

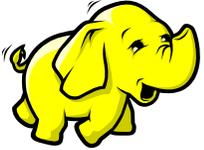
Data Sketches – быстро, дешево и (почти) точно!

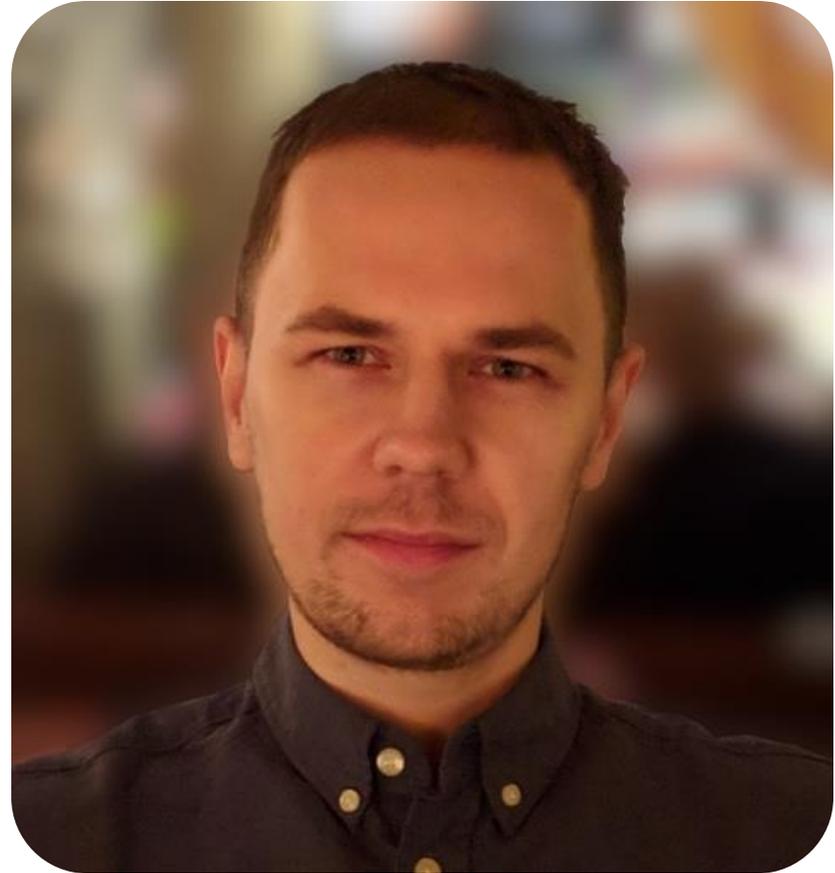
Сергей Жемжицкий

Деп. СТО

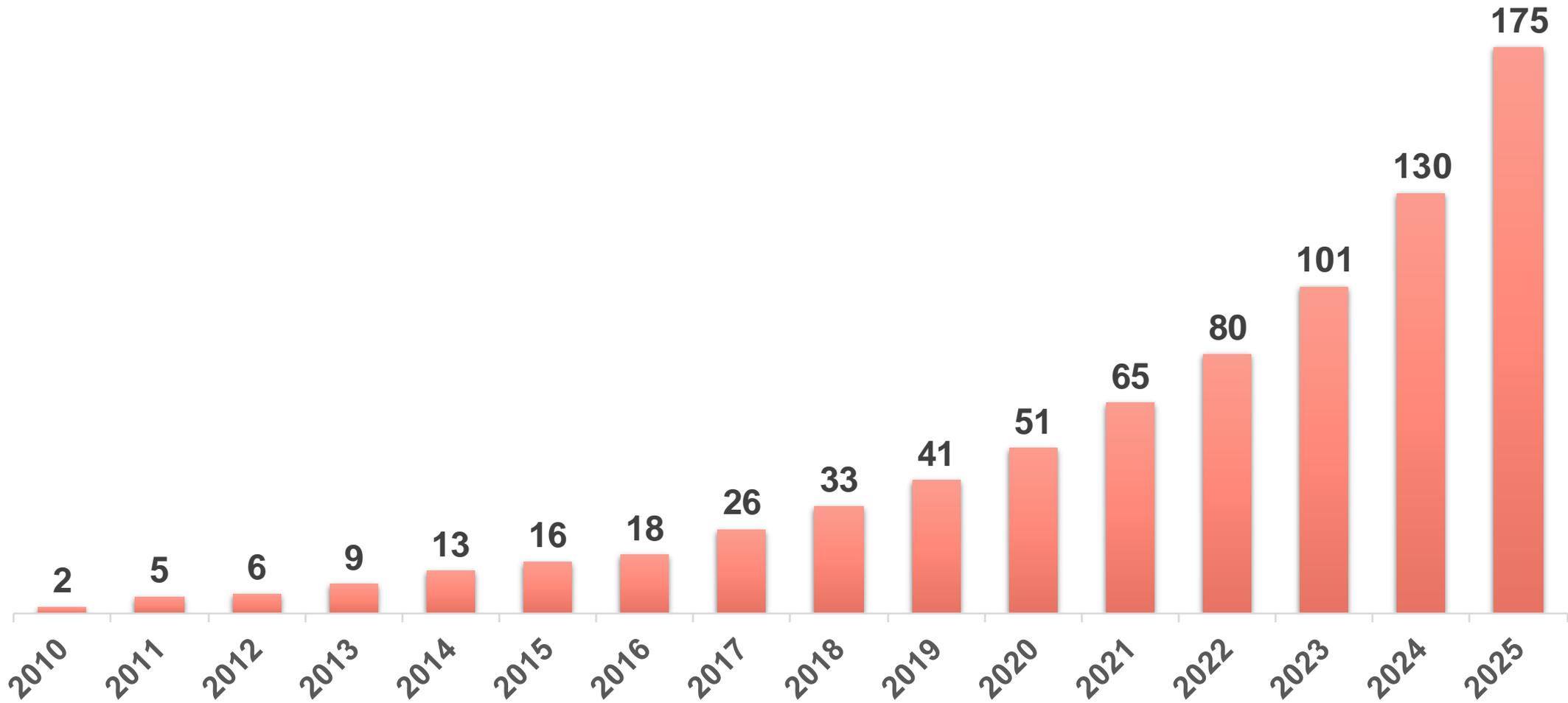


Обо мне

- Работаю с данными 15 лет
- За это время научился устанавливать Hadoop 
- Знаю кое-что об обработке данных
- Deputy CTO Arenadata



Объем данных в мире, зеттабайт



Объем данных в мире, зеттабайт

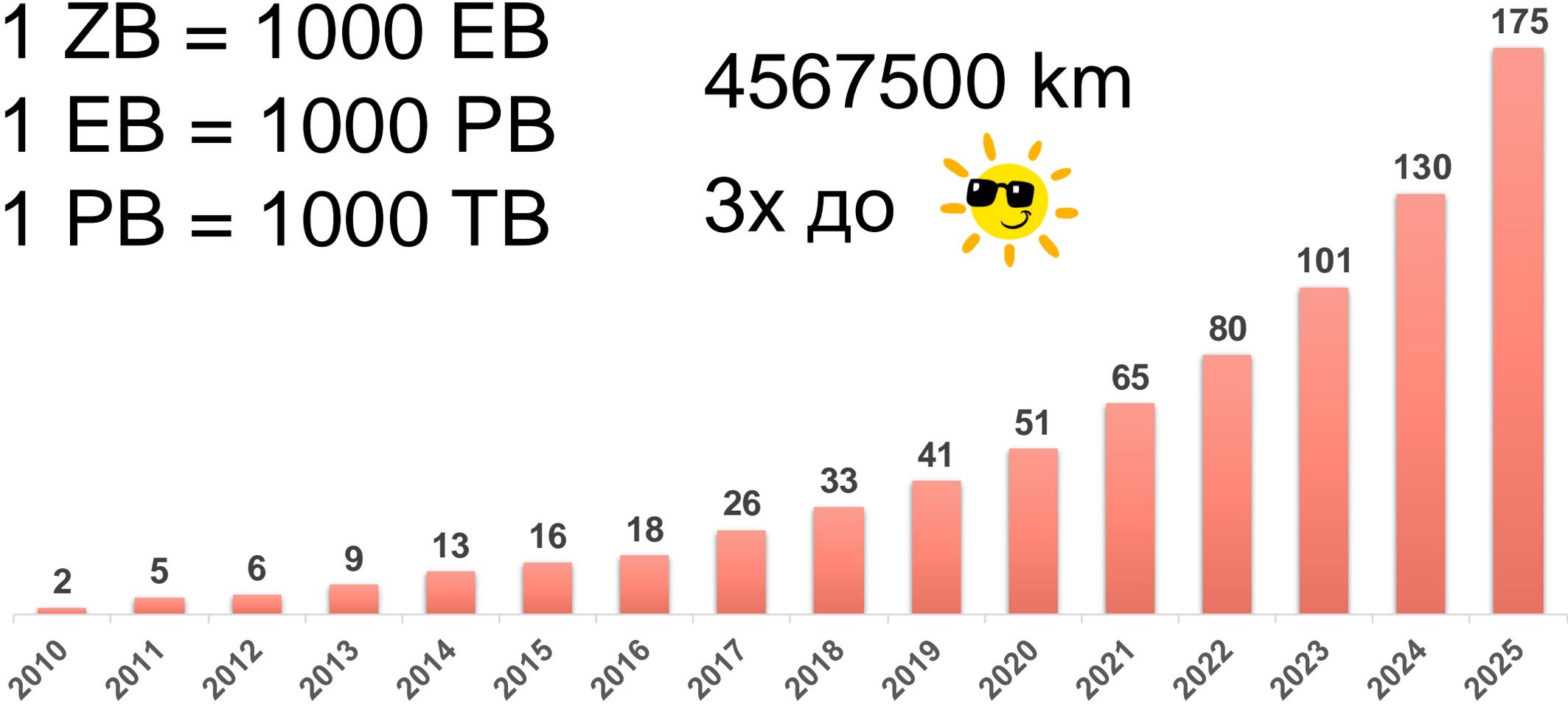
1 ZB = 1000 EB

1 EB = 1000 PB

1 PB = 1000 TB

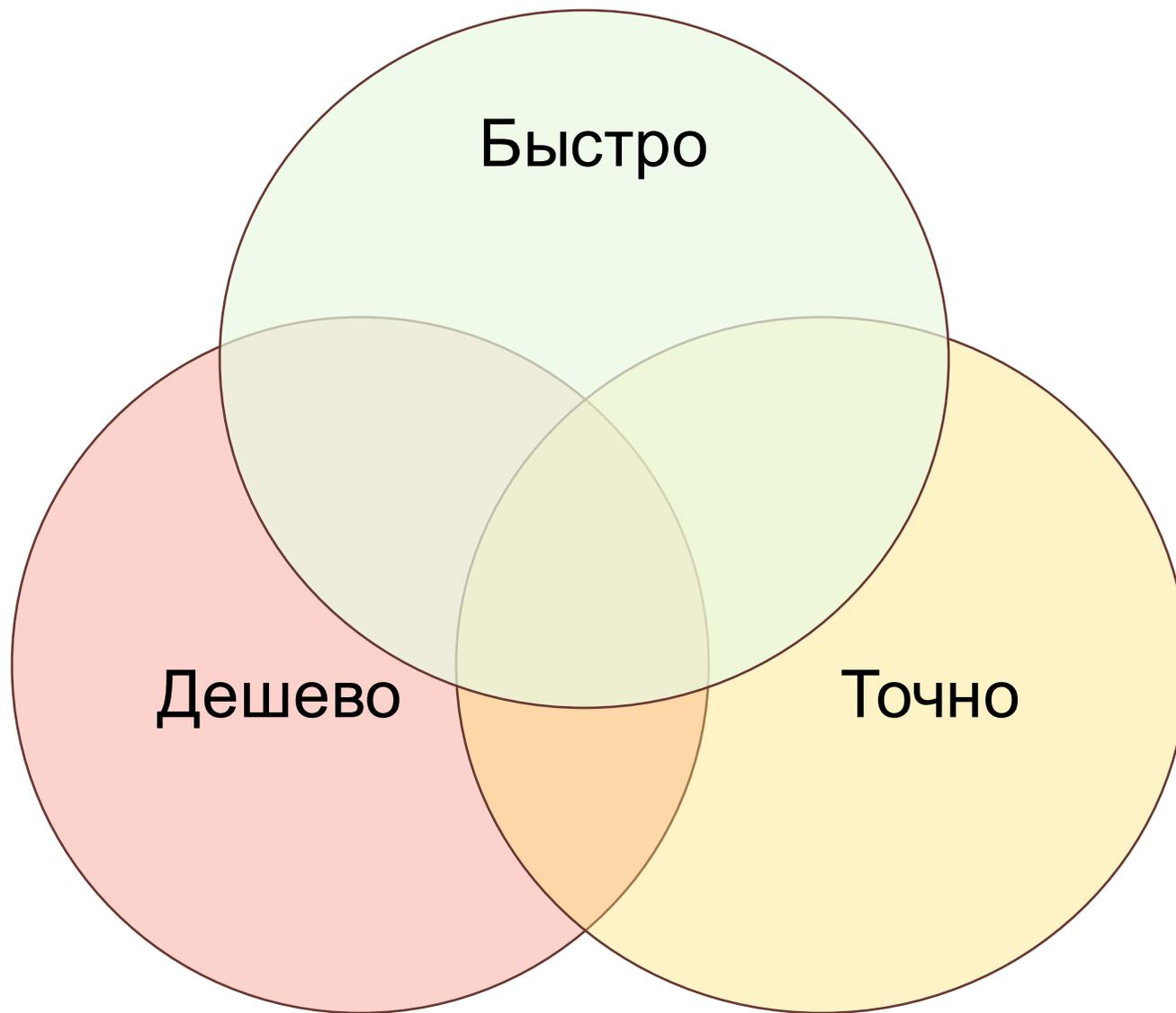
4567500 km

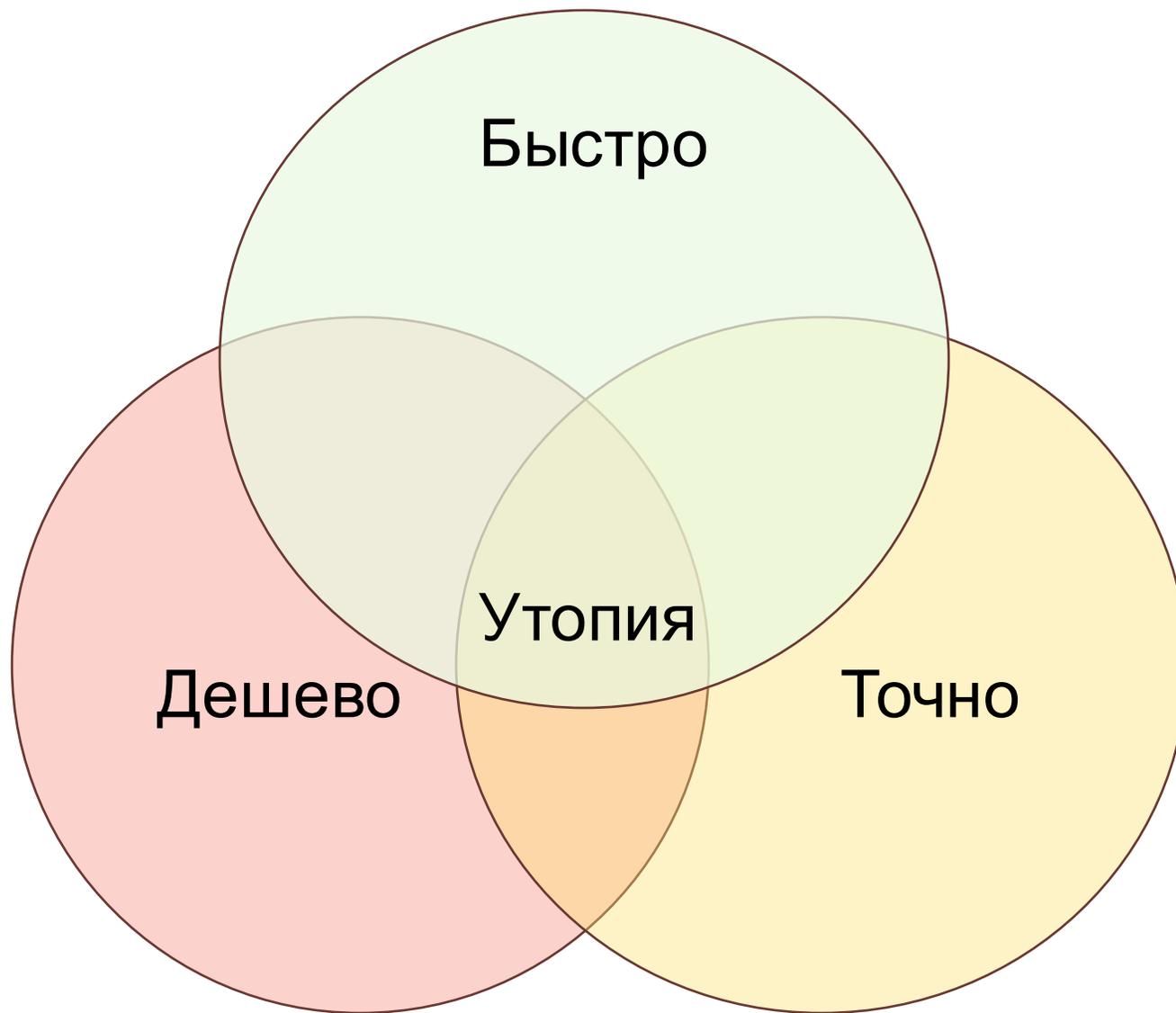
3x до

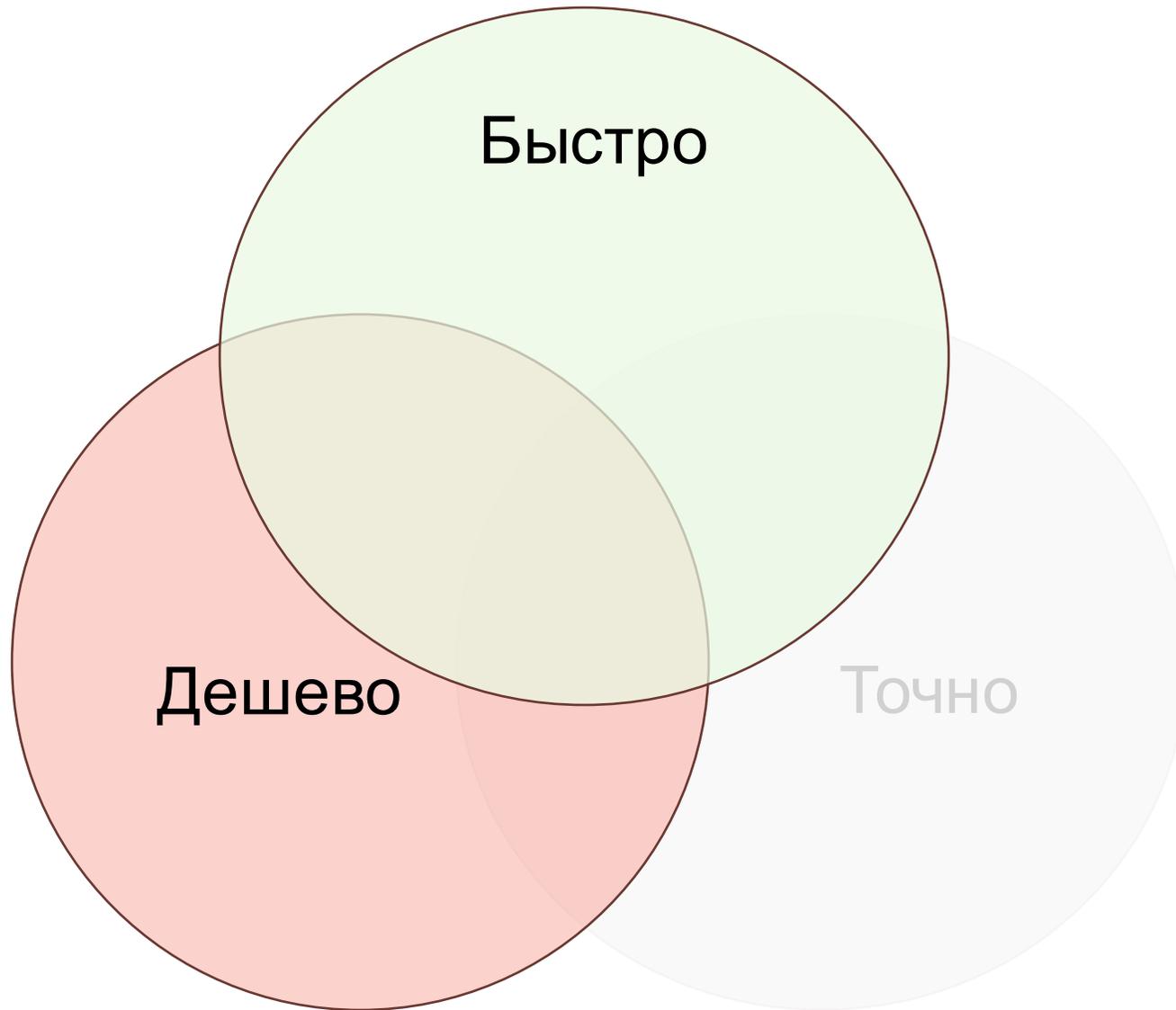


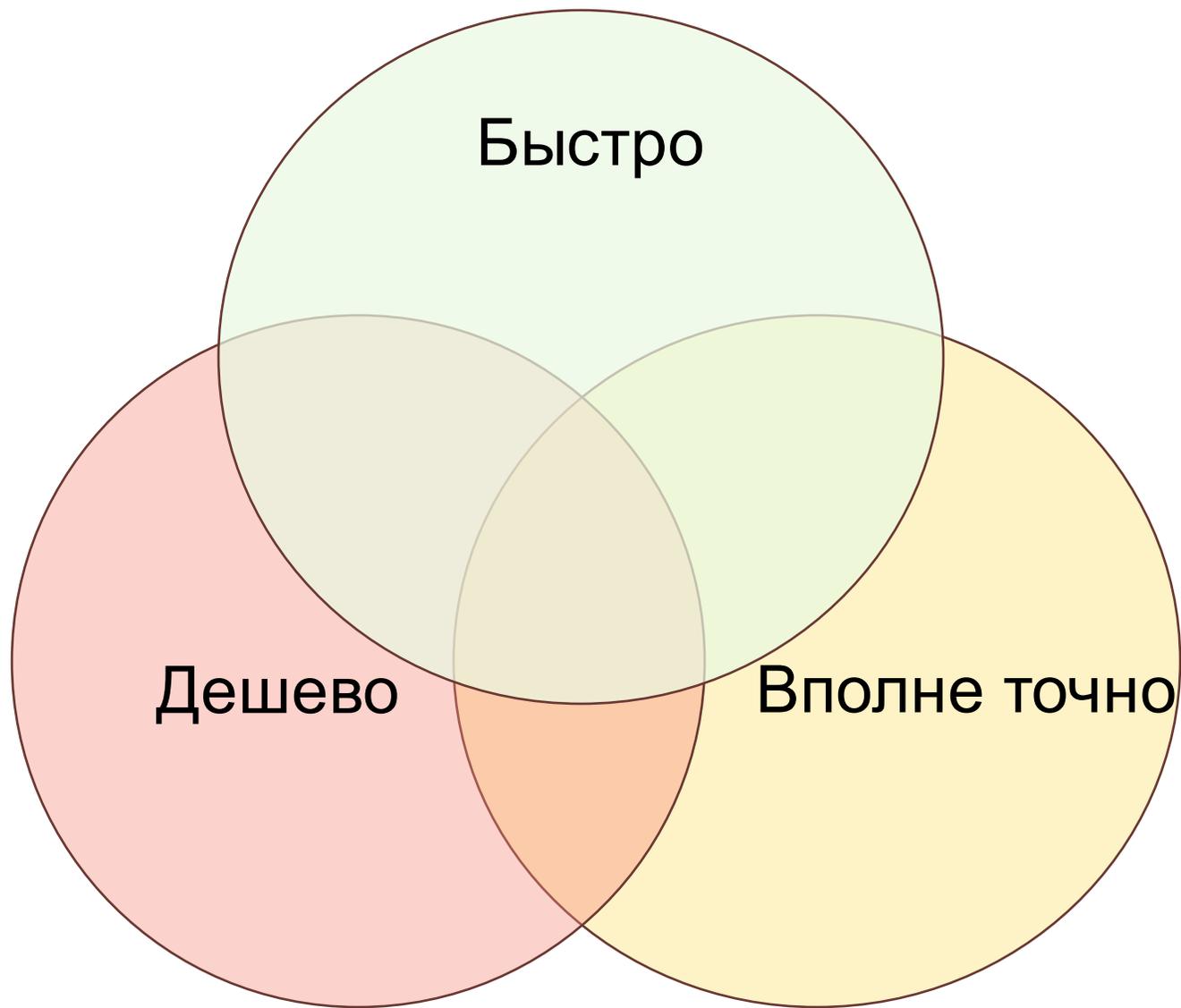
Big Data – Small Data

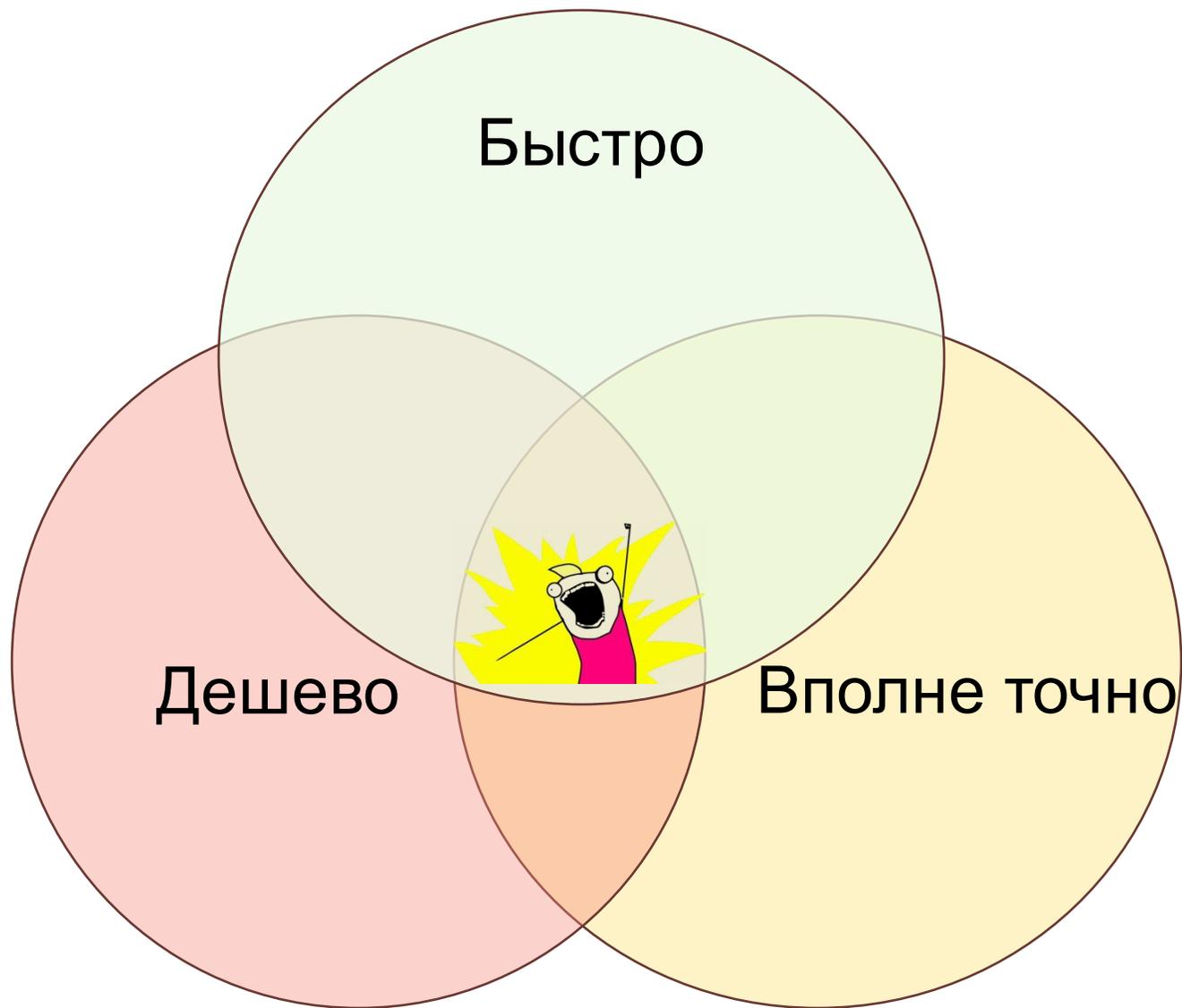
- Способы хранения данных
- Компрессия, сжатие данных
- Партиционирование и шардирование
- Форматы хранения данных (Avro, Parquet, ORC)
- Табличные форматы хранения (Iceberg, Hudi, Delta)
- Индексы











О чем поговорим

- Подсчет уникальных элементов
- Частота встречаемости
- Квантили и гистограммы

О чем поговорим

- Подсчет уникальных элементов
- Частота встречаемости
- Квантили и гистограммы

Data Sketches

Data Sketches

80-e

Philippe Flajolet и др.



