

Матан Лаба

Павел Андреев, Григорий Горбушкин, Евгений Турчанин

## Вавилонский метод

1. Покажем, что данная последовательность сходится куда надо. Предположим, что она действительно сходится, тогда пусть  $A$  - то, куда она сходится, АК предел, тогда:

$$A = \frac{1}{2} \left( A + \frac{a}{A} \right) \Rightarrow A = \sqrt{a}$$

Покажем, что данная последовательность вообще сходится, для этого нам нужна монотонность и ограниченность:

(a) Монотонность

$$x_n - x_{n-1} = \frac{1}{2} \left( x_{n-1} + \frac{a}{x_{n-1}} \right) - x_{n-1} = -\frac{1}{2} x_{n-1} + \frac{1}{2} \frac{a}{x_{n-1}}$$

Для монотонности нужно показать больше или меньше нуля это выражение, для этого сравним два числа:

$$\frac{1}{2} x_{n-1} \leq \frac{1}{2} \frac{a}{x_{n-1}} \Rightarrow x_{n-1}^2 \leq a \Rightarrow \text{тк } x_{n-1} > \sqrt{a} \Rightarrow \text{Убывает}$$

Покажем в явном виде, что  $x_{n-1} > \sqrt{a}$ , по теореме Кашина

$$x_{n-1} = \frac{1}{2} \left( x_{n-2} + \frac{a}{x_{n-2}} \right) \geq 2 \sqrt{\frac{1}{4} x_{n-2} \cdot \frac{a}{x_{n-2}}} = \sqrt{a}$$

(b) Ограниченность

Отсюда получаем и ограниченность, тк если каждый член последовательности меньше  $\sqrt{a}$ , то последовательность ограничена снизу. ~~И вообще кто молодец? Я молодец! Правильно? Правильно!~~

2. Из выше написанного следует что  $\frac{x_n}{\sqrt{a}} - 1 \geq 0$

Покажем что  $\varepsilon_{n+1} = \frac{\varepsilon_n^2}{2(1 + \varepsilon_n)}$ :

$$\varepsilon_{n+1} = \frac{x_{n+1}}{\sqrt{a}} - 1 = \frac{1}{2\sqrt{a}} \left( x_n + \frac{a}{x_n} \right) - 1 = \frac{1}{2} \left( \frac{x_n}{\sqrt{a}} + \frac{a}{x_n \sqrt{a}} - 2 \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{x_n^2 + a - 2x_n \sqrt{a}}{\sqrt{a} x_n} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{(x_n - \sqrt{a})^2}{\sqrt{a} x_n} \right)$$

Ну это очевидно равно  $\frac{\varepsilon_n^2}{2(1 + \varepsilon_n)}$

Теперь покажем что  $\varepsilon_{n+2} \leq \frac{1}{2} \min(\varepsilon_{n+1}^2, \varepsilon_{n+1})$

$$\varepsilon_{n+2} = \frac{\varepsilon_{n+1}^2}{2(1 + \varepsilon_{n+1})} \Rightarrow \frac{\varepsilon_{n+1}^2}{(1 + \varepsilon_{n+1})} \leq \min(\varepsilon_{n+1}^2, \varepsilon_{n+1})$$

Рассмотрим три случая:

