

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 69. Точность вычислений

§ 70. Решение уравнений

§ 71. Дискретизация

§ 72. Оптимизация

§ 73. Статистические расчёты

§ 74. Обработка результатов
эксперимента

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 69. Точность вычислений

Погрешности измерений

«Недостатки математического образования с наибольшей отчетливостью проявляются в чрезмерной точности численных расчетов».

Карл Фридрих Гаусс.

Погрешность (ошибка) – отклонение измеренного или вычисленного значения от истинного значения.



цена деления 0,1 см

измерено

8,2 см

фактически

8,1 ... 8,3 см

7,8 см

7,7 ... 7,9 см

Толщина дна:

вычислено

0,4 см

фактически

0,2 ... 0,6 см

0,4 ± 0,2 см

Погрешности измерений

абсолютная
погрешность Δx

$0,4 \pm 0,2$ см



Можно ли оценить
точность измерений?

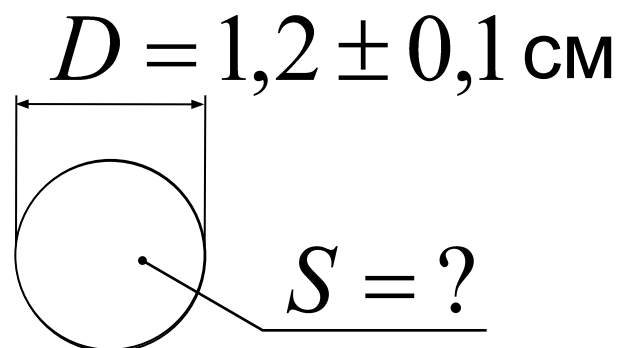
Относительная погрешность:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x^*}$$

измеренное
значение

$$\delta_x = \frac{0,2}{0,4} = 0,5 = 50\%$$

Погрешности вычислений



$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1,1309733552923255658465516179806\dots$$

$$S_{\min} = \frac{\pi \cdot 1,1^2}{4} = 0,950\dots$$

$$S_{\max} = \frac{\pi \cdot 1,3^2}{4} = 1,327\dots$$

$$S = 1,1 \pm 0,2 \text{ с}$$

М

$$\delta_x = \frac{0,2}{1,1} \cdot 100\% \approx 18\%$$

Все практические расчеты выполняются неточно.
Погрешность результата вычислений определяется погрешностью исходных данных.

Погрешности вычислений

$$x = \frac{a}{b} - \frac{c}{d}$$

$$a = 1000 \pm 0,001; \quad b = 0,002 \pm 0,001;$$

$$c = 1000 \pm 0,001; \quad d = 0,003 \pm 0,001.$$

$$\delta_a = \delta_c = \frac{0,001}{1000} = 0,01\%$$

$$\delta_b = \frac{0,001}{0,002} = 50\% \quad \delta_d = \frac{0,001}{0,003} = 33\%$$

$$x = \frac{1000}{0,002} - \frac{1000}{0,003} = 166667$$

неточные числа
в знаменателе

$$x_{\max} = \frac{1000}{0,001} - \frac{1000}{0,004} = 750000$$

$$\delta_x = \frac{750000 - 166667}{166667} \approx 352\%$$

$$x_{\min} = \frac{1000}{0,003} - \frac{1000}{0,002} = -166667$$

Метод **вычислительно неустойчив**: малые погрешности в исходных данных могут привести к большим погрешностям в решении.

Источники погрешностей

- неточность **исходных данных**
- неточность записи **вещественных чисел** в двоичном коде конечной длины
- погрешности приближенного вычисления некоторых стандартных **функций** (\sin , \cos , ...)
- накопление погрешностей при **арифметических действиях** с неточными данными
- погрешность **метода**

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 70. Решение уравнений

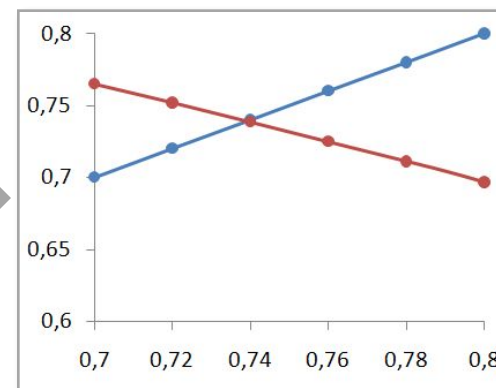
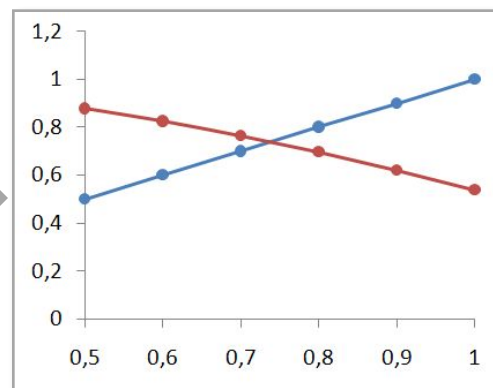
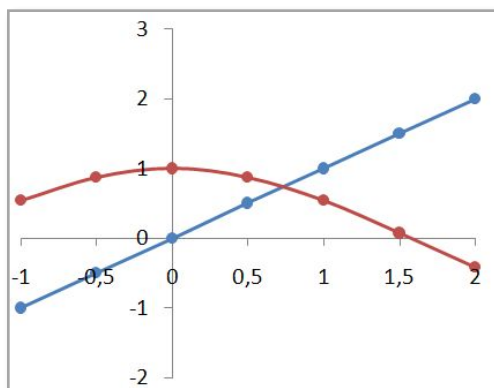
Методы решения уравнений

Точные (аналитические) методы:

$$ax + b = 1, \quad a \neq 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{1-b}{a}$$

$x = \cos x$  Как решать?

Графический метод:



Можно поручить такой поиск компьютеру!

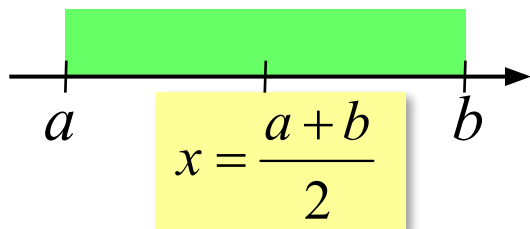


Можно ли получить точное решение?

Приближённые методы

Сжатие отрезка:

- 1) выбрать начальный отрезок $[a_0, b_0]$ (одно решение!)
- 2) уточнить решение с помощью некоторого алгоритма: $\Rightarrow [a, b]$
- 3) повторять шаг 2, пока длина отрезка $[a, b]$ не станет достаточно мала



Что лучше выбрать в качестве решения?



Как оценить ошибку?

$$|x - x^*| \leq \frac{b - a}{2}$$

Завершение работы:

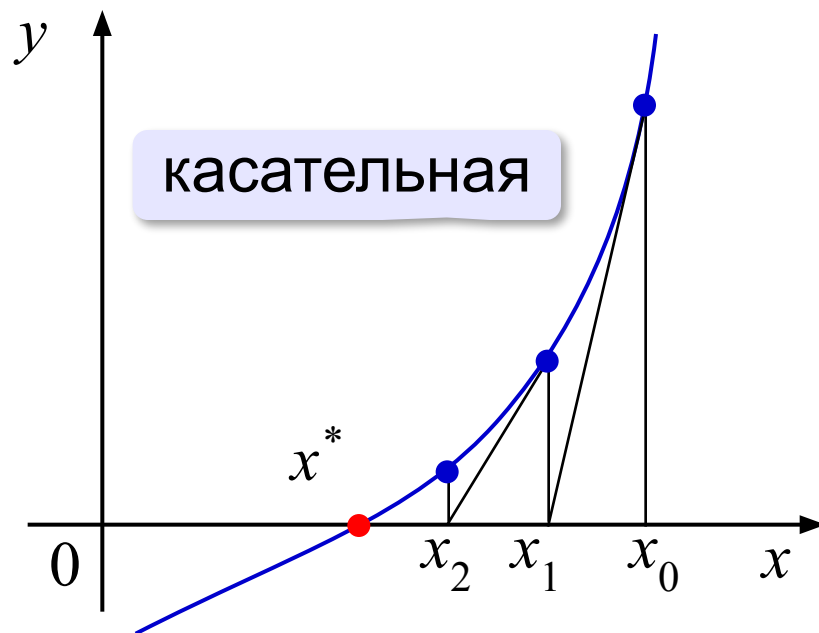
$$b - a \leq 2\varepsilon$$

допустимая
ошибка

Приближенные методы

По одной точке:

- 1) выбрать начальное приближение x_0
- 2) уточнить решение с помощью некоторого алгоритма:
 $\Rightarrow x$
- 3) повторять шаг 2, пока два последовательных приближения не будут отличаться достаточно мало



Завершение работы:

$$|x_i - x_{i-1}| \leq \varepsilon$$

метод Ньютона
(метод касательных)

Приближенные методы

Итерационные методы (лат. *iteratio* – повторение) – основаны на многократном выполнении одинаковых шагов, каждый из которых уточняет решение.

$$x_{k+1} = f(x_k)$$

следующее
приближение

предыдущее
приближение



- дают какое-то решение, если точное неизвестно
- могут давать меньшие ошибки, чем вычисления по точным формулам

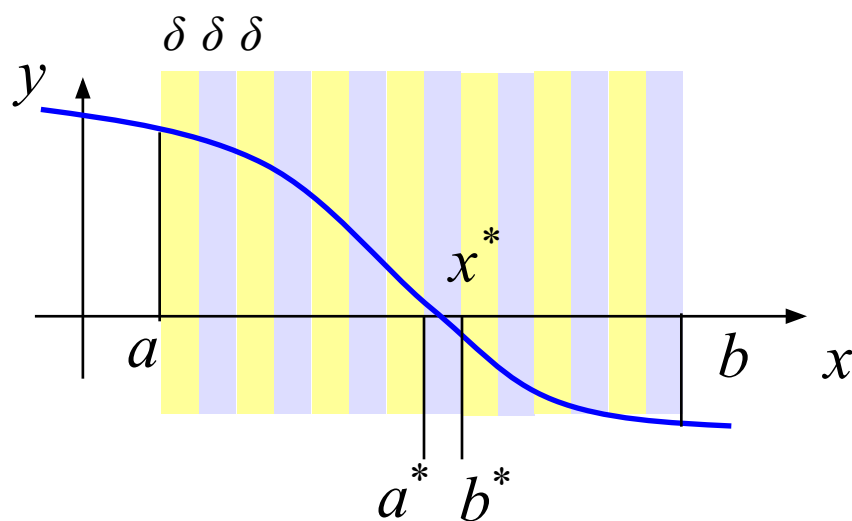


- решение приближенное: $x \approx 1,23345$
- ответ – число (зависимость от параметра?)
- большой объем вычислений
- не всегда просто оценить погрешность

Метод перебора

$$f(x) = 0 \quad x = \cos x \quad \Rightarrow \quad x - \cos x = 0$$

Задача. Найти решение уравнения справа от точки $x = a$ с точностью ε .



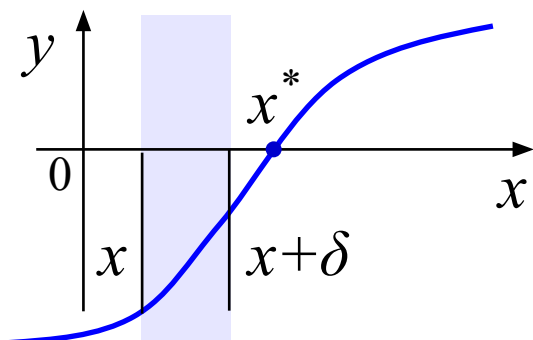
Алгоритм:

- 1) разбить отрезок $[a, b]$ на полосы шириной $\delta = 2\varepsilon$
- 2) найти полосу $[a^*, b^*]$, в которой находится x^*
- 3) решение:

$$x^* \approx \frac{a^* + b^*}{2}$$

Есть ли решение на $[x, x+\delta]$?

