Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Факультет Вычислительной математики и кибернетики

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

(часть 1)

Вл.В.Воеводин

Зав.кафедрой Суперкомпьютеров и квантовой информатики ВМК МГУ,
Директор НИВЦ МГУ,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

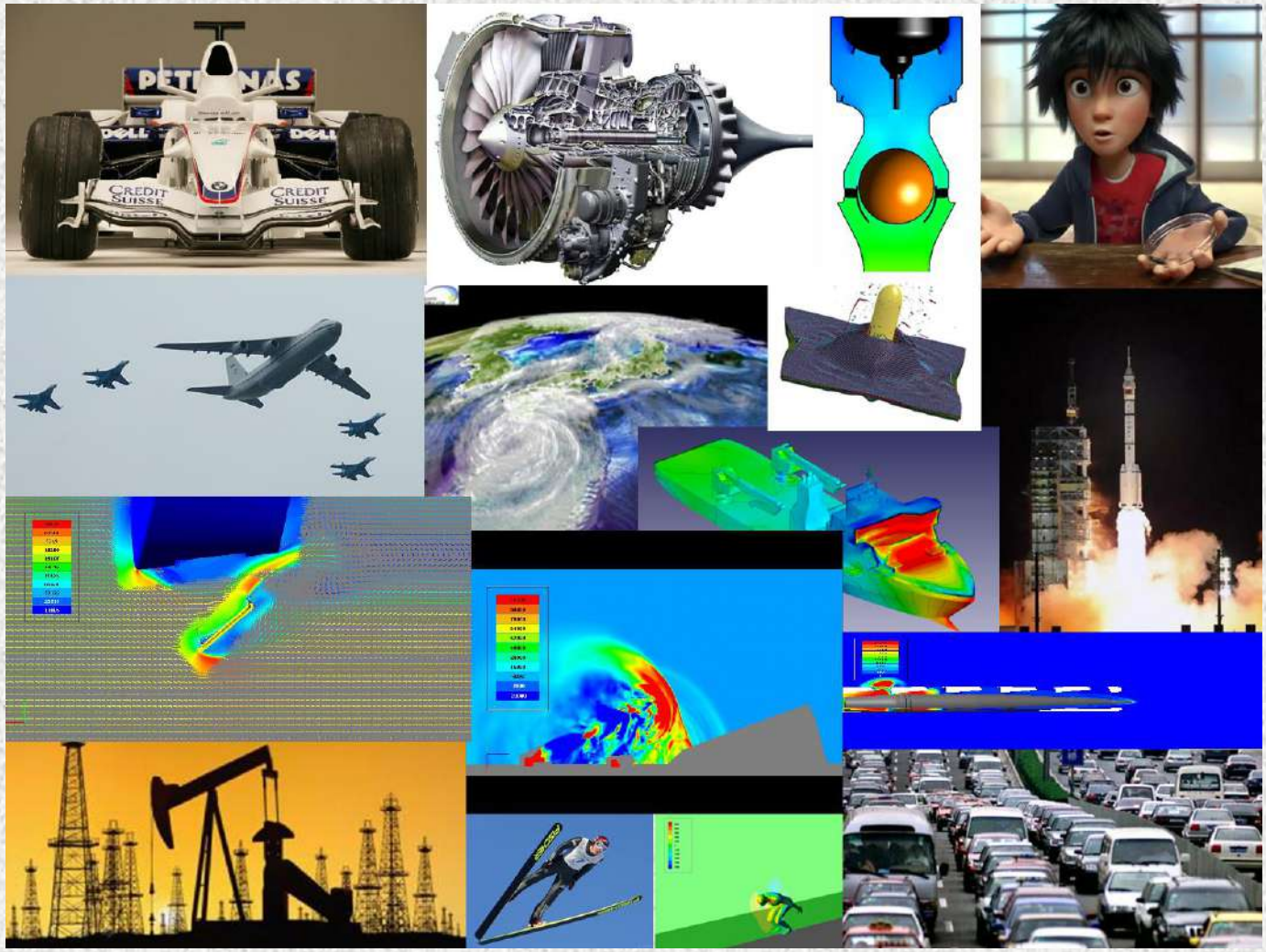
voevodin@parallel.ru

ВМК МГУ, 2020

Суперкомпьютеры – что это?

- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые работают значительно быстрее остальной массы современных компьютеров;*
- *Seymour Cray: It's hard to define but you know when you see it;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые занимают большой зал;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые весят больше 1 тонны;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые стоят больше $1M ;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые сводят проблему вычислений к проблеме ввода/вывода;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, мощности которых немного не хватает для решения актуальных вычислительно сложных задач;*

Суперкомпьютерные технологии сегодня везде



Суперкомпьютерные технологии – это инструмент **обеспечения конкурентоспособности** науки, компаний, промышленности, экономики, страны.
Сделать быстрее, дешевле, качественнее, быстрее вывести на рынок…

Суперкомпьютерные технологии – ключевой элемент сквозных технологий цифровой экономики

Сквозные технологии:

- *математическое моделирование,*
- *искусственный интеллект,*
- *новые производственные технологии,*
- *хранение и анализ больших данных,*
- *технологии виртуальной и дополненной реальности,*
- *квантовые технологии,*
- *Интернет вещей,*
- *кибербезопасность,*
- *…*

Суперкомпьютерные технологии и большие данные

Лидеры рейтинга **Fortune500 Global** в 2019 году:

№	Компания	Страна	Отрасль	Выручка
1	Walmart		Розничная торговля	$514 млрд
2	Sinopec		Добыча и переработка нефти и газа	$415 млрд
3	Royal Dutch Shell		Добыча и переработка нефти и газа	$397 млрд
4	China National Petroleum		Добыча и переработка нефти и газа	$393 млрд
5	State Grid		Электроэнергетика	$387 млрд
6	Saudi Aramco		Добыча и переработка нефти и газа	$356 млрд
7	BP		Добыча и переработка нефти и газа	$304 млрд
8	Exxon Mobil		Добыча и переработка нефти и газа	$290 млрд
9	Volkswagen		Производство автомобилей	$278 млрд
10	Toyota Motor		Производство автомобилей	$273 млрд

Все эти компании в своей работе опираются на использование технологий больших данных и высокопроизводительные вычислительные системы.

Walmart, торговля:

- годовой оборот более 500 млрд.долл., прибыль около 10 млрд.долл.,
- 20 тыс. магазинов в 28 странах мира,
- темп поступления и обработки данных: 2.5 ПБайт/час (10^{15} Байт/час),
- принятие оперативных решений на основе совокупной обработки данных из 200 источников, включая: транзакционные данные, метеорологические данные, экономические данные, телекоммуникационные данные, данные социальных сетей, цены на бензин, данные о событиях в населенных пунктах, где находятся магазины и многие другие.

Суперкомпьютерные технологии и квантовые технологии

Связь суперкомпьютерных и квантовых технологий естественна, но особенно сильно прослеживается по двум направлениям:

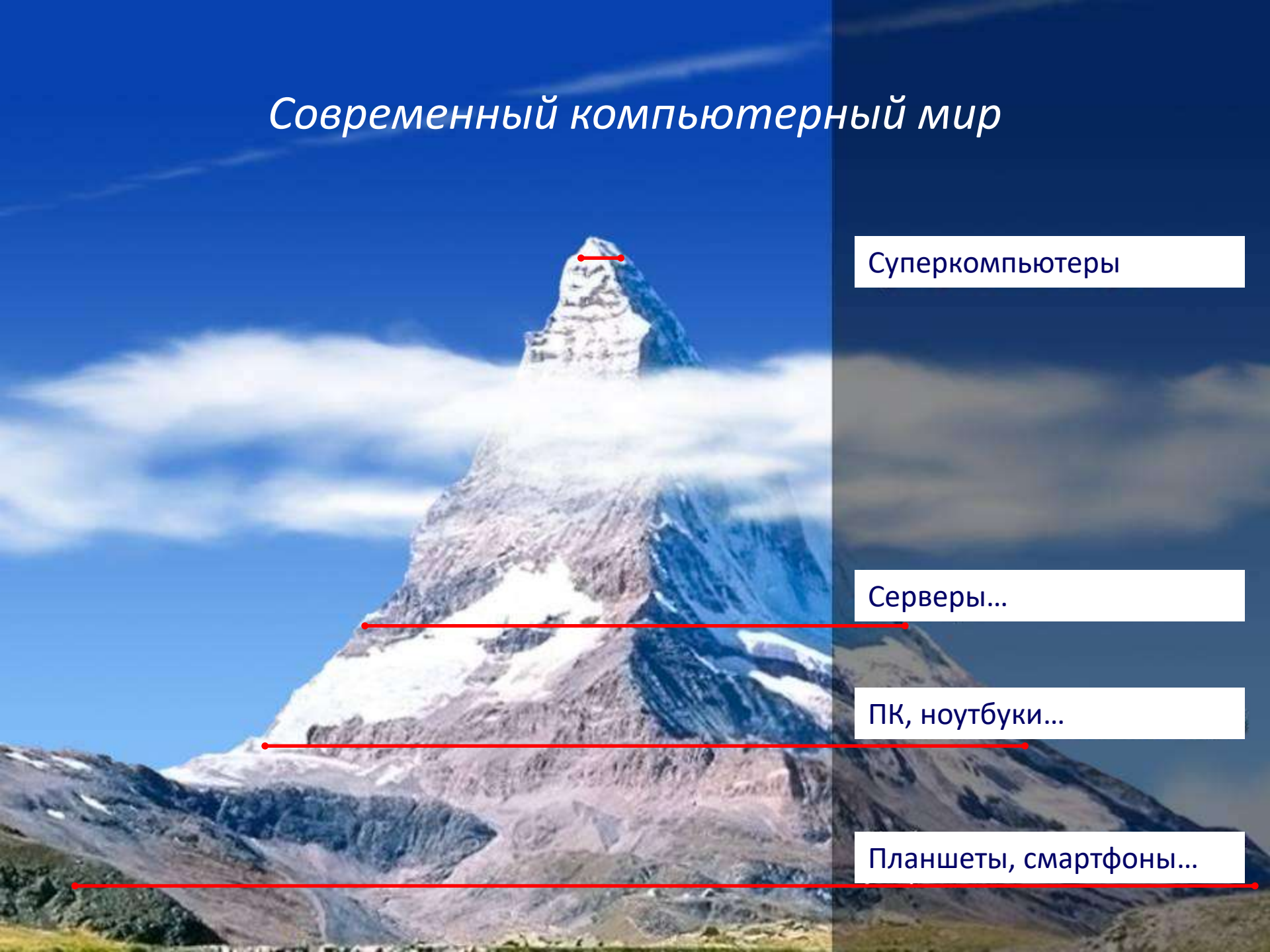
- Моделирование квантовых алгоритмов:
  - Понимание границы “квантового превосходства”, проверка новых схем коррекции ошибок, анализ влияния шумов.
  - Моделирование ведется с использованием лучших суперкомпьютеров мира (Cori - №14 в Top500, Edison Supercomputer, IBM BlueGene/Q) и собственных высокопроизводительных вычислительных систем компаний.
  - Активные работы ведут: Google, Alibaba, Huawei…

