X", u, u, u, u);
// "u=256 u=400 u=ff u=FF"

printf("ul=%ul ull=%ull", ul, ull); // "ul=65535 ull=1024"

printf("f=%f f=%g f=%e", f, f, f); // "f=123.456 f=1.23456e5 f=123.456"
printf("d=%lf d=%.1lf d=%.7lf d=%10.3lf", d, d, d, d);
//"d=12345678.901235 d=12345678.9 d=12345678.9012345 d=12345678.901"
printf("Result=%.2lf%%", result); // "Result=10.75%"
```

Функция scanf — форматирование и ввод

- Её формат похож на `printf`.
- Первый аргумент — форматная строка — то, что функция ожидает на вводе.
- В ней присутствуют такие же знаки процента, извещающие `scanf`, что ей потребуется ввести число в каком-то формате.
- Сами форматы в основном совпадают с теми, которые используются в `printf`.

Функция `scanf` требует, чтобы в неё передавались адреса, по которым можно присвоить введённое значение. Операция взятия адреса — символ `&` перед выражением.

Функция scanf — примеры использования

```
int  i;
char c;
unsigned u;
unsigned long ul;
long long ll;
unsigned long long ull;
float f;
double d;
int code = scanf("%d", &i);
code = scanf("%d %c %u %lu %ll %llu %f %lf",
             &i,&c,&u,&ul,&ll,&llu,&f, &d);
```

Важно: каждому элементу формата необходимо точное соответствие с типом аргумента!

Функция scanf — примеры использования

- Функция scanf возвращает число тех адресов, по которым ей удалось положить значение.
- А почему она могла не сделать какой-то работы?
- Например, потому, что мы просили число, а на входе оказалось нечто нечисловое.
- Может быть, закончились входные данные.

Пусть на входе имеется строка вида 17/12/2017. Тогда ввести её можно так:

```
int day, month, year;
code = scanf("%d/%d/%d", &day, &month, &year);
```

Если при этом code окажется равным трём, то всё ввелось успешно.

Память. Массивы.

Массив

- *Массив* — фундаментальная строительная единица в большинстве языков программирования.
- Массив — нечто, что позволяет хранить в себе много пронумерованных элементов одного и того же типа, причём время доступа к любому из элементов одинаково.
- *Простой массив* — набор однотипных элементов, количество которых известно во время компиляции.

```
int ar[100];
double z[32];
```

- У каждого простого массива есть свойства:
  - имя (`ar` или `z`);
  - тип его элементов (элементы `ar` имеют тип `int`, элементы `z` имеют тип `double`);
  - и количество элементов (100 элементов в массиве `ar`, 32 элемента в массиве `z`).

Массив

- Количество элементов простого массива должно быть известно в момент компиляции программы то есть размер простого массива должен быть *константным выражением*
- После создания массива к его элементам можно обращаться `по индексу`.

```
ar[10] = 15;
z[0] = 3.1415926;
```

Массив, объявленный `int ar[100]`, содержит ровно 100 элементов, которые нумеруются от 0 до 99. Обращение по индексам вне этих границ приводит к непредсказуемым результатам (*UB*, *Undefined Behavior*).

Операции над массивами

- Выражение вида `ar[i]` является `l-value`, оно может использоваться точно в тех же местах программы, где могла бы использоваться обычная переменная.

```
int ar[100],i;
...
i = 0;
if (ar[i] < ar[i+1]) {
  int t = ar[i];
  ar[i] = ar[i+1];
  ar[i+1] = ar[i];
}
```

Обменяли местами элементы `a[i]` и `a[i+1]`, если они расположены в порядке возрастания.

В Си нет встроенных операций над массивами, как над целыми объектами. Для работы с массивами нужно явным образом пройтись по всем его элементам.

Обработка массивов

- Чаще всего используют цикл `for`

```
for (int i = 0; i < 100; i++) {
  ar[i] = 0;
}
```

- В математической нотации, множество индексов есть `[0..100)` или множество закрытое слева и открытое справа.
  Если есть два одинаковых по размерам массива из однотипных элементов.