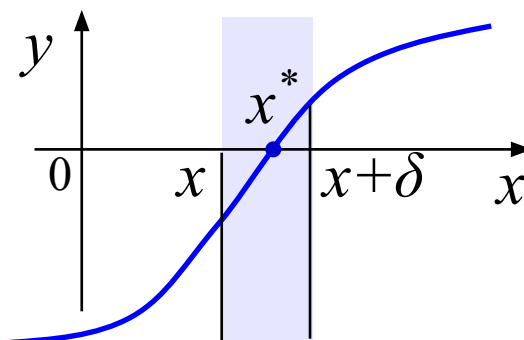
нет решения



$$f(x) < 0$$

$$f(x+\delta) < 0$$

есть решение!



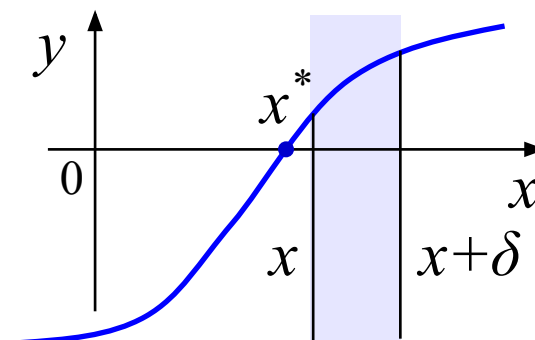
$$f(x) < 0$$

$$f(x+\delta) > 0$$

В чём отличие?

$$f(x)f(x+\delta) \leq 0$$

нет решения



$$f(x) > 0$$

$$f(x+\delta) > 0$$



Если *непрерывная* функция $f(x)$ имеет разные знаки на концах интервала $[a, b]$, то в некоторой точке x^* внутри $[a, b]$ она равна 0, то есть $f(x^*) = 0$!

Метод перебора ($a = 0$)

алг **Перебор**

нач

вещ eps, x, delta

eps := 0.001

x := 0 | x := a

delta := 2*eps

нц пока **f**(x)***f**(x+delta) > 0

 x := x + delta

кц

вывод 'x = ', x+eps

кон



Когда остановится?



Зацикливание?

алг **вещ** **f**(**вещ** x)

нач

знач := x - cos(x)

кон

Метод перебора ($a = 0$)

```
const eps = 0.001;  
var x, delta: real;
```

```
function f(x: real): real;  
begin  
    f := x - cos(x)  
end;
```

```
begin  
    x := 0; {x := a;}  
    delta := 2*eps;  
    while f(x)*f(x+delta) > 0 do  
        x := x + delta;  
    writeln('x = ', (x+eps):6:3)  
end.
```





Когда остановится?



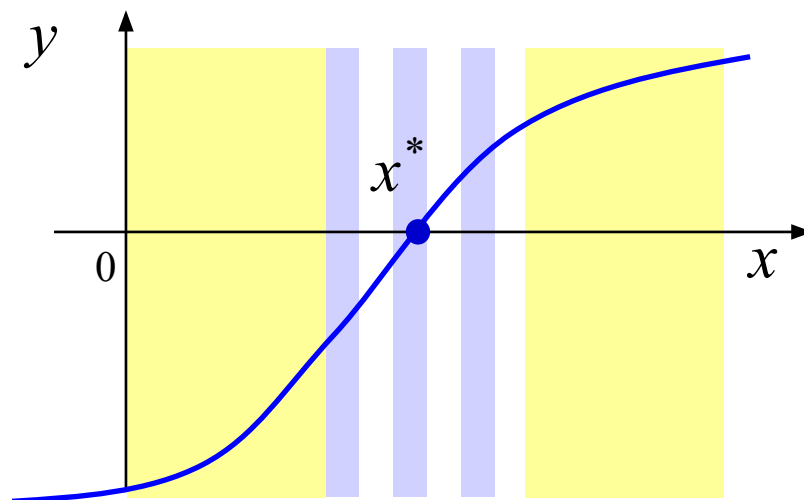
Зацикливание?

Метод перебора

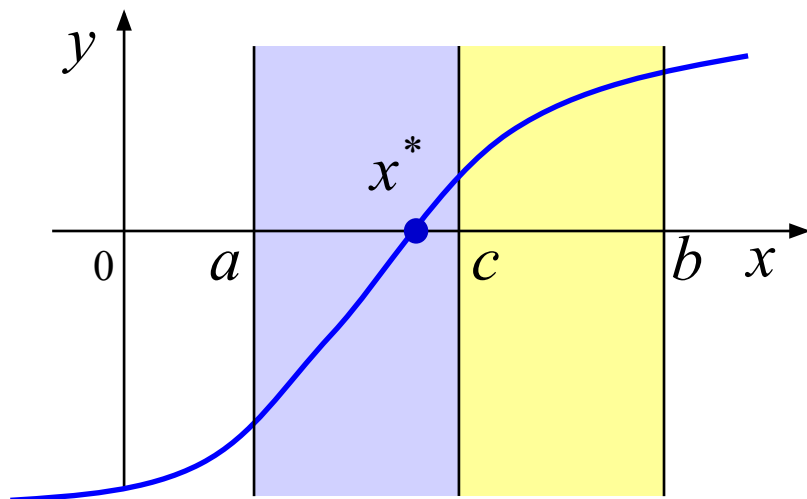
-  **простота**
 - можно получить решение с **любой заданной точностью**
-  **большой объем вычислений**

Усовершенствованный перебор:

- 1) **отделение корней** – перебор с большим шагом
- 2) **уточнение корней** – перебор с шагом 2ε



Метод деления отрезка пополам



Алгоритм:

- 1) вычислить середину отрезка: $c = \frac{a+b}{2}$
- 2) если на отрезке $[a, c]$ есть решение, присвоить $b := c$, иначе $a := c$
- 3) повторять шаги 1-2 до тех пор, пока $b - a > 2\varepsilon$

? Что напоминает?

? п.2: как определить, есть ли решение?

$$f(a) \cdot f(c) \leq 0$$

Вариант: $\text{sign}[f(a)] \neq \text{sign}[f(c)]$

$$\text{sign } x = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

Метод деления отрезка пополам

Алгоритмический язык:

```
delta := 2*eps
нц пока b - a > delta
  c := (a + b) / 2
  если f(a)*f(c) <= 0 то
    b := c
  иначе
    a := c
все
кц
вывод 'x = ', (a+b)/2
```

~~sign(f(a)) <> sign(f(c))~~

 Как меняется длина отрезка?

 За сколько шагов уменьшится в 1000 раз?

Метод деления отрезка пополам

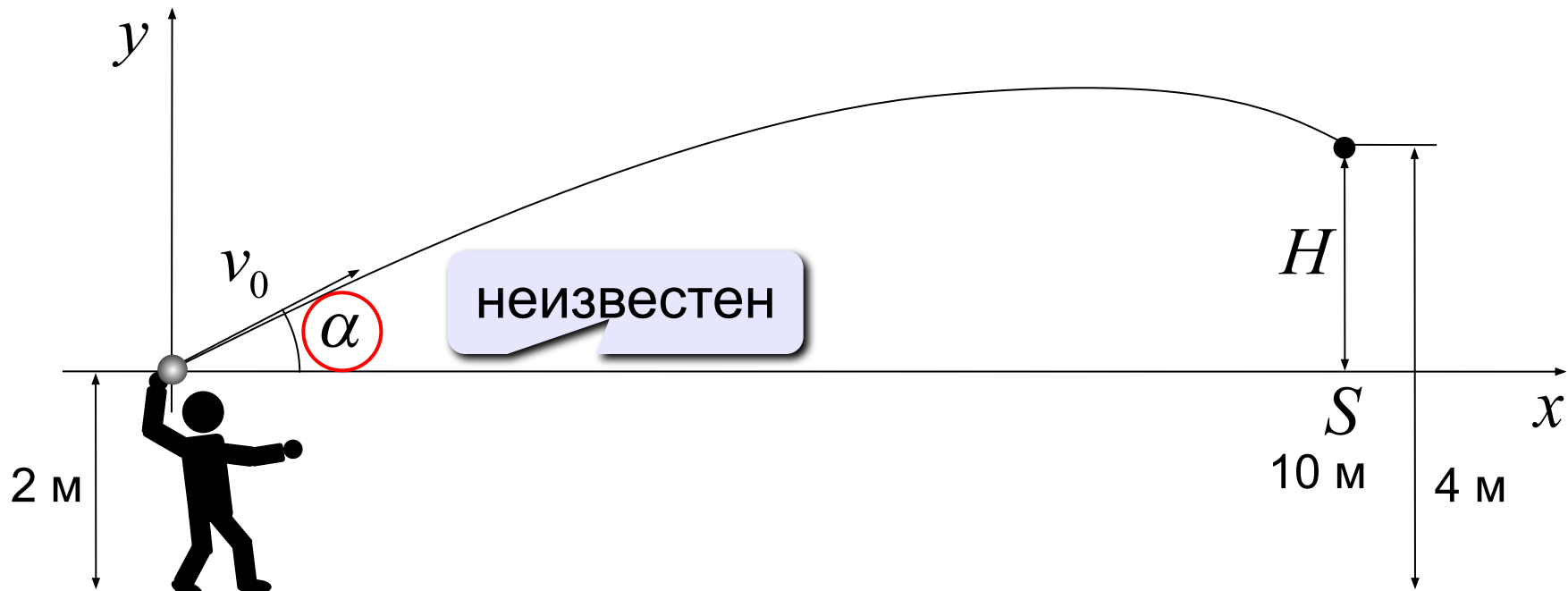
Паскаль:

```
delta := 2*eps;  
while b - a > delta do begin  
  c := (a + b) / 2;  
  if f(a)*f(c) <= 0 then  
    b := c  
  else a := c;  
end;  
writeln('x = ', (a+b)/2:6:3);
```

? Как меняется длина отрезка?

? За сколько шагов уменьшится в 1000 раз?