90-e

Andre Broder, Ravi Kumar, Edith Cohen и др.

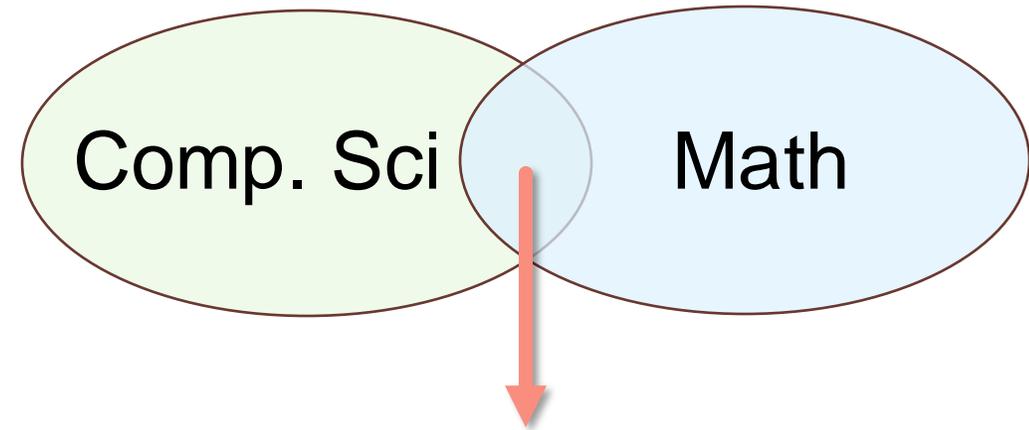


00-e

Graham Cormode и др.

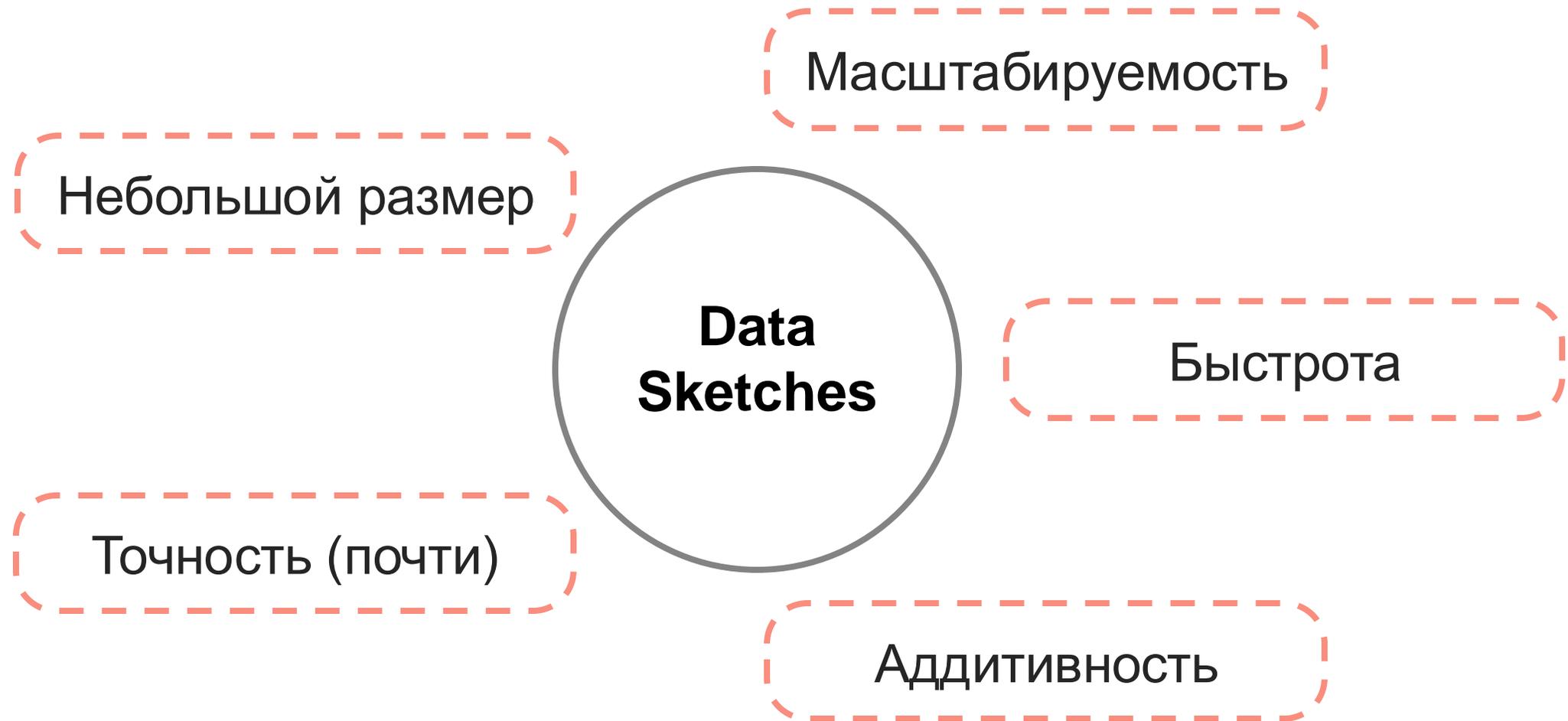


Взрыв количества научных публикаций



Stochastic Streaming Algorithms
Approximate Query Processing

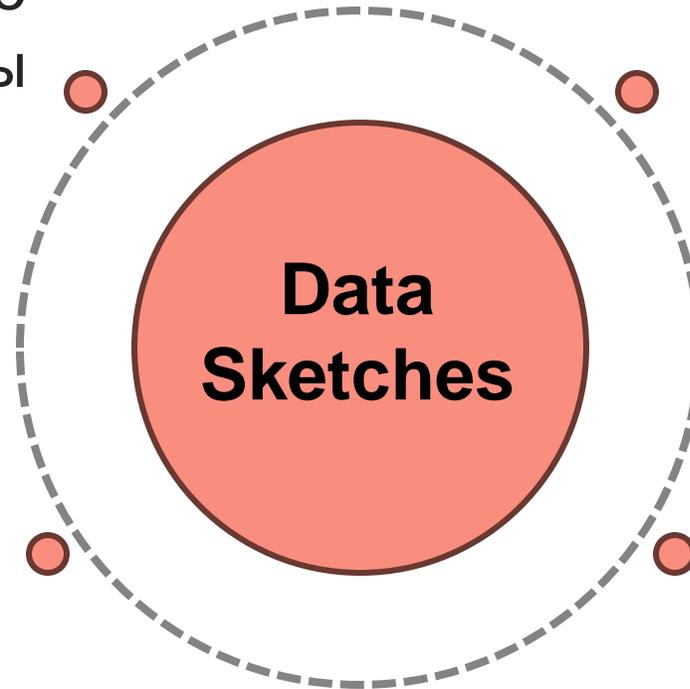
Свойства



Применение

Приблизительные
результаты приемлемы

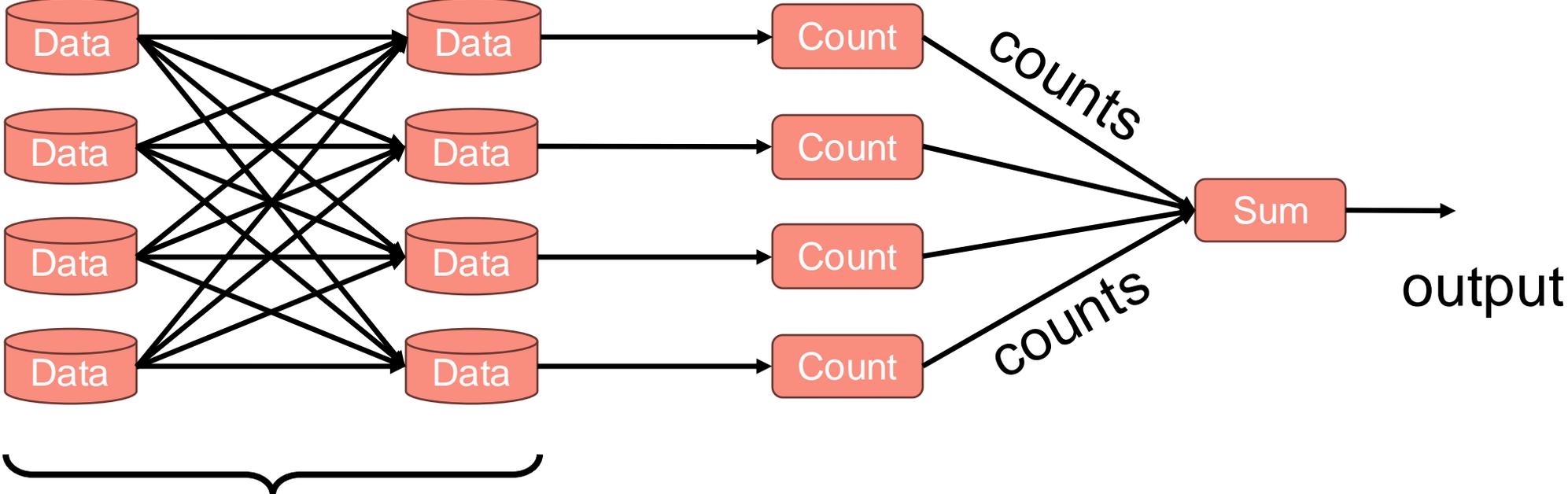
Данных много
и нужна скорость



Данные
обрабатываются в
ad-hoc-режиме

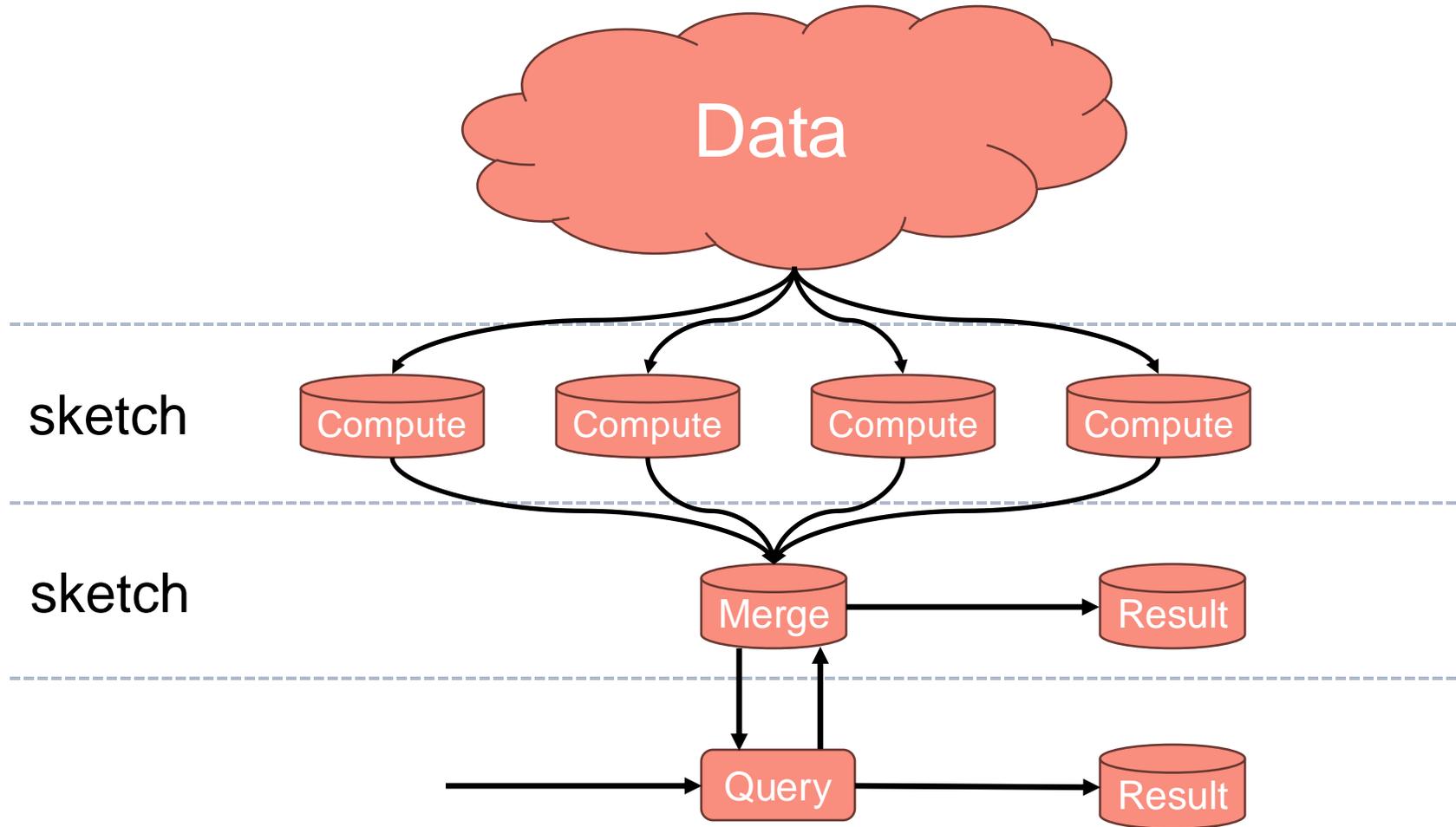
Данные
обрабатываются в
потоковом режиме