```
int ar1[100], ar2[100];
...
```

  то скопировать один массив в другой как `ar2 = ar1;` не получится.
  Надо так:

```
for (int i = 0; i < 100; i++) {
  ar2[i] = ar1[i];
}
```

Автоматическая память

- Переменные, объявленные где-то внутри функции называются *автоматическими* и место для них выделяется в *стеке*.
- Переменные, объявленные в любом *блоке* {...} автоматически исчезают,

> Объявление в блоке переменной с именем, которое уже существует в *охватывающем* блоке, разрешается и такое объявление *скрывает* внешнее имя. Иногда это полезно, но будьте с этим осторожны.

```
int f(int n) {
   double x = 123;
   if (n > 0) {
      int x = 5; // We hide double x
      // int x has own memory
   }
}
```

Глобальная и статическая память

- Под одну и ту же автоматическую переменную могут выделяться разные места в стеке в разное время.
- Если функция вызывает сама себя, *рекурсивная*, то в одно время может существовать несколько копий переменной.
- Существуют переменные, которые сохраняют своё место всё время исполнения программы.
- Это — *глобальные* переменные и *статические переменные*

Глобальная и статическая память

```
int gv, c[100000]; // Глобальные переменная и массив
int func() {
   gv = 0;
   for (int i = 0; i < 100000; i++)
      gv += c[i];
}
int bar() {
   static int sv; // Статическая переменная
   if (sv == 0) {
      printf("Вызвали функцию bar\n");
      sv = 1;
   }
}
int main() {
   func();
   printf("gv=%d\n", gv);
   for (int i = 0; i < 100; i++)
      bar();
}
```

Глобальная и статическая память

Статические и глобальные переменные не меняют своего адреса во время исполнения программы и инициализируются нулями (если они не инициализированы иначе).

- Глобальный массив `c[100000]` инициализирован нулями, поэтому сумма его элементов тоже нулевая.
- Сообщение о том, что вызвана функция `bar` было выведено на экран только один раз, так как значение переменной `sv` внутри функции `bar` сохраняется между вызовами функции и, однажды став единицей, больше не изменится.
- Переменные `gv` и `c` *видны* во всех местах программы после их объявления, а переменную `sv` видно только внутри функции `bar`.
- Имя `sv` как статической переменной функции `bar` вне функции использовать нельзя, мы *не видим* эту переменную, несмотря на то, что она существует всё время исполнения программы.

- Истинно глобальные переменные можно использовать и в других *единицах компиляции*.
- Для этого достаточно *объявить* их, как *внешние*, добавив ключевое слово `extern`:

```
// Файл main.c
int gv, c[100000];
...
// Файл user.c
extern int gv, c[100000];
```

- Без ключевого слова `extern`, компиляция (точнее, сборка) завершится неудачей: каждое определение глобальной переменной добавляет имя в *глобальное пространство имён*.
- В это же глобальное пространство имён добавляются и имена функций (если их не объявить `static`).

> Постарайтесь ограничить применение глобальных переменных. Не загрязняйте пространство имён.

Указатели

- Указатели — самое интересное и самое необычное в Си.
- Указатели существовали в нескольких языках до Си, но только в Си они получили чрезвычайно большую мощность.
- В 1970-х годах, практически одновременно появились два небольших языка программирования, претендующих на универсальность, Pascal (на 3 года раньше)и Си .
- Первый Си был гораздо несовершеннее нынешнего, но именно на Си стали разрабатывать и системные программы, и расчётные программы, и прикладные программы.
- Pascal пережил всплеск, связанный с почившей ныне фирмой Borland, но во все времена количество *промышленного* кода, написанного на Си во много раз превосходило таковое на любом из диалектов Pascal.
- Если бы при проектировании языка Си не изобрели бы указатели с их арифметикой, то Си не выжил бы в конкурентной борьбе с другими языками.

Указатель — переменная, содержащая в себе адрес какой-то области памяти.

Указатели

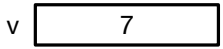
- Унарная операция `&` — операция *взятия адреса*.

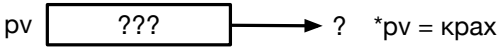
```
01 int v = 5;
02 int *pv;
03 pv = &v;
04 *pv = 7;
```

- Знак звёздочки `*` перед переменной при её объявлении показывает нам, что переменная будет указателем на тот тип, что находится слева от звёздочки.
- Вторую строчку следует читать так: объявляем переменную `pv`, которая является указателем (`*`) на целое (`int`).
- Третью — так: присвоить переменной `pv` адрес переменной `v`;
- Четвёртую: по адресу, который находится в переменной `pv` положить число 7.

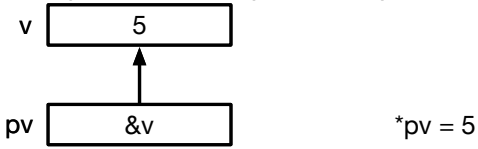
Работа с указателями

Что было после первых двух строк:

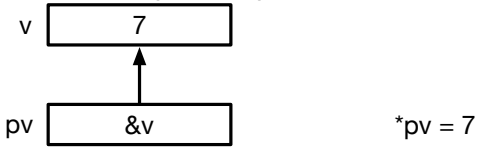




Что произошло в третьей строке:



После четвёртой строки:



Использование указателей

- Операция взятия адреса & к тому, что может иметь адрес, например, *l-значениям*: например, к переменным, элементам массивов и структур.
- Операция не применима к литералам (кроме строк), и выражениям типа `10 * 20`.
- Указателям можно (и нужно) присваивать какие-то адреса, причём адреса не первые попавшиеся, а адреса кусков в памяти, содержащих значения нужного типа.

```
int v = 5;
double *pv;
pv = &v;  // This is bad practice!
```

- Хороший стиль программирования: любое объявление переменной сто́ит совмещать с инициализацией. Особенно это относится к указателям.

> При объявлении указателей всегда инициализируйте их либо корректным адресом, либо специальным значением `NULL`, гарантирующим, что по этому адресу ничего нет.

Указатели и функции

- Пока указатели похожи на игрушку.
- Напишем функцию swap, которая меняет местами значения двух переменных.

```
#include <stdio.h>
void swap(int x, int y) {
   x ^= y; y ^= x; x ^= y;
   printf("swap: x=%d y=%d\n", x, y);
}
int main() {
   int x = 5, y = 7;
   swap(x, y);
   printf("x=%d y=%d\n", x, y);
}
```

Что выведет эта функция?

Указатели и функции

- Пока указатели похожи на игрушку.
- Напишем функцию swap, которая меняет местами значения двух переменных.

```
#include <stdio.h>
void swap(int x, int y) {
   x ^= y; y ^= x; x ^= y;
   printf("swap: x=%d y=%d\n", x, y);
}
int main() {
   int x = 5, y = 7;
   swap(x, y);
   printf("x=%d y=%d\n", x, y);
}
```

Что выведет эта функция?

```
swap: x = 7 y = 5
x = 5 y = 7
```

Указатели и функции: распечатаем значения указателей

```
#include <stdio.h>

void swap(int x, int y) {
  x ^= y; y ^= x; x ^= y;
  printf("swap: &x=%p x=%d &y=%p y=%d\n", &x, x, &y, y);
}

int main() {
  int x = 5, y = 7;
  swap(x, y);
  printf("main: &x=%p x=%d &y=%p y=%d\n", &x, x, &y, y);
  return 0;
}
```

Запуск программы:

```
swap: &x=0x7ffeef406afc x=7 &y=0x7ffeef406af8 y=5
main: &x=0x7ffeef406b18 x=5 &y=0x7ffeef406b14 y=7
```

Использование указателей

Чтобы разрешить изменять функцией `swap` `x` и `y`, мы должны это явным образом указать: передать в `swap` не сами переменные, а их адреса. Только тогда функция `swap` будет что-то в состоянии сделать с переменными, находящимися в `main`.