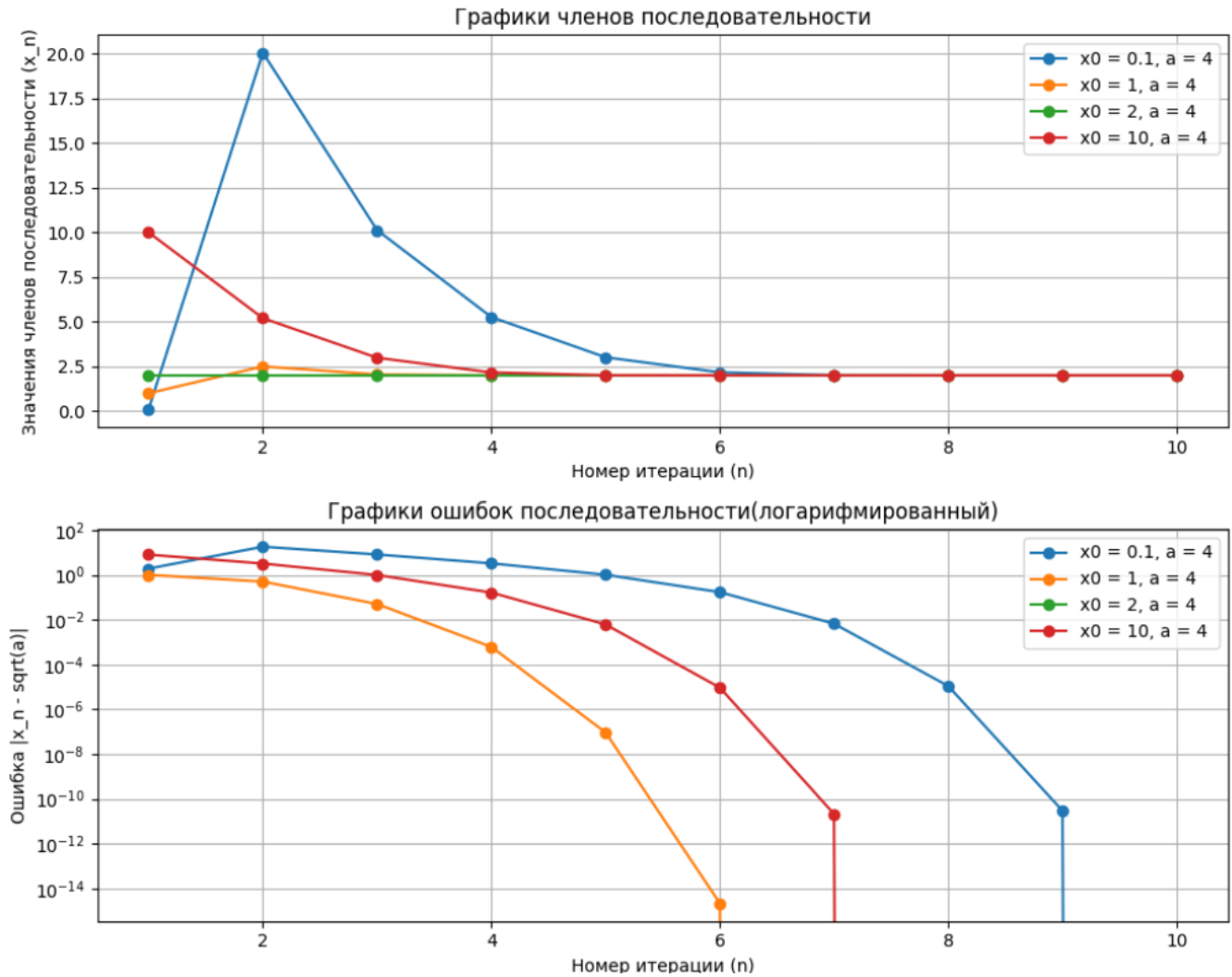
$$(a) \quad 0 < \varepsilon_{n+1} < 1 \Rightarrow \varepsilon_{n+1} > \varepsilon_{n+1}^2 \Rightarrow \frac{\varepsilon_{n+1}^2}{(1 + \varepsilon_{n+1})} \leq \varepsilon_{n+1}^2 \Rightarrow \frac{1}{1 + \varepsilon_{n+1}} \leq 1 \Rightarrow \frac{1}{1 + \varepsilon_{n+1}} < 1$$

$$(b) \quad \varepsilon_{n+1} = 1 \Rightarrow \frac{1}{1 + 1} < 1$$

$$(c) \quad \varepsilon_{n+1} > 1 \Rightarrow \frac{\varepsilon_{n+1}^2}{(1 + \varepsilon_{n+1})} \leq \varepsilon_{n+1} \Rightarrow \varepsilon_{n+1}^2 \leq \varepsilon_{n+1} + 1 \Rightarrow 0 < 1$$