Data Sketches

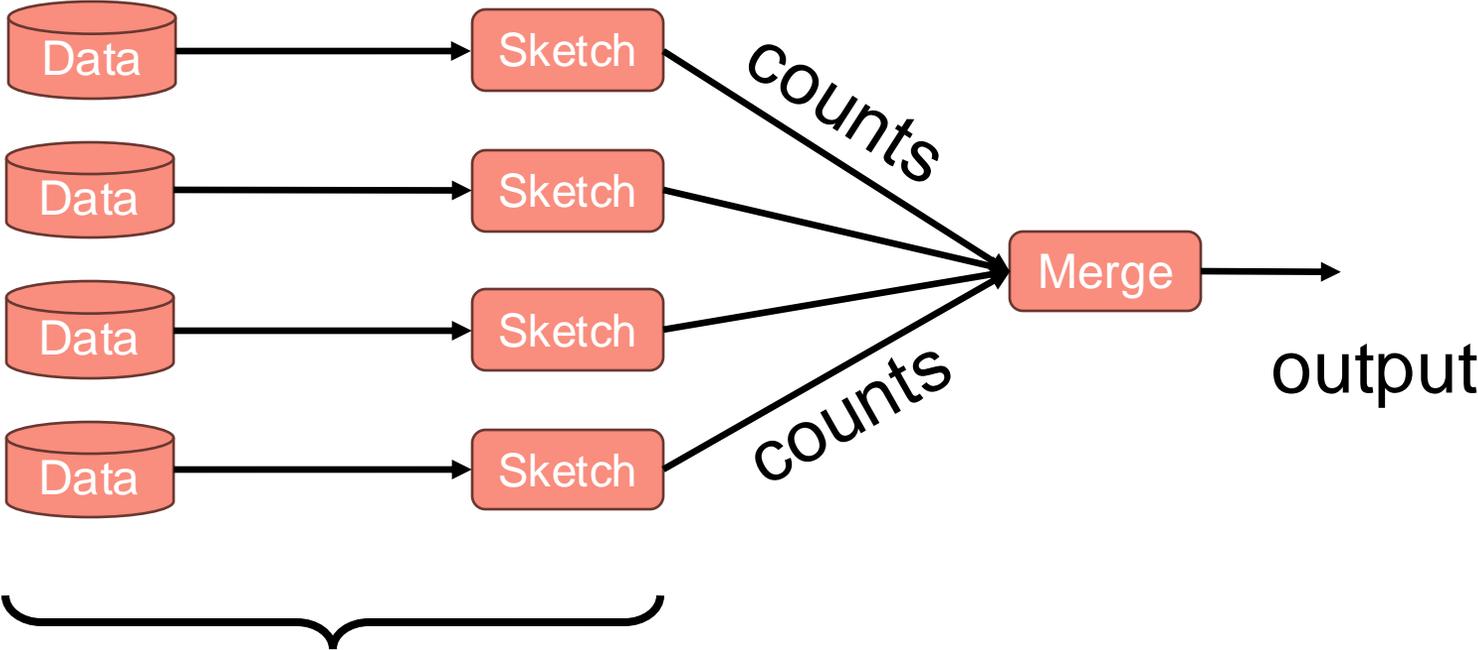


shuffle – дорого

Data Sketches

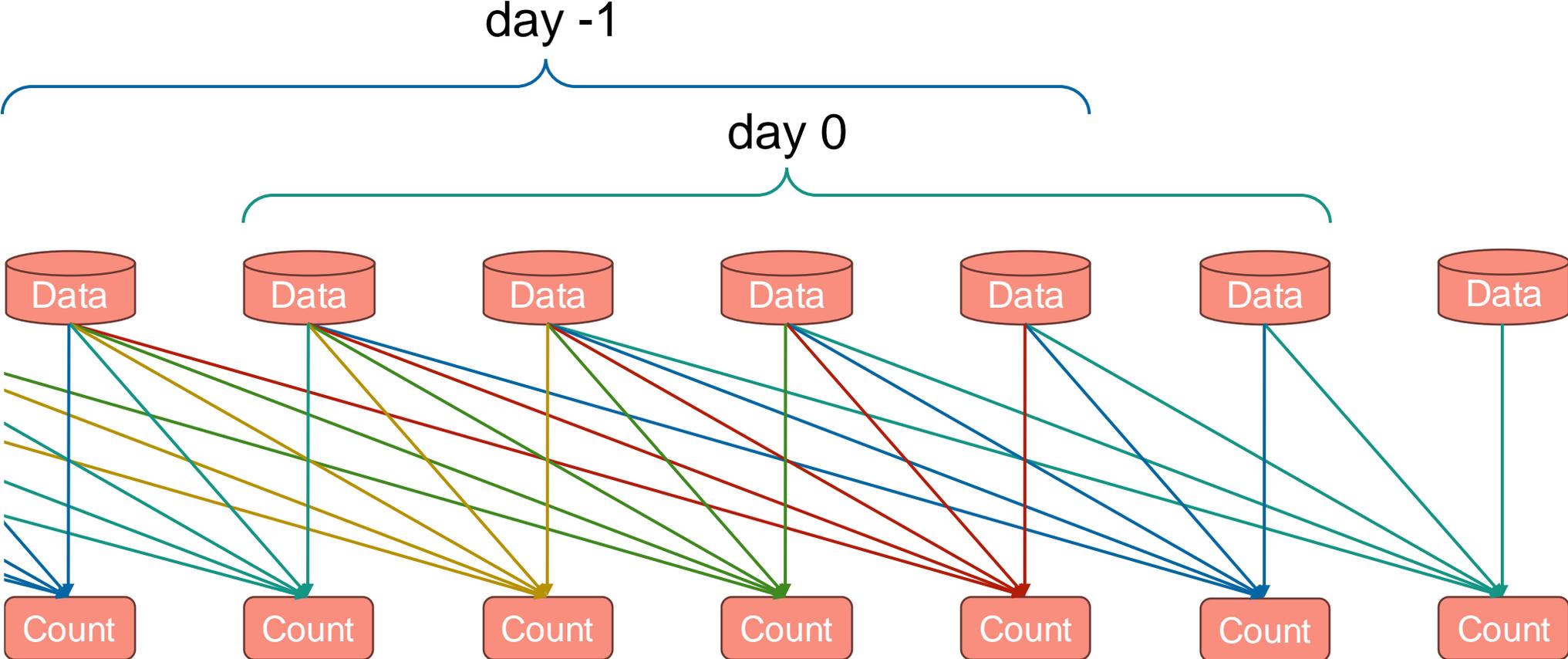


Data Sketches

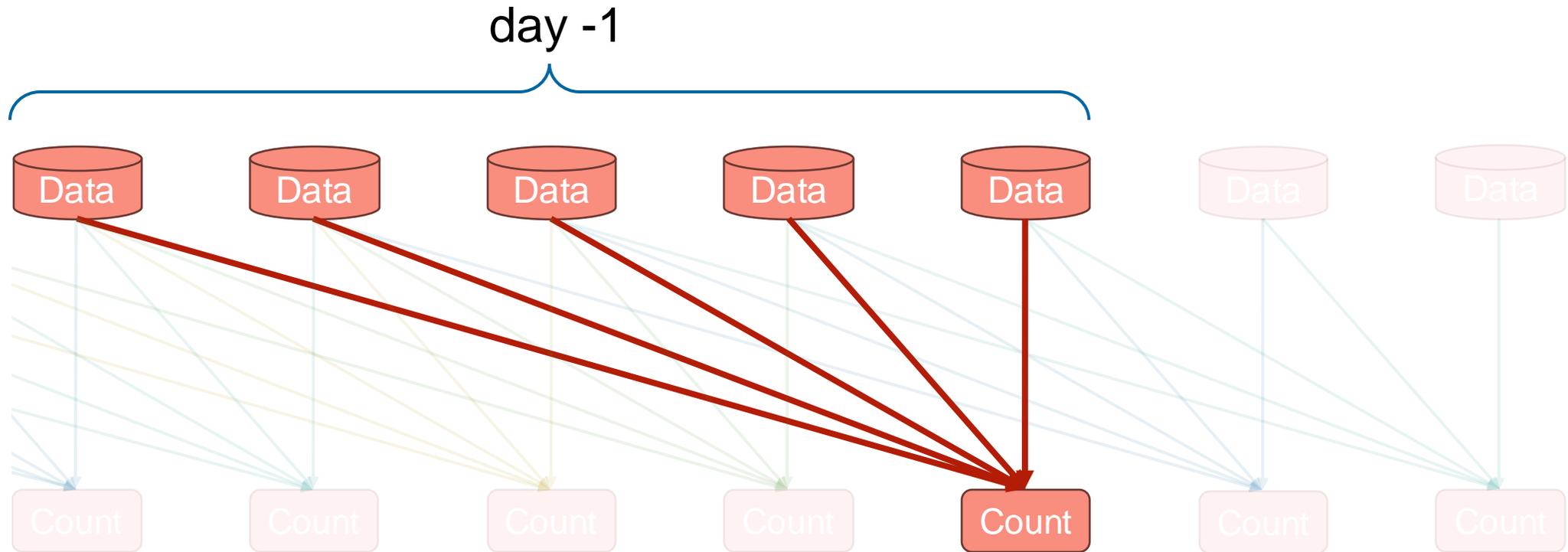


X HET shuffle

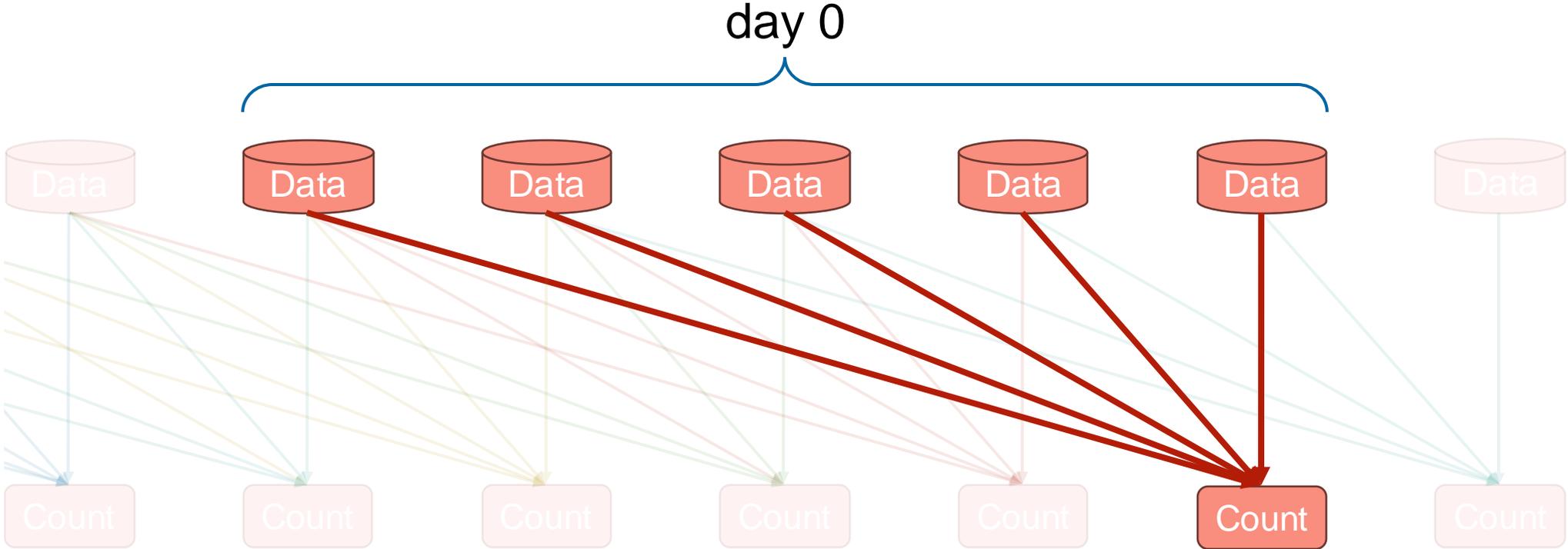
Data Sketches



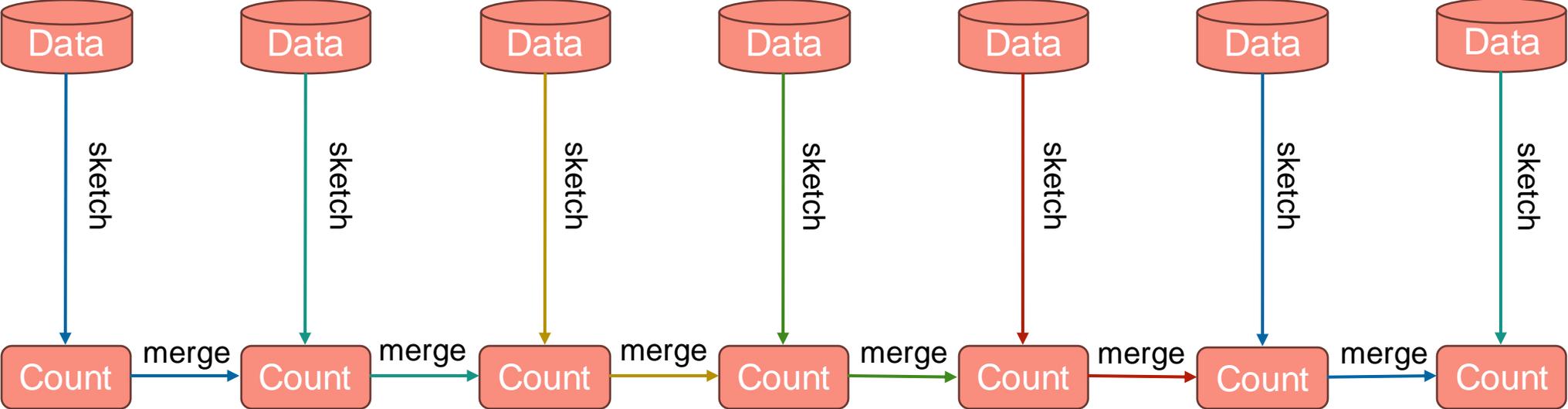
Data Sketches



Data Sketches

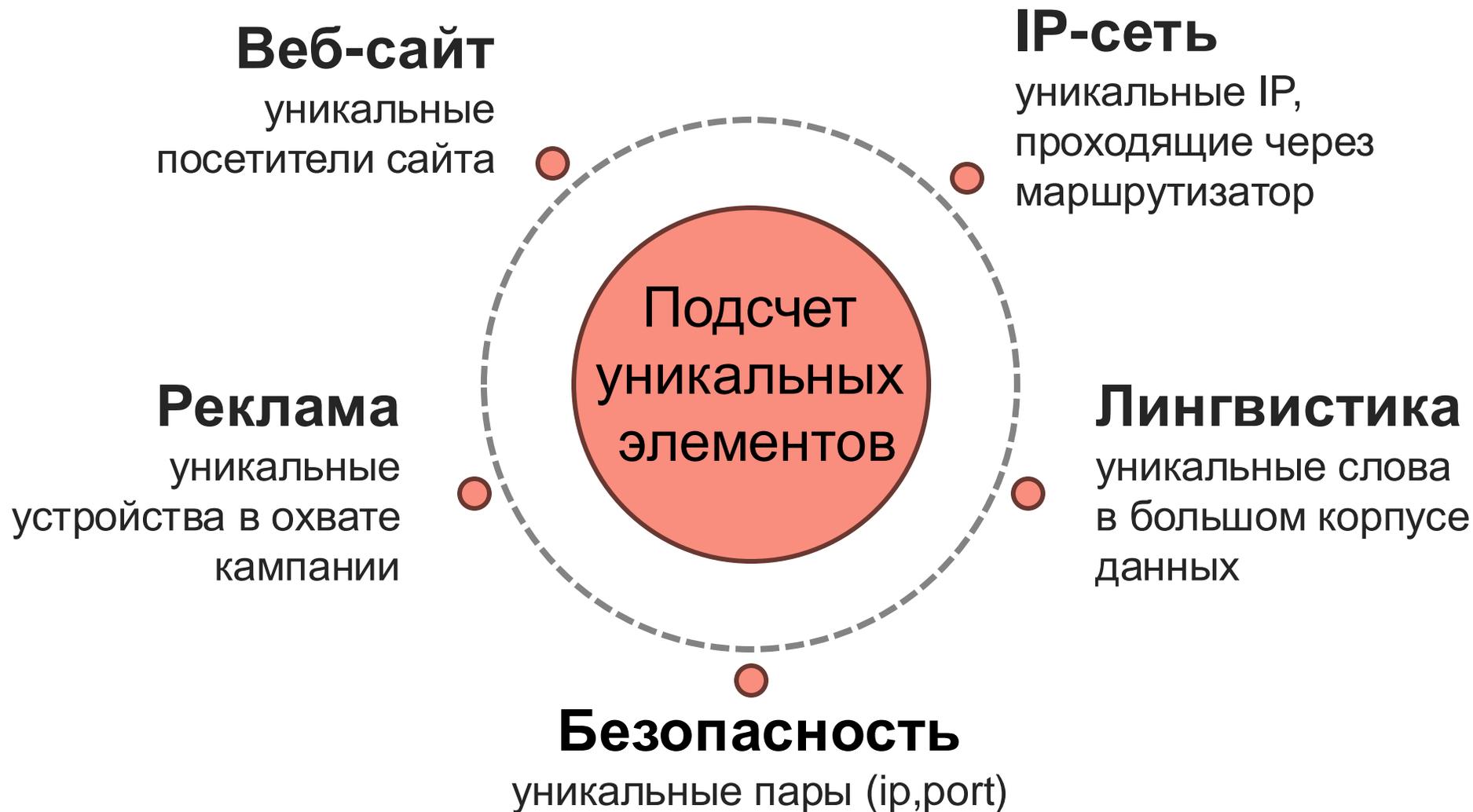


Data Sketches



Подсчет уникальных элементов

Примеры использования



Подсчет уникальных элементов

```
select  
    count(distinct <column>)  
from <table>
```

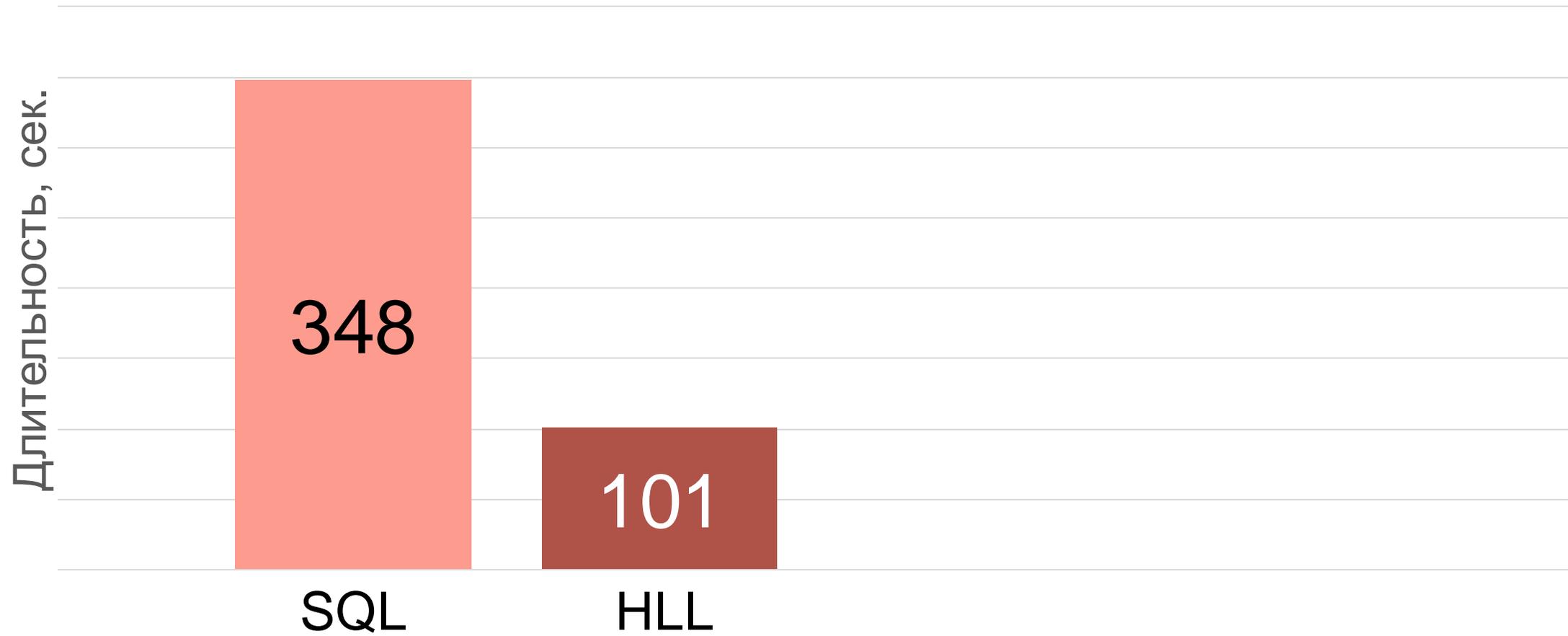
count(distinct ...)

- Много CPU
- Много RAM
- Перекосы в данных (data skew)
- Не аддитивна

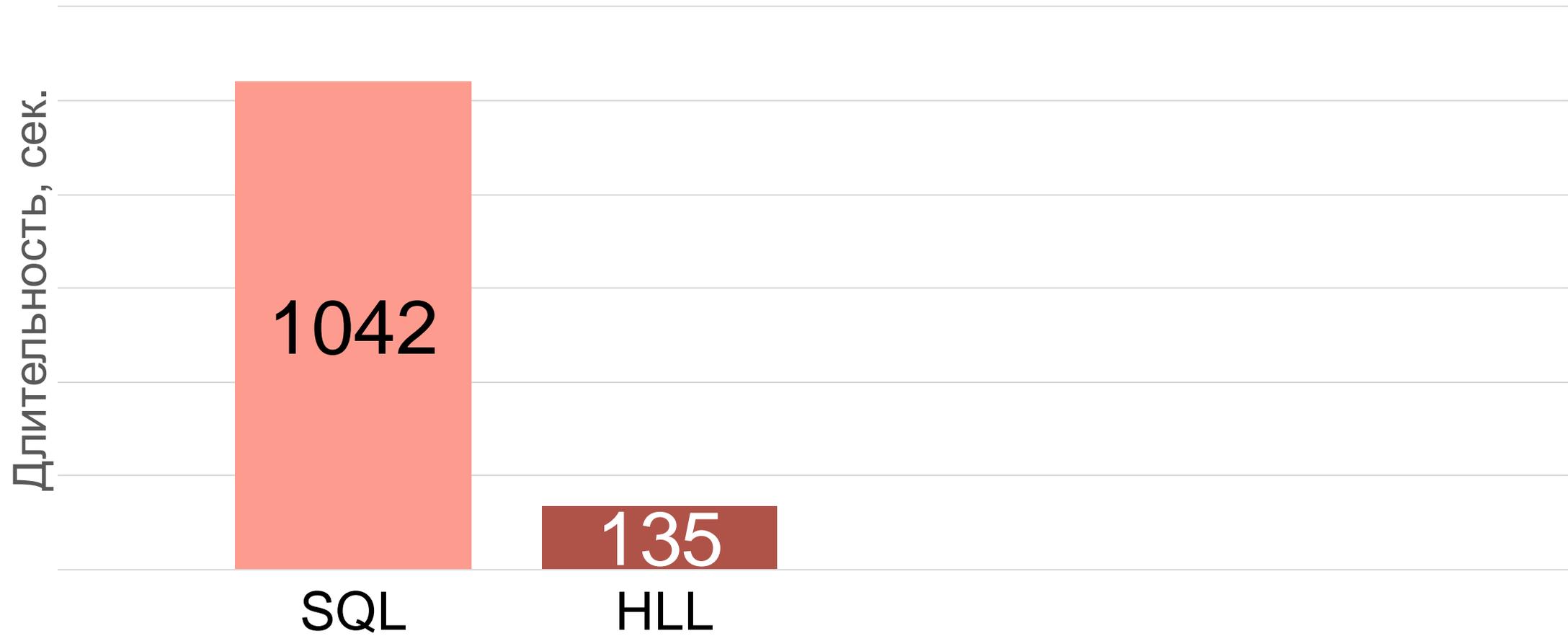
count(distinct ...)



HyperLogLog



HyperLogLog



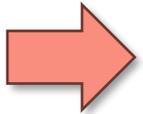
HyperLogLog на пальцах

Алиса

HyperLogLog на пальцах

Алиса

$h(\text{Алиса})$

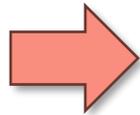
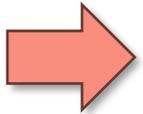


HyperLogLog на пальцах

Алиса

$h(\text{Алиса})$

1110 1100

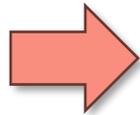
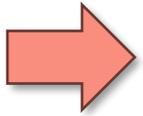


HyperLogLog на пальцах

Алиса

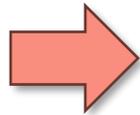
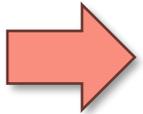
$h(\text{Алиса})$

1110 1100



HyperLogLog на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110



HyperLogLog на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110
Джон	$h(\text{Джон})$	1111	0001
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010
Марта	$h(\text{Марта})$	0010	1001
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100
Том	$h(\text{Том})$	1110	0011
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110

HyperLogLog на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110
Джон	$h(\text{Джон})$	1111	0001
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010
Марта	$h(\text{Марта})$	0010	1001
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100
Том	$h(\text{Том})$	1110	0011
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110

HyperLogLog на пальцах

Алиса	h(Алиса)	1110	1100	
Боб	h(Боб)	0110	1110	
Алиса	h(Алиса)	1110	1100	
Джек	h(Джек)	0111	0100	
Боб	h(Боб)	0110	1110	
Джон	h(Джон)	1111	0001	→ 2^3 (8)
Мери	h(Мери)	1010	0010	
Марта	h(Марта)	0010	1001	
Джек	h(Джек)	0111	0100	
Том	h(Том)	1110	0011	
Мери	h(Мери)	1010	0010	
Боб	h(Боб)	0110	1110	

HyperLogLog на пальцах

Алиса	h(Алиса)	1110	1100	
Боб	h(Боб)	0110	1110	
Алиса	h(Алиса)	1110	1100	
Джек	h(Джек)	0111	0100	
Боб	h(Боб)	0110	1110	
Джон	h(Джон)	1111	0001	
Мери	h(Мери)	1010	0010	
Марта	h(Марта)	0010	1001	
Джек	h(Джек)	0111	0100	
Том	h(Том)	1110	0011	
Мери	h(Мери)	1010	0010	
Боб	h(Боб)	0110	1110	

→

→

→ 2^3 (8)

12 элементов
7 уникальных

HyperLogLog на пальцах



HyperLogLog на пальцах



$$\frac{1}{2}$$



$$\frac{1}{2}$$

HyperLogLog на пальцах

 $\frac{1}{2}$

x

 $\frac{1}{2}$  $\frac{1}{2}$

x

 $\frac{1}{2}$

HyperLogLog на пальцах



$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$$

HyperLogLog на пальцах



$$\frac{1}{1024}$$

HyperLogLog на пальцах



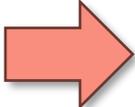
000000000000000001

00000**1**000000000000

HyperLogLog на пальцах

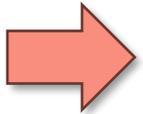
Алиса	h(Алиса)	1110 1100	
Боб	h(Боб)	0110 1110	
Алиса	h(Алиса)	1110 1100	
Джек	h(Джек)	0111 0100	
Боб	h(Боб)	0110 1110	
Джон	h(Джон)	1111 0001	→ 2^5 (32)
Мери	h(Мери)	1010 0010	
Марта	h(Марта)	0000 1101	12 элементов
Джек	h(Джек)	0111 0100	7 уникальных
Том	h(Том)	1110 0011	
Мери	h(Мери)	1010 0010	
Боб	h(Боб)	0110 1110	

HyperLogLog на пальцах

Алиса	1 110	1100
Боб	0 1 10	1110
Алиса	1 110	1100
Джек	0 1 11	0100
Боб	0 1 10	1110
Джон	 1 111	0001
Мери	1 010	0010
Марта	0000	1 101
Джек	0 1 11	0100
Том	1 110	0011
Мери	1 010	0010
Боб	0 1 10	1110

HyperLogLog на пальцах

Алиса	1110	1100
Боб	0110	1110
Алиса	1110	1100
Джек	0111	0100
Боб	0110	1110
Джон	1111	0001
Мери	1010	0010
Марта	0000	1101
Джек	0111	0100
Том	1110	0011
Мери	1010	0010
Боб	0110	1110



HyperLogLog на пальцах

Алиса	1110	1100	1110	1100
Боб	0110	1110		
Алиса	1110	1100	1110	1100
Джек	0111	0100	0111	0100
Боб	0110	1110		
Джон	1111	0001		
Мери	1010	0010		
Марта	0000	1101		
Джек	0111	0100	0111	0100
Том	1110	0011		
Мери	1010	0010		
Боб	0110	1110		

HyperLogLog на пальцах

Алиса	1110	1100	1110	1100		
Боб	0110	1110				
Алиса	1110	1100	1110	1100		
Джек	0111	0100	0111	0100		
Боб	0110	1110				
Джон	1111	0001			1111	0001
Мери	1010	0010				
Марта	0000	1101			0000	1101
Джек	0111	0100	0111	0100		
Том	1110	0011				
Мери	1010	0010				
Боб	0110	1110				

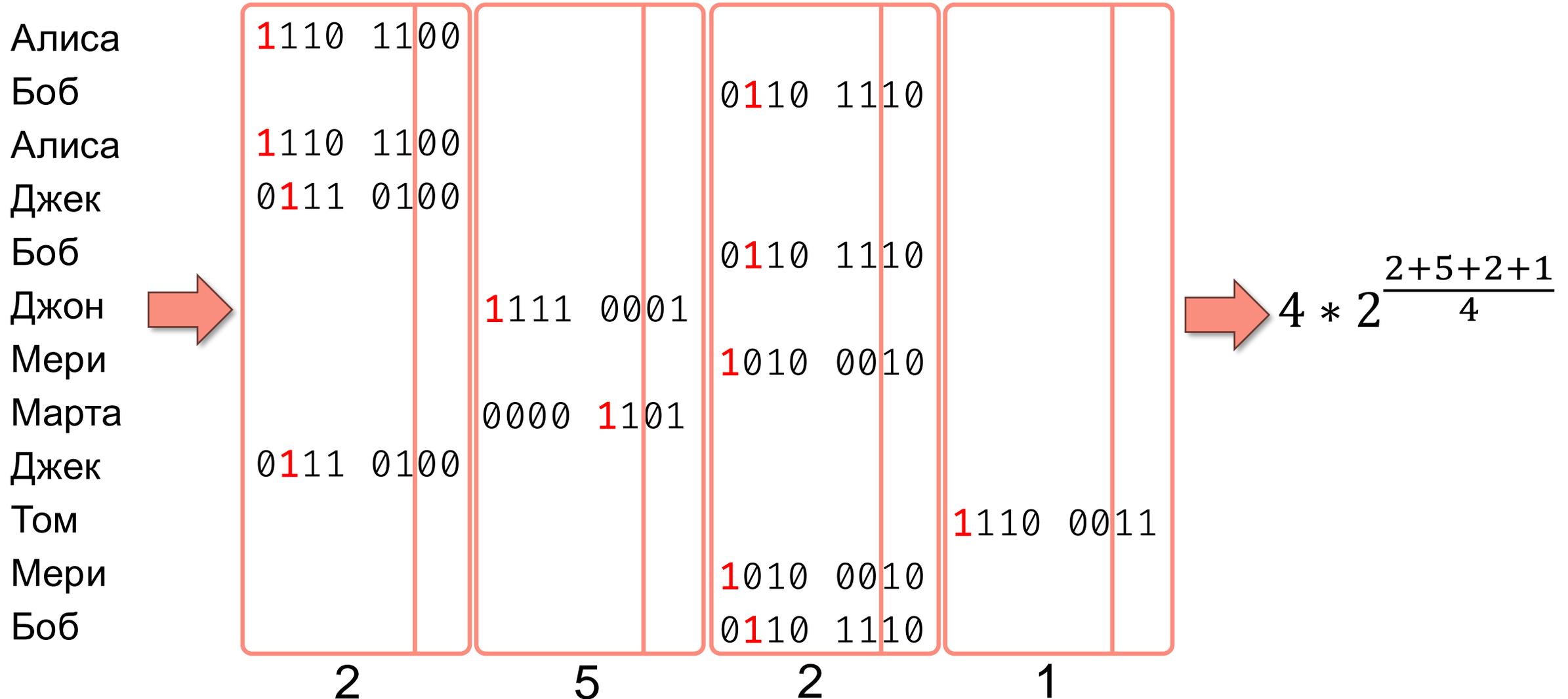
HyperLogLog на пальцах

Алиса	1110	1100	1110	1100				
Боб	0110	1110					0110	1110
Алиса	1110	1100	1110	1100				
Джек	0111	0100	0111	0100				
Боб	0110	1110					0110	1110
Джон	1111	0001			1111	0001		
Мери	1010	0010					1010	0010
Марта	0000	1101			0000	1101		
Джек	0111	0100	0111	0100				
Том	1110	0011						
Мери	1010	0010					1010	0010
Боб	0110	1110					0110	1110

HyperLogLog на пальцах

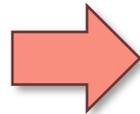
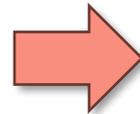
Алиса	1110	1100	1110	1100					
Боб	0110	1110					0110	1110	
Алиса	1110	1100	1110	1100					
Джек	0111	0100	0111	0100					
Боб	0110	1110					0110	1110	
Джон	1111	0001			1111	0001			
Мери	1010	0010					1010	0010	
Марта	0000	1101			0000	1101			
Джек	0111	0100	0111	0100					
Том	1110	0011						1110	0011
Мери	1010	0010					1010	0010	
Боб	0110	1110					0110	1110	

HyperLogLog на пальцах



HyperLogLog на пальцах

Алиса
Боб
Алиса
Джек
Боб
Джон
Мери
Марта
Джек
Том
Мери
Боб

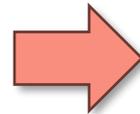
 $4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}}$  **22,63**

12 элементов
7 уникальных

HyperLogLog на пальцах

Алиса
Боб
Алиса
Джек
Боб
Джон
Мери
Марта
Джек
Том
Мери
Боб

→ $4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}}$



22,63

12 элементов
7 уникальных

было

2⁵ (32)

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

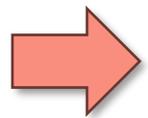
Марта

Джек

Том

Мери

Боб



$$4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}} * \alpha$$

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

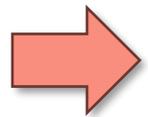
Марта

Джек

Том

Мери

Боб



$$4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}} * \left(0,39701 - \frac{2\pi^2 + (\ln 2)^2}{48 * 4}\right)$$

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

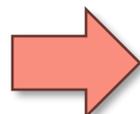
Марта

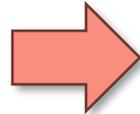
Джек

Том

Мери

Боб


$$4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}} * \left(0,39701 - \frac{2\pi^2 + (\ln 2)^2}{48 * 4}\right)$$


$$6,6$$

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

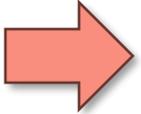
Марта

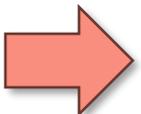
Джек

Том

Мери

Боб


$$4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}} * \left(0,39701 - \frac{2\pi^2 + (\ln 2)^2}{48 * 4}\right)$$


$$6,6$$

было

22,63

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

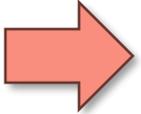
Марта

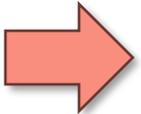
Джек

Том

Мери

Боб


$$4 * 2^{\frac{2+5+2+1}{4}} * \left(0,39701 - \frac{2\pi^2 + (\ln 2)^2}{48 * 4}\right)$$



6,6

7 уникальных

было

22,63

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

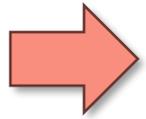
Марта

Джек

Том

Мери

Боб



$$4 * \frac{4}{2^{-2} + 2^{-5} + 2^{-2} + 2^{-1}} * \alpha$$

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

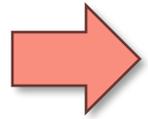
Марта

Джек

Том

Мери

Боб



$$4 * \frac{4}{2^{-2} + 2^{-5} + 2^{-2} + 2^{-1}} * \alpha$$

$$\alpha \sim \frac{1}{2 \ln 2 \left(1 + \frac{1}{4} (3 \ln 2 - 1) + 4^{-2}\right)}$$