Полёт мяча



$$x = v_0 \cdot t \cdot \cos \alpha,$$

$$y = v_0 \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}$$

Полёт мяча

Задача. Найти **угол α** (и время t) при котором $x = S$ и $y = H$:

$$S = v_0 \cdot t \cdot \cos \alpha, \quad H = v_0 \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}$$

Решение:

$$t = \frac{S}{v_0 \cdot \cos \alpha} \rightarrow H = \frac{\cancel{v_0} \cdot S \cdot \sin \alpha}{\cancel{v_0} \cdot \cos \alpha} - \frac{g \cdot S^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}$$

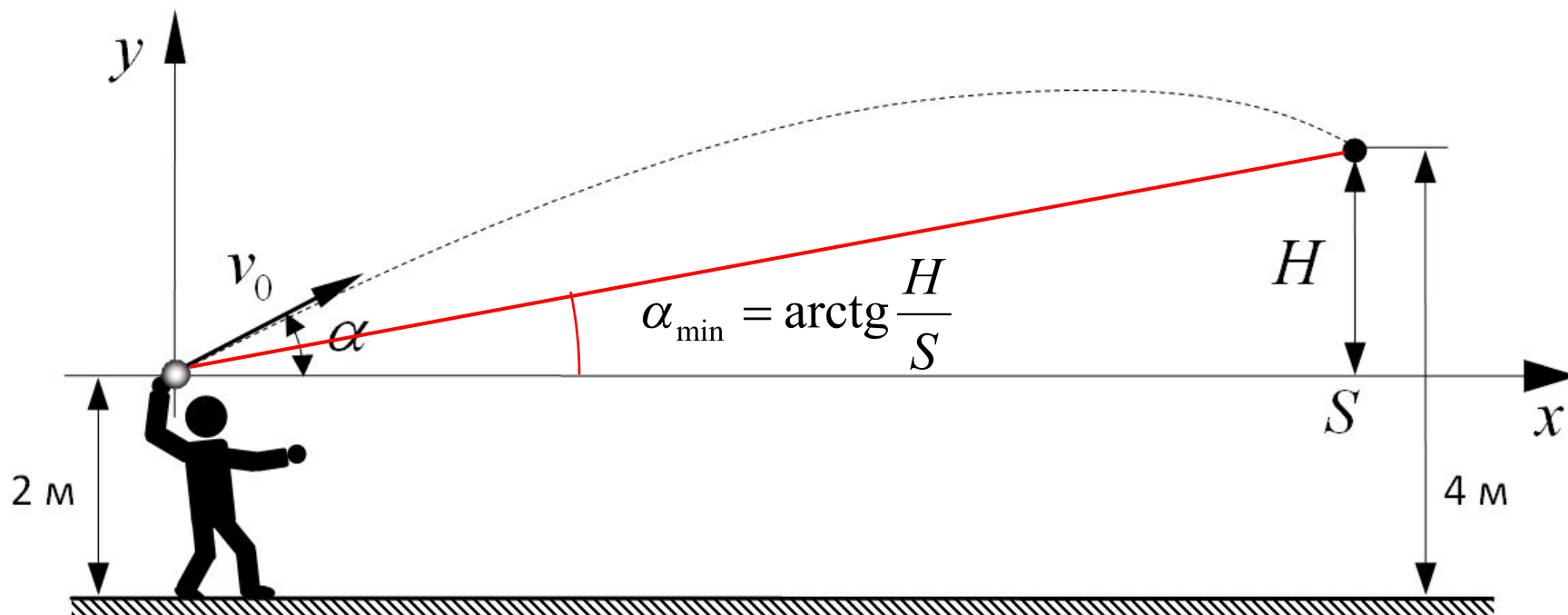
$$f(\alpha) = S \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g \cdot S^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} - H = 0$$

Диапазон углов для поиска: $[0^\boxtimes \dots 90^\boxtimes]$ \Rightarrow $\left[0 \dots \frac{\pi}{2}\right]$



Как уточнить?

Уточнение диапазона углов



Диапазон углов для поиска: $\left[\arctg \frac{H}{S} \dots \frac{\pi}{2} \right]$

Полёт мяча

Программа на алгоритмическом языке:

```
pi := 3.1415926
u := 0
delta := 2*eps
нц пока u < pi/2
  если f(u)*f(u+delta) <= 0 то
    вывод 'Угол: ', (u+eps)*180/pi
    вывод ' градусов', нс
  все
  u := u + delta
кц
```

$$\alpha_1 \approx 35,6^\circ \quad \alpha_2 \approx 65,8^\circ$$

Полёт мяча

Программа на языке Паскаль:

```
u := 0;  
delta := 2*eps;  
while u < pi/2 do begin  
    if f(u)*f(u+delta) <= 0 then begin  
        alpha := (u+eps)*180/pi;  
        writeln('Угол: ', alpha:4:1, ' градусов');  
    end;  
    u := u + delta  
end;
```

$$\alpha_1 \approx 35,6^\circ$$

$$\alpha_2 \approx 65,8^\circ$$

Полёт мяча

Использование табличного процессора:

— имя ячейки
или диапазона

	A	B
1	Расстояние	10
2	Разница высот	2
3	Скорость	12

Диапазон углов:

	A
4	
5	Угол
6	0
7	5
8	

Полёт мяча

	А	В	С	Д	Е
1	Расстояние	10			
2	Разница высот	2			
3	Скорость	12			
4					
5	Угол	Угол(рад)	Время	у	f(alpha)
6	0	=RADIANS(A6)	=S/W/COS(B6)	=v*SIN(B6)*C6-9,81*C6^2/2	=D6-H
7	5				
8	10				

S ⇔ **\$B\$1**

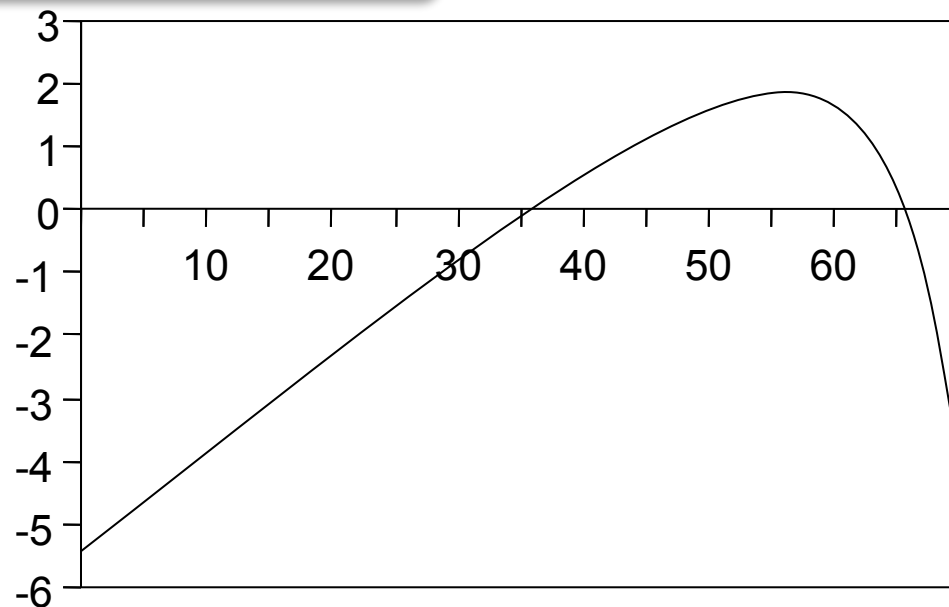
Excel: **РАДИАНЫ**

Диаграмма XY:

Excel: **Точечная**

$$\alpha_1 \approx 35^\circ$$

$$\alpha_2 \approx 65^\circ$$



Полёт мяча

с графика!

	I	J	K	L
1	Угол	Угол(рад)	Время	$f(\alpha)$
2	35			

начальное приближение

целевая
ячейка

Сервис – Подбор параметра:

нужно
 $f(\alpha) = 0$

Подбор параметра

Настройки по умолчанию

Яч. с формулой:

Целевое значение:

Изменяемая яч.:

OK
Отмена
Справка

?

Как найти второе
решение?

изменяем
начальное
приближение



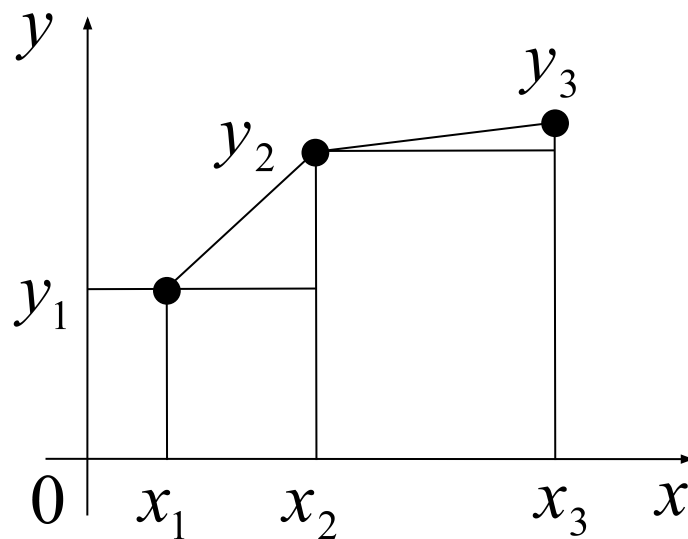
результат
в H2!

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 71. Дискретизация

Вычисление длины линии

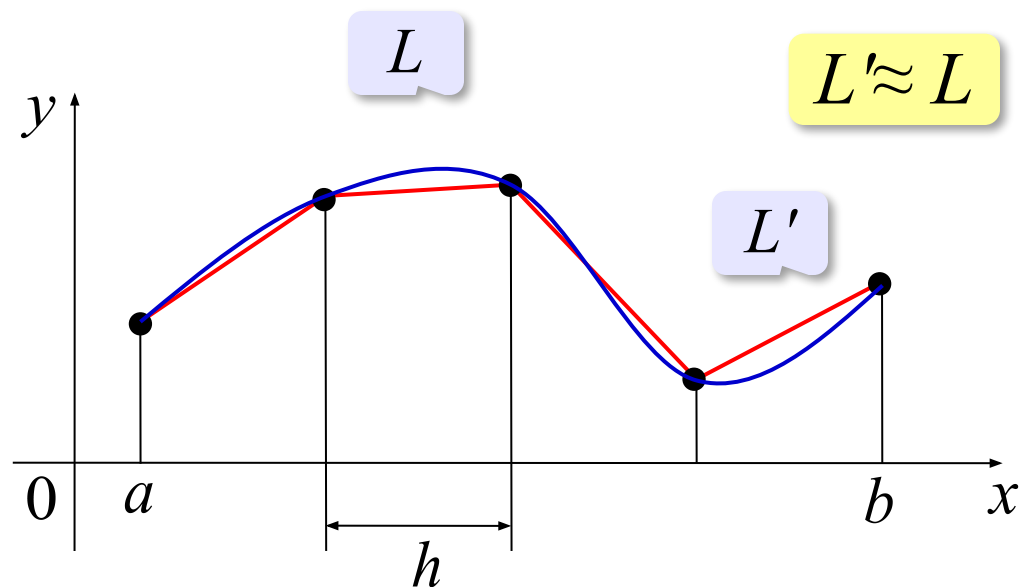
Ломаная:



$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$$

Вычисление длины линии

Кривая:



шаг дискретизации



Выполнена дискретизация!



Как увеличить точность?



$\downarrow h$

Дискретизация

- цель – представить задачу в виде, пригодном **для компьютерных расчётов**
- есть **потеря информации**
- методы **приближённые**
- для уменьшения погрешности нужно **уменьшать шаг дискретизации**



Что ухудшится?