Ну и мое любимое

**ЧТД**



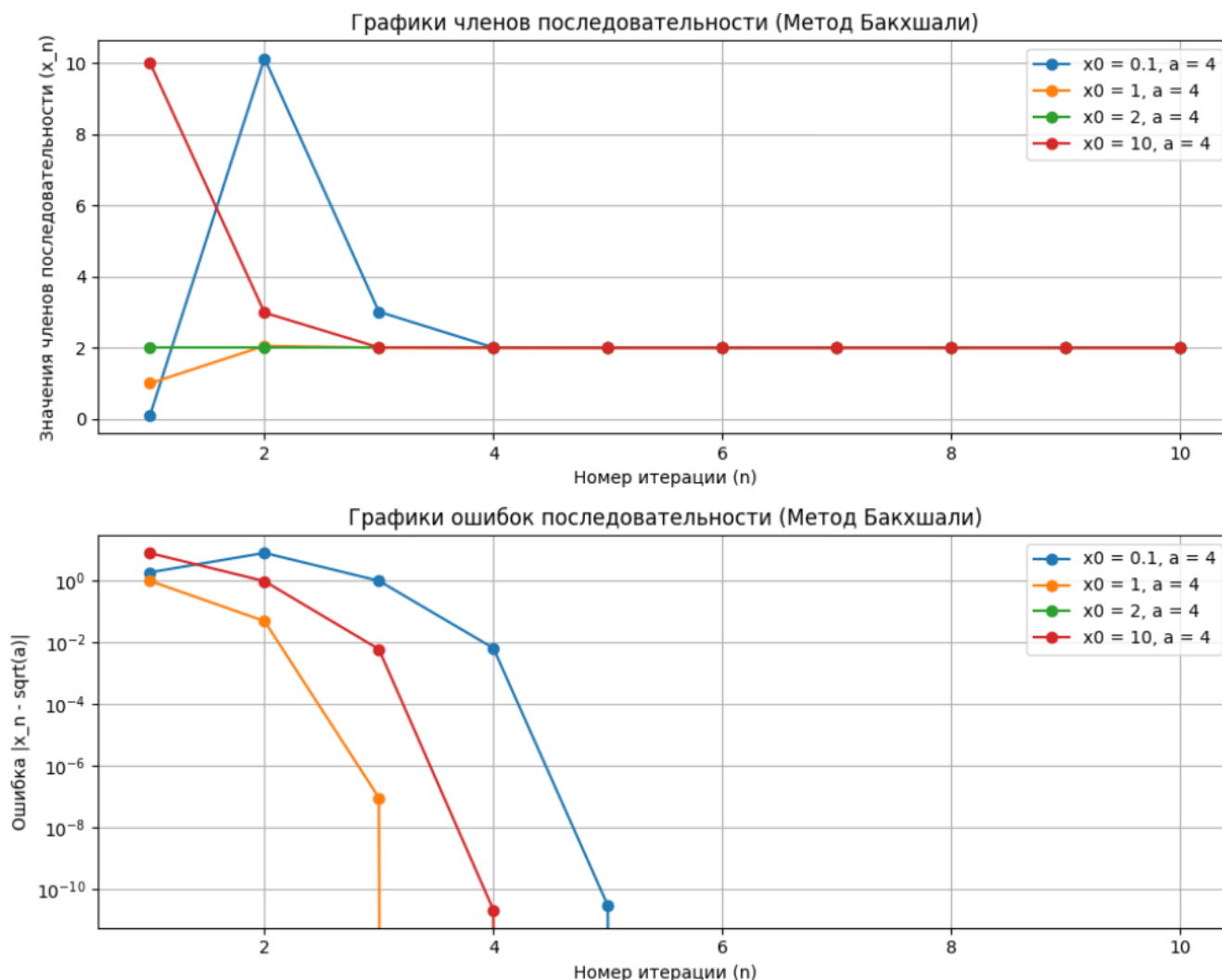
## Метод Бакхшали

$$x_1 = \frac{1}{2} \left( x_0 + \frac{a}{x_0} \right) \Rightarrow x_2 = \frac{1}{4} \left( x_0 + \frac{a}{x_0} \right) + \frac{a}{\left( x_0 + \frac{a}{x_0} \right)} = \frac{\left( \left( \frac{x_0^2 + a}{x_0} \right)^2 + 4a \right) x_0}{4(x_0^2 + a)} = \frac{(x_0^2 + a)^2 + 4ax_0^2}{4x_0(x_0^2 + a)} = \boxed{\frac{x_0^4 + 6x_0^2a + a^2}{4x_0^3 + 4ax_0}}$$

Посчитаем одну итерацию второго метода:

$$x_1^* = x_0 + \frac{a - x_0^2}{2x_0} - \frac{(a - x_0^2)^2}{8 \left( x_0 + \frac{a - x_0^2}{2x_0} \right) x_0^2} = \frac{x_0^2 + a}{2x_0} - \frac{(a - x_0^2)^2}{8 \left( x_0 + \frac{a - x_0^2}{2x_0} \right) x_0^2} = \frac{x_0^2 + a}{2x_0} - \frac{(a - x_0^2)^2}{2x_0 (4x_0^2 + 2(a - x_0^2))} =$$

$$\frac{(x_0^2 + a)(2x_0^2 + 2a) - (a - x_0^2)^2}{2x_0 (2x_0^2 + 2a)} = \frac{2x_0^4 + 4ax_0^2 + 2a^2 - (a^2 - 2ax_0^2 + x_0^4)}{4x_0^3 + 4x_0a} = \boxed{\frac{x_0^4 + 6ax_0^2 + a^2}{4x_0^3 + 4ax_0}}$$



## Интерактивный метод с двумя переменными

1. Покажем связь между  $c_{n+1}$  и  $c_n$ :

$$1 + c_{n+1} = (1 + c_n) \left(1 - \frac{c_n}{2}\right)^2$$

Раскроем правую часть:

$$1 + \frac{c_n^2(c_n - 3)}{4} = (1 + c_n) \left(1 - c_n + \frac{c_n^2}{4}\right)$$

$$1 + \frac{c_n^3}{4} - \frac{3c_n^2}{4} = 1 - c_n + \frac{c_n^2}{4} + c_n - c_n^2 + \frac{c_n^3}{4}$$

$$1 + \frac{c_n^3}{4} - \frac{3c_n^2}{4} = 1 + \frac{c_n^3}{4} - \frac{3c_n^2}{4}$$