HyperLogLog на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

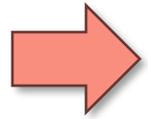
Марта

Джек

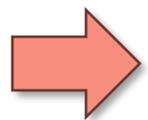
Том

Мери

Боб



$$4 * \frac{4}{2^{-2} + 2^{-5} + 2^{-2} + 2^{-1}} * \alpha$$



8,6

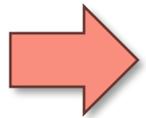
7 уникальных

было

22,63

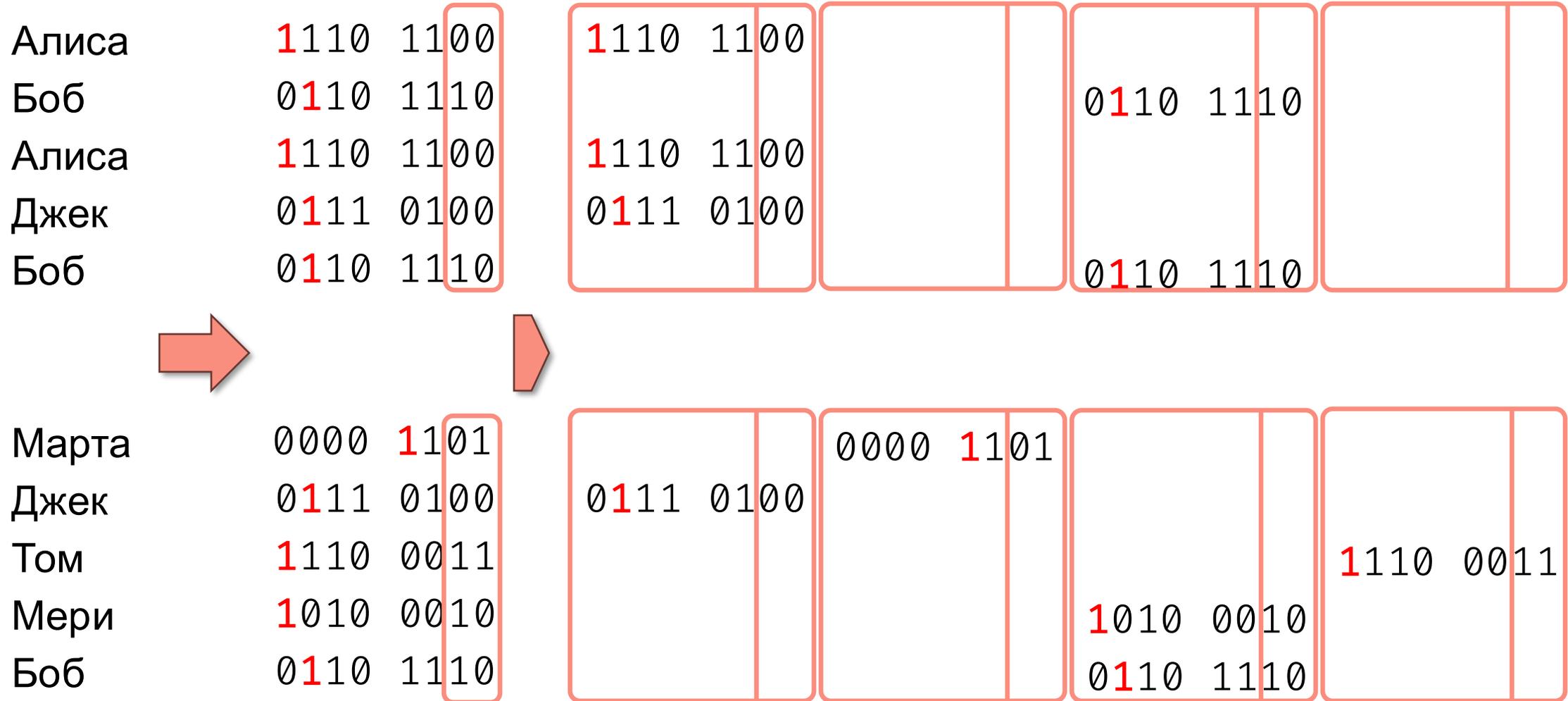
HyperLogLog на пальцах (merge)

Алиса	1110	1100
Боб	0110	1110
Алиса	1110	1100
Джек	0111	0100
Боб	0110	1110

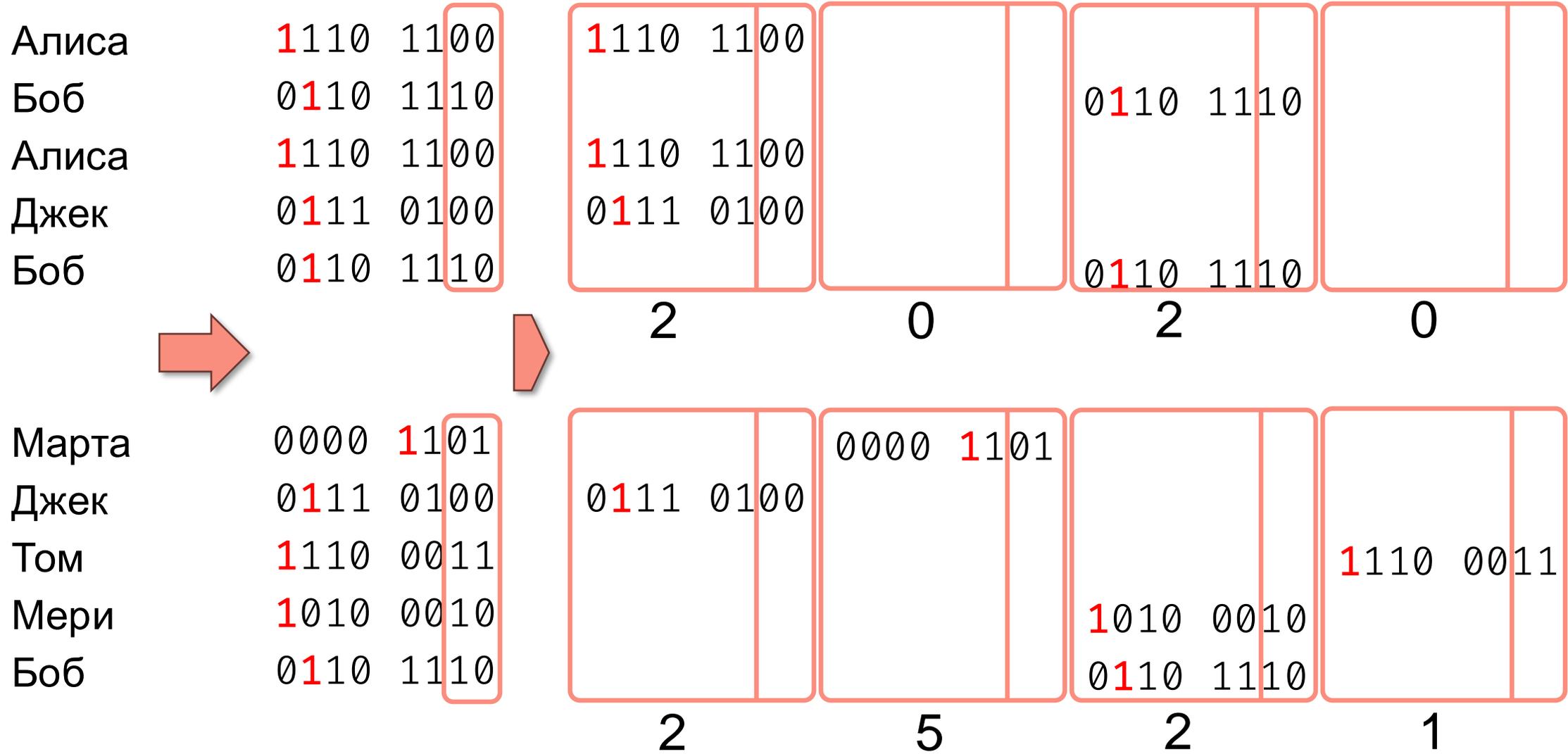


Марта	0000	1101
Джек	0111	0100
Том	1110	0011
Мери	1010	0010
Боб	0110	1110

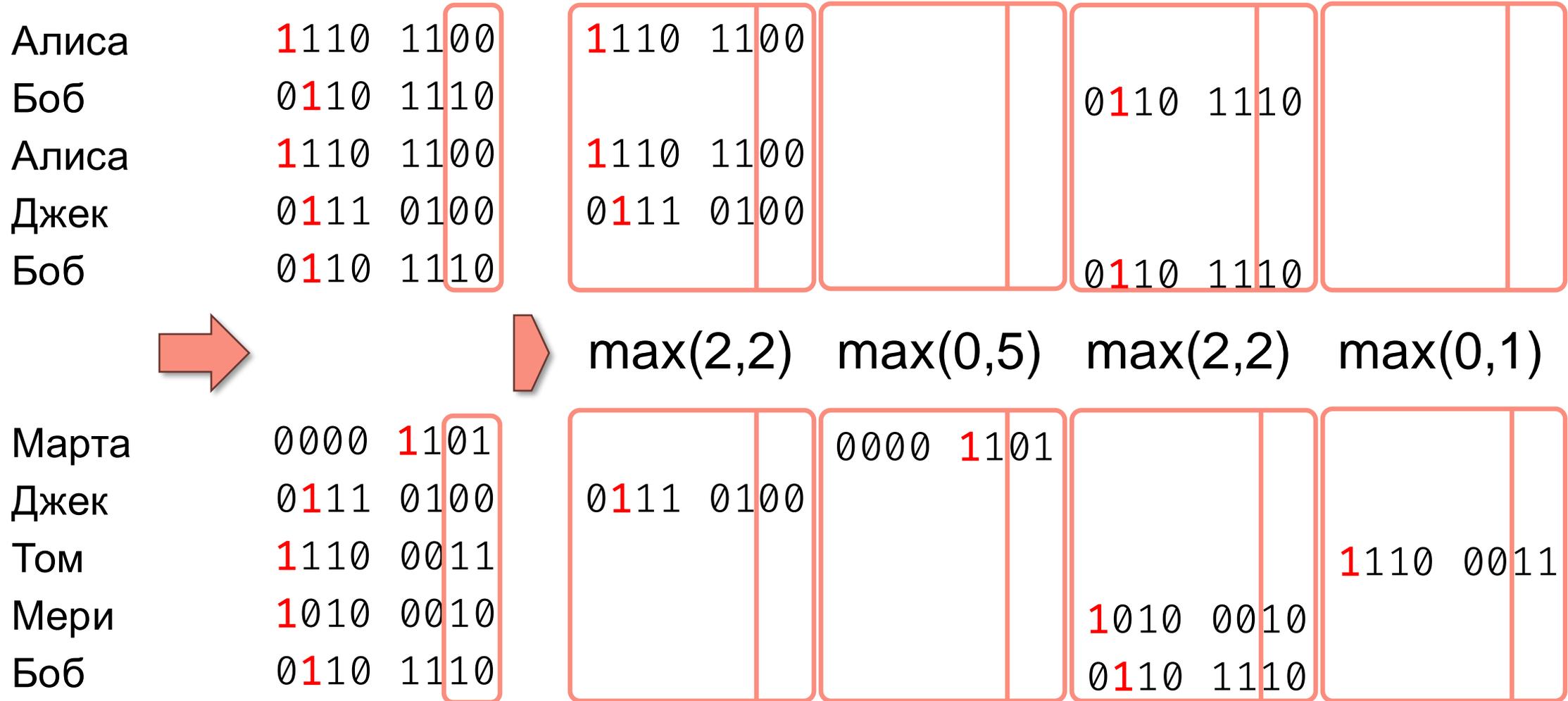
HyperLogLog на пальцах (merge)



HyperLogLog на пальцах (merge)



HyperLogLog на пальцах (merge)

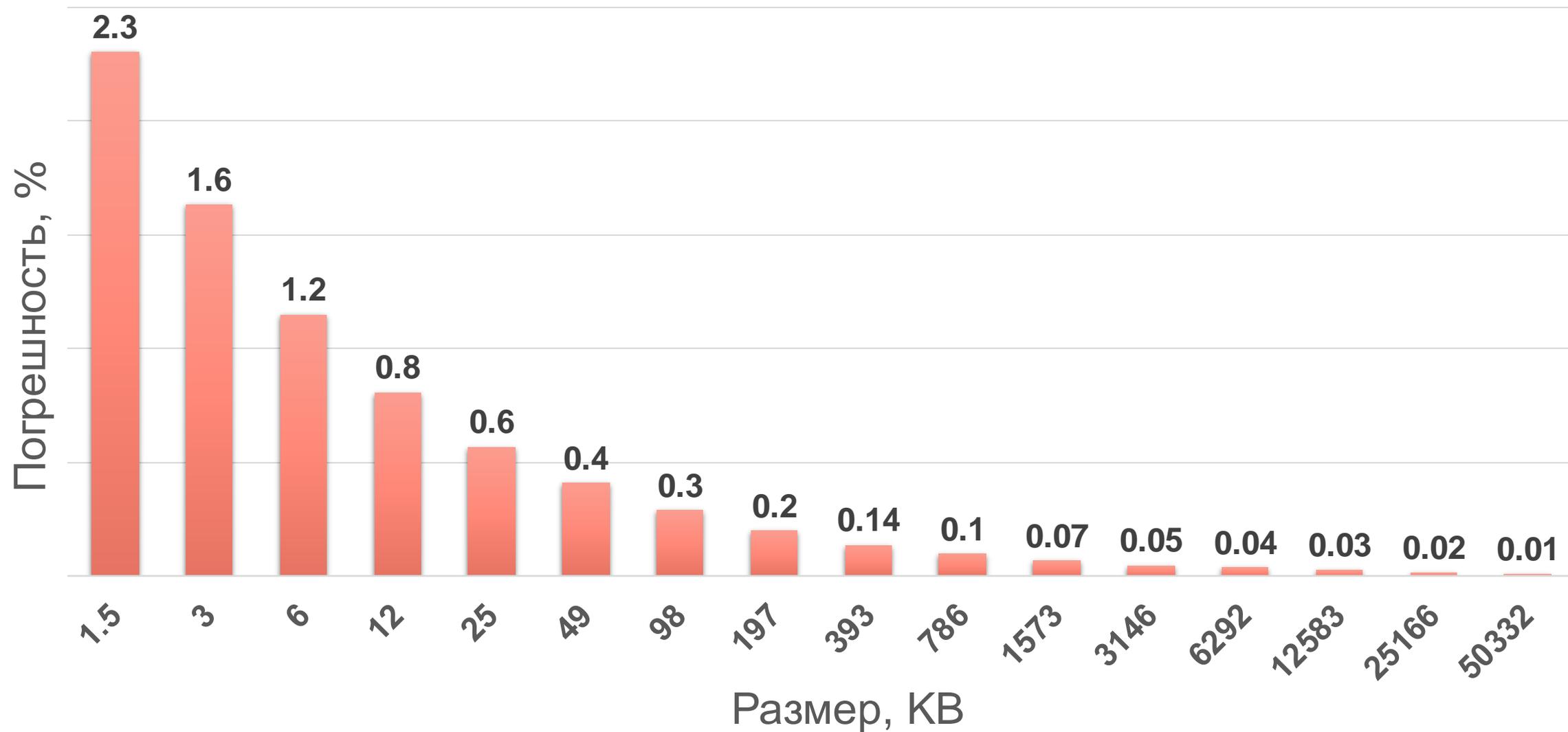


HyperLogLog на пальцах (merge)



Результат не меняется

HLL, погрешность от размера



HLL, погрешность от размера

10 KB за 1%

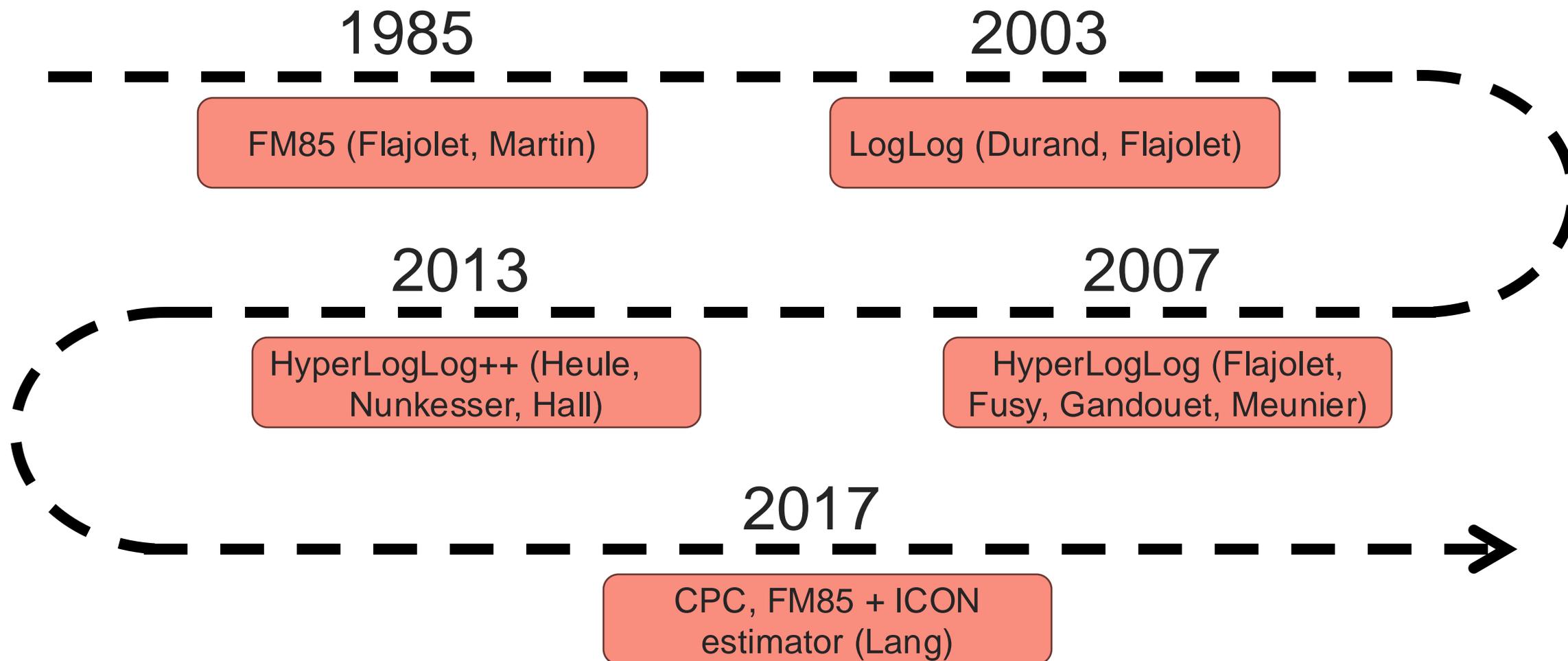
50 MB за 0,01%

для произвольного потока данных

Есть ли что-то лучше



Немного истории



Compressed Probability Counting (CPC)

СРС на пальцах

Алиса

Боб

Алиса

Джек

Боб

Джон

Мери

Марта

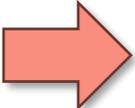
Джек

Том

Мери

Боб

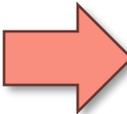
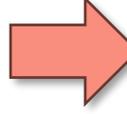
СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$
Боб	$h(\text{Боб})$
Алиса	$h(\text{Алиса})$
Джек	$h(\text{Джек})$
Боб	$h(\text{Боб})$
Джон 	$h(\text{Джон})$
Мери	$h(\text{Мери})$
Марта	$h(\text{Марта})$
Джек	$h(\text{Джек})$
Том	$h(\text{Том})$
Мери	$h(\text{Мери})$
Боб	$h(\text{Боб})$

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110
Джон	$h(\text{Джон})$	1111 0001
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010
Марта	$h(\text{Марта})$	0000 1001
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100
Том	$h(\text{Том})$	1110 0011
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110		
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110		
Джон	$h(\text{Джон})$	1111	0001		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010		
Марта	$h(\text{Марта})$	0000	1001		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100		
Том	$h(\text{Том})$	1110	0011		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110		

00000 00000

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110
Джон	$h(\text{Джон})$	1111 0001
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010
Марта	$h(\text{Марта})$	0000 1001
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100
Том	$h(\text{Том})$	1110 0011
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110

→ 1000 0000

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110		
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110		
Джон	$h(\text{Джон})$	1111 0001		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010		
Марта	$h(\text{Марта})$	0000 1001		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100		
Том	$h(\text{Том})$	1110 0011		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110		

→ → → **1100** 0000

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110
Джон	$h(\text{Джон})$	1111 0001
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010
Марта	$h(\text{Марта})$	0000 1001
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100
Том	$h(\text{Том})$	1110 0011
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110

→ 1100 0000

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110		
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110 1100		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110		
Джон	$h(\text{Джон})$	1111 0001		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010		
Марта	$h(\text{Марта})$	0000 1001		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111 0100		
Том	$h(\text{Том})$	1110 0011		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010 0010		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110 1110		

→ → → 1100 1000

СРС на пальцах

Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110		
Алиса	$h(\text{Алиса})$	1110	1100		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110		
Джон	$h(\text{Джон})$	1111	0001	→	1100 1000
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010		
Марта	$h(\text{Марта})$	0000	1001		
Джек	$h(\text{Джек})$	0111	0100		
Том	$h(\text{Том})$	1110	0011		
Мери	$h(\text{Мери})$	1010	0010		
Боб	$h(\text{Боб})$	0110	1110		

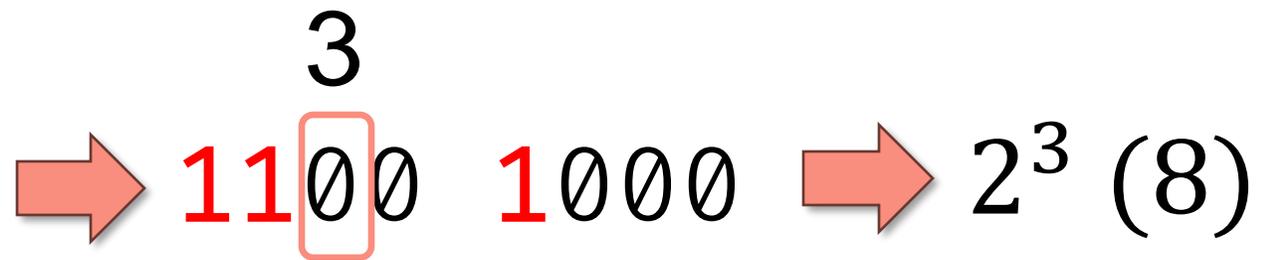
СРС на пальцах

Алиса	h(Алиса)	1110	1100		
Боб	h(Боб)	0110	1110		
Алиса	h(Алиса)	1110	1100		
Джек	h(Джек)	0111	0100		
Боб	h(Боб)	0110	1110		
Джон	h(Джон)	1111	0001	→	1100 1000
Мери	h(Мери)	1010	0010		
Марта	h(Марта)	0000	1001		
Джек	h(Джек)	0111	0100		
Том	h(Том)	1110	0011		
Мери	h(Мери)	1010	0010		
Боб	h(Боб)	0110	1110		

Diagram illustrating the construction of a Merkle tree (СРС) from a list of names and their hashes. The names and their corresponding hashes are listed on the left. The hashes are represented as binary strings. The process involves combining adjacent hashes to form a new level of the tree. In this example, the hashes for Джон (1111 0001) and Боб (0110 1110) are combined to form a new hash (1100 1000). The number 3 is shown above the new hash, indicating the number of bits in the new hash. The original hashes for Джон and Боб are highlighted with red boxes, and the new hash is also highlighted with a red box.

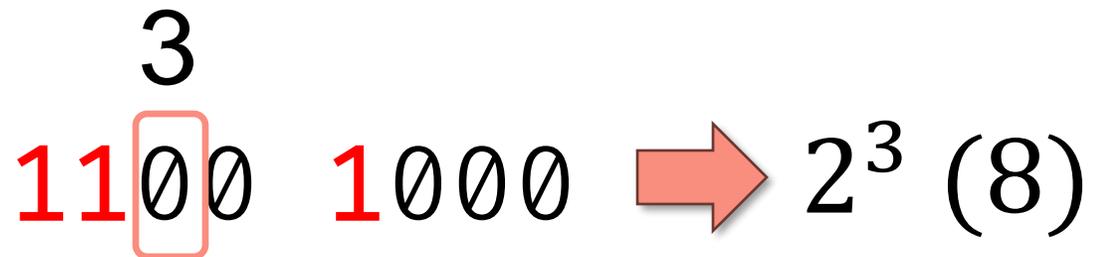
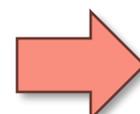
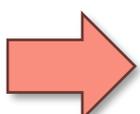
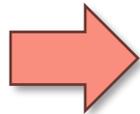
СРС на пальцах

Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Боб	h(Боб)	0110	1110
Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Джек	h(Джек)	0111	0100
Боб	h(Боб)	0110	1110
Джон	h(Джон)	1111	0001
Мери	h(Мери)	1010	0010
Марта	h(Марта)	0000	1001
Джек	h(Джек)	0111	0100
Том	h(Том)	1110	0011
Мери	h(Мери)	1010	0010
Боб	h(Боб)	0110	1110



СРС на пальцах

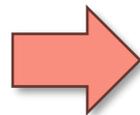
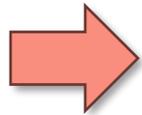
Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Боб	h(Боб)	0110	1110
Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Джек	h(Джек)	0111	0100
Боб	h(Боб)	0110	1110
Джон	h(Джон)	1111	0001
Мери	h(Мери)	1010	0010
Марта	h(Марта)	0000	1001
Джек	h(Джек)	0111	0100
Том	h(Том)	1110	0011
Мери	h(Мери)	1010	0010
Боб	h(Боб)	0110	1110



12 элементов
7 уникальных

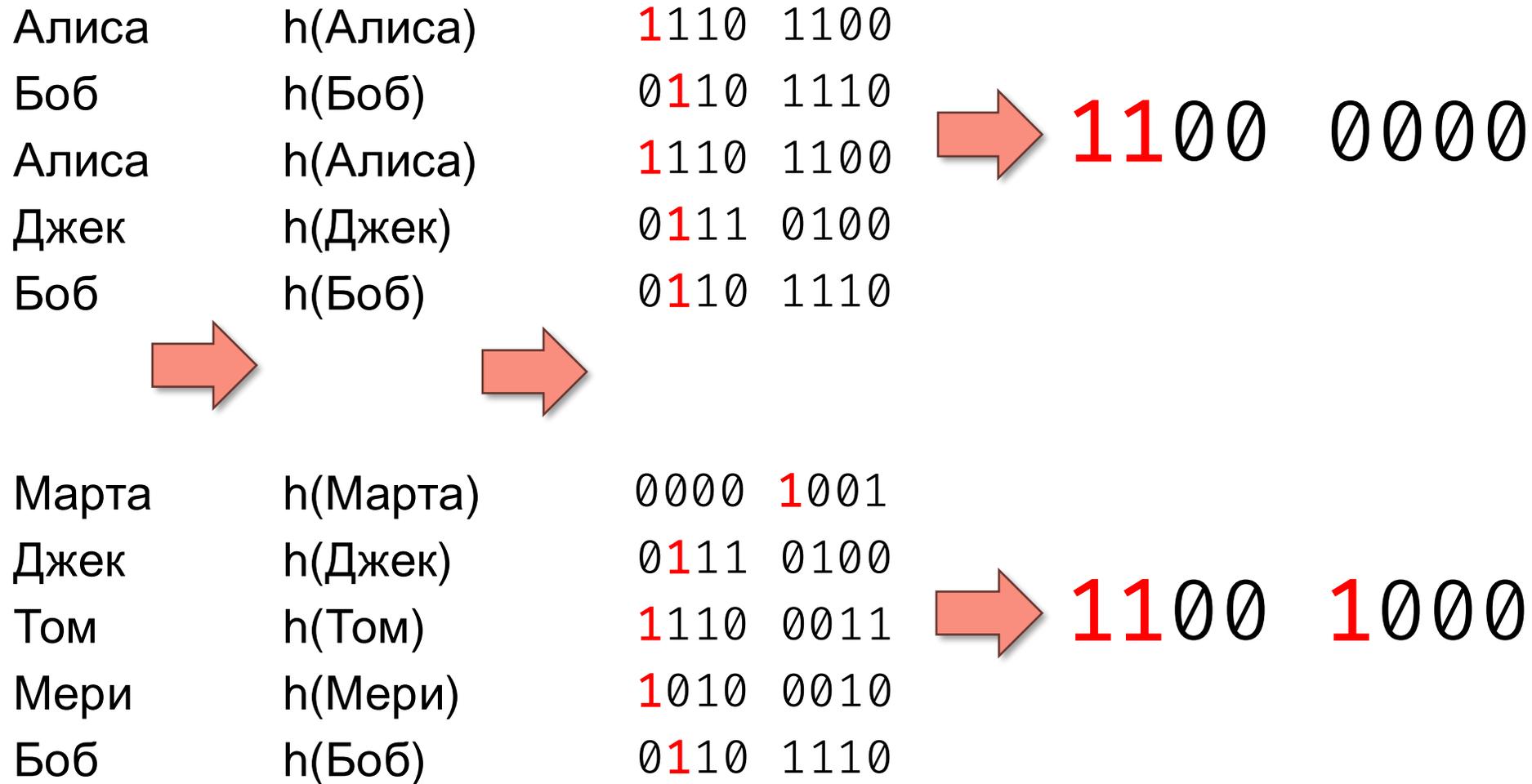
СРС на пальцах (merge)

Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Боб	h(Боб)	0110	1110
Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Джек	h(Джек)	0111	0100
Боб	h(Боб)	0110	1110

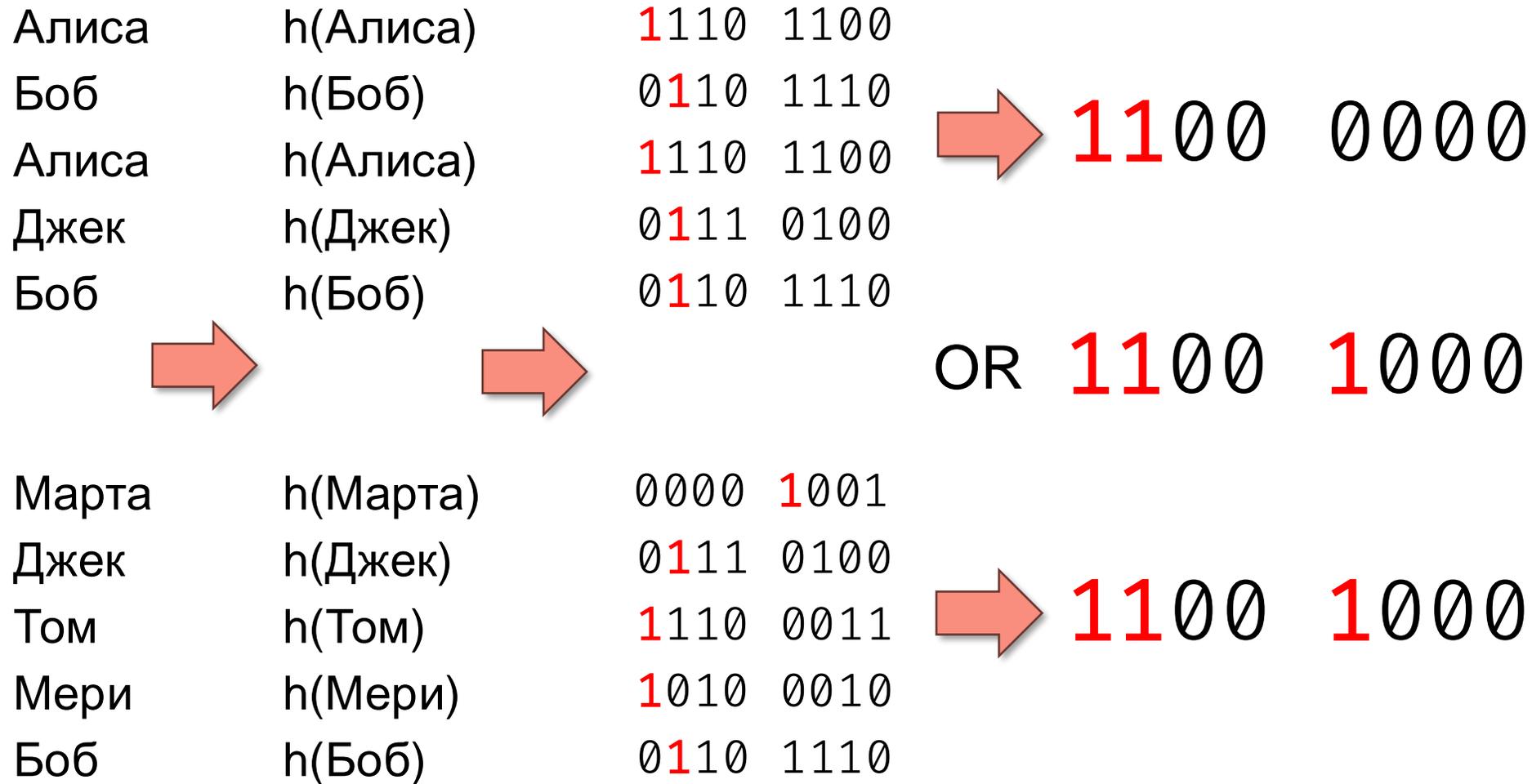


Марта	h(Марта)	0000	1001
Джек	h(Джек)	0111	0100
Том	h(Том)	1110	0011
Мери	h(Мери)	1010	0010
Боб	h(Боб)	0110	1110

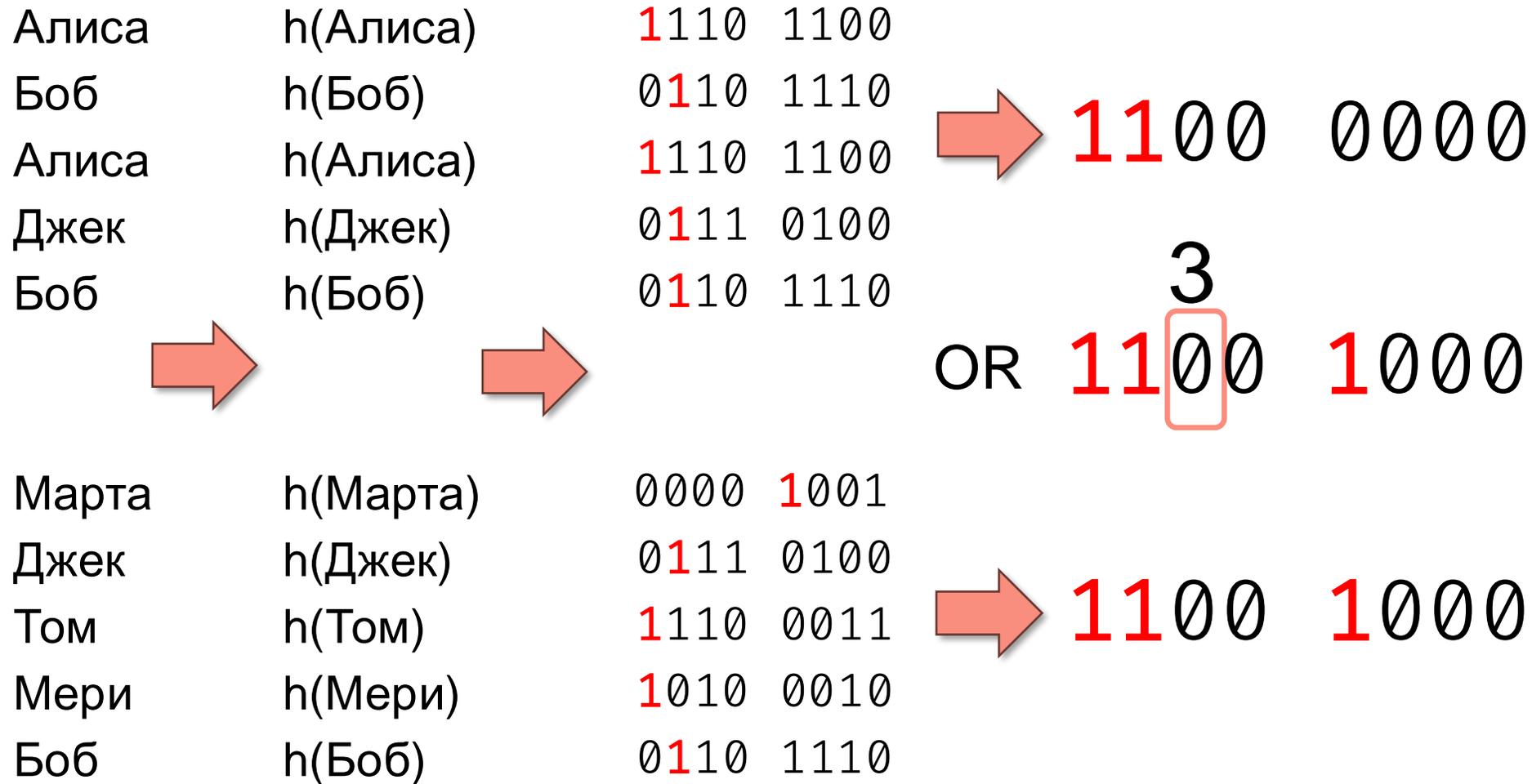
СРС на пальцах (merge)



СРС на пальцах (merge)

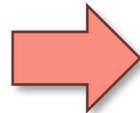
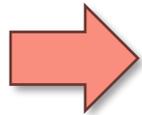


СРС на пальцах (merge)



СРС на пальцах (merge)

Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Боб	h(Боб)	0110	1110
Алиса	h(Алиса)	1110	1100
Джек	h(Джек)	0111	0100
Боб	h(Боб)	0110	1110



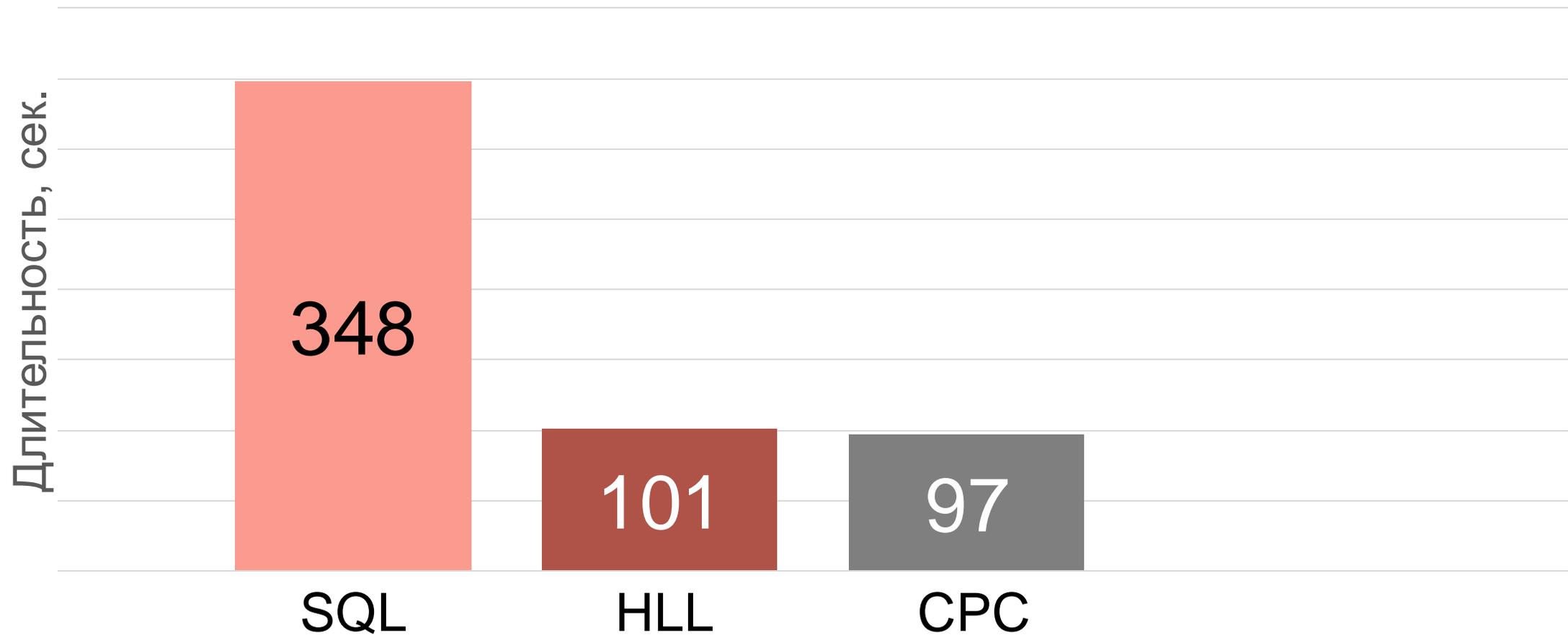
OR 1100 0000

OR 11³00 1000 → 2³ (8)

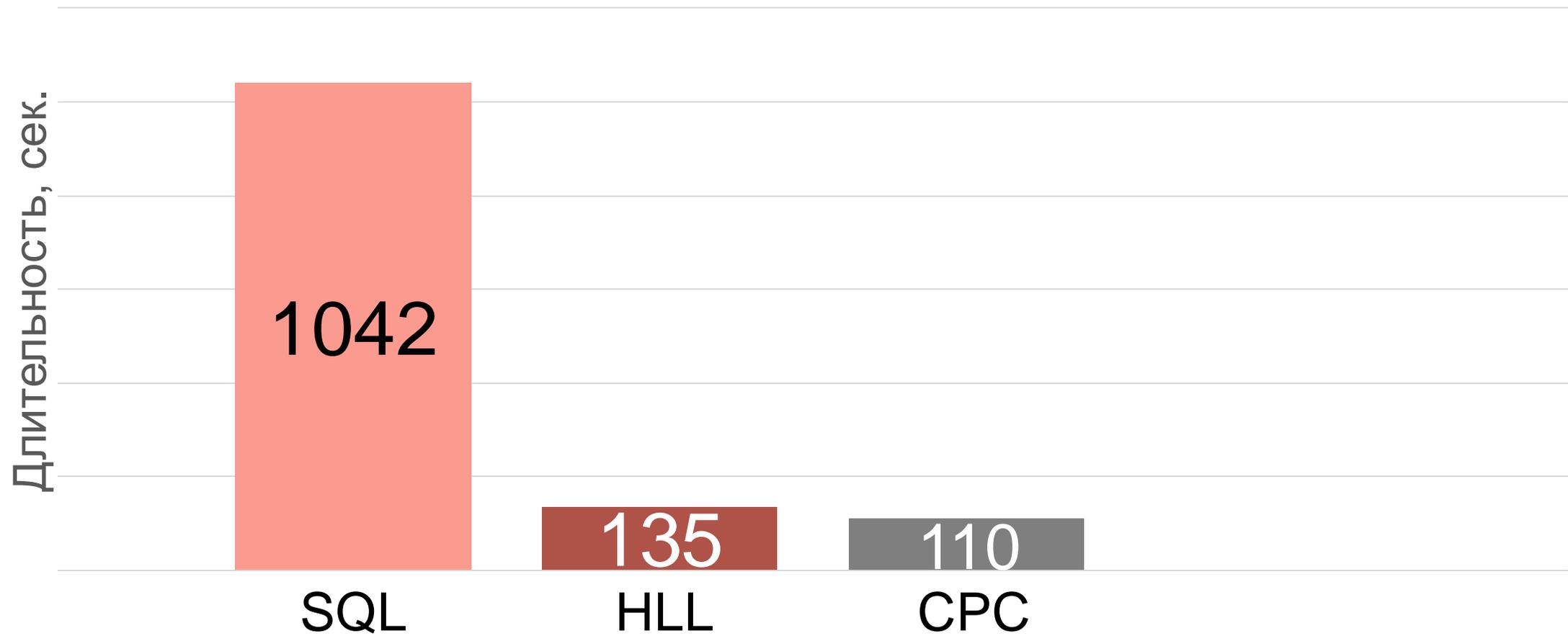
Марта	h(Марта)	0000	1001
Джек	h(Джек)	0111	0100
Том	h(Том)	1110	0011
Мери	h(Мери)	1010	0010
Боб	h(Боб)	0110	1110

OR 1100 1000

Compressed Probability Counting



Compressed Probability Counting



СРС, погрешность от размера



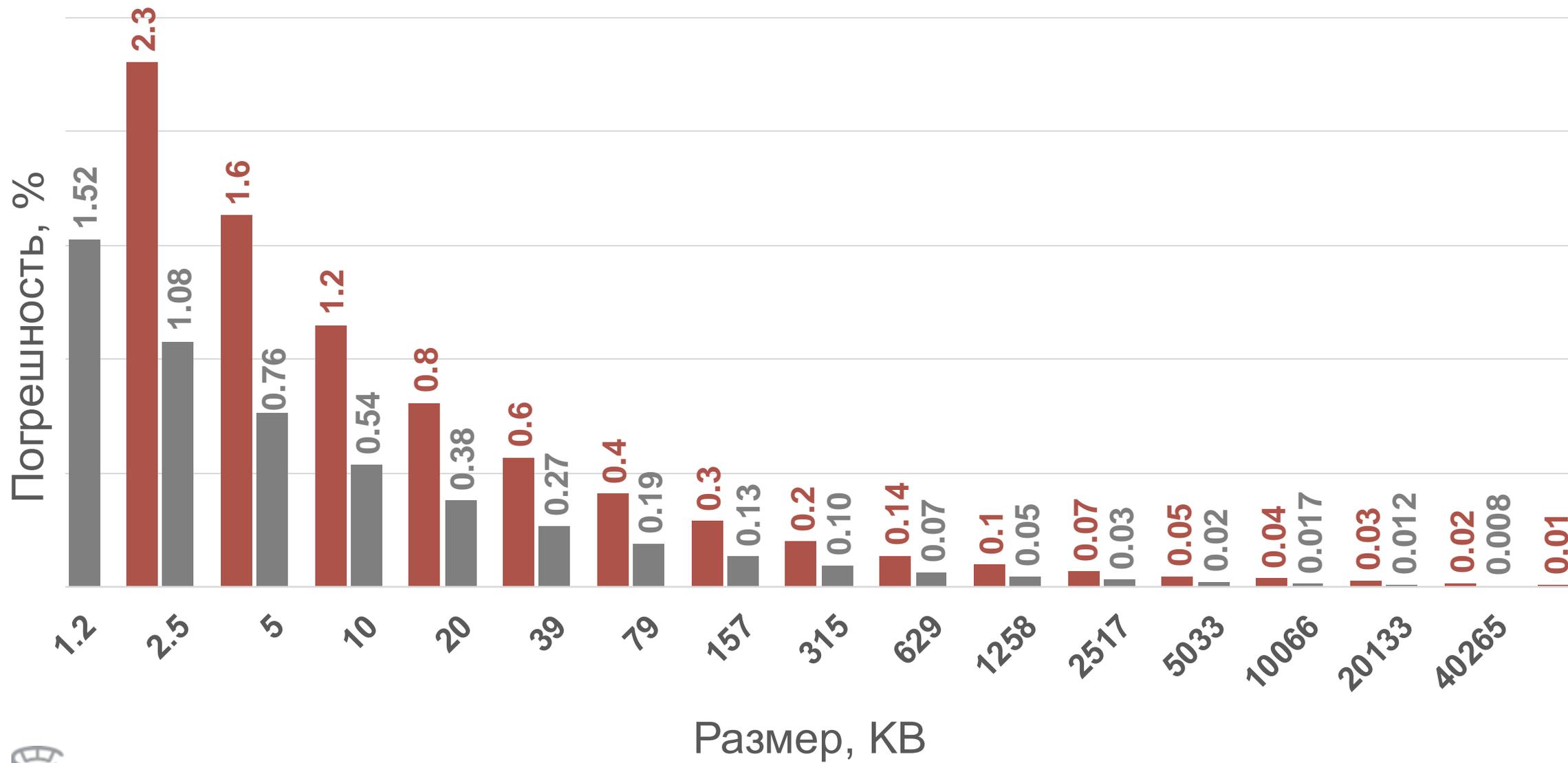
СРС, погрешность от размера

2,5 КВ за 1%

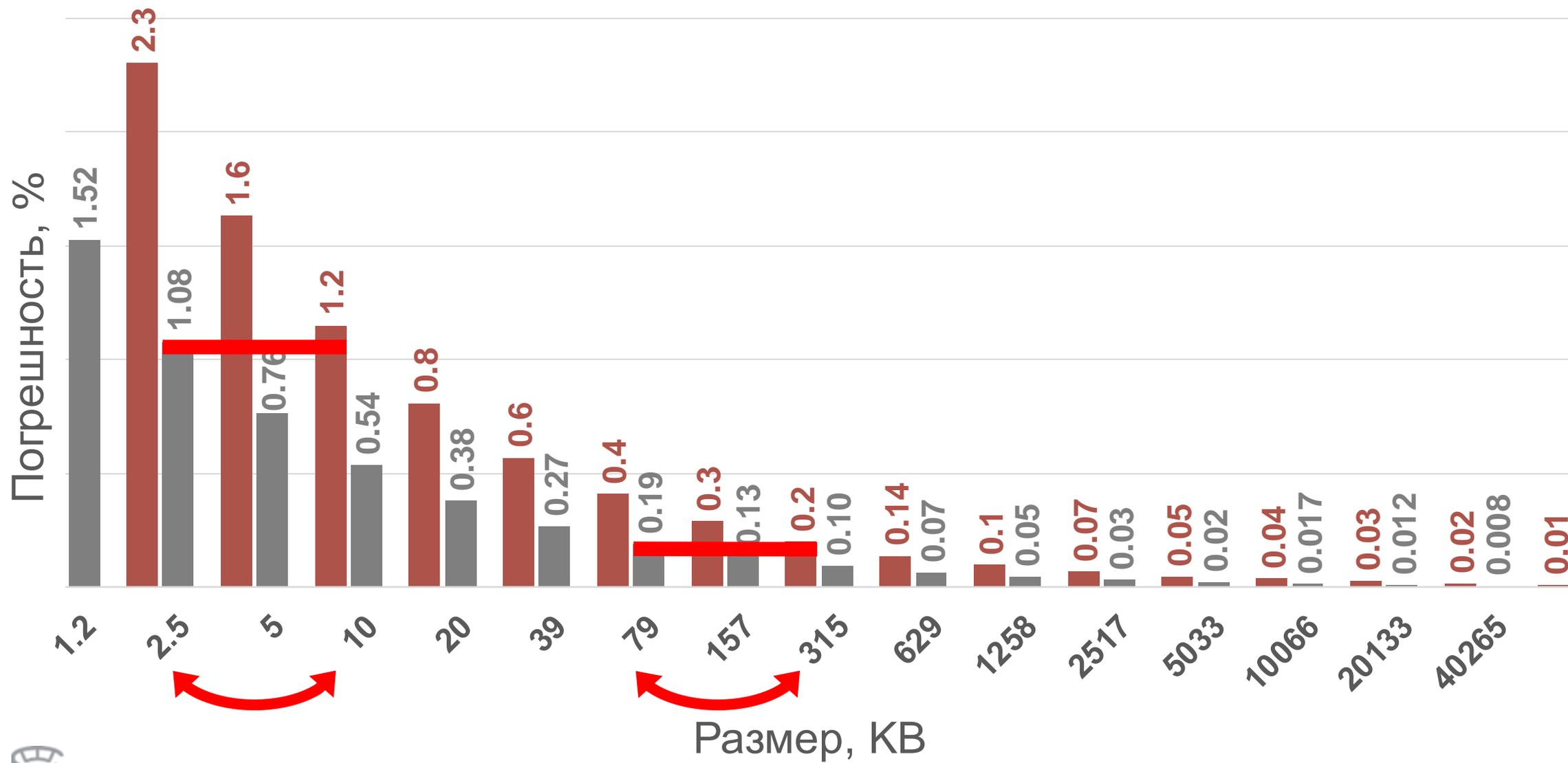
20 МВ за 0,01%

для произвольного потока данных

CPC vs HLL



CPC vs HLL



CPC vs HLL

60%

CPC vs HLL

на **60%** меньше
размер

при сравнимой погрешности

Усложняем кейсы

- Веб-сайт – количество уникальных пользователей, посетивших ваш сайт и сайт партнера
- Уникальные пользователи, посетившие ваш сайт, но не сайт партнера

$$(A \cup B) \cap (C \cup D) \setminus E$$

Усложняем кейсы

- Веб-сайт – количество уникальных пользователей, посетивших ваш сайт и сайт партнера
- Уникальные пользователи, посетившие ваш сайт, но не сайт партнера

$$(A \cup B) \cap (C \cup D) \setminus E$$

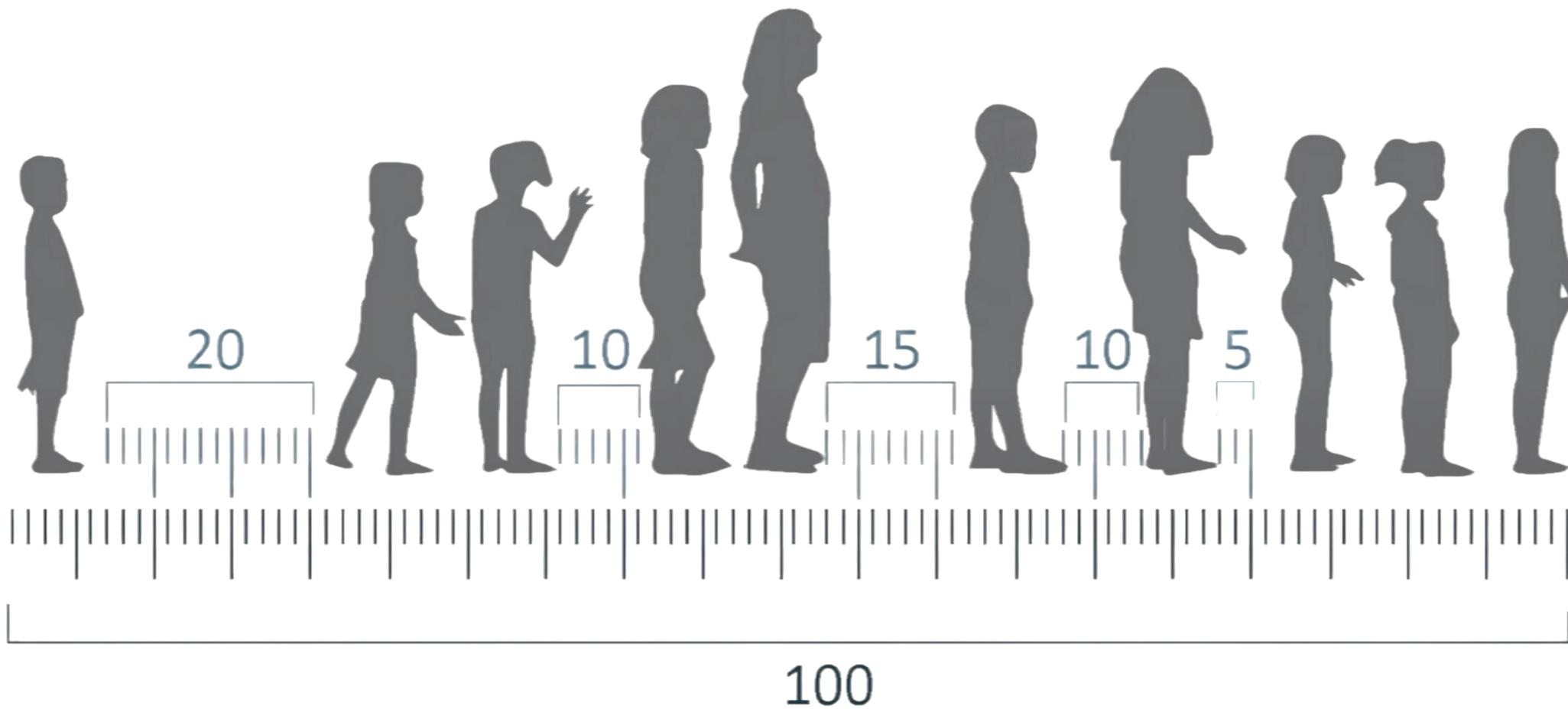
$$(A \cup B) \cap (C \cup D) \setminus E$$