- Выбор параметров и управление квантовыми компьютерами:
  - успешные квантовые вычисления возможны только с надежной коррекцией ошибок, что увеличивает число необходимых физических кубитов на много порядков, что, в свою очередь, требует эффективного массивного управления (алгоритм Шора: для успешной работы необходимы 10^4-10^5 физических кубитов на каждый логический кубит);
  - для анализа работы реального физического квантового преобразования (гейта) необходимо проводить квантовую томографию (набирать статистику), однако сложность как по памяти, так и по скорости растет экспоненциально.

Суперкомпьютеры – что это?

… мобильные устройства –
персональные компьютеры – серверы –
суперкомпьютеры

Современный компьютерный мир



Персональный компьютер, 2020 г. – какой он?

Производительность: около 100 млрд. оп/с.

Память – 8-64 Гбайт

Диски – 500 Гбайт

Важные сокращения

Мега (Mega)	$– 10^6$	(миллион)
Гига (Giga)	$– 10^9$	(биллион / миллиард)
Тера (Tera)	$– 10^{12}$	(триллион)
Пета (Peta)	$– 10^{15}$	(квадриллион)

Флоп/с, Flop/s – Floating point operations per second

15 Tflop/s = $15 * 10^{12}$ арифметических операций в секунду над вещественными числами, представленными в форме с плавающей точкой.

Важные сокращения

Мега (Mega)	$– 10^6$	(миллион)
Гига (Giga)	$– 10^9$	(биллион / миллиард)
Тера (Tera)	$– 10^{12}$	(триллион)
Пета (Peta)	$– 10^{15}$	(квадриллион)

Флоп/с, Flop/s – Floating point operations per second

15 Tflop/s = $15 * 10^{12}$ арифметических операций в секунду над вещественными числами, представленными в форме с плавающей точкой.

Персональный компьютер, 2020 г. – какой он?

Производительность: около 100 Гфлоп/с.

Память – 8-64 Гбайт

Диски – 500 Гбайт

Важные сокращения

(взгляд в недалекое будущее)

Мега (Mega)	*– 10^6*	*(миллион)*
Гига (Giga)	*– 10^9*	*(биллион / миллиард)*
Тера (Tera)	*– 10^{12}*	*(триллион)*
Пета (Peta)	*– 10^{15}*	*(квадриллион)*
Экза (Exa)	*– 10^{18}*	*(квинтиллион)*

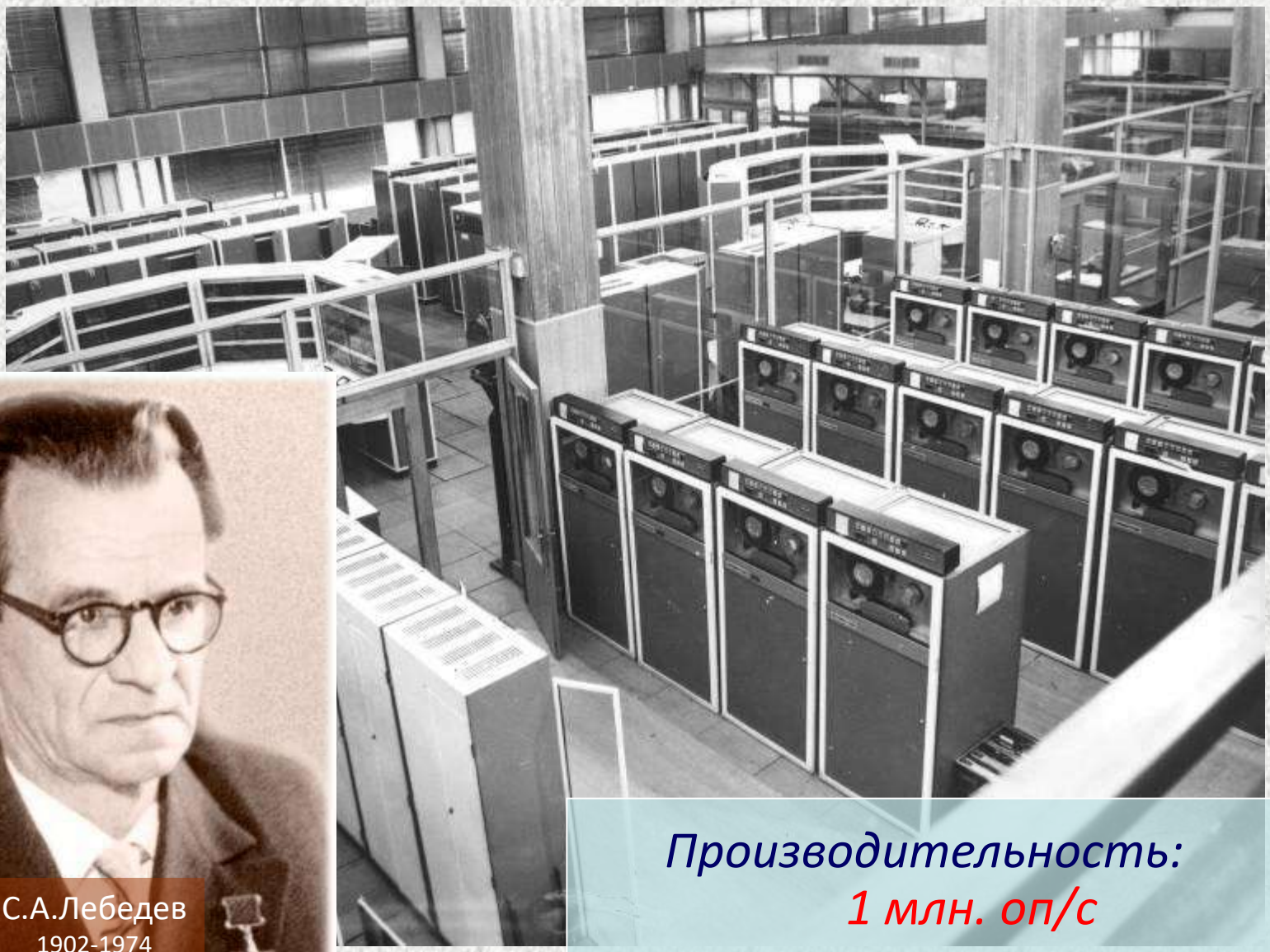
1 000 000 000 000 000 000 – ‘Экза’

Большие машины и суперкомпьютеры: какие они?

Вычислительный центр МГУ, 1956 г.

Вычислительный центр МГУ, 1959 г.

НИВЦ МГУ, ЭВМ “БЭСМ-6”, 1968 г.



С.А.Лебедев
1902-1974

Производительность:
1 млн. оп/с

Суперкомпьютер IBM “RoadRunner”, США

(#1 Top500 в 2008-2009 г.)

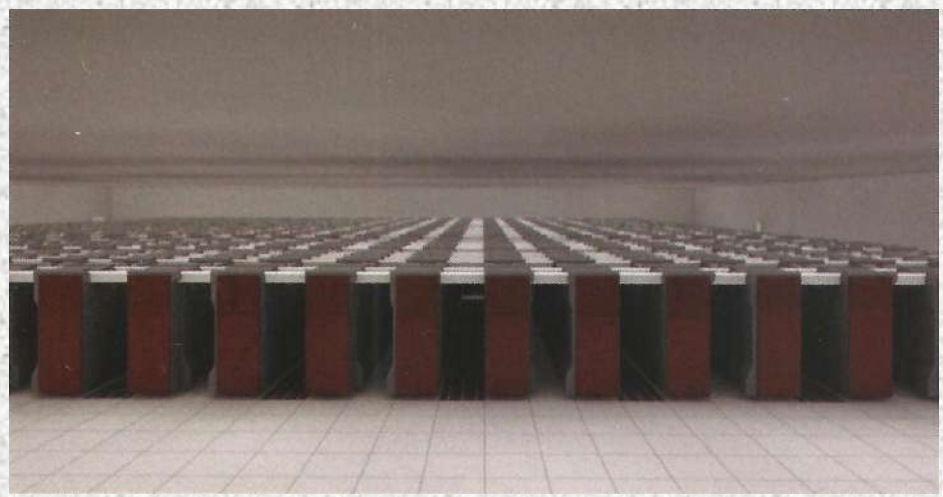
122 400 процессоров IBM Cell + AMD Opteron.

Производительность: 1 Pflop/s.