- при малом шаге на результат могут сильно влиять **погрешности вычислений**

Вычисление длины кривой

Программа на алгоритмическом языке:

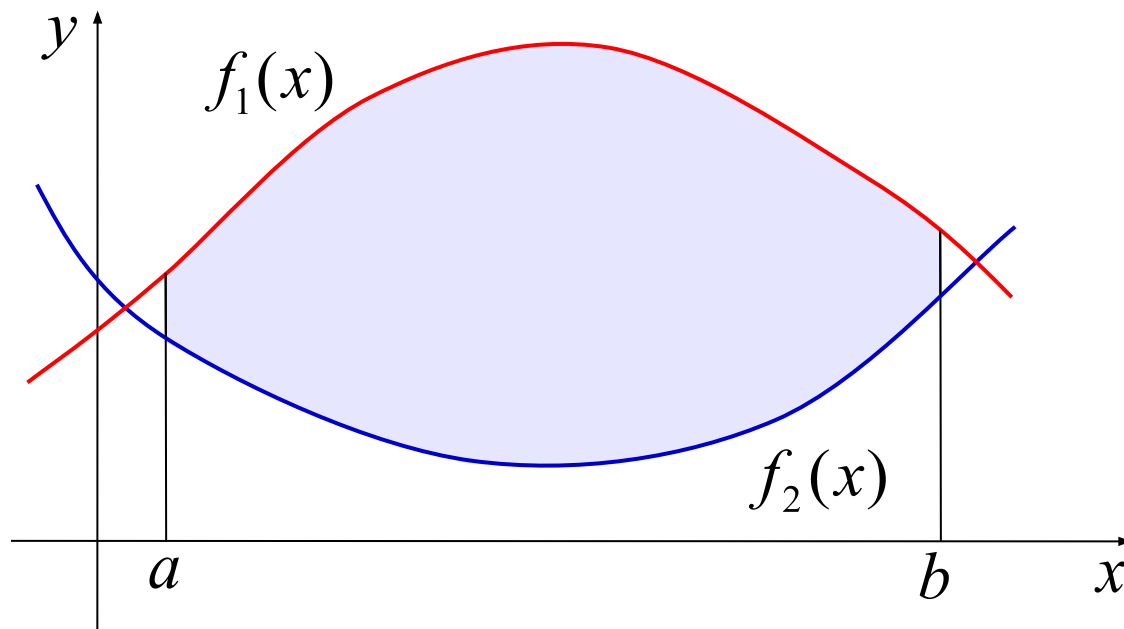
```
х := а
L := 0
нц пока х < b
  у1 := f (х)
  у2 := f (х+h)
  L := L + sqrt (h*h + (у1-у2) * (у1-у2) )
  х := х + h
кц
вывод ' Длина кривой ', L
```

Вычисление длины кривой

Программа на Паскале:

```
x := a ;  
L := 0 ;  
while x < b do begin  
  y1 := f (x) ;  
  y2 := f (x+h) ;  
  L := L + sqrt (h*h + (y2-y1) * (y2-y1)) ;  
  x := x + h  
end ;  
writeln ( ' Длина кривой ' , L:10:3) ;
```

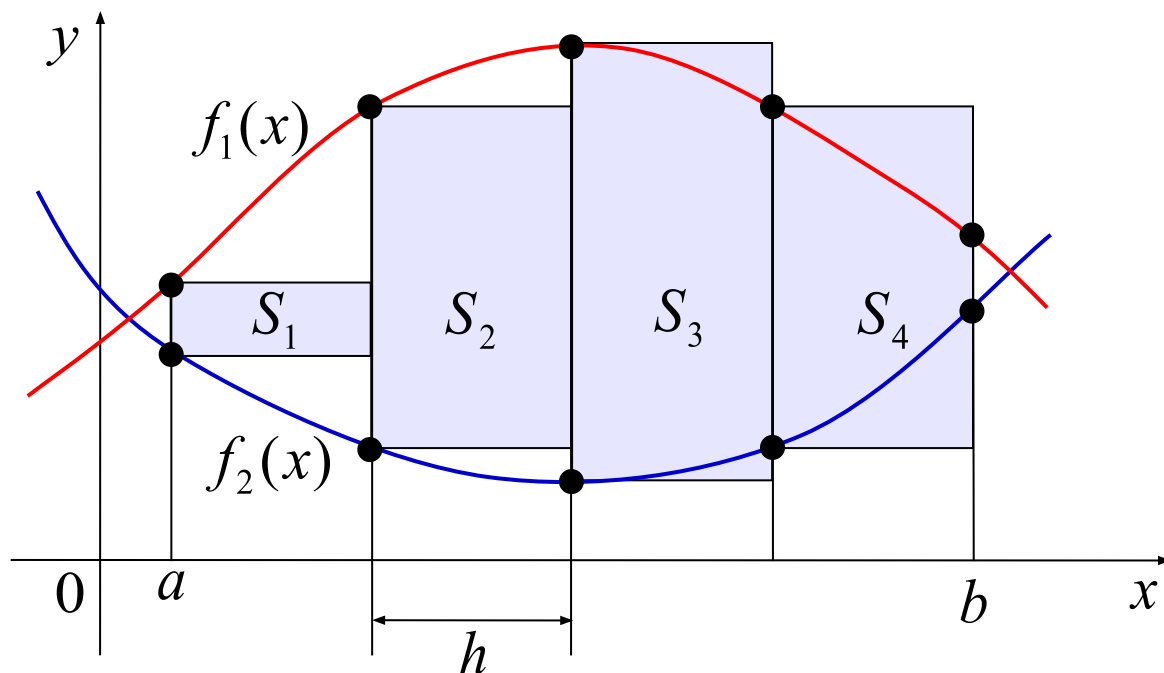
Площадь фигуры



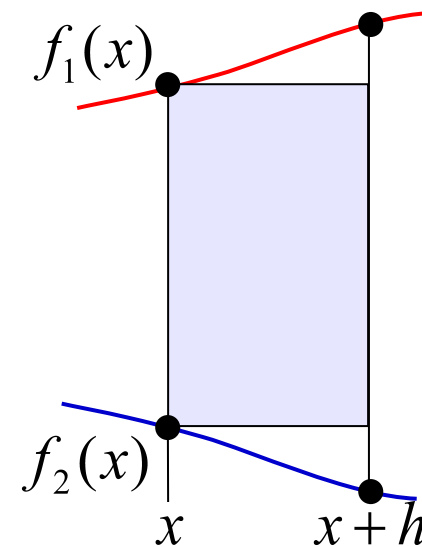
Аналитически решается не всегда!

Дискретизация

Метод прямоугольников:



$$S \approx S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$



$$S_x \approx h \cdot (f_1(x) - f_2(x))$$



Как улучшить?

Метод прямоугольников

Алгоритмический язык:

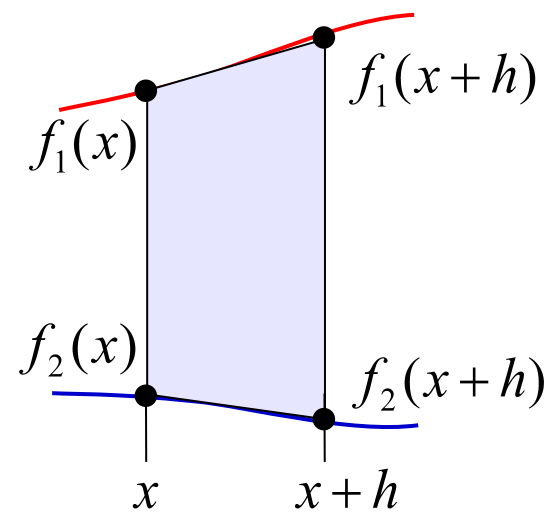
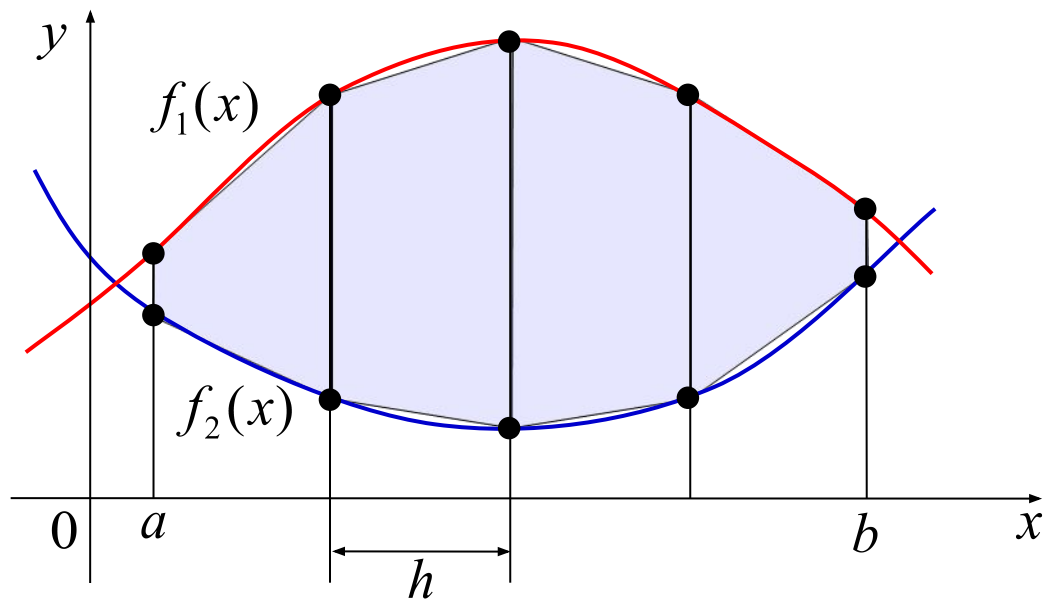
```
S := 0; x := a
нц пока x < b
  S := S + f1 (x+h/2) - f2 (x+h/2)
  x := x + h
кц
S := h*S
вывод ' Площадь ', S
```

в середине
отрезка $[x, x+h]$

Паскаль:

```
S := 0; x := a;
while x < b do begin
  S := S + f1 (x+h/2) - f2 (x+h/2);
  x := x + h
end;
S := h*S;
writeln(' Площадь ', S:8:3);
```

Метод трапеций



$$S_x = \frac{h}{2} \cdot [f_1(x) - f_2(x) + f_1(x+h) - f_2(x+h)]$$

Метод трапеций

Алгоритмический язык:

```

S := 0; x := a
нц пока x < b
    S := S + f1(x) - f2(x) + f1(x+h) - f2(x+h)
    x := x + h
кц
S := h*S/2
вывод 'Площадь', S
  
```

Паскаль:



Как улучшить?

```

S := 0; x := a;
while x < b do begin
    S := S + f1(x) - f2(x) + f1(x+h) -
    f2(x+h)*h;
end;
S := h*S/2;
writeln('Площадь', S:8:3);
  
```

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 72. Оптимизация

Что такое оптимизация?

Оптимизация – это поиск наилучшего (оптимального) решения задачи в заданных условиях.

1) **Цель**: выбрать неизвестный x , так чтобы

$$f(x) \rightarrow \min$$

или $f(x) \rightarrow \max$

целевая функция

$$- f(x) \rightarrow \min$$

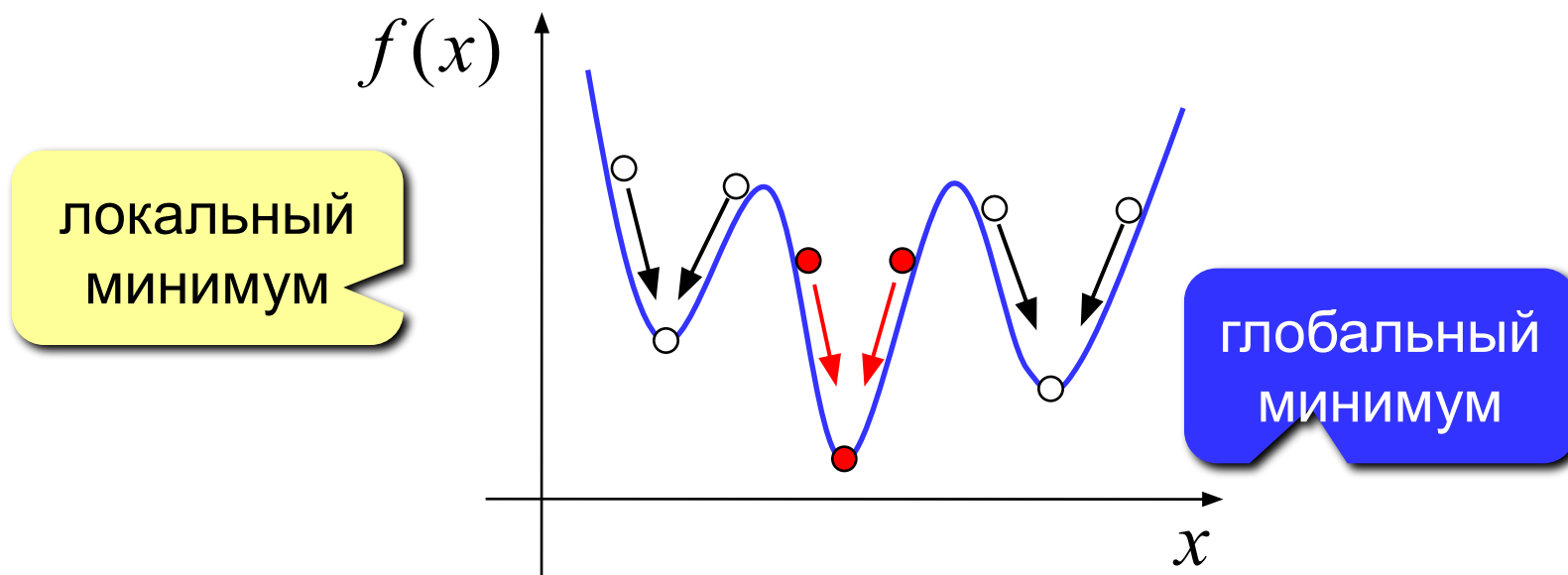
2) **Ограничения**

задача
оптимизации



Почему неправильно «самый оптимальный»?