В HLL и CPC тоже можно,
но ошибка неприемлема

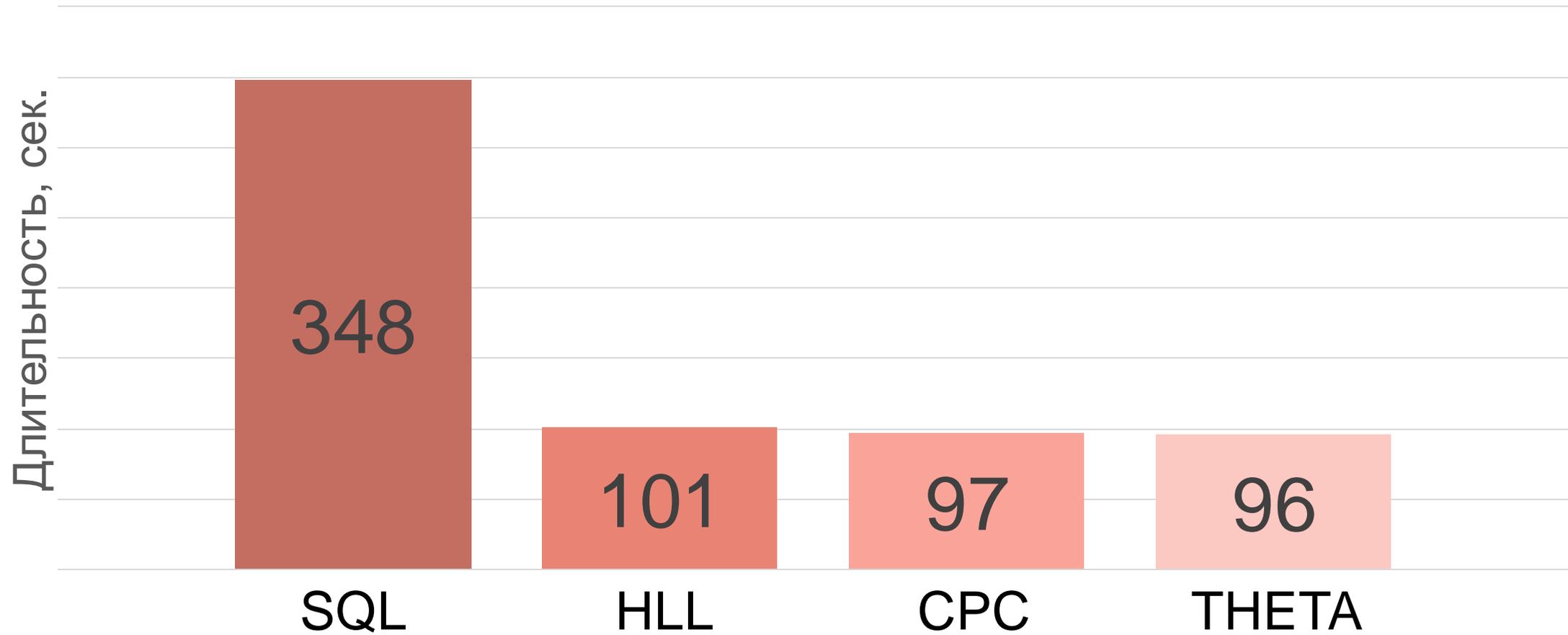
$$(A \cup B) \cap (C \cup D) \setminus E$$

ThetaSketch

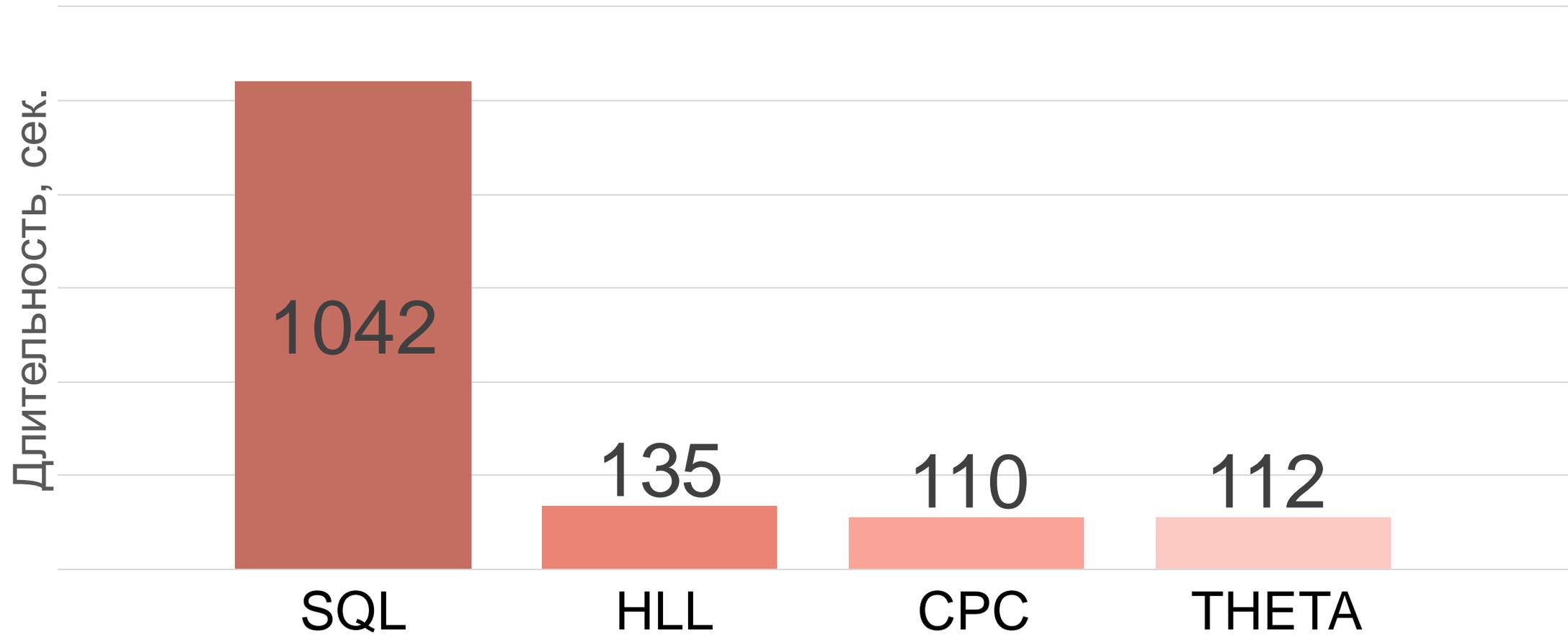
Theta на пальцах



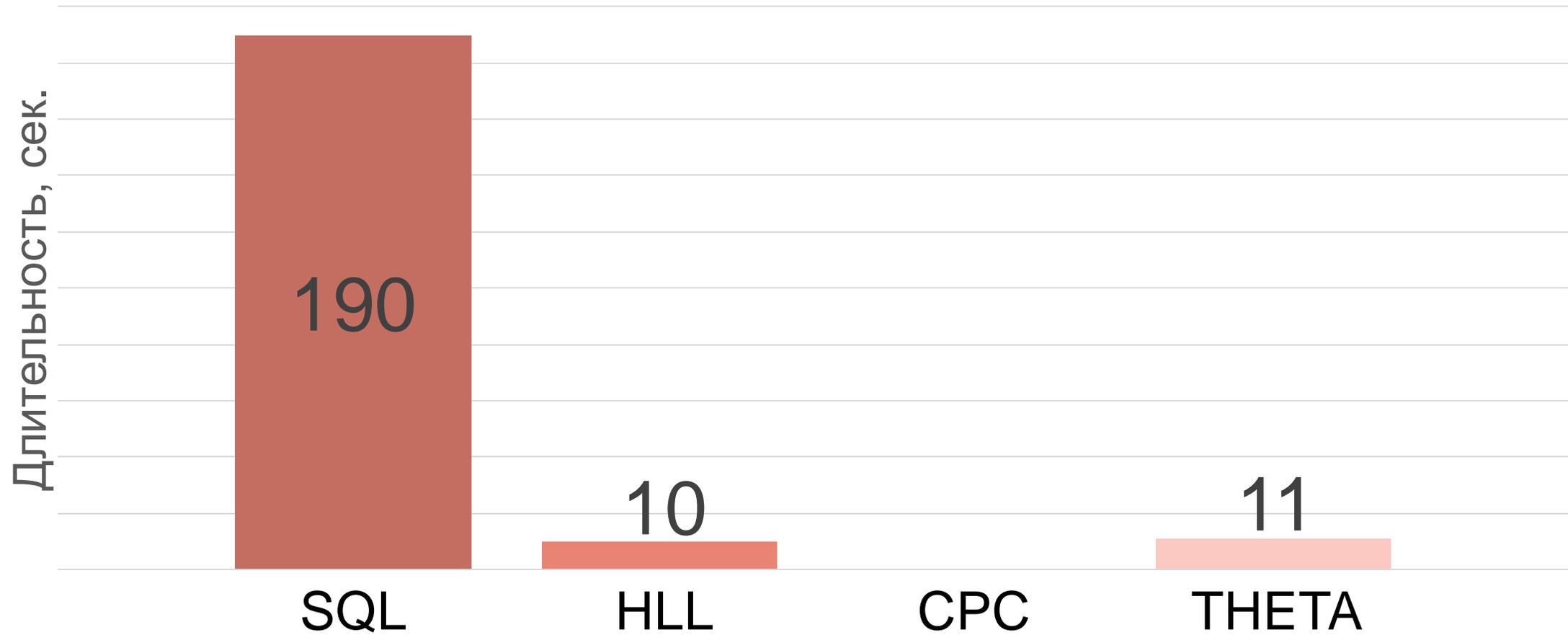
Theta Sketch



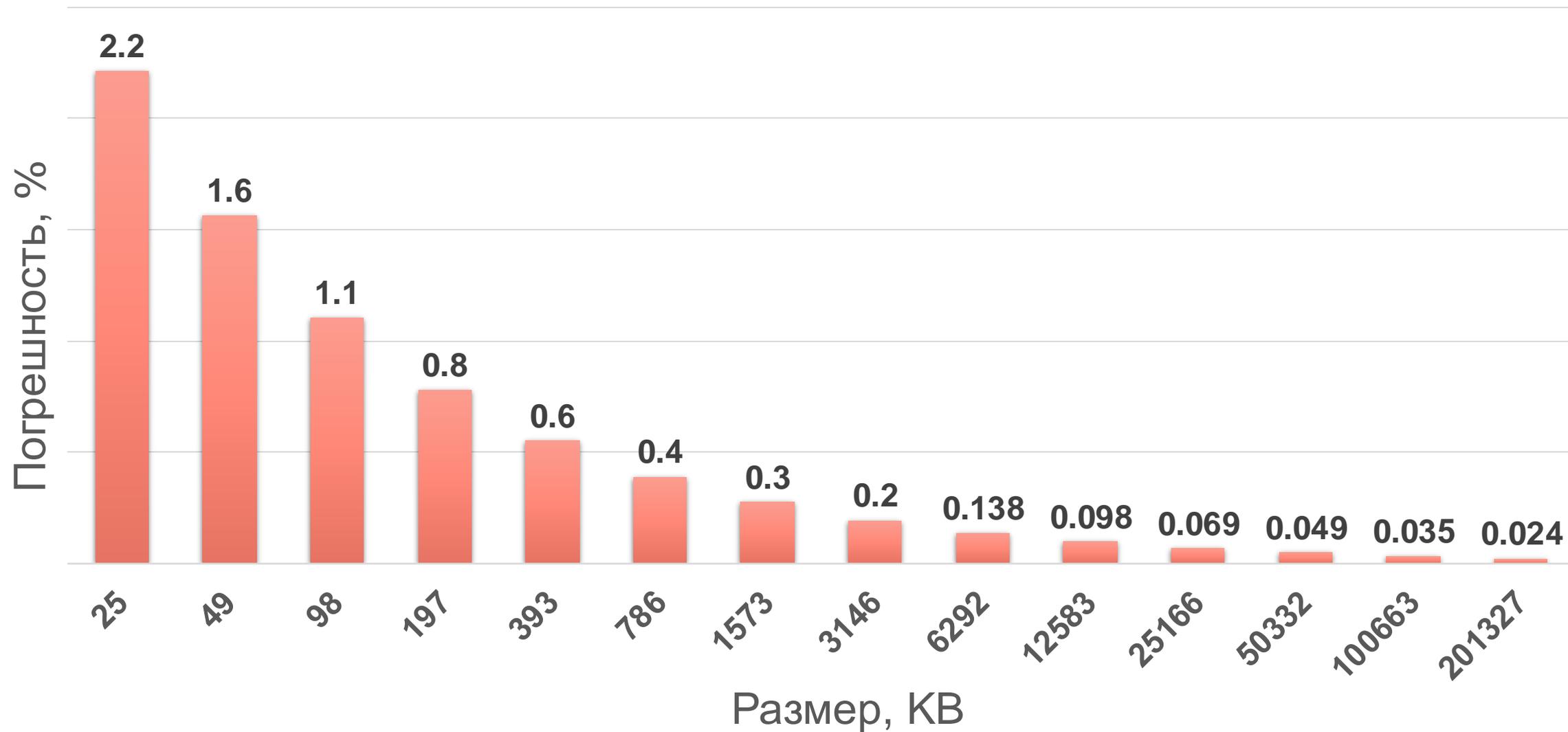
Theta Sketch



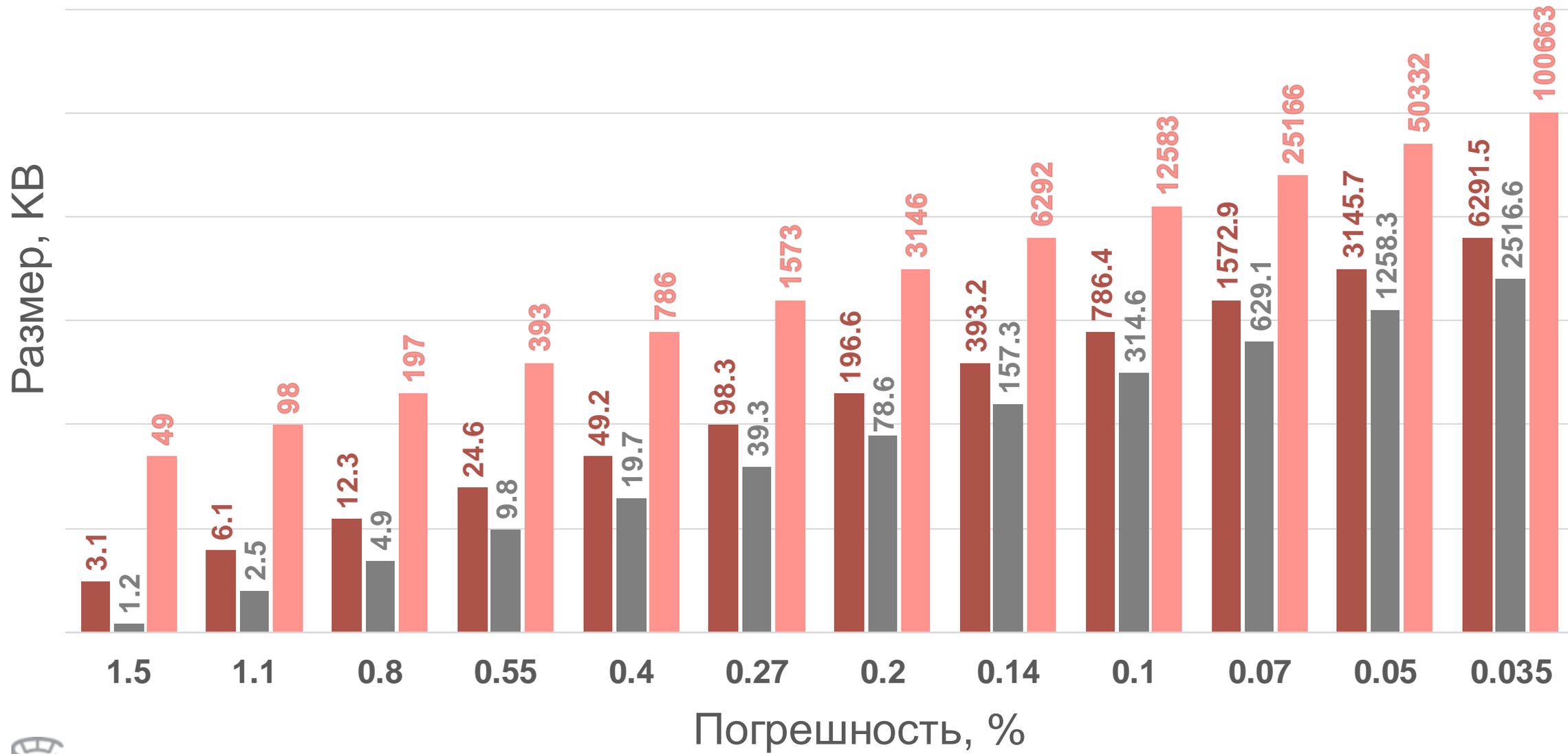
Theta Sketch (ClickHouse)



Theta, погрешность от размера



HLL vs CPC vs Theta



CPC vs HLL vs Theta

$$(A \cup B) \cap (C \cup D) \setminus E$$

CPC vs HLL vs Theta

$$(A \cup B) \cap (C \cup D) \setminus E$$

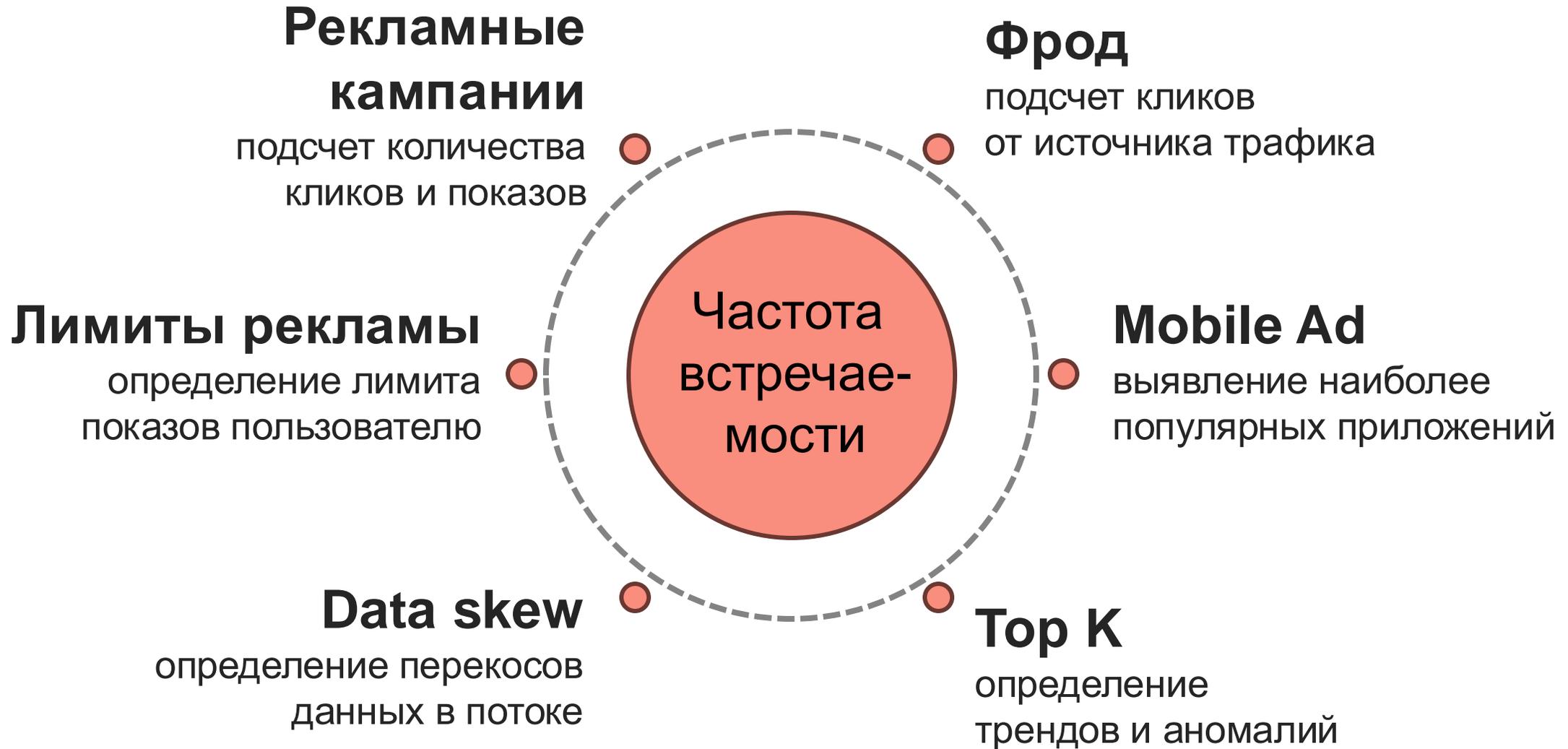
> 16x HLL

> 40x CPC

при сравнимой погрешности

Частота встречаемости

Примеры использования



Частота встречаемости

```
select  
  item,  
  count(*) as amount  
from <table>  
group by item  
order by amount desc  
limit K
```

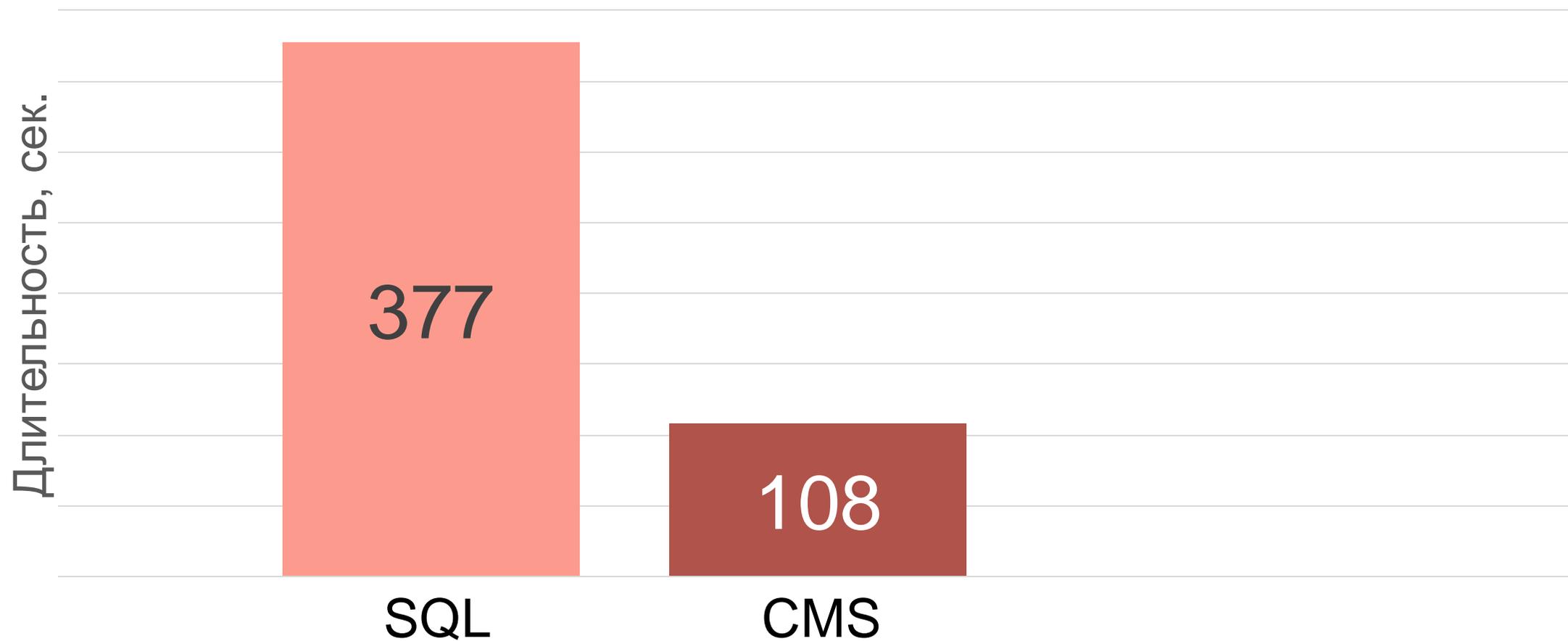
select count(*) ... group by

- Много CPU
- Много RAM
- Перекосы в данных (data skew)

select count(*) ... group by



CountMin Sketch



CountMin Sketch на пальцах

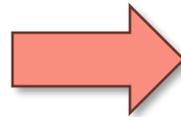
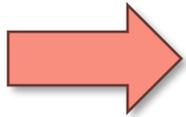
m

	0	0	0	0
k	0	0	0	0
	0	0	0	0

CountMin Sketch на пальцах

Алиса

hash(Алиса)



k

m

0	1a	0	0
0	0	1a	0
1a	0	0	0

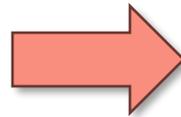
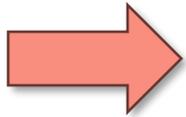
CountMin Sketch на пальцах

Алиса

hash(Алиса)

Алиса

hash(Алиса)



k

m

0	2a	0	0
0	0	2a	0
2a	0	0	0

CountMin Sketch на пальцах

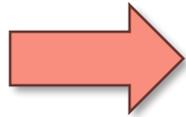
Алиса

hash(Алиса)

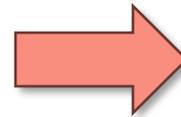
Алиса

hash(Алиса)