“K Computer”, Япония

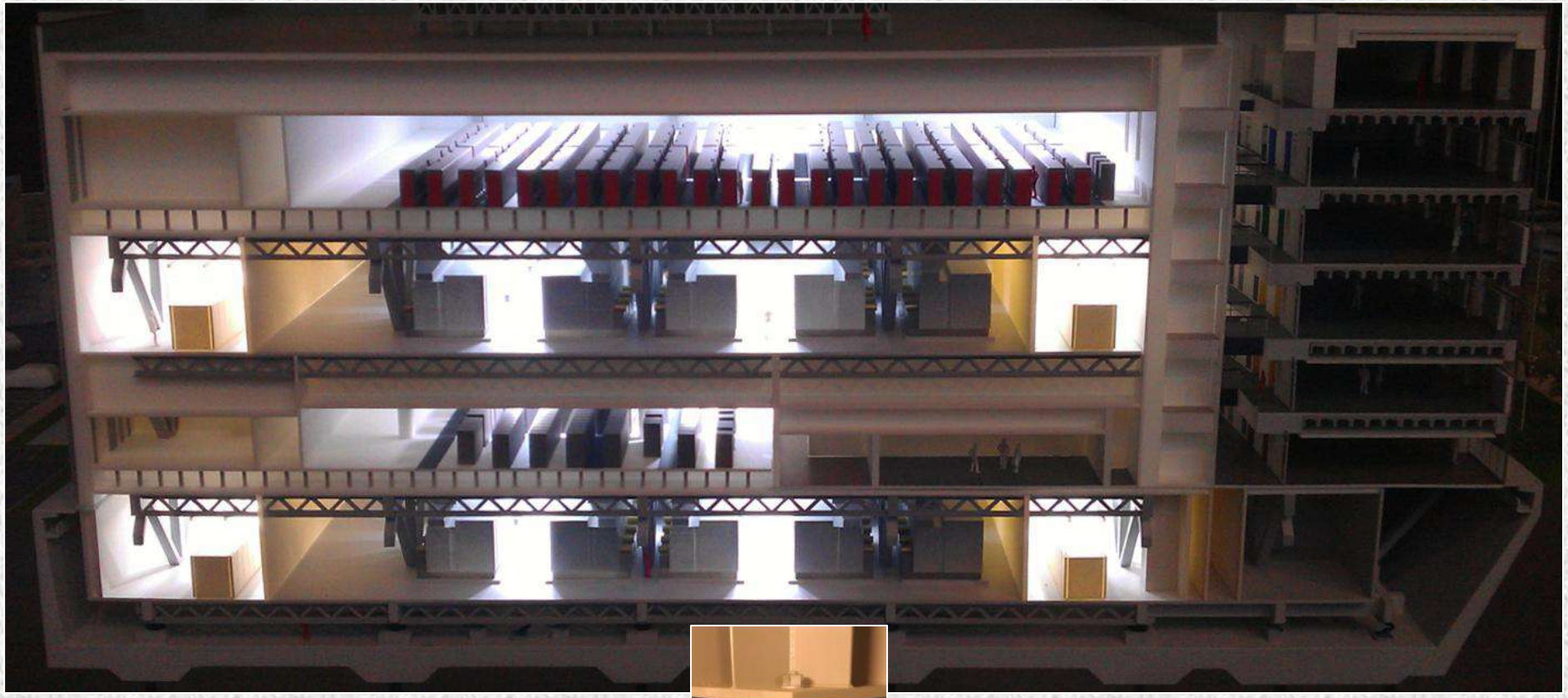
(#1 Top500 в 2011 г.)

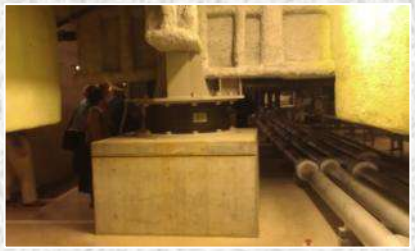
Производитель: Fujitsu, Япония
Пик (теория): 11.3 Pflop/s
Тест Linpack: 10.5 Pflop/s
Эффективность: 93%
Число стоек: 800+
Процессор: SPARC64 VIIIfx, 2.0 GHz
Число процессорных ядер: 705 024
Связь между процессорами: Tofu, 6D mesh/torus
Энергопотребление: 12.6 МВт

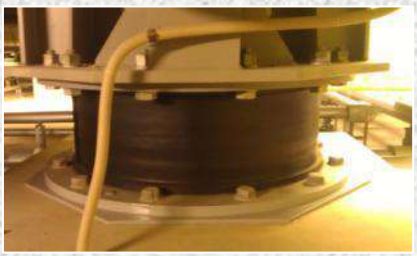


“K Computer”, Япония

(#1 Top500 в 2011 г.)







Суперкомпьютер “Sequoia”, IBM BlueGene/Q, США

(#1 Top500 в 2012 г., июнь)

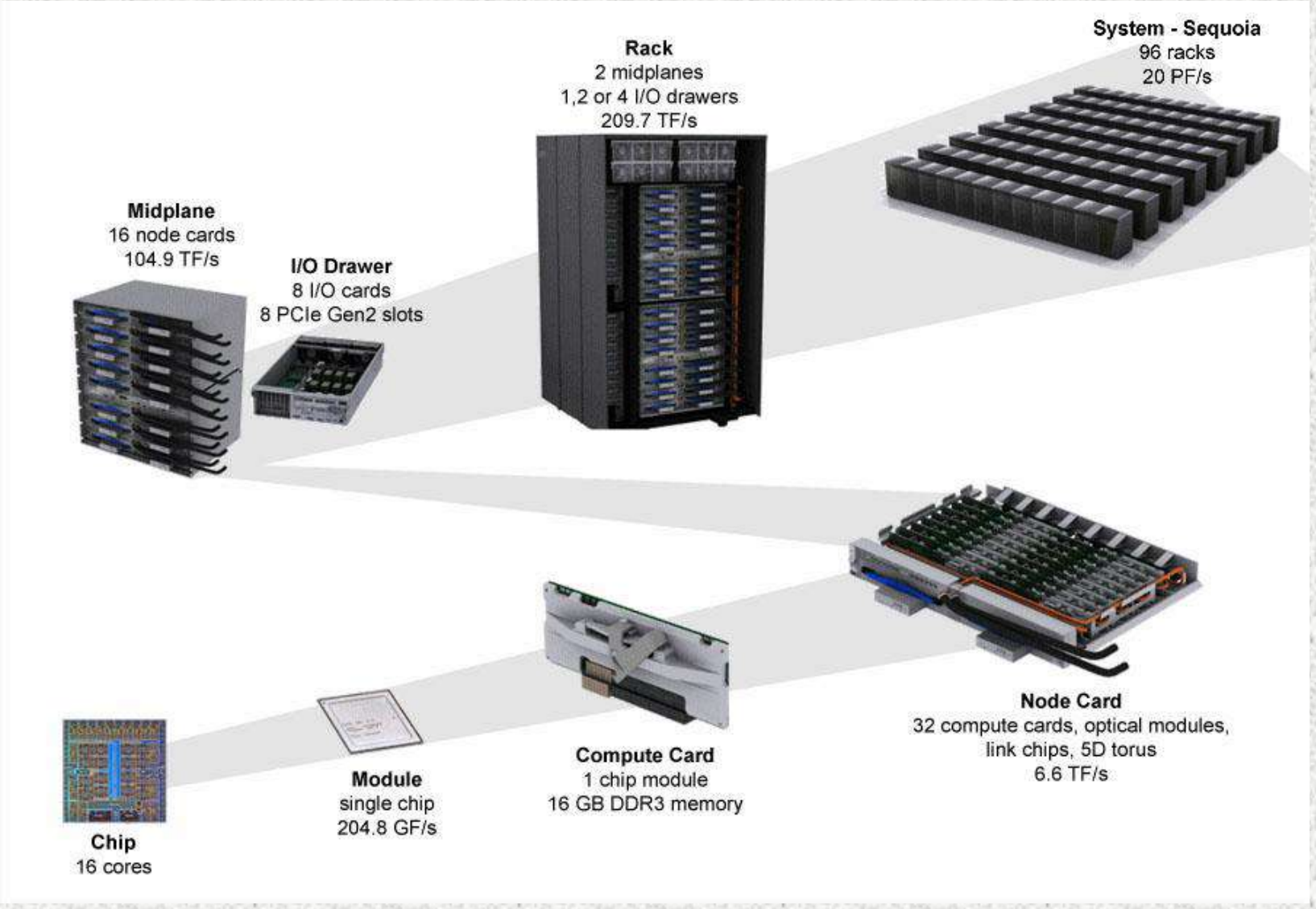
1 572 864 ядра,
IBM PowerPC A2 (64-bit),
1.6 GHz.

Связь между процессорами:
5-мерный тор

Производительность:
16.32 Pflop/s

Иерархичность архитектуры и параллелизма суперкомпьютеров

(IBM BlueGene/Q, Sequoia, 2012 г.)



Суперкомпьютер “Titan”, Cray XK7, США

(#1 Top500 в 2012 г., ноябрь)

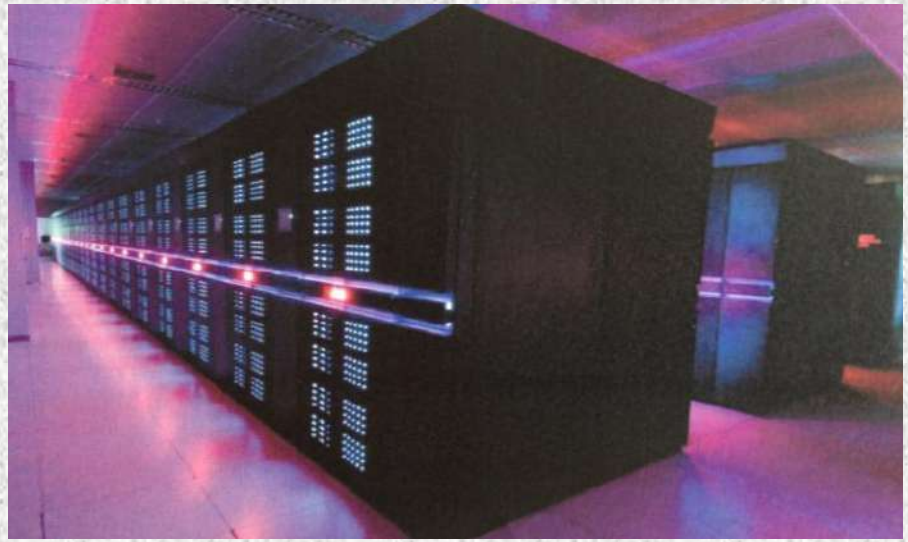
18 688 вычислительных узлов:

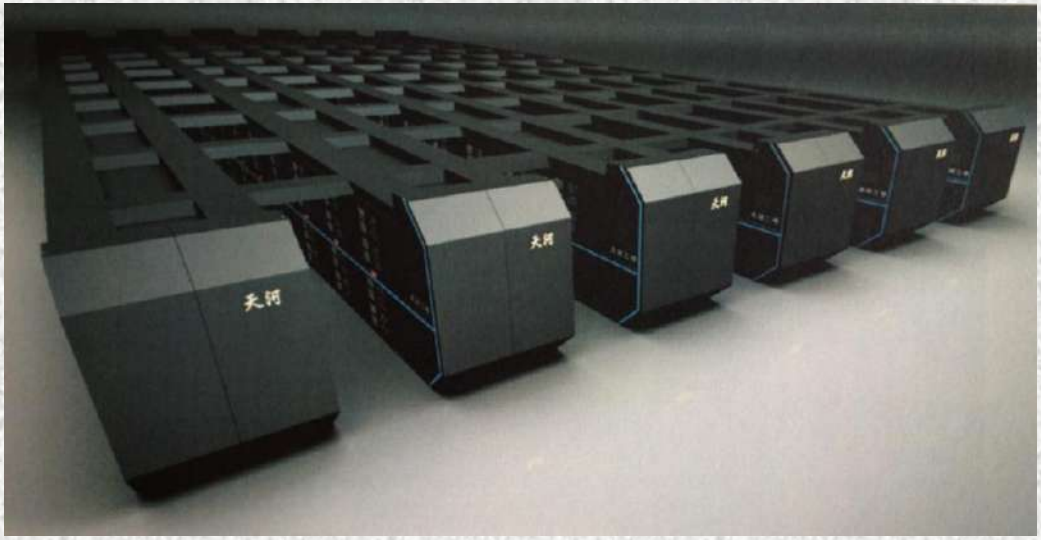
18 688 AMD Opteron, 16-core (299 008 ядер),
18 688 NVIDIA Tesla K20.

Производительность:
17.59 Pflop/s

Суперкомпьютер “Tianhe-2”, Китай

(#1 Top500 в 2013-2015 г.)





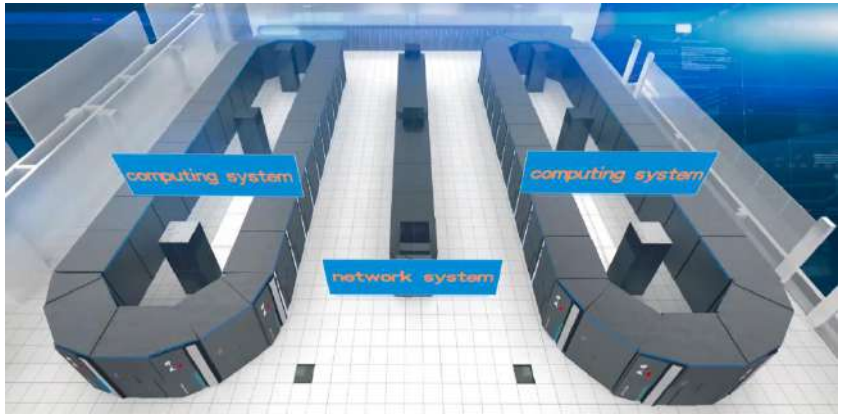
16 000 вычислительных узлов

32 000 Intel Xeon IvyBridge, 12-core
48 000 Intel Xeon Phi (Matrix-2000)

Всего: 3 120 000 ядер

Производительность:
Peak (теория): 54.9 Pflop/s
Тест Linpack: 33.86 Pflop/s
Эффективность: 62%

Суперкомпьютер Sunway TaihuLight, Китай
(#1 Top500 в 2016-2017 г.)



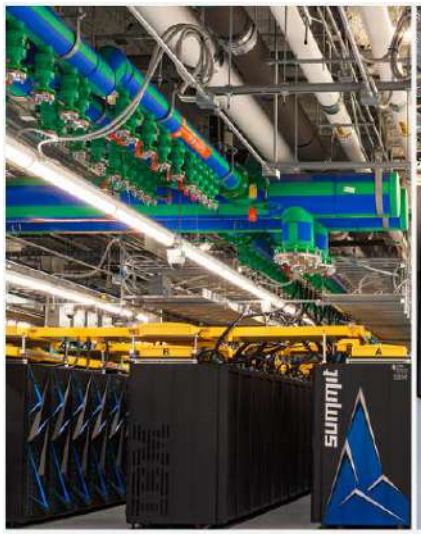
40 960 вычислительных узлов
40 960 CPUs (SW26010, 260 ядер)

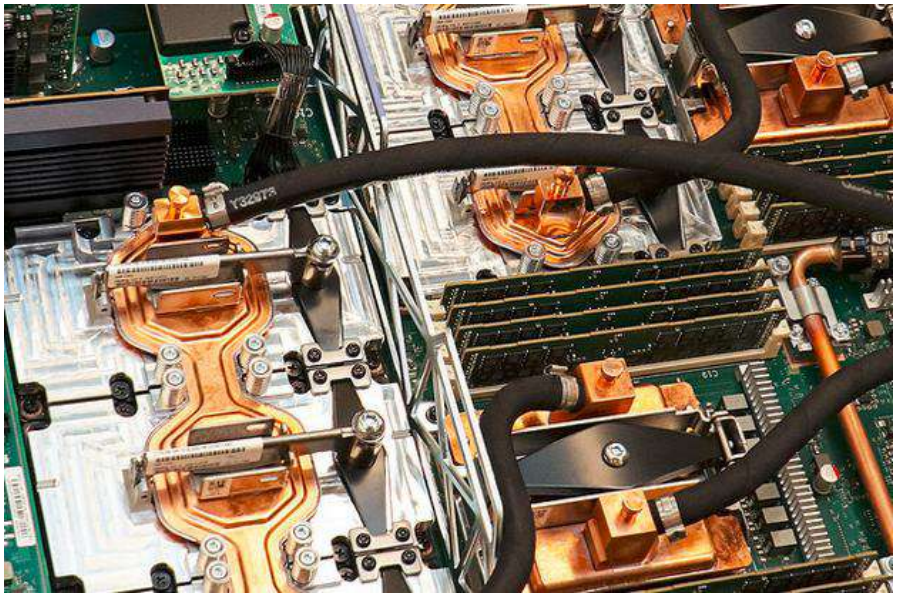
Всего: 10 649 600 процессорных ядер

Производительность:
Пик (теория): 125.4 Pflop/s
Тест Linpack: 93 Pflop/s (74%)

Оперативная память = 1.31 Пбайт
HDD = 20 ПБайт

Суперкомпьютер IBM Summit, США
(#1 Top500 в 2018-2019 г.)





4 608 вычислительных узлов,
в каждом узле:
2 x CPUs (IBM Power9, 22 ядра)
6 x GPU (NVIDIA Tesla V100)

Производительность:
Пик (теория): 200.8 Pflop/s
Тест Linpack: 148.6 Pflop/s (74%)

Оперативная память = 10 Пбайт
HDD = 250 ПБайт

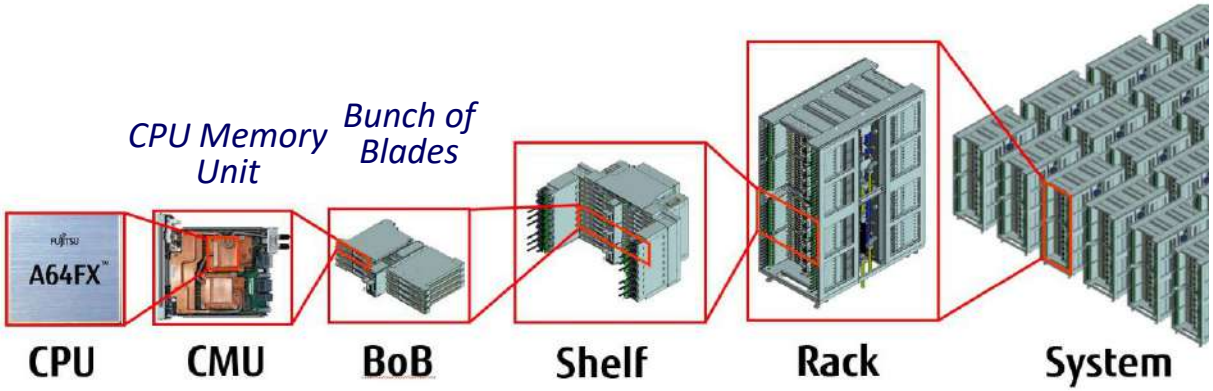
Суперкомпьютер Fujitsu Fugaku, Япония
(#1 Top500 в 2020 г.)

158 976 выч.узлов, 432 стойки

CPU: A64FX ARM v8.2-A, 48/52 cores
Векторные инструкции (SVE),
аппаратная поддержка барьеров…
Int: 1,2,4,8 байт; Float: 16,32,64 бит

Производительность:
Пик (теория): 513 Pflop/s
Тест Linpack: 415 Pflop/s (81%)
Оперативная память = 4.85 Пбайт
Энергопотребление = 28 МВт
Площадь = 1920 м^2

Суперкомпьютер Fujitsu Fugaku, Япония
(#1 Top500 в 2020 г.)