Что такое минимум?

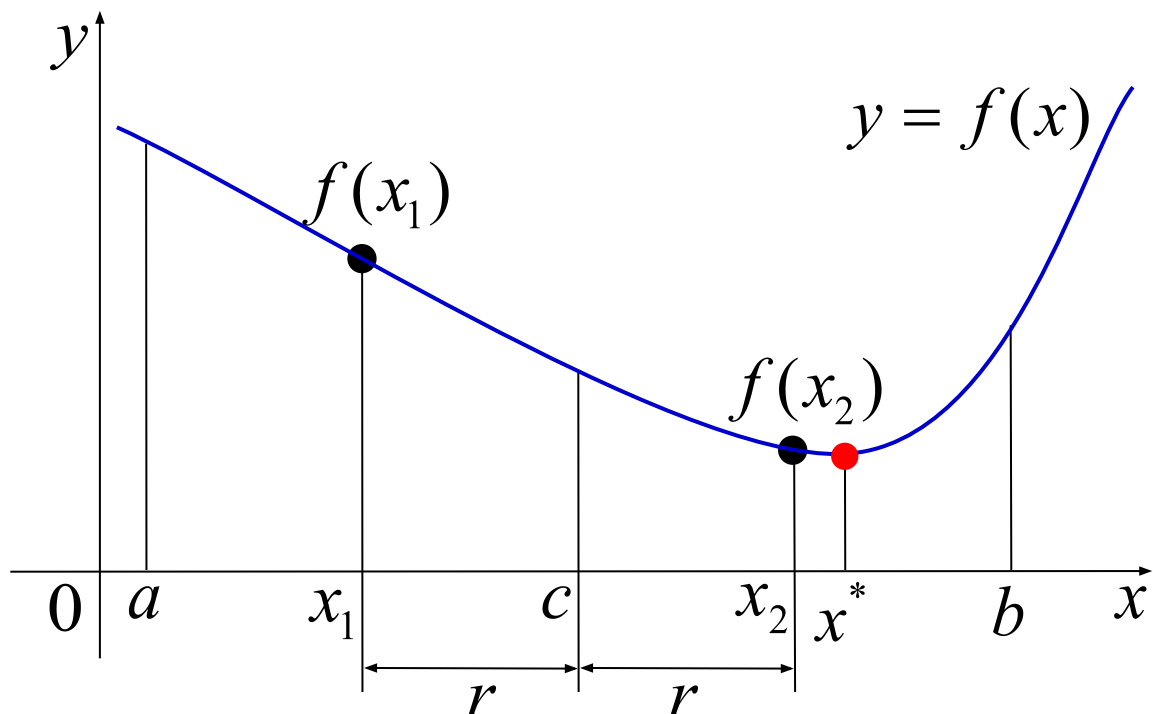


- обычно нужно найти **глобальный** минимум
- большинство численных методов находят только **локальный** минимум



Результат локальной оптимизации зависит от начального приближения!

Метод дихотомии



Алгоритм:

- 1) вычислить середину отрезка: $c = \frac{a+b}{2}$
- 2) найти симметричные точки $x_1 = c - r$, $x_2 = c + r$
- 3) если $f(x_1) > f(x_2)$, далее ищем на $[x_1, b]$
иначе ищем на $[a, x_2]$

Метод дихотомии

$$c = \frac{a+b}{2} \Rightarrow x_1 = c - r, \quad x_2 = c + r$$

? Как выбрать r ?

$$0 < r < \frac{b-a}{2} \Rightarrow r = k \cdot (b-a), \quad 0 < k < 0,5$$

Уменьшение интервала:

стало

было

$$\frac{b-a}{2} + k \cdot (b-a) = (0,5 + k) \cdot (b-a)$$

! Выгоднее выбирать k близко к нулю!

? Почему нельзя $k = 0$?

Метод дихотомии

Алгоритмический язык:

```
k := 0.01
delta := 2*eps
нц пока b - a > delta
  r := k * (b - a)
  x1 := (a + b) / 2 - r
  x2 := (a + b) / 2 + r
  если f(x1) > f(x2) то
    а := x1
  иначе b := x2
все
кц
вывод 'x = ', (a+b) / 2
```



Как улучшить?

Метод дихотомии

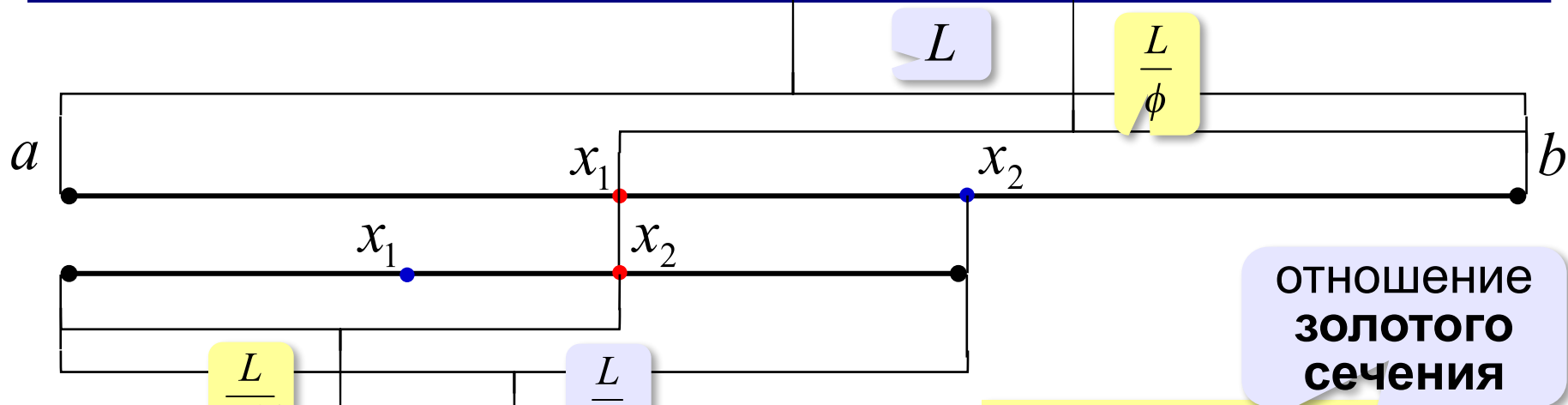
Паскаль:

```
k := 0.01;  
delta := 2*eps;  
while b - a > delta do begin  
    r := k*(b - a);  
    x1 := (a + b) / 2 - r;  
    x2 := (a + b) / 2 + r;  
    if f(x1) > f(x2) then  
        a := x1  
    else b := x2  
end;  
writeln('x = ', (a+b) / 2 : 10 : 3 );
```



Как улучшить?

Метод золотого сечения



ОТНОШЕНИЕ
ЗОЛОТОГО
СЕЧЕНИЯ

$$\frac{L}{\phi^2} = L - \frac{L}{\phi}$$

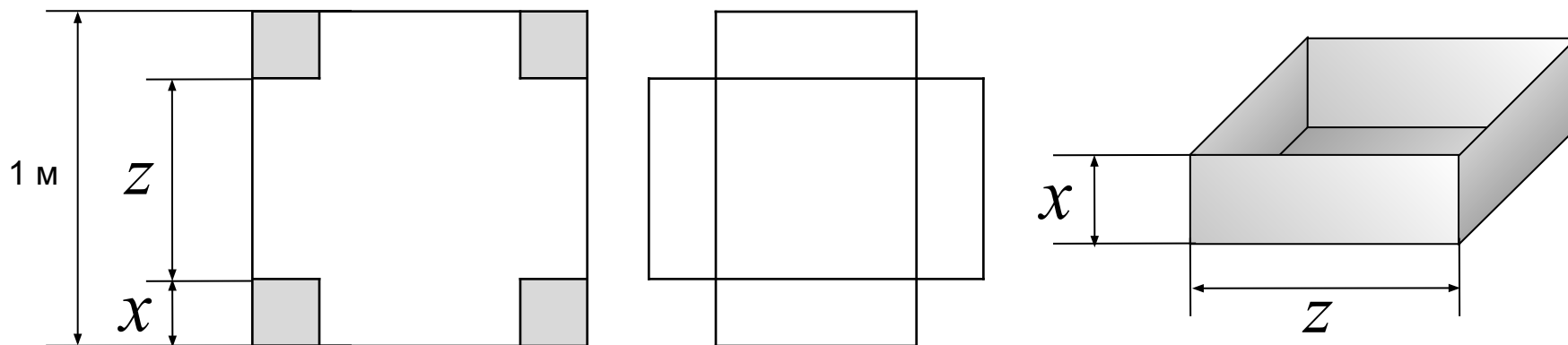
$$\Rightarrow \phi^2 - \phi - 1 = 0 \Rightarrow$$

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618\dots$$

$$\phi = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \approx -0,618\dots$$

$$\frac{(b-a)}{\phi} = (0,5 + k) \cdot (b-a) \Rightarrow 0,5 + k = \frac{1}{\phi}$$

Оптимальный раскрой листа



Цель: $V(x) \rightarrow \max$ $V(x) = x \cdot (1 - 2x)^2 \rightarrow \max$

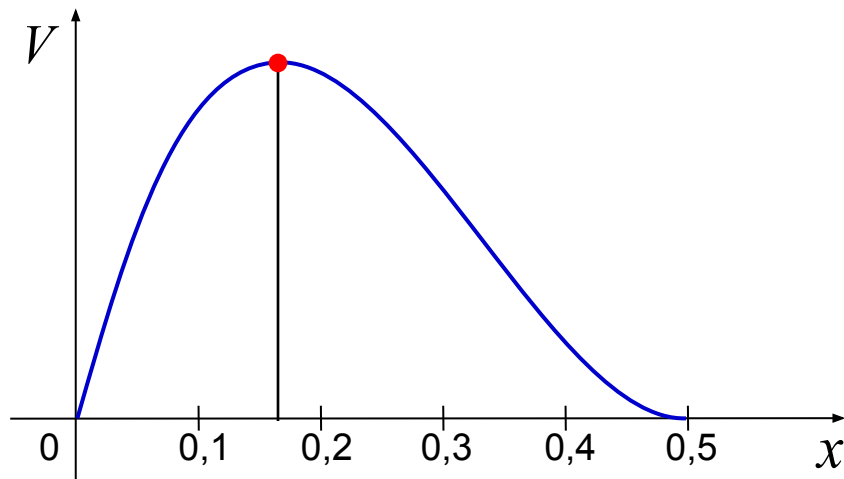
? Какие ограничения?