```
#include <stdio.h>
void swap(int *x, int *y) {
    *x ^= *y; *y ^= *x; *x ^= *y;
    printf("swap: &x=%p x=%d &y=%p y=%d\n", x, *x, y, *y);
}

int main() {
    int x = 5, y = 7;
    swap(&x, &y);
    printf("main: &x=%p x=%d &y=%p y=%d\n", &x, x, &y, y);
    return 0;
}
```

Запуск программы:

```
swap: &x=0x7ffeec169b18 x=7 &y=0x7ffeec169b14 y=5
main: &x=0x7ffeec169b18 x=7 &y=0x7ffeec169b14 y=5
```

Указатели и функции

- Всё заработало.
- Функция `swap` стала менее красивой, нам приходится каждый раз использовать операцию *взятие значения по адресу*, которая обозначается `*`. Зато мы решили поставленную задачу.

> Единственным способом изменить значение локальной переменной при передаче её в функцию — передать её адрес и принять его как указатель в вызванной функции.

- `Си` — один из немногих языков, который позволяет при вызове функции легко определить, может ли изменить функция свои аргументы.
- По вызову функции `swap` в `main` мы видим знаки `&` перед переменными и понимаем, что значения этих переменных после вызова функции *могут* поменяться.

Структуры

Структуры

- Массивы — полезно, но все элементы должны иметь один и тот же тип.
- Если мы хотим создать модель автомобиля, то описать его одним, пусть даже большим массивом, содержащим элементы одного типа, не удастся.

> *Структура* — тип данных, позволяющий сгруппировать объекты, возможно. разных типов и работать с ними как с единым целым. Сама структура становится *объектом*, а её составные части становятся *подобъектами* или *полями*.

Структуры: анатомия

- Каждое поле имеет *тип* и *имя*.
- Для модели автомобиля структура, например, может состоять из полей `num_of_wheels` — количестве колёс целого типа, `velocity` — текущей скорости автомобиля вещественного типа и `reg_number` типа *массив символов*.
- Такую структуру можно было бы описать так:

```
struct car_s {
  int num_of_wheels;
  double velocity;
  char reg_number[12];
};
```

У нас появился новый тип данных — `struct car_s`. Теперь мы можем создавать переменные, которые имеют соответствующий тип:

```
struct car_s a,b,c;
```

Формат описания структуры

- За ключевым словом `struct` следует идентификатор `car_s`, который называется *тегом* или *ярлыком* структуры.
- Если не хочется писать `struct car_s` каждый раз, можно использовать ключевое слово `typedef`.

  ```
  typedef struct car_s car;
  ```

- Появился ещё один тип данных — `car`, который можно использовать везде, где допустимо имя типа.

  ```
  car a, road[1000], *pa = &a;
  ```

  Мы объявили одиночный автомобиль `a`, массив из 1000 автомобилей `road` и указатель на автомобиль `pa`, который инициализировали адресом автомобиля `a`.

Операции над структурами

- Структура — полноценный тип данных и над ней можно производить универсальные для всех типов данных операции: копировать, передавать в функции, определять адрес, возвращать значение данного типа из функции.
- Вполне корректна запись:

```
car some_function() {
  car ret;
  ...
  return ret;
}

...
car t = some_function();
cat copy_t = t;
```

Операции над структурами

- Для обращения к полю структуры применяется соответствующая операция *точка*.