Иерархия в архитектуре суперкомпьютеров

Суперкомпьютеры и их характеристики

(производительность, память, диски, ленты)

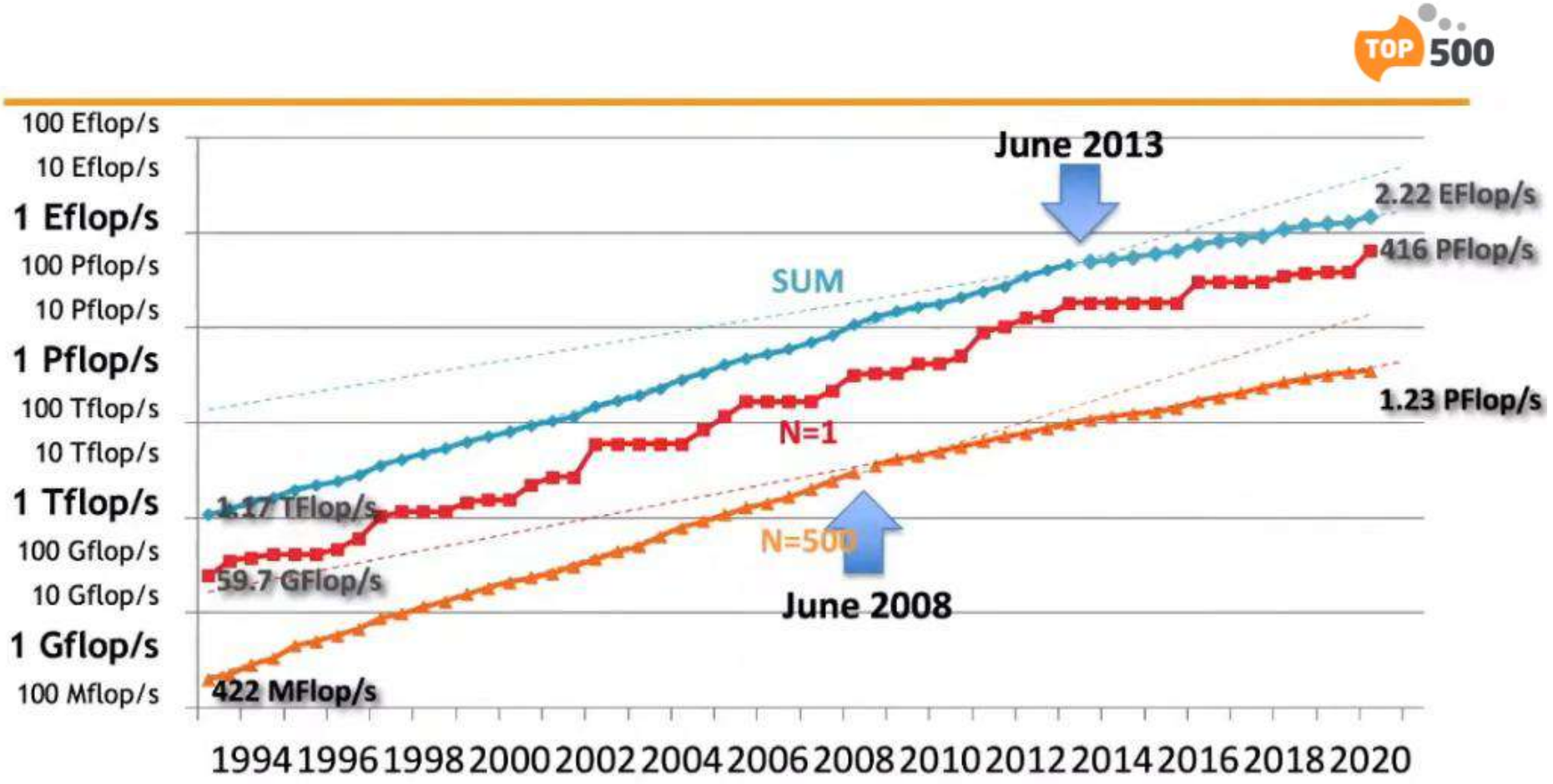
- *IBM Summit, 4608 вычислительных узлов:*
  2 × IBM Power9 (22 ядра), 4 GHz + 6 × NVIDIA Tesla V100
  148.6 Pflop/s, ОП = 10 PB, HDD = 250 PB
- *Sunway TaihuLight, 40960 вычислительных узлов:*
  SW26010 (260 cores), 1.45 GHz
  93 Pflop/s, ОП = 1.3 PB, HDD = 20 PB
- *Tianhe-2, 16 000 вычислительных узлов:*
  2 × Intel XeonE5-2692 (12cores), 2.93GHz + 3 × Matrix-2000,
  61.4 Pflop/s, ОП = 2.3 PB, HDD = 12 PB
- *Cray XK7, Titan, 18 688 вычислительных узлов:*
  AMD Opteron 16-core + NVIDIA Tesla K20
  17.59 Pflop/s, ОП = 710 TB, HDD = 10 PB
- *IBM BlueGene/Q, Sequoia, 1 572 864 ядра, IBM PowerPC A2, 1.6 GHz*
  16.32 Pflop/s, ОП = 1.57 PB, HDD = 55 PB, Tape = “virtually unlimited”

Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира
(http://top500.org, июнь, 2020 г.)

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	**Supercomputer Fugaku** - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,299,072	415,530.0	513,854.7	28,335
2	**Summit** - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	**Sierra** - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
4	**Sunway TaihuLight** - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
5	**Tianhe-2A** - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
6	**HPC5** - PowerEdge C4140, Xeon Gold 6252 24C 2.1GHz, NVIDIA Tesla V100, Mellanox HDR Infiniband, Dell EMC Eni S.p.A.	669,760	35,450.0	51,720.8	2,252

Рост производительности суперкомпьютеров

(закономерности отрасли)

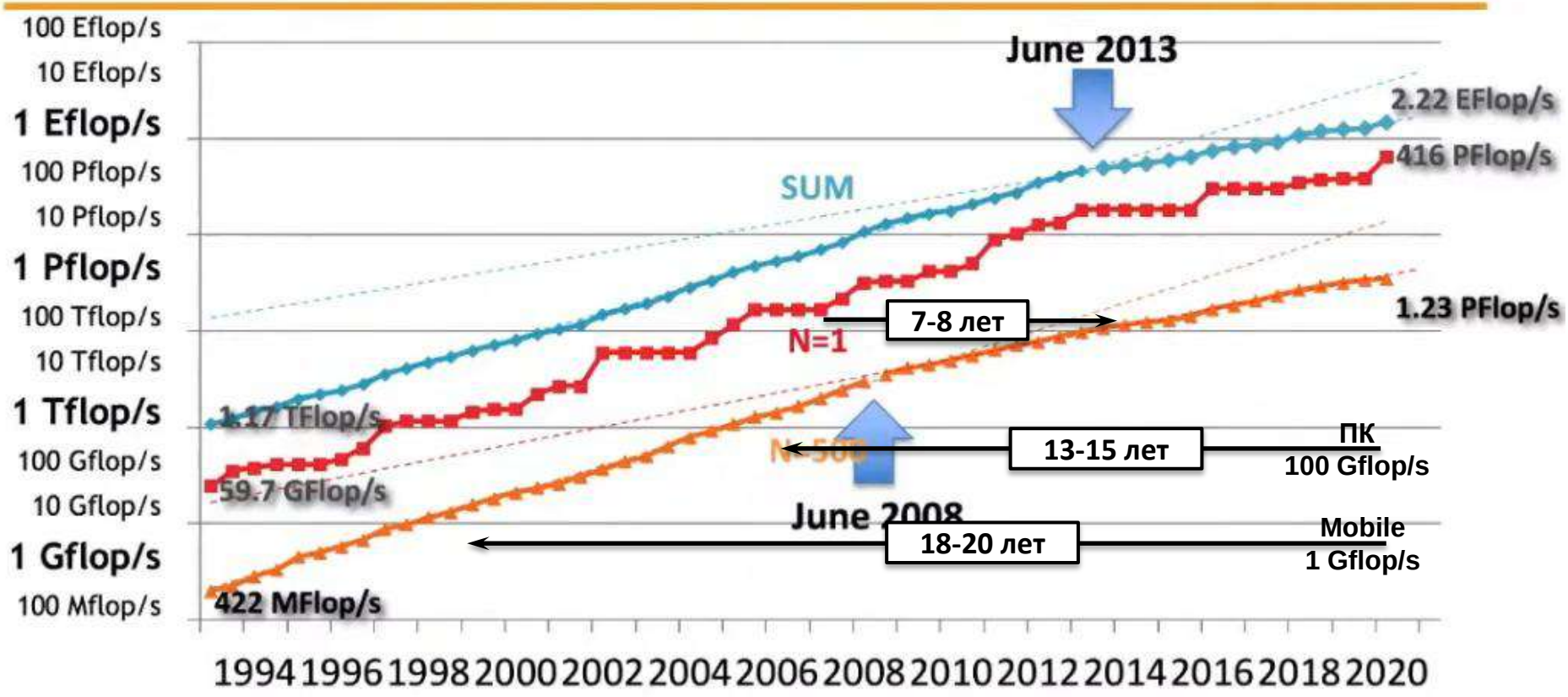


TOP500 SUPERCOMPUTER SITES

Courtesy of E.Strohmaier, LBNL, USA

Рост производительности суперкомпьютеров

(закономерности отрасли)



Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира
(http://top500.org, июнь, 2020 г.)