Ограничения: $0 < x < 0,5$

? Какой результат ожидаете (по интуиции)?

Оптимальный раскрой листа

В табличном процессоре:



начальное
приближение $\approx 0,2$



Какая формула в F2?

		E	F
1	x		Объем
2		0,200	0,072

Оптимизация в табличном процессоре

Задача оптимизации: найти максимум (или минимум) целевой функции в ячейке ..., изменяя значения ячеек ... при ограничениях

OpenOffice.org Calc:

модуль ***Solver for Nonlinear Programming***
(входит в *LibreOffice*)

Excel:

надстройка ***Поиск решения***

Оптимизация в табличном процессоре

OpenOffice.org Calc:

Решатель

Целевая ячейка:

Оптимизация результата: Максимум
 Минимум
 Значение:

Путем изменения ячеек:

Ограничительные условия


Ссылка на ячейку	Операция	Значение
<input type="text" value="\$E\$2"/>	<input type="text" value=">="/>	<input type="text" value="0"/>
<input type="text" value="\$E\$2"/>	<input type="text" value="<="/>	<input type="text" value="0,5"/>
<input type="text"/>	<input type="text" value="<="/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text" value="<="/>	<input type="text"/>

Параметры... Справка Закр^ыть Решить

Оптимизация в табличном процессоре


Excel:

Поиск решения

Установить целевую ячейку: 

Равной: максимальному значению значению:

минимальному значению

Изменяя ячейки: 

Ограничения:
\$E\$2 >= 0

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 73. Статистические расчёты

Что такое статистика?

Статистика – это наука, которая изучает методы обработки и анализа больших массивов данных.

Ряд данных: x_1, x_2, \dots, x_n

только числа!

Свойства ряда данных:

сумма: **=SUM (A1 : A20)** **=СУММ (A1 : A20)**

среднее: **=AVERAGE (A1 : A20)** **=СРЗНАЧ (A1 : A20)**

минимальное: **=MIN (A1 : A20)** **=МИН (A1 : A20)**

максимальное: **=MAX (A1 : A20)** **=МАКС (A1 : 20)**

количество чисел: **=COUNT (A1 : A20)** **=СЧЁТ (A1 : 20)**

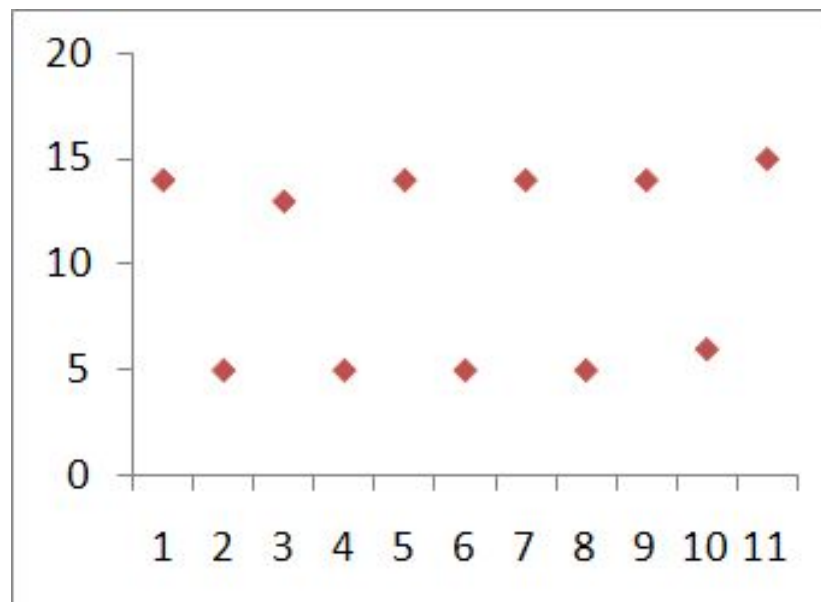
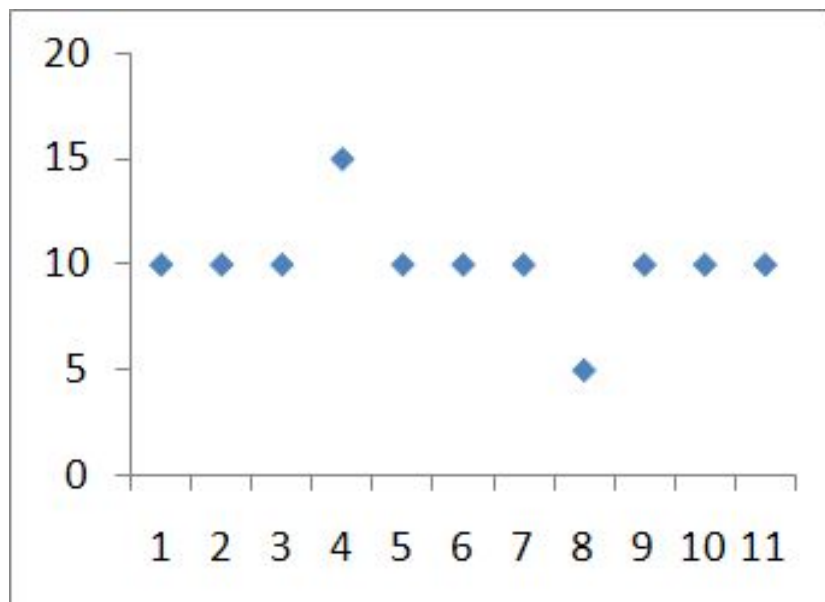
сколько ячеек удовлетворяет условию:

=COUNTIF (A1 : A20 ; "=5") **СЧЁТЕСЛИ**

=COUNTIF (A1 : A20 ; ">3")

Дисперсия

Для этих рядов одинаковы МИН, МАКС, СРЗНАЧ



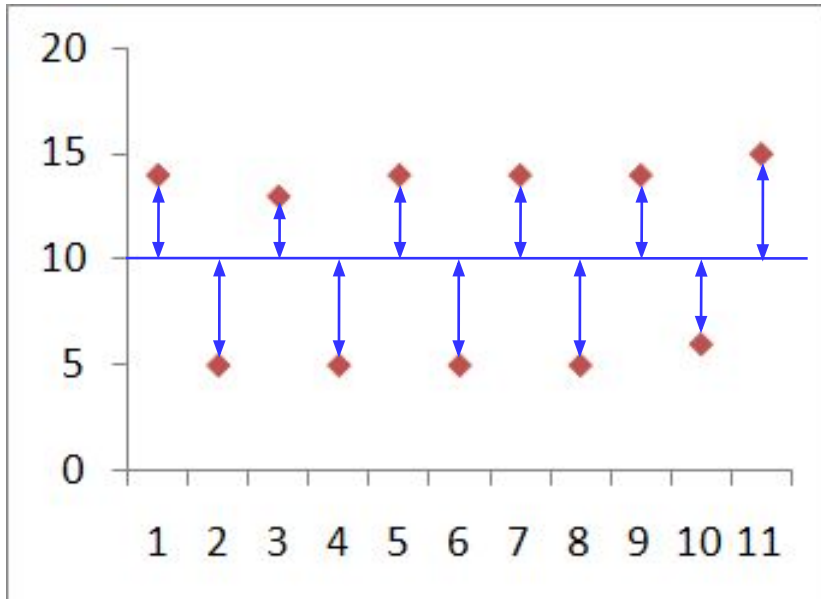
В чем различие?

Дисперсия («разброс») характеризует разброс данных относительно среднего значения.

Дисперсия

$$D_x = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{среднее арифметическое}$$



$(x_1 - \bar{x})^2$ квадрат
отклонения x_1
от среднего

D_x **средний квадрат**
отклонения от
среднего значения

Дисперсия и СКВО

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$



В каких единицах измеряется?

Что неудобно:

если x измеряется в метрах, то D_x – в м^2

СКВО = среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}$$

=STDEV (A1 : A20)

=СТАНДОТКЛОН (A1 : A20)

Условные вычисления

	А	В	С
1	Заказ	Сумма	Доставка
2	1234	256 руб.	51 руб.
3	1345	128 руб.	26 руб.
4	1456	1 024 руб.	0
5	1565	512 руб.	0
6	1576	345 руб.	69 руб.

Доставка:

- бесплатно при >500 руб.
- 20% для остальных

условие

если $V2 > 500$ то

$C2 := 0$

иначе

$C2 := V2 * 0.2$

все

= IF (V2>500; 0; V2*0,2)
 =ЕСЛИ (V2>500; 0; V2*0,2)

если «да»

если «нет»

Сложные условия

NOT (НЕ, отрицание)

AND (И, логическое умножение)

OR (ИЛИ, логическое сложение)

=IF (AND (A2<1500 ; B2>500) ; 0 ; B2*0,2)

	A	B	C	D
1	Фамилия	Год рождения	Рост	Принят
2	Алексеев	1995	176	=IF(AND(B2>1994; C2>175);"да";"-")
3	Викторов	1995	167	=IF(AND(B3>1994; C3>175);"да";"-")
4	Петров	1994	180	=IF(AND(B4>1994; C4>175);"да";"-")

=IF (AND (B2>1994 ; C2>175) ; "да" ; "-")

	A	B	C	D
1	Фамилия	Год рождения	Рост	Принят
2	Алексеев	1995	176	да
3	Викторов	1995	167	–
4	Петров	1994	180	–

Сложные условия

	A	B	C	D
1	Фамилия	Математика	Физика	Принят
2	Алексеев	100	67	=IF(OR(B2=100; C2=100; B2+C2>180); "да"; "-")
3	Викторов	98	98	=IF(OR(B3=100; C3=100; B3+C3>180); "да"; "-")
4	Петров	90	80	=IF(OR(B4=100; C4=100; B4+C4>180); "да"; "-")

=IF (OR (B2=100 ; C2=100 ; B2+C2>=180) ; "да" ; "-")

	A	B	C	D
1	Фамилия	Математика	Физика	Принят
2	Алексеев	100	67	да
3	Викторов	98	98	да
4	Петров	90	80	-

Вложенные условия

	А	В	С
1	Заказ	Сумма	Доставка
2	1234	256 руб.	26 руб.
3	1345	128 руб.	26 руб.
4	1456	1 024 руб.	0
5	1565	512 руб.	0
6	1576	345 руб.	35 руб.