Теперь все стало очевидно

2. Докажем по индукции соотношение  $a(1 + c_n) = a_n^2$ :

(а) База индукции:

При  $n = 0$ :  $a(1 + a - 1) = a_0^2 \Rightarrow a^2 = a^2$  - верно

(b) Индукционный переход:

Предположим, что утверждение верно для  $n = k$ , докажем для  $n = k + 1$ :

$$a(1 + c_{k+1}) = a_{k+1}^2$$

$$a \left( 1 + \frac{c_k^2(c_k - 3)}{4} \right) \stackrel{?}{=} \left( a_k - \frac{a_k c_k}{2} \right)^2$$

$$a + \frac{ac_k^3}{4} - \frac{3ac_k^2}{4} \stackrel{?}{=} a_k^2 - a_k^2 c_k + \frac{a_k^2 c_k^2}{4}$$

$$a + \frac{ac_k^3}{4} - \frac{3ac_k^2}{4} \stackrel{?}{=} a(1 + c_k) - a(c_k + c_k^2) + a \left( \frac{c_k^2}{4} + \frac{c_k^3}{4} \right)$$

$$a + \frac{ac_k^3}{4} - \frac{3ac_k^2}{4} \stackrel{?}{=} a + ac_k - ac_k - ac_k^2 + \frac{ac_k^2}{4} + \frac{ac_k^3}{4}$$

$$a + \frac{ac_k^3}{4} - \frac{3ac_k^2}{4} \stackrel{?}{=} a + \frac{ac_k^3}{4} - \frac{3ac_k^2}{4}$$

~~Теперь все стало еще очевиднее~~

Докажем, что  $c_n \rightarrow 0 \Leftrightarrow a_n \rightarrow \sqrt{a}$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a(1 + c_{n+1})) = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+1}^2)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a) + \lim_{n \rightarrow \infty} (ac_{n+1}) = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+1}^2)$$

$$a + 0 = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+1}^2)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+1}) = \sqrt{a}$$

3. Найдем все возможные пределы данной последовательности:

$$A = \frac{A^2(A - 3)}{4} \Rightarrow A_1 = 0; A_2 = -1; A_3 = 4$$

Покажем, что -1 и 4 не могут быть пределами последовательности при  $-1 < c < 2$ :

(a) Если -1 - предел, то с некоего номера все члены лежать 'рядом' с -1, рассмотрим такой  $-1 < c_n < 0$ , тогда

$$c_n \stackrel{?}{=} \frac{c_n^2(c_n - 3)}{4}$$

$$0 \stackrel{?}{=} \frac{c_n(c_n + 1)(c_n - 4)}{4}$$

Понятно, что это число положительное, те  $c_n > \frac{c_n^2(c_n - 3)}{4}$ , те последовательность возрастает, те -1 не может быть пределом

(b) Если 4 - предел: По аналогии, если 4 - предел, то с некоего номера все члены лежать 'рядом' с 4, рассмотрим такой  $3 < c_n < 4$ , тогда

$$c_n \stackrel{?}{=} \frac{c_n^2(c_n - 3)}{4}$$

$$0 \stackrel{?}{=} \frac{c_n(c_n + 1)(c_n - 4)}{4}$$

Понятно, что это число отрицательное, те  $c_n < \frac{c_n^2(c_n - 3)}{4}$ , те последовательность убывает, те 4 не может быть пределом

~~Если говорить прямо~~ Для каждого из этих случаев, если пределом является -1/4, то можно выделить бесконечную подпоследовательность, которая не будет идти к -1/4

(с) Покажем, что 0 является пределом, по критерию Коши, для этого покажем, что все числа последовательности лежат в  $(-1, 2)$ :

Понятно, что  $c_0$  лежит в  $(-1, 2)$ , покажем, что если верно для  $c_n$ , то верно при  $c_{n+1}$ :

$$-1 < c_n < 2 \Rightarrow (c_n - 2)^2(c_n + 1) > 0 \Rightarrow c_n^3 - 3c_n^2 + 4 > 0 \Rightarrow c_n^2(c_n - 3) > -4 \Rightarrow \frac{c^2(c - 3)}{4} > -1$$

И понятно, что все члены прогрессии (начиная с  $c_1$ ) лежат ниже 0, поэтому с  $c_1$ , все члены лежат в  $(-1, 0)$ , а выше показано, что при  $(-1, 0)$ , последовательность возрастает и огр. нулем  $\Rightarrow 0$  является пределом