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	**Supercomputer Fugaku** - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,299,072	415,530.0	513,854.7	28,335
2	**Summit** - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	**Sierra** - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
4	**Sunway TaihuLight** - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
5	**Tianhe-2A** - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
6	**HPC5** - PowerEdge C4140, Xeon Gold 6252 24C 2.1GHz, NVIDIA Tesla V100, Mellanox HDR Infiniband, Dell EMC Eni S.p.A.	669,760	35,450.0	51,720.8	2,252

Gflops/Watt

Лидеры по энергоэффективности

(http://top500.org, Green500 list, июнь 2020)

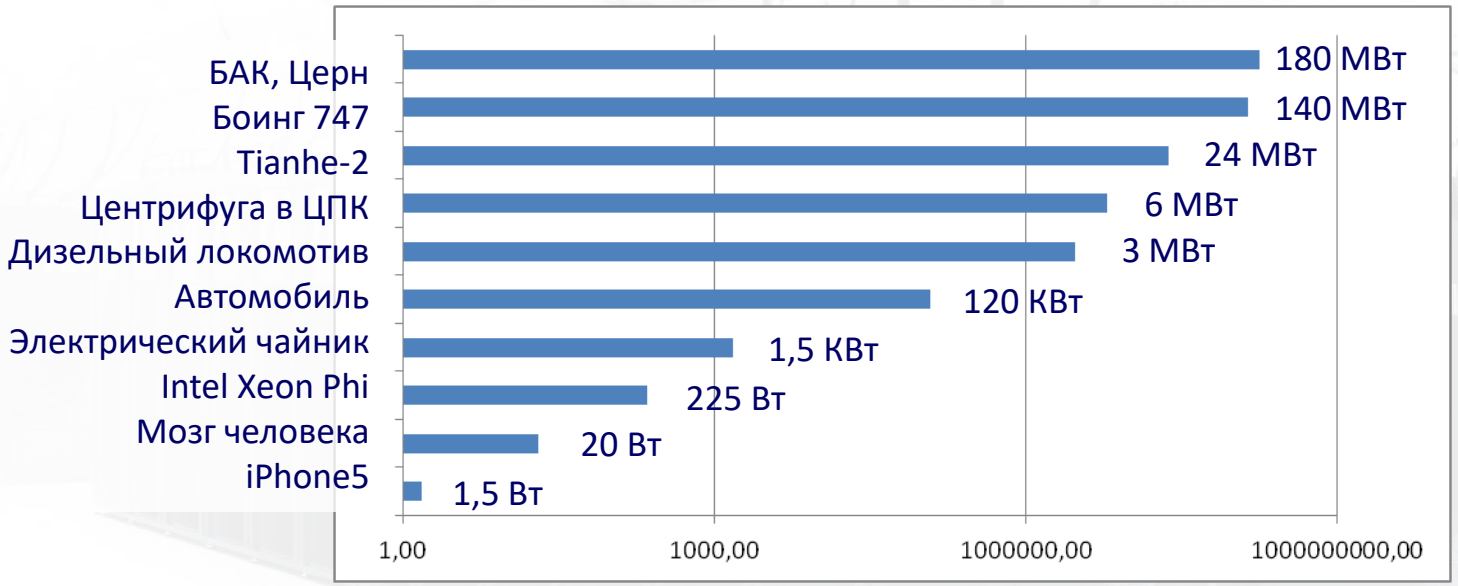
The GREEN 500

Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	393	**MN-3** - MN-Core Server, Xeon 8260M 24C 2.4GHz, MN-Core, RoCEv2/MN-Core DirectConnect, Preferred Networks Preferred Networks Japan	2,080	1,621.1	77	21.108
2	7	**Selene** - DGX A100 SuperPOD, AMD EPYC 7742 64C 2.25GHz, NVIDIA A100, Mellanox HDR Infiniband, Nvidia NVIDIA Corporation United States	272,800	27,580.0	1,344	20.518
3	468	**NA-1** - ZettaScaler-2.2, Xeon D-1571 16C 1.3GHz, Infiniband EDR, PEZY-SC2 700Mhz, PEZY Computing / Exascaler Inc. PEZY Computing K.K. Japan	1,271,040	1,303.2	80	18.433
4	204	**A64FX prototype** - Fujitsu A64FX, Fujitsu A64FX 48C 2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu Fujitsu Numazu Plant Japan	36,864	1,999.5	118	16.876
5	26	**AiMOS** - IBM Power System AC922, IBM POWER9 20C 3.45GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM	130,000	8,339.0	512	16.285

TOP500 SUPERCOMPUTER SITES

[Gflops/Watt]

Энергопотребление вокруг нас…



Автомобиль - БАК (Большой Адронный Коллайдер) - Боинг 747 - Дизельный локомотив
Мозг человека - Центрифуга в ЦПК - Электрический чайник
Intel Xeon Phi - iPhone5 - Tianhe-2

Top50 самых мощных компьютеров СНГ

(top50.supercomputers.org)

Top50 – это совместный проект НИВЦ МГУ и МСЦ РАН

Top50 самых мощных суперкомпьютеров СНГ

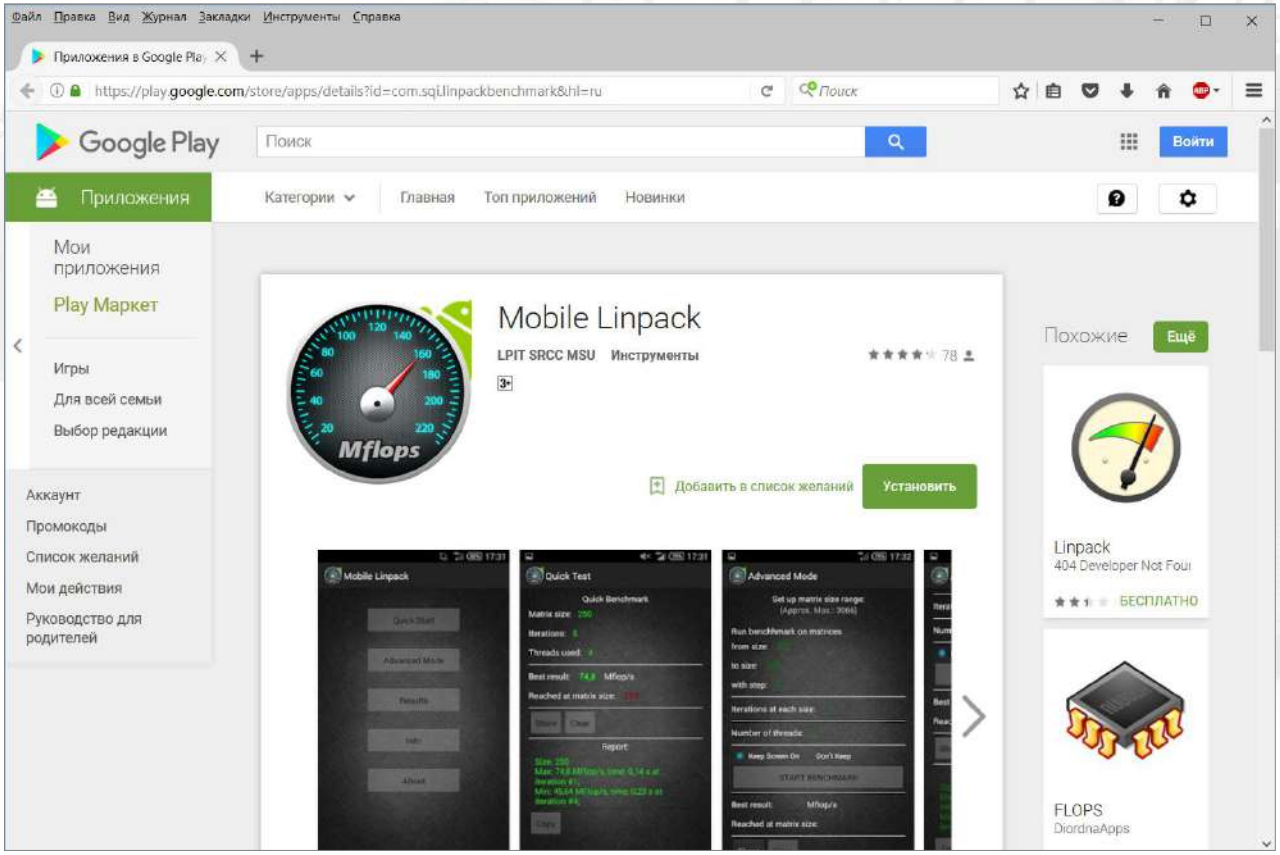
(top50.supercomputers.ru)

№	Название Место установки	Узлов Проц. Ускор.	Архитектура: кол-во узлов: конфигурация узла сеть: вычислительная / сервисная / транспортная	Rmax Rpeak (Тфлоп/с)	Разработчик *Область применения*
1 new	«Кристофари» SberCloud (ООО «Облачные технологии») , СберБанк, Москва	75 150 1200	75: NVIDIA DGX-2 CPU: 2x Intel Xeon Platinum 8168 24C 2.7GHz, 1536 GB RAM Acc: 16x NVIDIA Tesla V100 EDR Infiniband / 100 Gigabit Ethernet / 10 Gigabit Ethernet	6669.0 8789.76	**SberCloud (ООО «Облачные технологии») NVIDIA** *Облачный провайдер*
2 ▽	«Ломоносов-2» Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва	1696 1696 1856	1536: CPU: 1x Intel Xeon E5-2697v3, 64 GB RAM Acc: 1x NVIDIA Tesla K40M 160: CPU: 1x Intel Xeon Gold 6126, 96 GB RAM Acc: 2x NVIDIA Tesla P100 FDR Infiniband / Gigabit Ethernet / FDR Infiniband	2478.0 4946.79	**Т-Платформы** *Наука и образование*
3 ▽	ФГБУ 'ГВЦ Росгидромета', Москва	976 1952 н/д	976: CPU: 2x Intel Xeon E5-2697v4, 128 GB RAM Aries / Aries + Gigabit Ethernet / Aries + Infiniband	1200.35 1293.0	**Т-Платформы** **Cray** *Исследования*
4 ▽	«Ломоносов» Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва	6199 12406 2130	4160: CPU: 2x Intel Xeon X5570, 12 GB RAM 260: CPU: 2x Intel Xeon X5570, 24 GB RAM 640: CPU: 2x Intel Xeon X5670, 24 GB RAM 40: CPU: 2x Intel Xeon X5670, 48 GB RAM 30: CPU: 2x IBM PowerXCell 8i, 16 GB RAM 777: CPU: 2x Intel Xeon E5630, 12 GB RAM Acc: 2x NVIDIA Tesla X2070	901.9 1700.21	**Т-Платформы** *Исследования*

Сравните скорость своего мобильного устройства с суперкомпьютерами прошлого и настоящего

(http://linpack.hpc.msu.ru/)

Тест Linpack для мобильных устройств: Android 1.6 и выше, iOS 6.0 и выше.