```
car ret;
ret.number_of_wheels = 4;
ret.velocity = 10.7;
strcpy(ret.reg_number,"A789AB150");
```

- После применения этой операции (она ещё носит названия *квалификация поля*) поле структуры становится неотличимым от обычной переменной.
- Оно может быть и l-значением, и r-значением.
- Если оно имеет элементарный тип, то разрешены операции типа += или ++.
- С целой структурой такие операции уже не существуют.
- Мы не можем написать новый тип, похожий на встроенные.
- Это ограничение, которое в Си никак не обходится. Если нужно, чтобы новый тип был «как родной» в языке, придётся использовать C++.

Указатели и структуры

- Структуры — тоже объекты языка, имеют адреса, к ним тоже применимо взятие адреса и указатели на структуры.

  `car a, *pa = &a;`

- Объявив одиночный автомобиль `car a`, мы выделили память под хранение всех полей структуры и эта память обязана располагаться рядом и в заданной описанием последовательности. Указатель на автомобиль `pa` мы инициализировали адресом автомобиля `a`.
- Будет ли правильным, если мы напишем `*pa.velocity = 123.4;`?
- Нет. Приоритет операции квалификации поля `.` выше, чем операции взятия значения по адресу `*`, поэтому порядок исполнения операций будет следующим: `*(pa.velocity) = 123.4;`
- Можно писать так: `(*pa).velocity = 123.4;`, это верно, но громоздко?

> Для обращения к элементу структуры по указателю на структуру применяется операция `->`, например `pa->velocity = 123.4;`

Операция sizeof

- Для любого элемента данных и любого типа данных имеется операция `sizeof` в двух вариантах.
- Во-первых, операндом `sizeof` может быть любое выражение.
- Во-вторых, операндом может быть любое имя типа, заключённое в круглые скобки.
- `sizeof` возвращает количество минимально адресуемых единиц памяти, *байтов*, требуемых для размещения в памяти операнда или объектов такого типа.
- Известно, что `sizeof(char)=1`. Остальное зависит от архитектуры компьютера.

```
int sizeint = sizeof(int); // Скорее всего 4
double d = 1.0;
int sized = sizeof d; // Скорее всего 8
int arr[100];
int sizearr = sizeof arr; // Скорее всего 400
```

Выравнивание элементов структур

- Сколько байт будет выделено для хранения следующей структуры?

```
struct some_1 {
   double x;
   int y;
   short z;
   char c;
};
```

- А для этой:

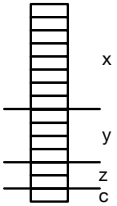
```
struct some_2 {
  char c;
  double x;
  short z;
  int y;
};
```

Выравнивание элементов структур

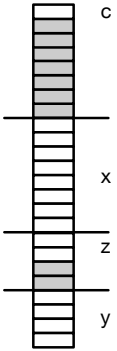
- Эти структуры содержат одни и те же элементы, поэтому они потребуют одинаковое количество памяти?
- Нет.
- Скорее всего, первая структура займёт 16 байт, а вторая — 24 байта.
- Проблема в том, что архитектура современных компьютеров такова, что для быстрейшего доступа к элементам данных требуется *выравнивание* этих элементов на определённые адреса.
- Если поместить объект типа `double` по адресу, не кратному 8, то все операции с ним потребуют больше *процессорных тактов*.
- Часто *невыровненные* данные вообще запрещены.
- 32-битные объекты нужно размещать по адресам, кратным четырём.
- 64-битные объекты нужно размещать по адресам, кратным восьми.

Выравнивание элементов структур

```
struct some_1 {
    double x;
    int y;
    short z;
    char c;
};
```



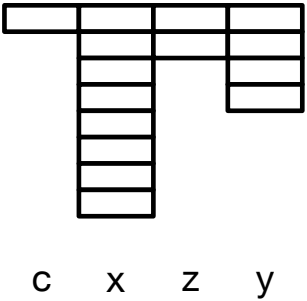

```
struct some_2 {
  char c;
  double x;
  short z;
  int y;
};
```



Объединения

- Иногда нам нужно очень жёстко экономить память.
- Для этого мы можем использовать другую модификацию структур — *объединение*, `union`.

```
union some_3 {
    char c;   // 0
    double x; // 0
    short z;  // 0
    int y;    // 0
} us3;
```



- Присваивание любому элементу объединения меняет все остальные!