Боб



hash(Боб)



k

m

0	2a	1b	0
0	0	2a	1b
2a	0	1b	0

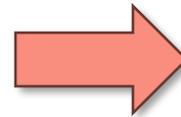
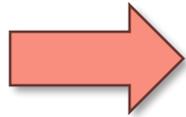
CountMin Sketch на пальцах

Алиса hash(Алиса)

Алиса hash(Алиса)

Боб hash(Боб)

Джек hash(Джек)



m

0	2a	1b	1d
0	0	2a+1d	1b
2a	1d	1b	0

k

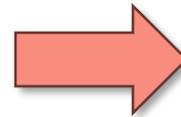
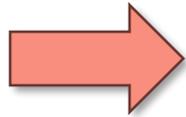
CountMin Sketch на пальцах

Алиса hash(Алиса)

Алиса hash(Алиса)

Боб hash(Боб)

Джек hash(Джек)



m

0	2а	1б	1д
0	0	3да	1б
2а	1д	1б	0

k

CountMin Sketch на пальцах

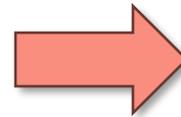
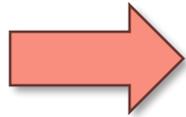
Алиса hash(Алиса)

Алиса hash(Алиса)

Боб hash(Боб)

Джек hash(Джек)

Боб hash(Боб)



m

	0	2а	2б	1д
k	0	0	3да	2б
	2а	1д	2б	0

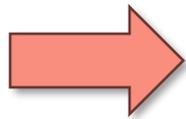
CountMin Sketch на пальцах

m

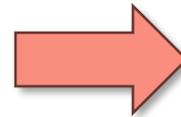
	0	2a	2б	1д
k	0	0	3да	2б
	2a	1д	2б	0

CountMin Sketch на пальцах

Алиса



hash(Алиса)



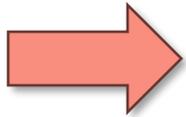
k

m

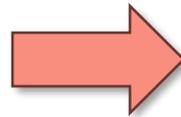
0	2а	2б	1д
0	0	3да	2б
2а	1д	2б	0

CountMin Sketch на пальцах

Алиса



hash(Алиса)

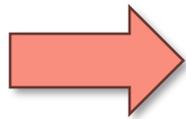


m

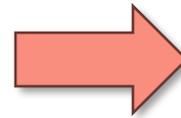
	0	2а	2б	1д
k	0	0	3да	2б
	2а	1д	2б	0

CountMin Sketch на пальцах

Алиса

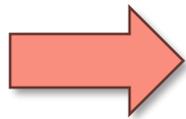


hash(Алиса)

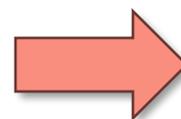


k

		m		
	0	2а	2б	1д
	0	0	3да	2б
k	2а	1д	2б	0



min(2, 3, 2)



2

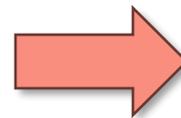
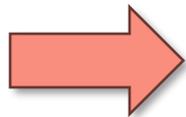
CountMin Sketch на пальцах

Алиса

hash(Алиса)

Боб

hash(Боб)



m

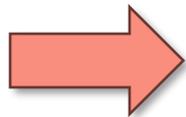
0	2a	2б	1д
0	0	3да	2б
2a	1д	2б	0

k

CountMin Sketch на пальцах

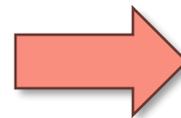
Алиса

Боб



hash(Алиса)

hash(Боб)



k

m

0	2a	2б	1д
0	0	3да	2б
2a	1д	2б	0

CountMin Sketch на пальцах

Алиса

hash(Алиса)

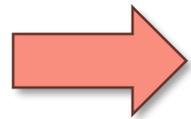
Боб

hash(Боб)

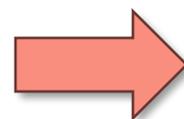
k

m

0	2а	2б	1д
0	0	3да	2б
2а	1д	2б	0

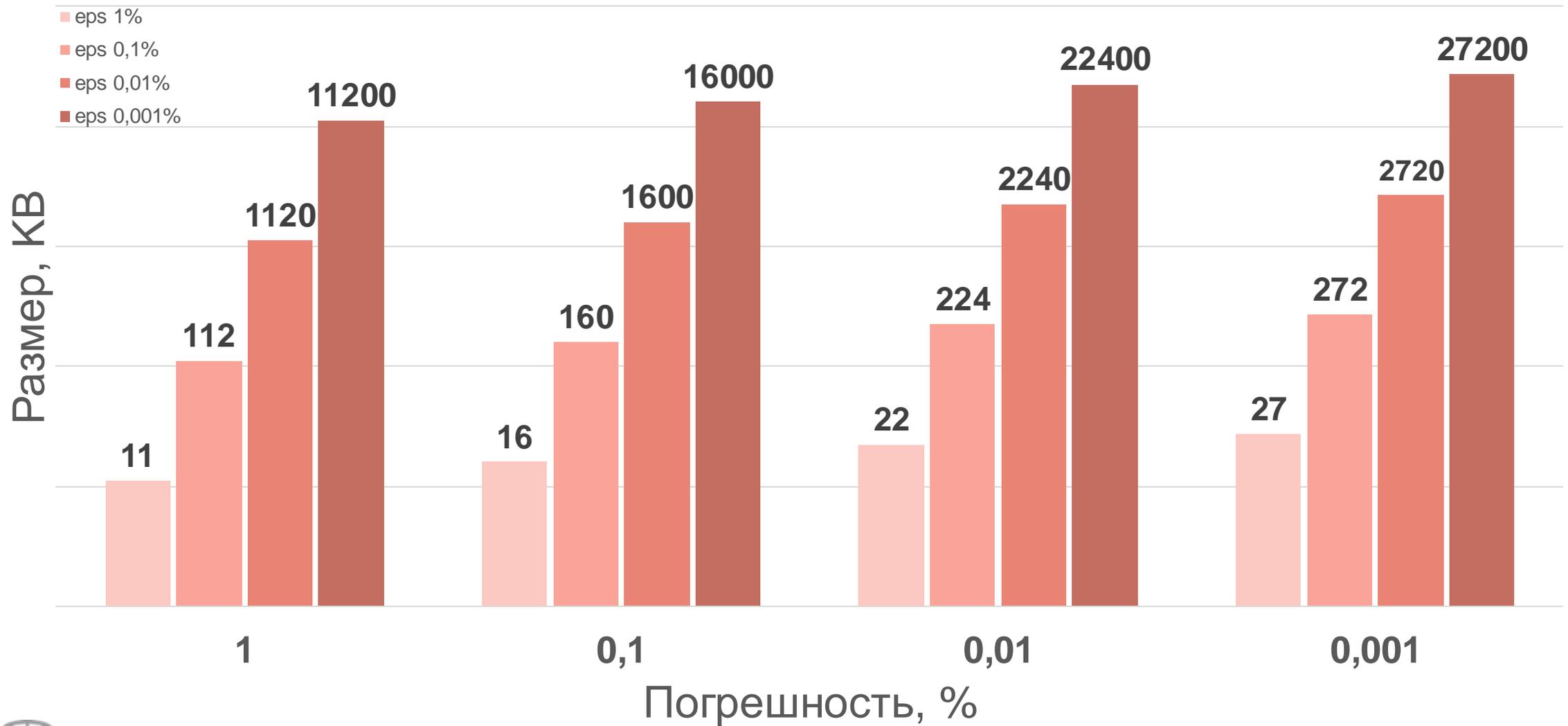


min(2, 2, 2)



2

CMS, размер от ошибки



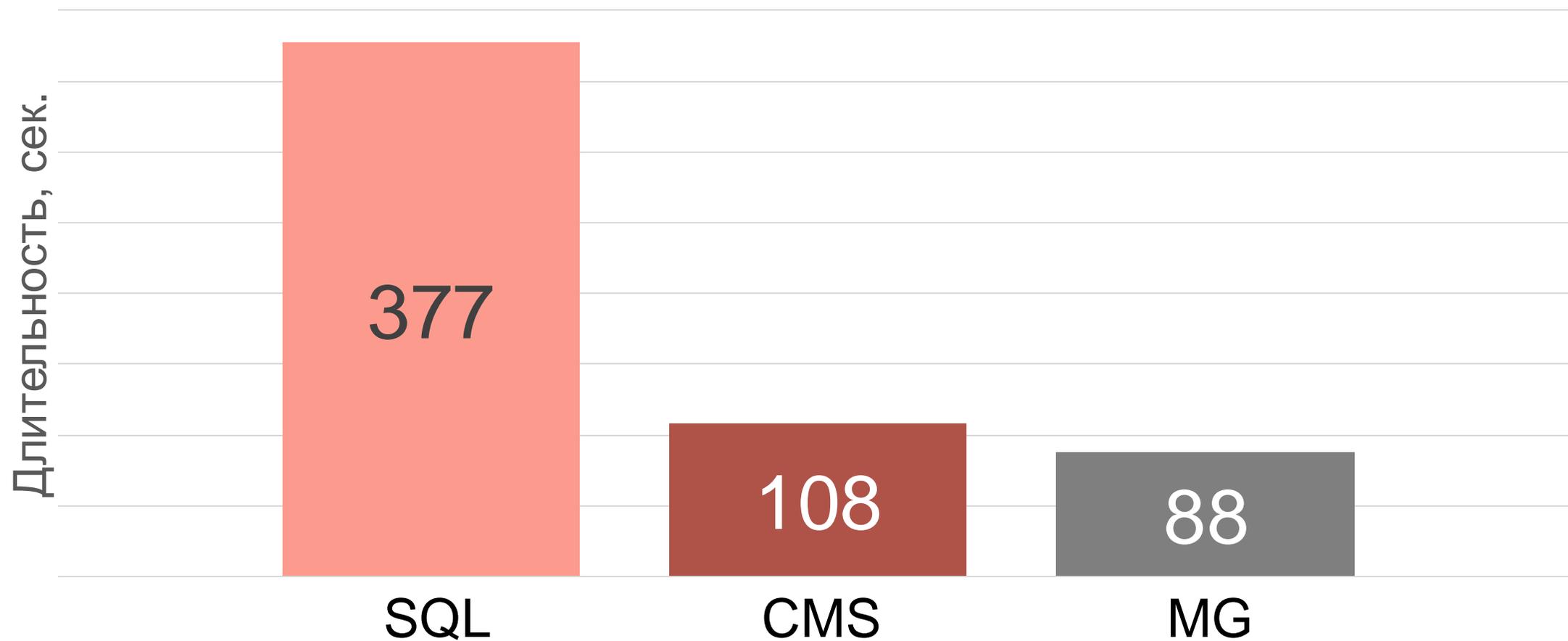
11 KB

11 КВ

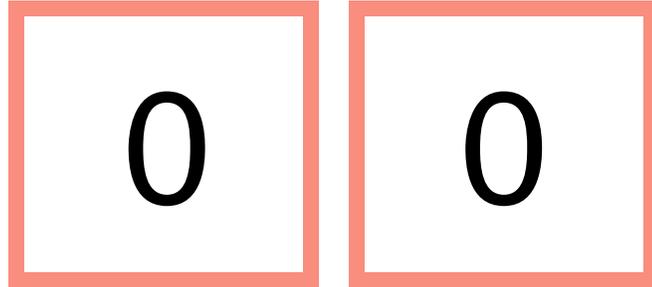
при погрешности 1%*

** и вероятности превышения ошибки 1%*

Misra-Gries

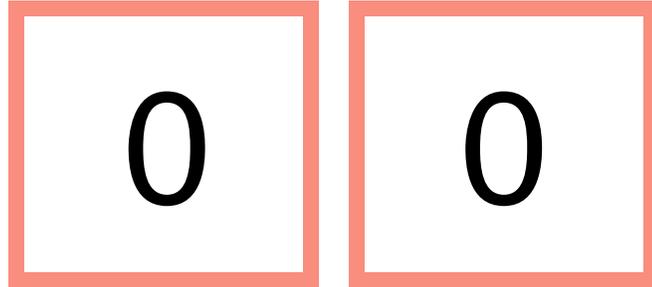


Misra-Gries на пальцах (top 2)



Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса



Misra-Gries на пальцах (top 2)

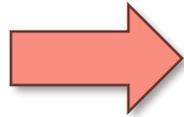
Алиса



Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса

Алиса



Алиса

2

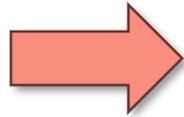
0

Misra-Gries на пальцах (top 2)

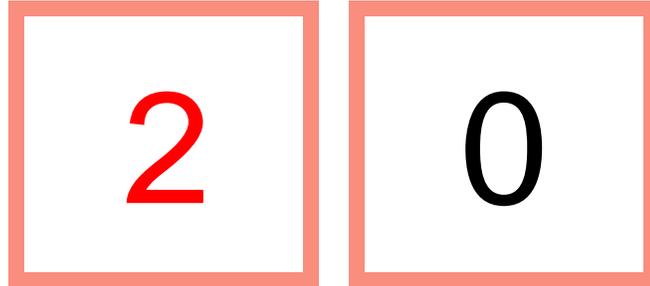
Алиса

Алиса

Боб



Алиса

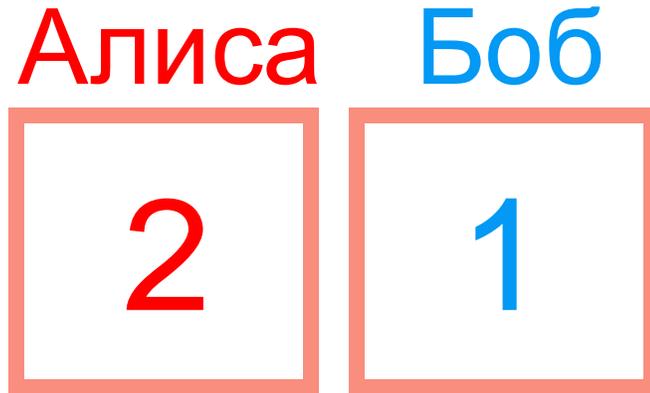
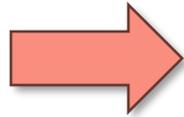


Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса

Алиса

Боб



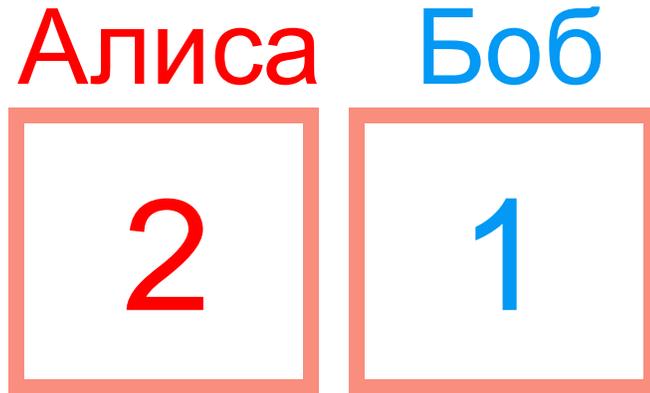
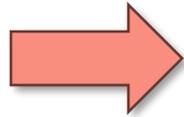
Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса

Алиса

Боб

Джек



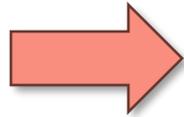
Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса

Алиса

Боб

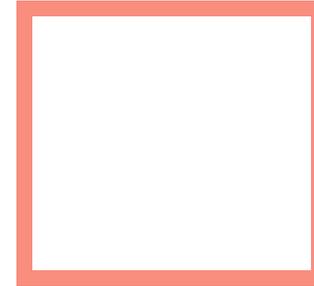
Джек



Алиса

Боб

-



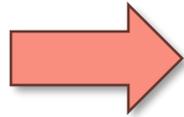
Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса

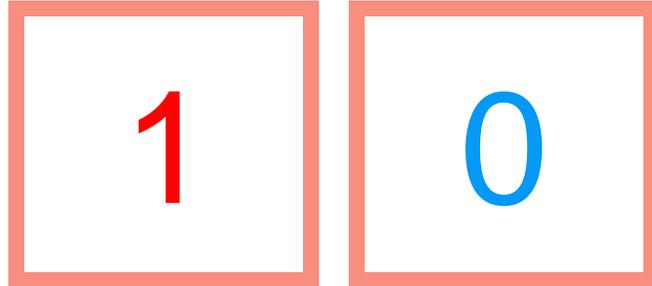
Алиса

Боб

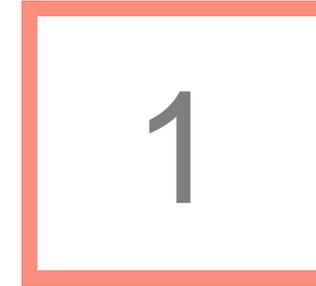
Джек



Алиса Боб



-



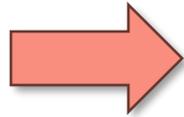
Misra-Gries на пальцах (top 2)

Алиса

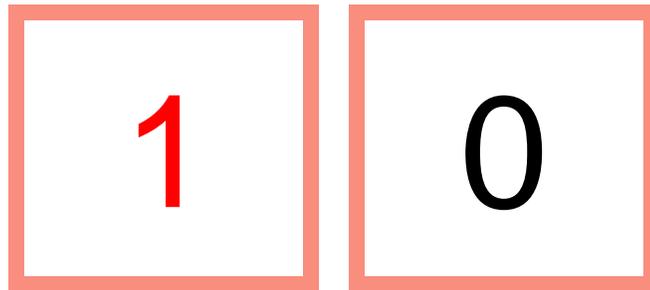
Алиса

Боб

Джек



Алиса



-



Misra-Gries на пальцах (top 2)

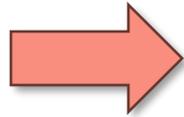
Алиса

Алиса

Боб

Джек

Боб



Алиса Боб



-



Misra-Gries на пальцах (top 2)

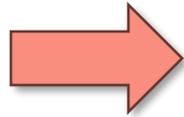
Алиса

Алиса

Боб

Джек

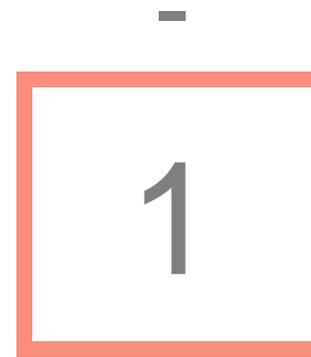
Боб



Алиса Боб



+



Misra-Gries на пальцах (top 2)

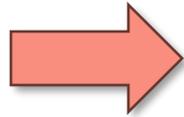
Алиса

Алиса

Боб

Джек

Боб



Misra-Gries, размер от частоты



10 KB

10 кв

для обнаружения объектов
с частотой встречаемости 1%

CountMin

Низкочастотные
элементы

Компактнее*

Misra-Gries

Точный результат*

Быстрее*

Квантили и гистограммы

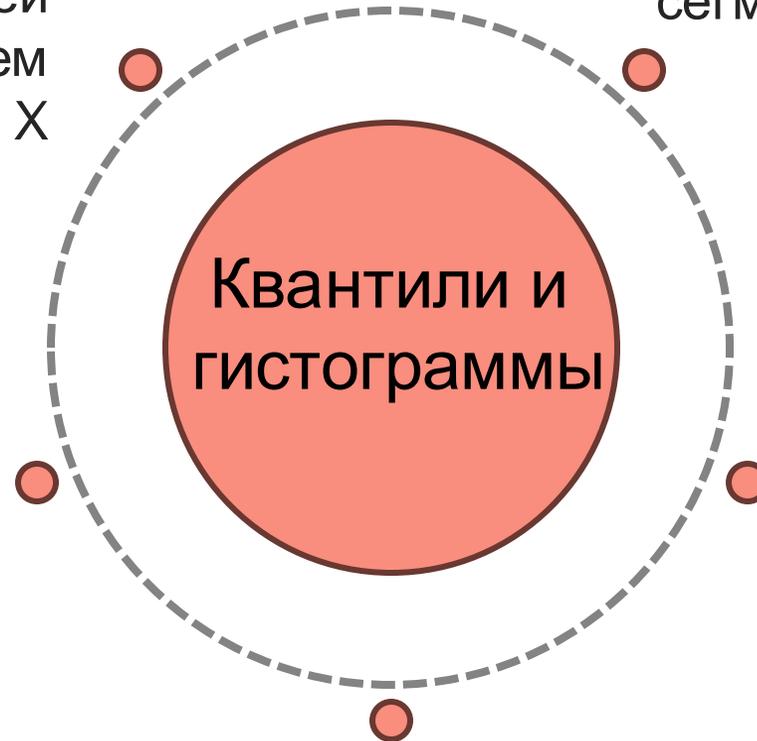
Примеры использования

Реклама

подсчет % пользователей сайта, проводящих на нем больше времени, чем X

Исследование аудитории

сегментация пользователей



Квантили и гистограммы

Data Quality

Мониторинг распределения данных "на лету", поиск перекосов

Вовлеченность

оценка времени, которое проводят на сайте 90% пользователей

Поведенческая аналитика

анализ кликов, репостов и лайков

Квантили и гистограммы

Ранг – номер элемента

Ранг	1	2	3	4	5
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	10	20	30	40	50

Квантили и гистограммы

Ранг – номер элемента

Нормализованный ранг – $rank/n$

Ранг	1	2	3	4	5
Норм. ранг	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	10	20	30	40	50

Квантили и гистограммы

Ранг – номер элемента

Нормализованный ранг – $rank/n$

Квантиль – значение, соотв. рангу

Ранг	1	2	3	4	5
Норм. ранг	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Квантиль	10	20	30	40	50

Квантили и гистограммы

Ранг – номер элемента

Нормализованный ранг – $rank/n$

Квантиль – значение, соотв. рангу

Ранг	1	2	3	4	5
Норм. ранг	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Квантиль	10	20	30	40	50

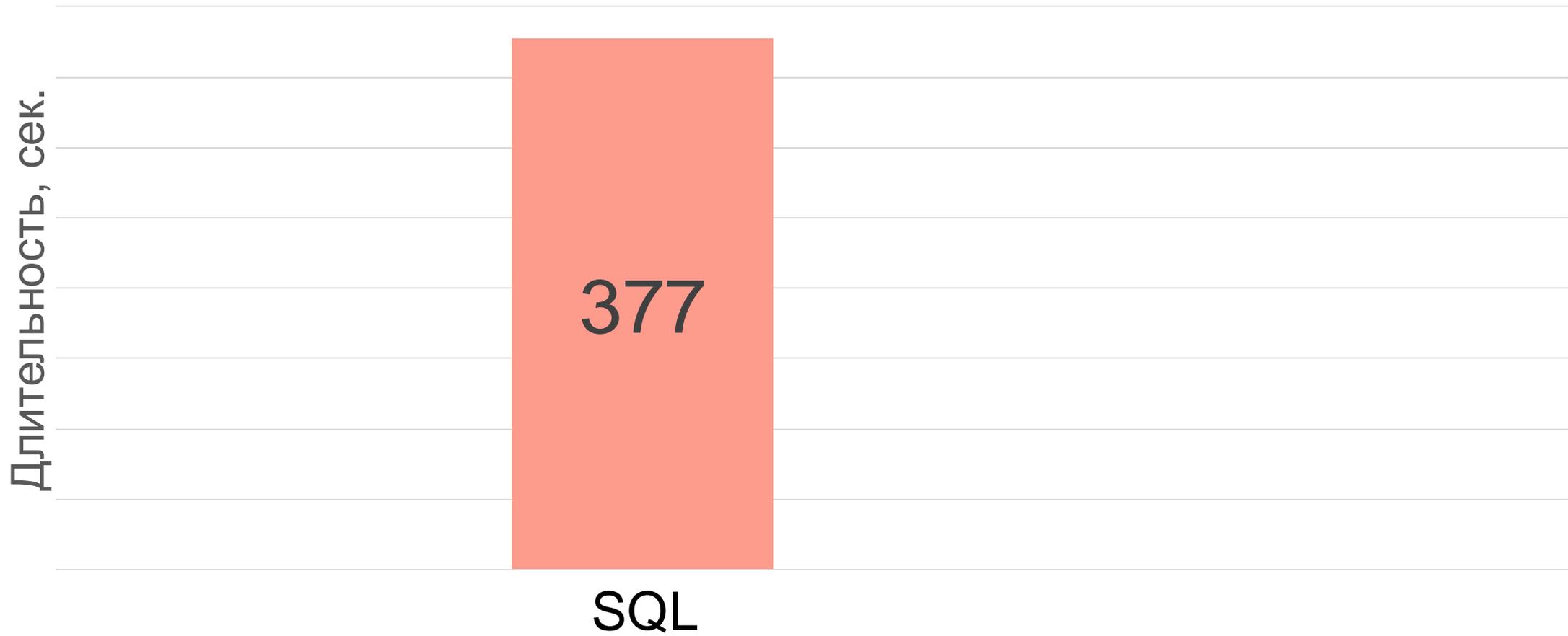
Пример: 80% запросов не превышают 40 ms

$$q(0.8) = 40$$

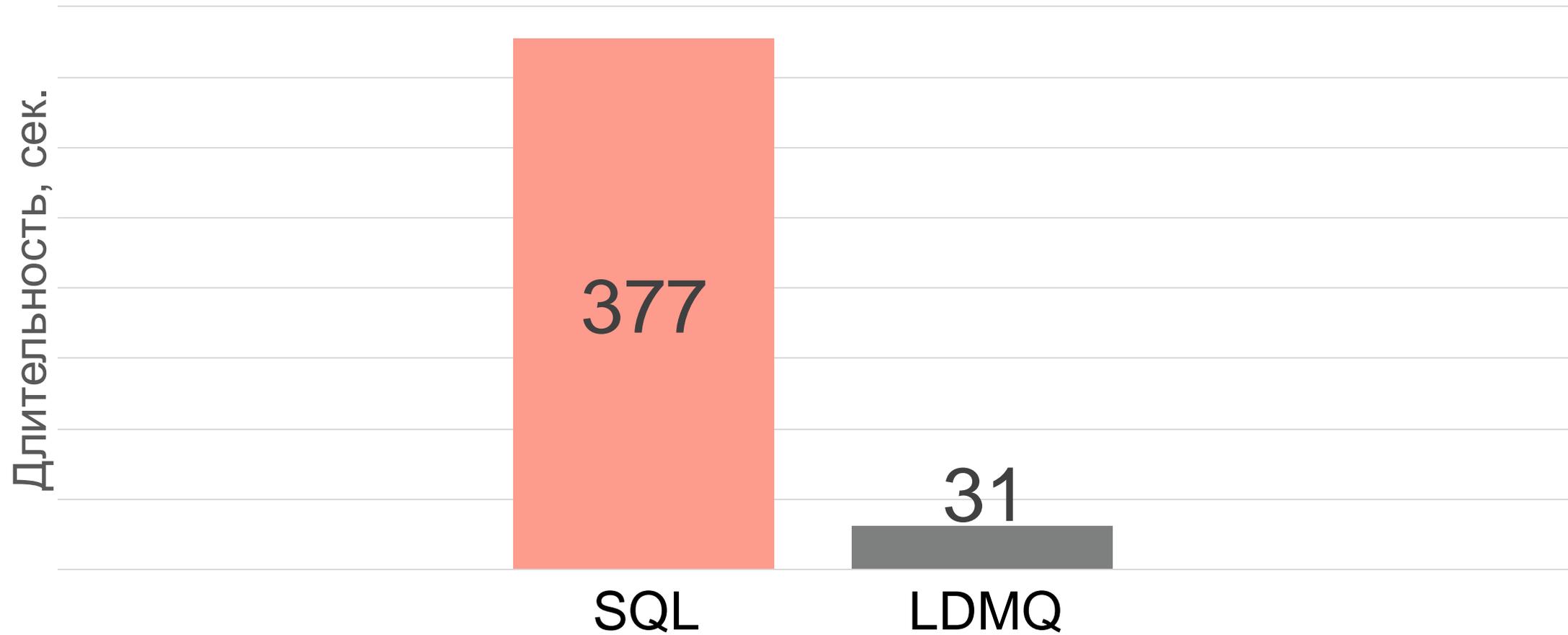
Квантили и гистограммы

```
select  
    percentile_cont(0.5)  
        within group (order by <column>)  
from items
```

select ... order by



Low Discrepancy Mergeable Quantiles Sketch



Квантили и гистограммы

Алгоритм	Простота	Merge	Размер
Uniform Sampling	✓	✓	$1/\varepsilon^2$
Greenwald Khanna (GK)	✗	✗	$\log(n)/\varepsilon$
Felber-Ostrovsky	✗	✗	$\log(1/\varepsilon)/\varepsilon$
Manku-Rajagopalan-Lindsay (MRL)	✓	✓	$\log^2(n)/\varepsilon$
Agarwal, Cormode, Huang, Phillips, Wei, Yi	✓/✗	✓	$\log^{3/2}(1/\varepsilon)/\varepsilon$
Karnin, Lang, Liberty	✓	✓	$\sqrt{\log(1/\varepsilon)}/\varepsilon$
Karnin, Lang, Liberty	✓/✗	✗	$\log^2(\log(1/\varepsilon))/\varepsilon$
Karnin, Lang, Liberty	✗	✗	$\log(\log(1/\varepsilon))/\varepsilon$
Still open ...	✓	✓	$\log(\log(1/\varepsilon))/\varepsilon$