Адрес для отзывов: ml@parallel.ru

Первый вычислительный кластер МГУ, 1999 г.

(12 узлов, 24 CPUs, Intel P-III/500MHz, сеть SCI)

Производительность:

12 Гфлоп/с

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Всего в системе 10 т гликоля и 40 т воды

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

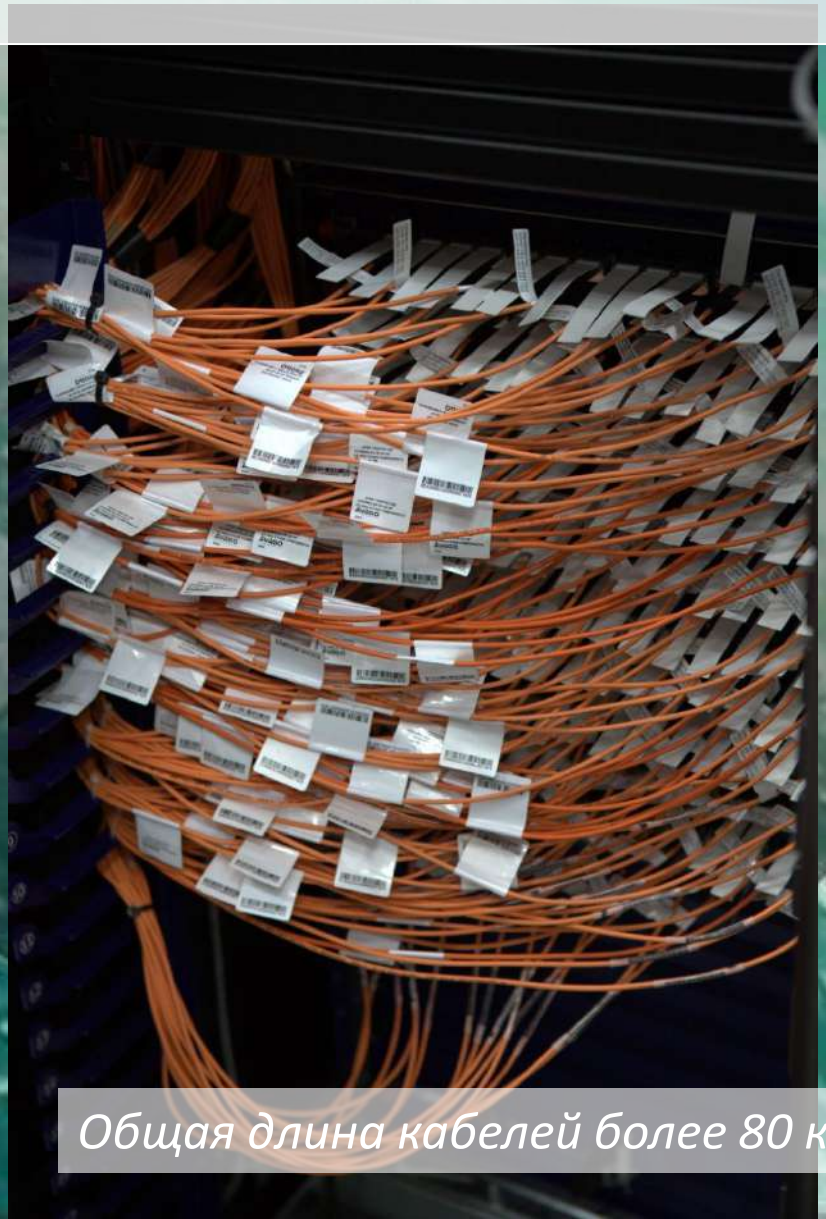
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

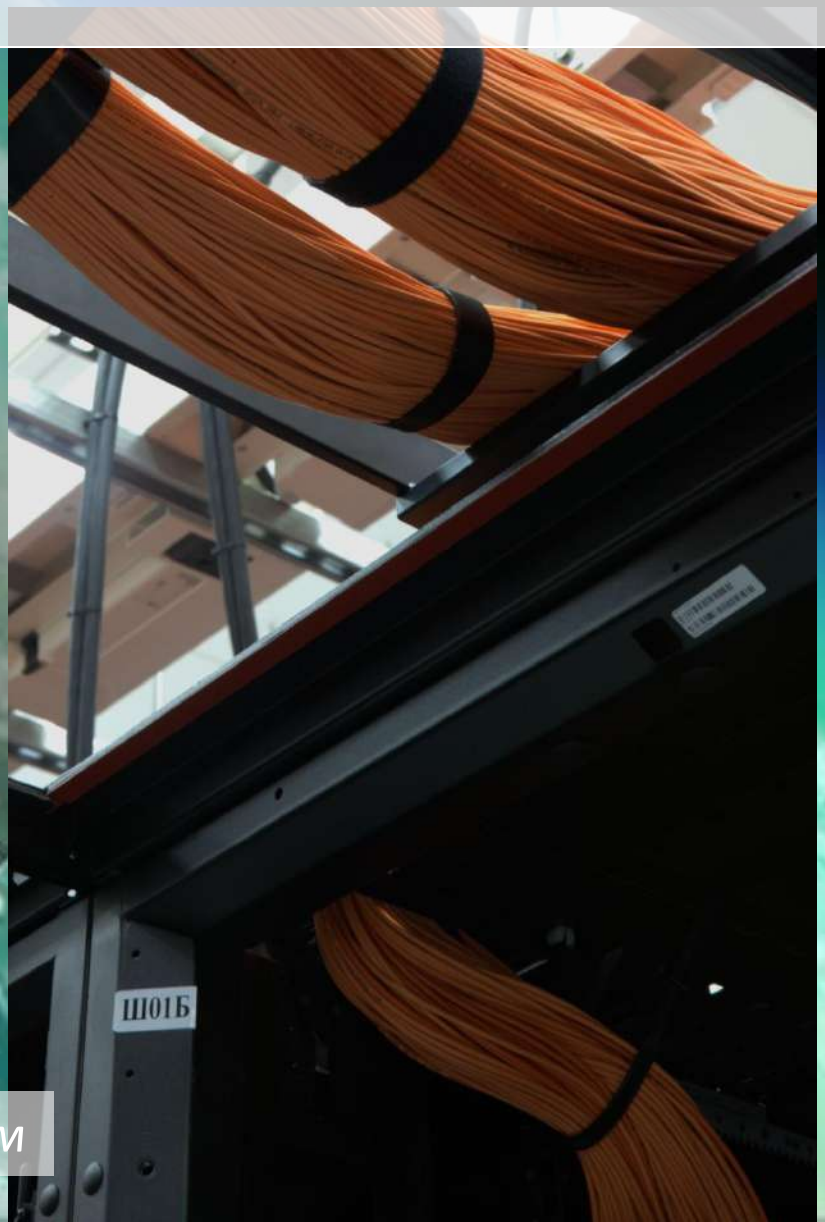
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Вес оборудования в маш.зале – 57 т, СБЭ – 92т

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”