Доставка:

- бесплатно при >500 руб.
- 10% при >200 руб.
- 20% для остальных

```

если В2 > 500 то
    С2 := 0
иначе
    если В2 > 200 то
        С2 := В2 * 0.1
    иначе
        С2 := В2 * 0.2
все
все
  
```

```

=IF (В2>500 ; 0 ; IF (В2>200 ; В2*0,1 ; В2*0,2) )
  
```

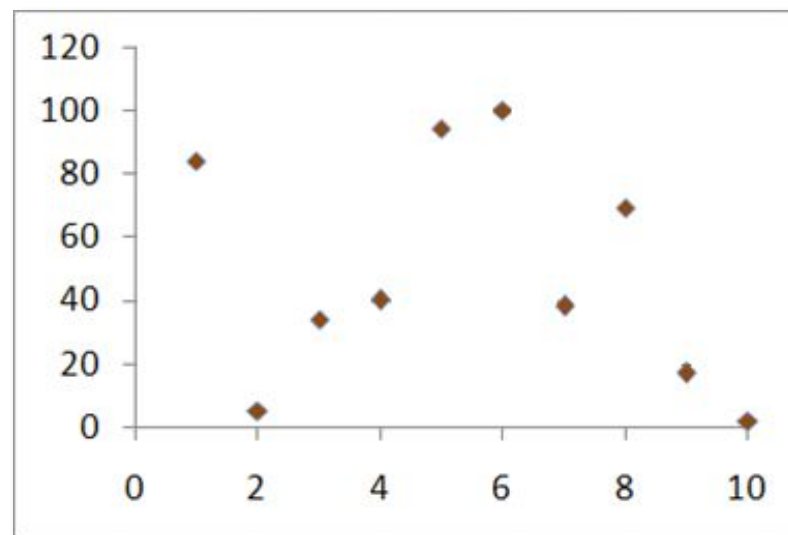
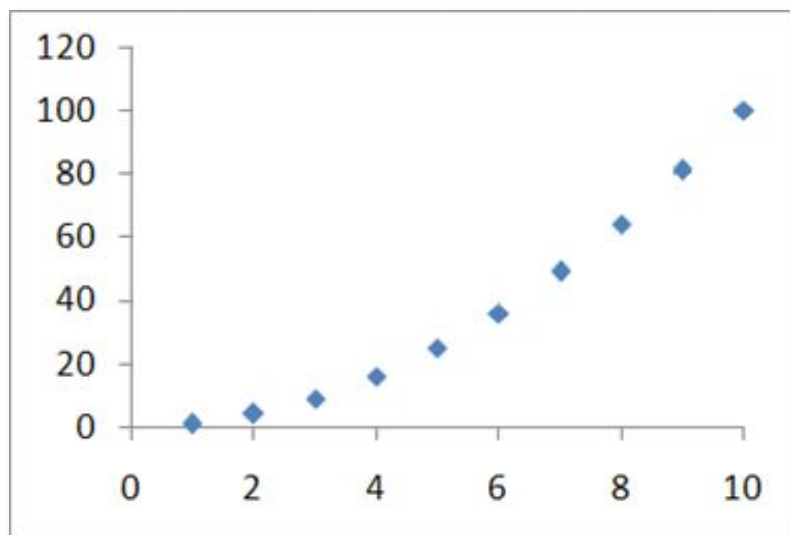
Связь двух рядов данных

Два ряда одинаковой длины:

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad y_1, y_2, \dots, y_n$$

Вопросы:

- есть ли связь между этими рядами (соответствуют ли пары (x_i, y_i) какой-нибудь зависимости $y = f(x)$)
- насколько сильна эта связь?



Коэффициент корреляции

$$\rho_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

средние рядов

СКВО рядов



В каких единицах измеряется?

безразмерный!



Если x и y – один и тот же ряд?

$$-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$$

=CORREL (A1 : A20 ; B1 : B20)

=КОРРЕЛ (A1 : A20 ; B1 : B20)

Коэффициент корреляции

Как понимать это число?

- если $\rho_{xy} > 0$: увеличение X приводит к увеличению Y
- если $\rho_{xy} < 0$: увеличение X приводит к уменьшению Y
- если $\rho_{xy} \approx 0$: связь обнаружить не удалось

Сильная связь: $|\rho_{xy}| > 0,5$

$\rho_{xy} = 1$: линейная зависимость $y = kx + b$, $k > 0$

$\rho_{xy} = -1$: линейная зависимость $y = kx + b$, $k < 0$



Если $\rho_{xy} \approx 0$, то связи нет?

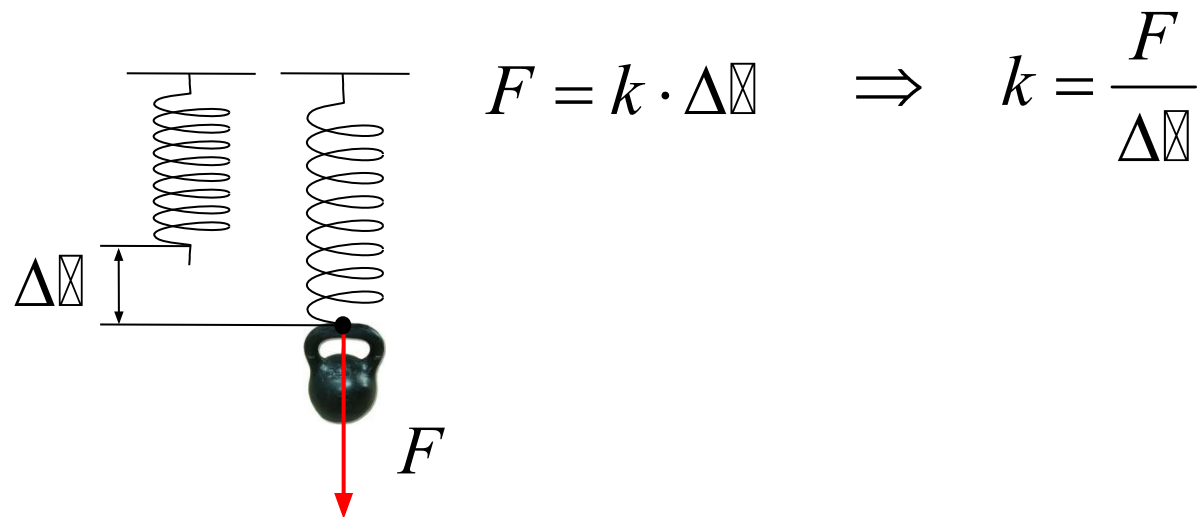


Метод для определения линейной зависимости!

Решение вычислительных задач на компьютере

§ 74. Обработка результатов эксперимента

Закон Гука

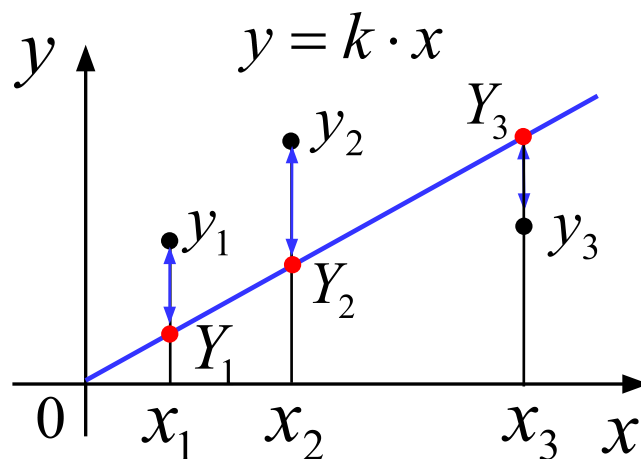


Несколько опытов: $k_i = \frac{F_i}{\Delta x_i}, (i = 1, \dots, n)$



Что принять за k ?

Метод наименьших квадратов (МНК)



НЕИЗВЕСТНО!

$$Y_i = k \cdot x_i$$

Ошибка определяется величиной:

$$E(k) = (Y_1 - y_1)^2 + (Y_2 - y_2)^2 + \dots + (Y_n - y_n)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2$$

Метод наименьших квадратов: $E(k) \rightarrow \min$



Это задача оптимизации!

Метод наименьших квадратов (МНК)

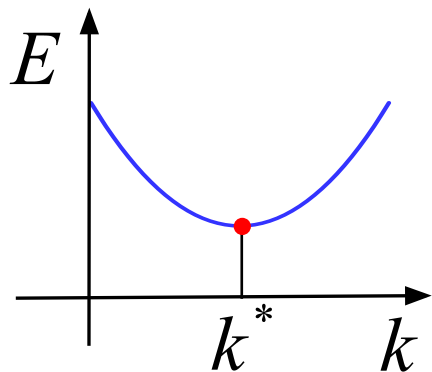
$$(Y_i - y_i)^2 = (k \cdot x_i - y_i)^2 = k^2 x_i^2 - 2kx_i y_i + y_i^2$$

$$E(k) = A \cdot k^2 - B \cdot k + C$$

$$A = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

$$B = 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

$$C = \sum_{i=1}^n y_i^2$$



$$k^* = \frac{B}{2A}$$

Метод наименьших квадратов (МНК)

Алгоритмический язык:

```

A := 0; B := 0
нц для i от 1 до N
  A := A + x[i]*x[i]
  B := B + x[i]*y[i]
кц
k := B / A

```

вещ A, B, k

вещ x[1:N], y[1..N]

$$k^* = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Паскаль:

```

A := 0; B := 0;
for i:=1 to N do begin
  A := A + x[i]*x[i];
  B := B + x[i]*y[i]
end;
k := B / A;

```

var A, B, k: real;

x, y: array[1..N] of real;

Метод наименьших квадратов (МНК)

Табличный процессор:

начальное приближение

	А	В	С	Y
1	k	1,000		
2	E	=SUMXMY2(B5:B7;C5:C7)		
3				
4	x		y	
5	1	СУММКВРАЗН	1,1	=\$B\$1*A5
6	2		1,8	=\$B\$1*A6
7	3		3,5	=\$B\$1*A7

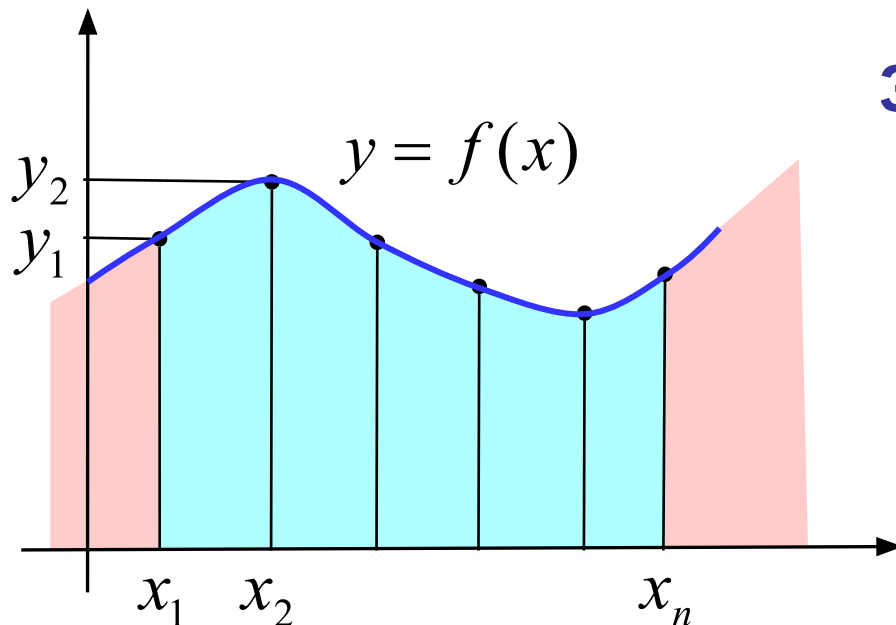
Поиск решения: выбрать B1 так, что B2 \rightarrow min

Восстановление зависимостей

Два ряда одинаковой длины:

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad y_1, y_2, \dots, y_n$$

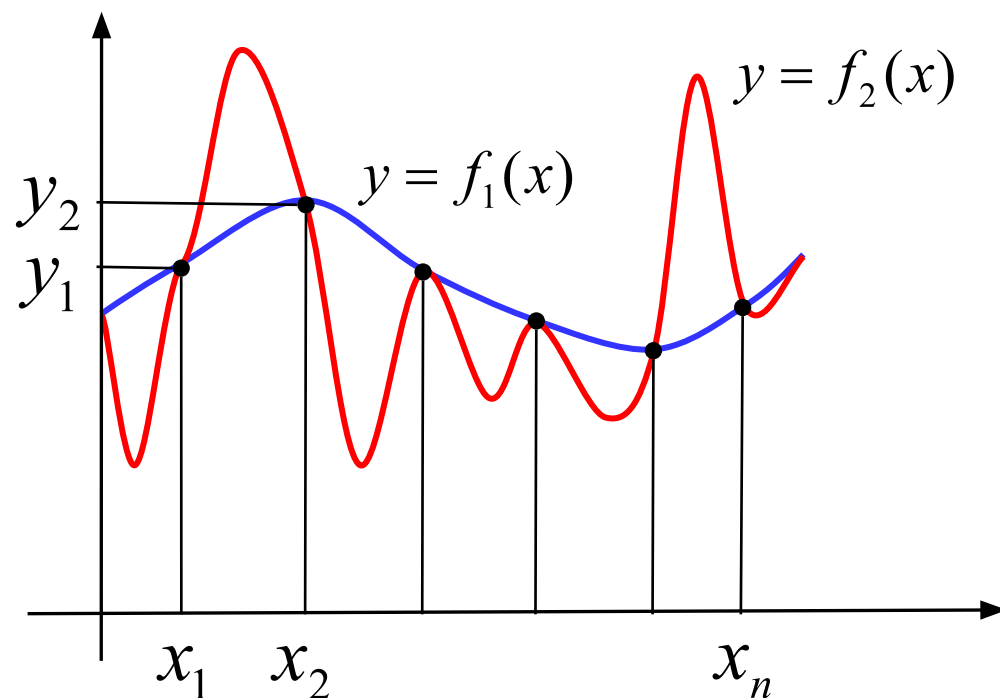
задают некоторую неизвестную функцию $y = f(x)$



Зачем:

- найти y в промежуточных точках (**интерполяция**)
- найти y вне диапазона измерений (**экстраполяция, прогнозирование**)

Восстановление зависимостей

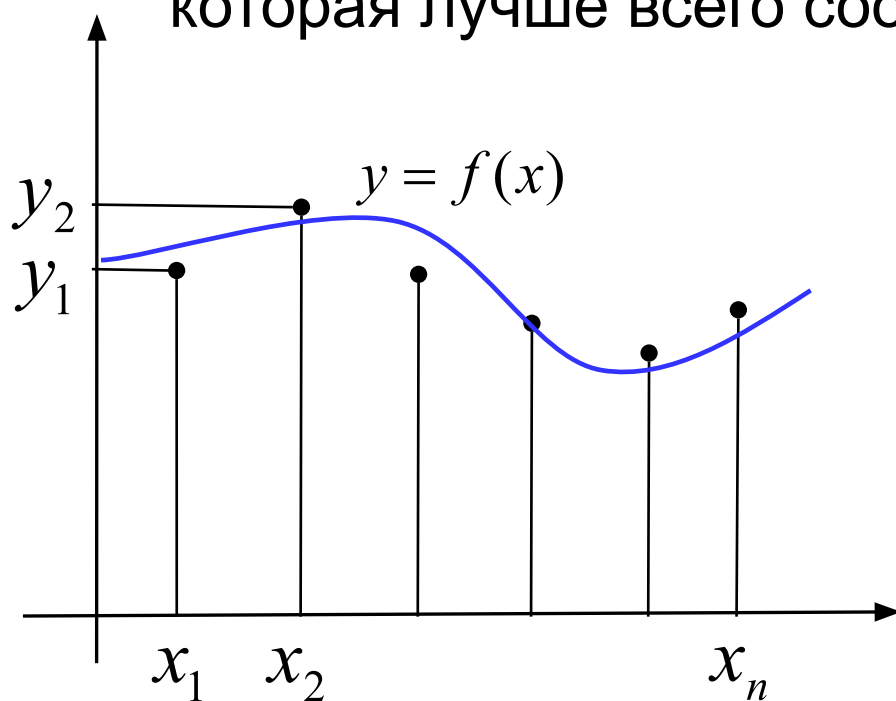


Через заданный набор точек проходит бесконечно много разных кривых!

Вывод: задача **некорректна**, поскольку решение неединственно.

Восстановление зависимостей

Корректная задача: найти функцию заданного вида, которая лучше всего соответствует данным.



Примеры:

- линейная $y = a \cdot x + b$
- полиномиальная $y = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$
- степенная $y = a \cdot x^b$
- экспоненциальная $y = a \cdot e^{bx}$
- логарифмическая $y = a \cdot \ln x + b$



График функции не обязательно проходит через заданные точки!



Как выбрать функцию?

Что значит «лучше всего соответствует»?

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

(x_i, y_i) заданные пары значений

$$Y_i = f(x_i)$$

\bar{y} – среднее значение y_i

коэффициент
детерминации

Крайние случаи:

- если график проходит через точки: $R^2 = 1$
- если считаем, что y не меняется и $Y_i = \bar{y}$: $R^2 = 0$

$$R^2 \rightarrow \max \text{ когда } \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2 \rightarrow \min$$

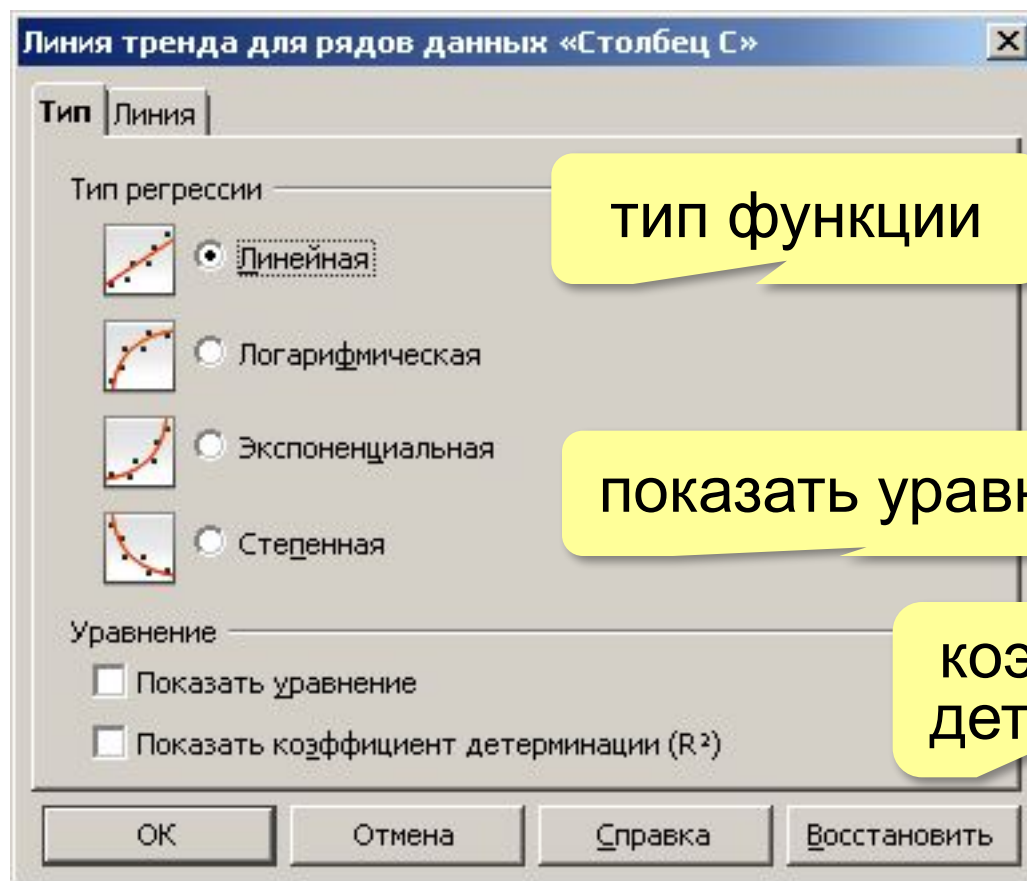


Фактически – метод наименьших квадратов!

Восстановление зависимостей

Табличный процессор:

- 1) Диаграмма XY (Excel: Точечная)
- 2) ПКМ – Вставить линию тренда

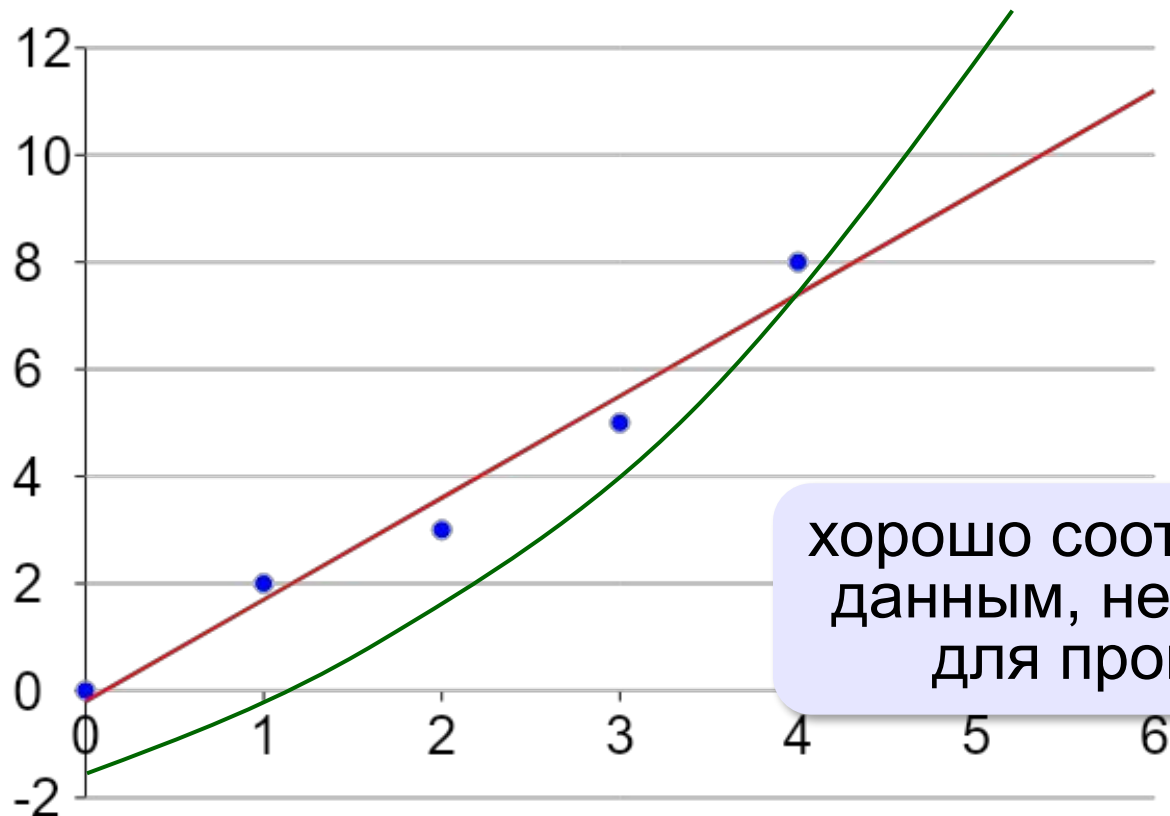


тип функции

показать уравнение

коэффициент
детерминации

Прогнозирование



хорошо соответствует
данным, непригодна
для прогноза!

Конец фильма

ПОЛЯКОВ Константин Юрьевич

д.т.н., учитель информатики

ГБОУ СОШ № 163, г. Санкт-Петербург

kpolyakov@mail.ru

ЕРЕМИН Евгений Александрович

к.ф.-м.н., доцент кафедры мультимедийной

дидактики и ИТО ПГГПУ, г. Пермь

eremin@pspu.ac.ru

Источники иллюстраций

1. vispo.ru
2. www.ars-sport.ru
3. иллюстрации художников издательства «Бином»
4. авторские материалы