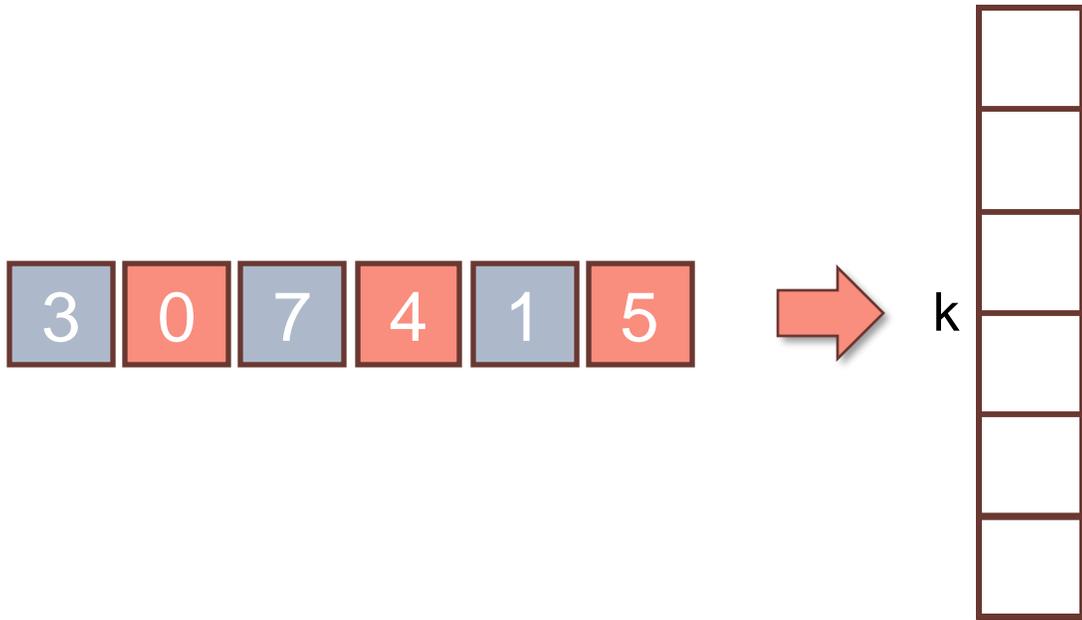
Квантили и гистограммы

Алгоритм	Простота	Merge	Размер
Uniform Sampling	✓	✓	$1/\varepsilon^2$
Greenwald Khanna (GK)	✗	✗	$\log(n)/\varepsilon$
Felber-Ostrovsky	✗	✗	$\log(1/\varepsilon)/\varepsilon$
Manku-Rajagopalan-Lindsay (MRL)	✓	✓	$\log^2(n)/\varepsilon$
Agarwal, Cormode, Huang, Phillips, Wei, Yi	✓/✗	✓	$\log^{3/2}(1/\varepsilon)/\varepsilon$
Karnin, Lang, Liberty	✓	✓	$\sqrt{\log(1/\varepsilon)}/\varepsilon$
Karnin, Lang, Liberty	✓/✗	✗	$\log^2(\log(1/\varepsilon))/\varepsilon$
Karnin, Lang, Liberty	✗	✗	$\log(\log(1/\varepsilon))/\varepsilon$
Still open ...	✓	✓	$\log(\log(1/\varepsilon))/\varepsilon$

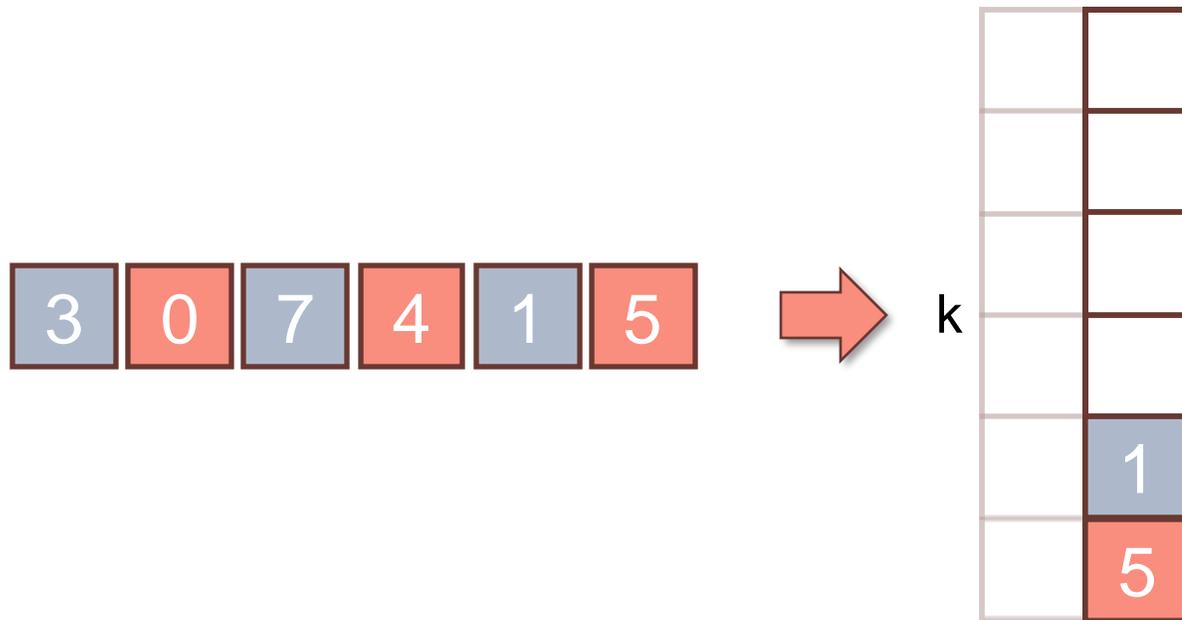
Квантили на пальцах



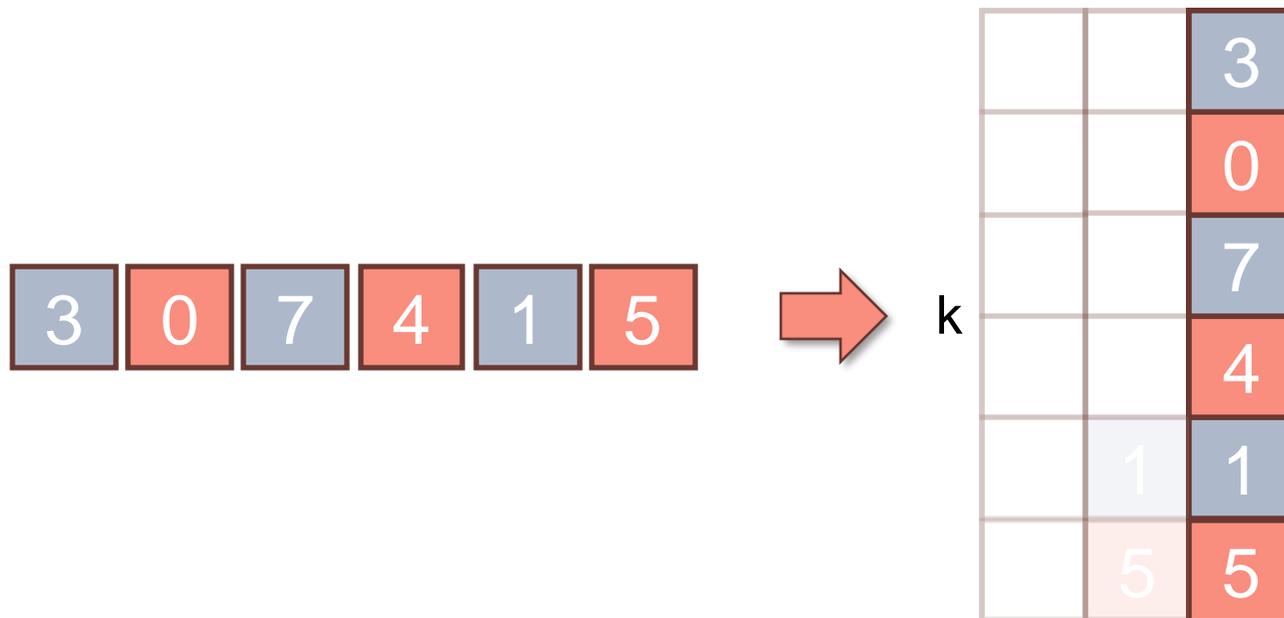
Квантили на пальцах



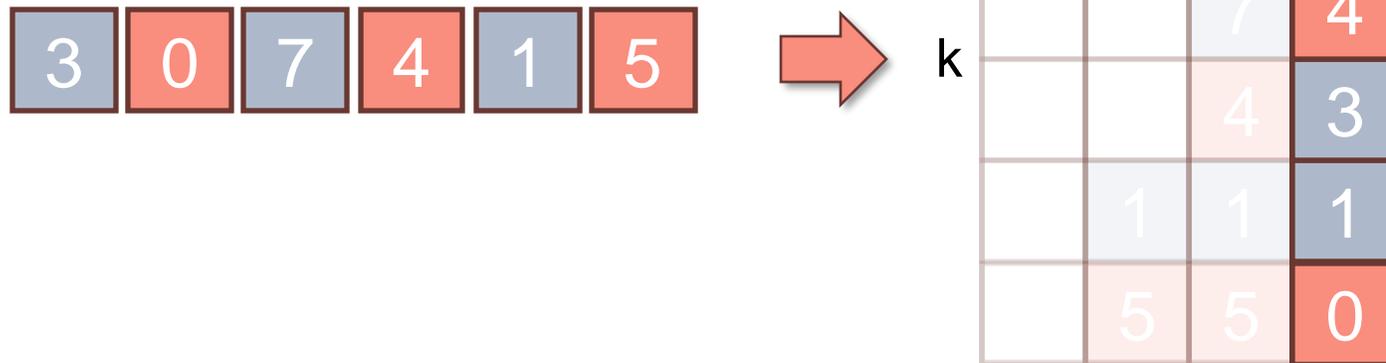
Квантили на пальцах



Квантили на пальцах



Квантили на пальцах



Квантили на пальцах



k

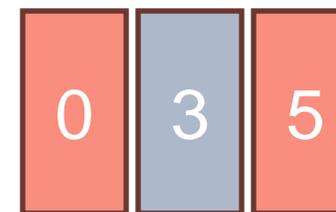
		3	7	7
		0	5	5
		7	4	4
		4	3	3
	1	1	1	1
	5	5	0	0

Квантили на пальцах

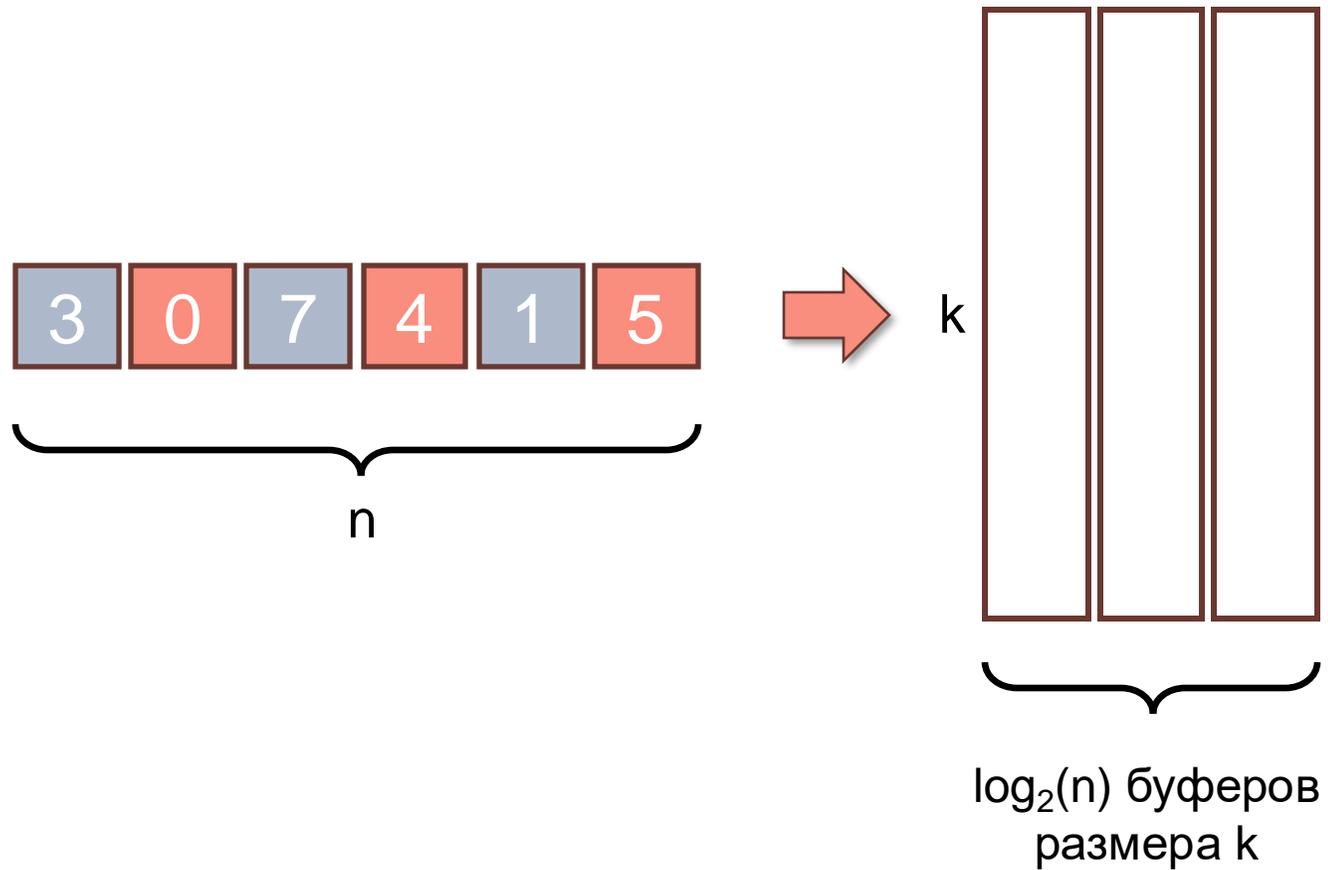


k

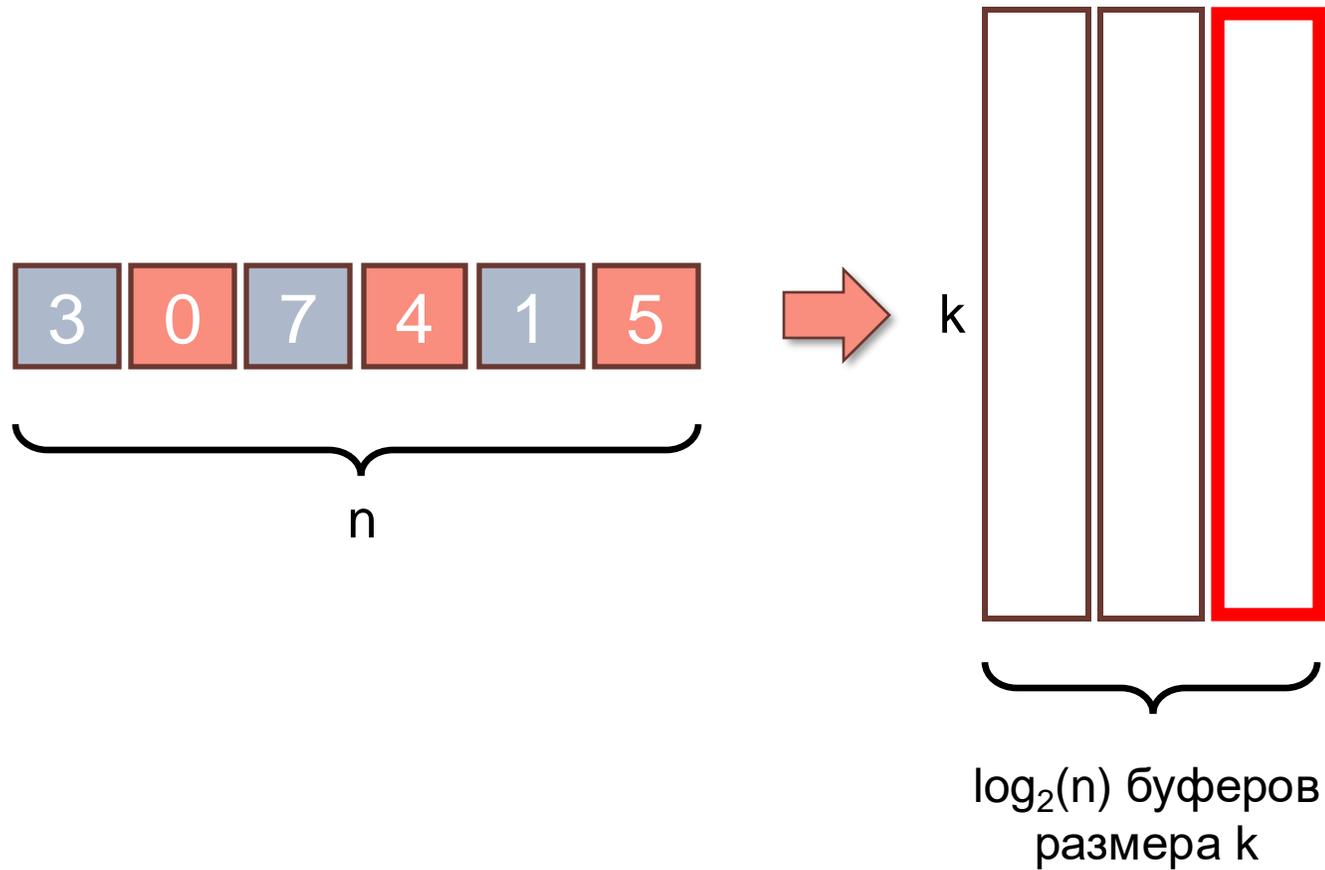
		3	7	7	
		0	5	5	
		7	4	4	
		4	3	3	
	1	1	1	1	
	5	5	0	0	



Manku-Rajagopalan-Lindsay (MRL)

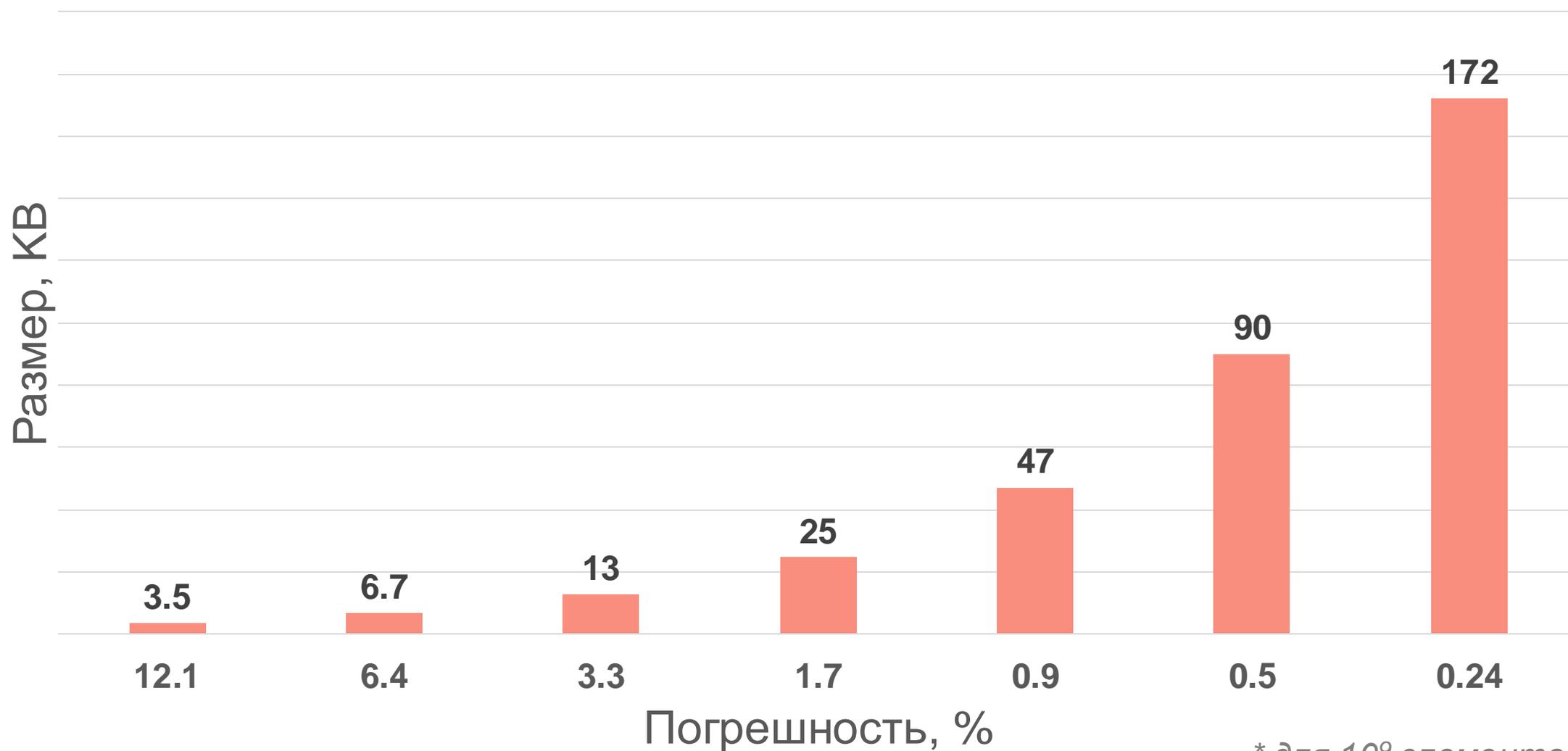


Manku-Rajagopalan-Lindsay (MRL)



В **11000** меньше
при погрешности 1%

Квантили и гистограммы



* для 10^9 элементов

Где вы могли это уже видеть?

Spark	approx_count_distinct	hll*_agg	approx_percentile	percentile_approx		
ClickHouse	uniq	uniqCombined	uniqHLL12	uniqTheta	quantile*	approx_top_*
BigQuery	count_distinct	approx_quantiles	approx_top_count	hll_count.*		
Snowflake	approx_count_distinct	approx_top_k	approx_percentile	hll*		
Oracle	approx_count_distinct*	approx_percentile*	approx_median			
SQLServer	approx_count_distinct	approx_percentile_*				

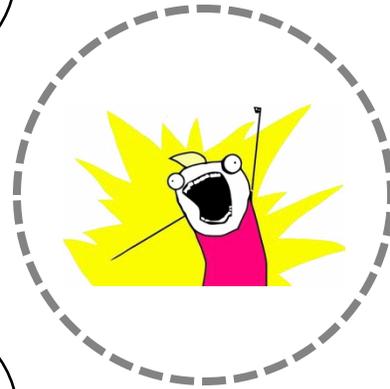
Итоги Data Sketches

Нерешаемые задачи
становятся решаемыми

Нелинейные сложности
становятся линейными

Количество ресурсов
сокращается на порядки

Точность почти
не страдает



Что еще почитать

- CPC (FM85) - <https://arxiv.org/pdf/1708.06839.pdf>
- HLL - <https://oertl.github.io/hyperloglog-sketch-estimation-paper/paper/paper.pdf>
- Theta - <https://arxiv.org/pdf/1510.01455.pdf>
- CMS - <http://www.eecs.harvard.edu/~michaelm/CS222/countmin.pdf>
- MG - <https://www.cs.utexas.edu/users/misra/scannedPdf.dir/FindRepeatedElements.pdf>
- KLL - <https://arxiv.org/pdf/1603.05346.pdf>
- t-digest - <https://arxiv.org/pdf/1902.04023.pdf>
- Mergeable Summaries - <https://users.cs.utah.edu/~jeffp/papers/merge-summ.pdf>
- Quantile Approximation - <https://arxiv.org/pdf/1603.05346.pdf>

Что еще посмотреть

- <https://github.com/apache/datasketches-java>
- <https://github.com/apache/datasketches-python>
- <https://github.com/apache/datasketches-go>
- <https://github.com/apache/datasketches-cpp>
- <https://github.com/apache/datasketches-postgresql>
- <https://github.com/apache/datasketches-hive>
- <https://github.com/addthis/stream-lib>

Спасибо!

Сергей Жемжицкий

Dep. СТО

@arenadata



Спасибо!

Сергей Жемжицкий

Dep. CTO

@ya_dec



[yet another DE channel]