```
us3.c = 5;
```

Чему станет равно `x`? Чему-то непредсказуемому.

Указатели и массивы

- Настало время подробнее понять, что происходит, когда мы пишем, например, `int a[100];`.
- Мы называли такие массивы *простыми*.
- Под него выделяется память на момент его создания.
- Оказывается, имя массива (в данном случае a) не что иное, как указатель на выделенную системой память.
- Так a — массив или указатель?
- Если a — указатель, то как с ним работать?
- Что у нас имеется кроме операции * для обращения к той памяти, на которую указатель показывает?
- В обращении к элементам массива нам помогает *адресная арифметика*.

Адресная арифметика

- Пусть начальным адресом нашего массива a будет 10000.
- Тогда обращение `*a` разрешено и это будет нулевым элементом массива.
- К нулевому элементу массива можно обратиться и как `a[0]`.
- Давайте запишем первое выражение немного по-другому: `*(a+0)`. Тогда `a[0]` есть синоним к `*(a+0)`.
- Память под массивы гарантированно выделяется *непрерывным куском*, поэтому элемент под номером 1, `a[1]` будет находиться по адресу 10004, если размер одного элемента типа `int` равен четырём.
- `a[1]` есть синоним к `*(a+1)`, `a[i]` — для `*(a+i)`.
- Арифметика становится не совсем обычной: к указателю, равному 10000 прибавили единицу и он стал равен 10004.
- Для всех ли типов данных подобное верно?
- Для всех с одной поправкой: степень увеличения адреса зависит от размера элемента массива.

Адресная арифметика

Указатели допускают следующие операции:

- сложение указателя с целым `ptr + i`. Результат показывает на элемент того же типа, отстоящий на `i` элементов дальше `ptr`;
- вычитание из указателя целого `ptr - i`. Результат показывает на элемент того же типа, находящийся за `i` элементов перед `ptr`;
- вычитание указателей одного типа `ptr2 - ptr1`. Результат — количество элементов этого типа между адресами.

Массивы и функции

- Можно ли передавать массивы в функции?
- Да, конечно!
- Для совсем наивных можно описывать аргументы функций как массивы:

```
int sum_elems(int array[100]) {
   int i, sum = 0;
   for (i = 0; i < 100; i++) {
      sum += array[i];
   }
   return sum;
}
```

Массивы и функции

- Почему «для наивных»?
- Потому, что в Си массив как целое передать в функцию невозможно.
- Имя массива — просто указатель на нечто, который нельзя изменить.
- Пока мы в области определения простого массива, видимости точки его создания, компилятор знает его размер.
- После того, как массив, точнее, указатель на него, переданы в функцию, никто внутри функции не способен определить его размер.

```c
#include <stdio.h>

void bar(int b[100]) {
   int sizebar = sizeof b / sizeof b[0];
   printf("sizebar = %d\n", sizebar);
}

void func() {
   int arr[100];
   int sizearr = sizeof arr / sizeof arr[0];
   printf("sizearr = %d\n", sizearr);
   bar(arr);
}

int main() {
   func();
}
```

```
sizearr = 100
sizebar = 2
```

Массивы и функции

- В функцию передан указатель на массив, размер указателя здесь 8 байт, размер типа `int` здесь четырём байтам, отсюда `sizebar = 2`.
- Обман? Зачем всё это?
- Чтобы не отпугнуть тех, кто хочет мигрировать с FORTRAN на Си.
- Функция не может отличить указатель на отдельную переменную от указателя на кусок памяти (массив).
- Число в квадратных скобках, которое, вроде бы, должно показать нам количество элементов массива, для одномерных массивов игнорируется.
- Следующие три объявления функции эквивалентны:

```
int add_elems(int arr[10000]);
int add_elems(int arr[]);
int add_elems(int *arr);
```

Массивы и функции

- Теперь у нас есть универсальная функция, которая готова вычислить сумму элементов любого целочисленного массива любой длины.
- Нужно только, чтобы она знала количество элементов.
- В классическом `Pascal` такую функцию написать было невозможно.
- Математикам такие функции позарез необходимы, для линейной алгебры, для векторов и матриц.
- К матрицам мы и переходим.