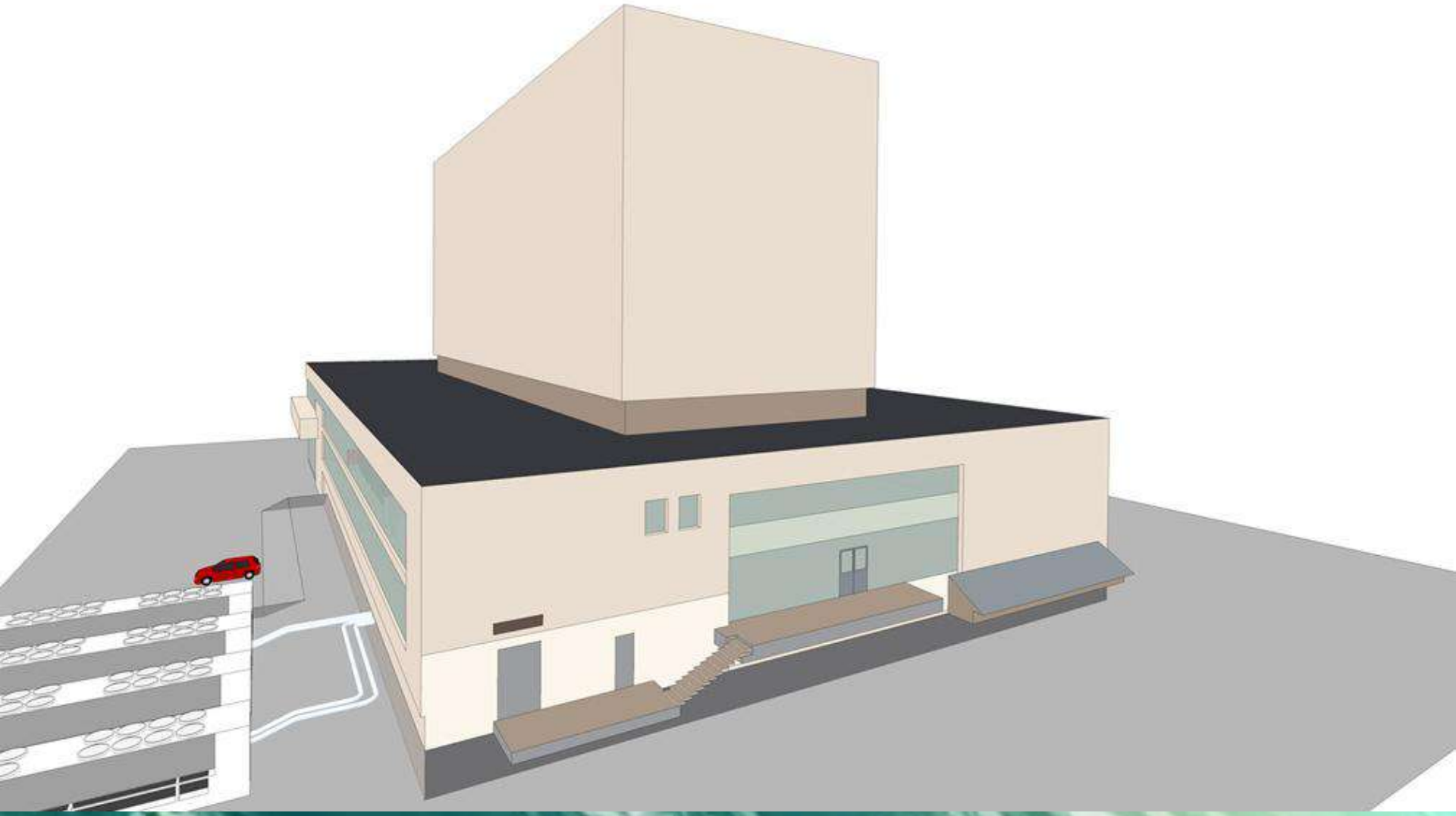
Общая длина кабелей более 80 км

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

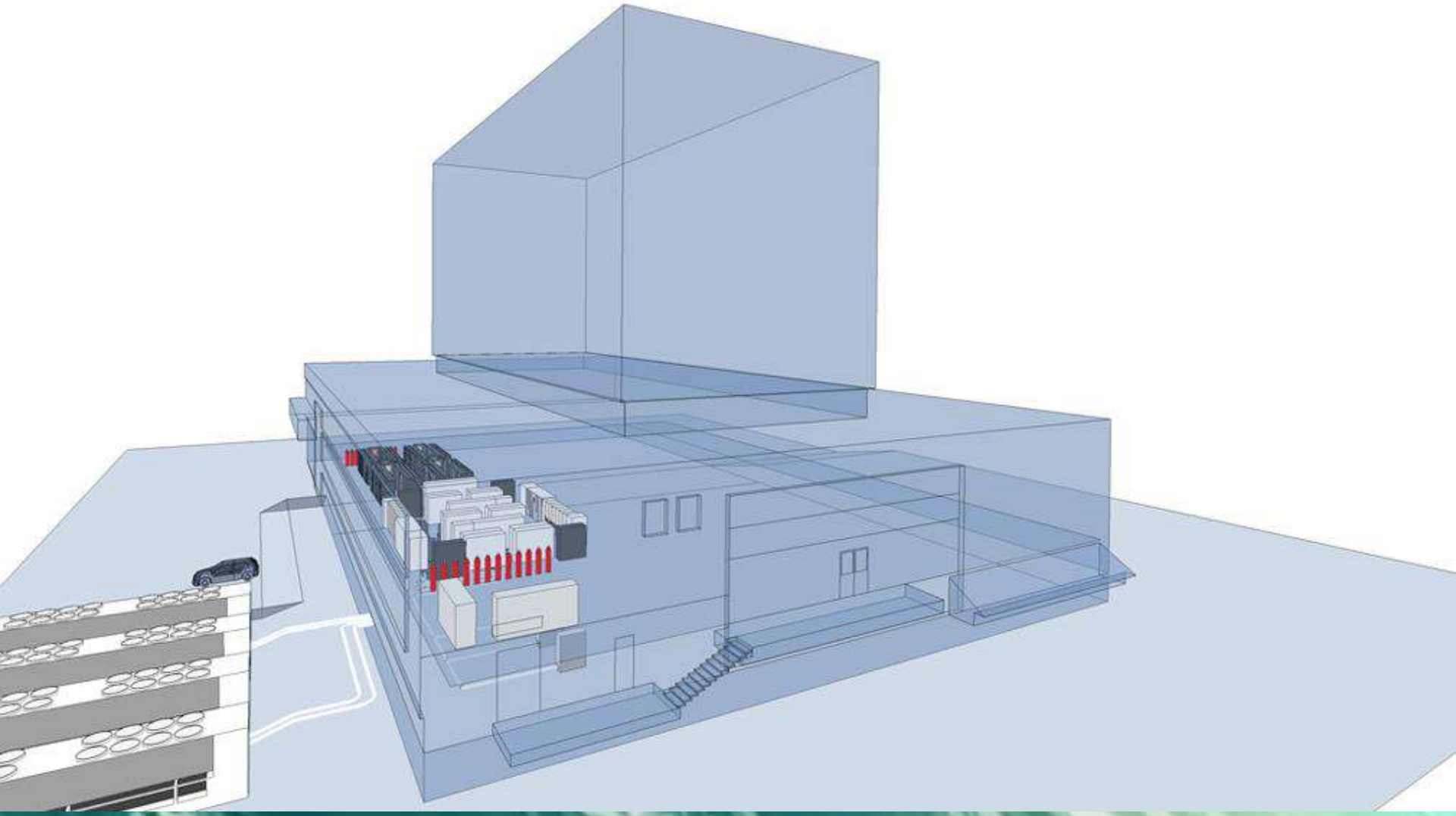
TOP500
This Site is ranked
NO. 12 in the TOP500 List
published 11/2009

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

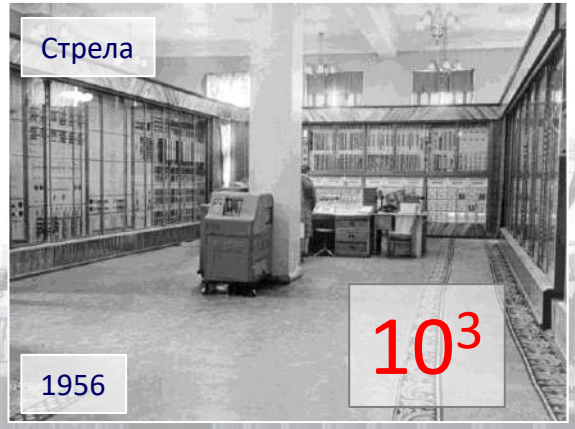


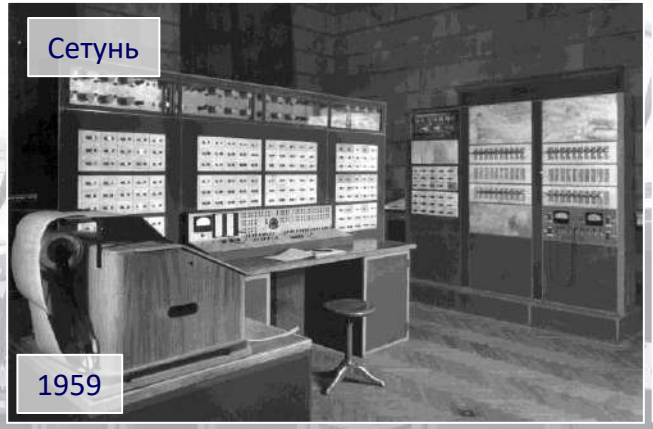
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

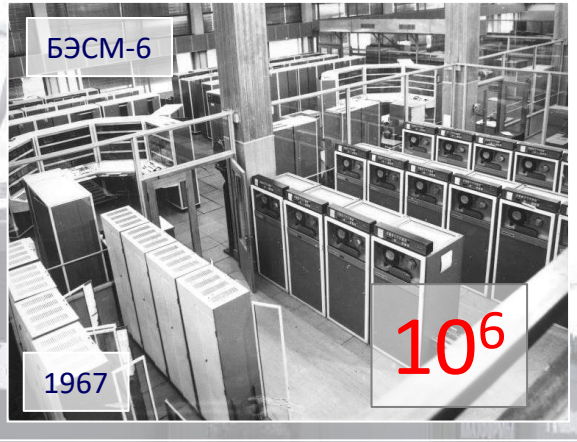
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”

Компьютерный путь Московского университета

(с 1956 г. до наших дней)

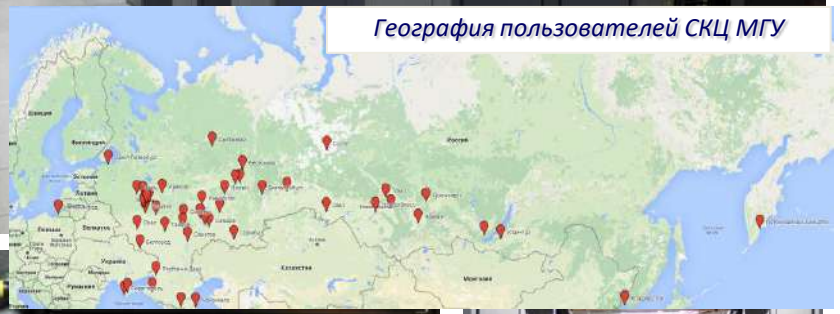






Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов-2”

Суперкомпьютерный центр МГУ сегодня:
Пользователи: 2955
Проекты: 880



Факультеты / Институты МГУ: 21
Институты РАН: 95
Университеты России: 102

Города России: 50

1 стойка = 256 узлов: Intel Xeon (14c) + NVIDIA K40/P100= 515 Tflop/s
Суперкомпьютер “Ломоносов-2” = 4.9 Pflop/s

Компьютерный мир в сравнении

Производительность	Вес	Энергопотребление	Цена	
10^6	100 т	3 МВт	$30М	Суперкомпьютеры
10	10 кг	1 КВт	$10К	Серверы…
1	1.5 кг	90 Вт	$1К	ПК, ноутбуки…
0.05	0.1 кг	2 вт	$300	Планшеты, смартфоны…

Суперкомпьютеры... Зачем?

Неужели есть настолько сложные задачи, что для их решения хорошего сервера не хватает ?

Неужели есть настолько важные задачи, которые оправдывают крайне высокую стоимость суперкомпьютеров ?

А далеко ли вычислительно сложные задачи?

Задача о числе счастливых билетиков :

```
count = 0;
for ( I1 = 0; I
  for ( I2 = 0;
    for ( I3 = 0
      for ( I4 =
        for ( I5 =
          for ( I6
            if(
              (
          }
```

Intel Core Duo 2.6 ГГц:

8 цифр – 0.1 с

10 цифр – 10 с

12 цифр – 1780 с

А далеко ли вычислительно сложные задачи?

Задача о числе счастливых билетиков :

- *Поможет ли оптимизация программы?*
- *Поможет ли использование суперкомпьютера?*

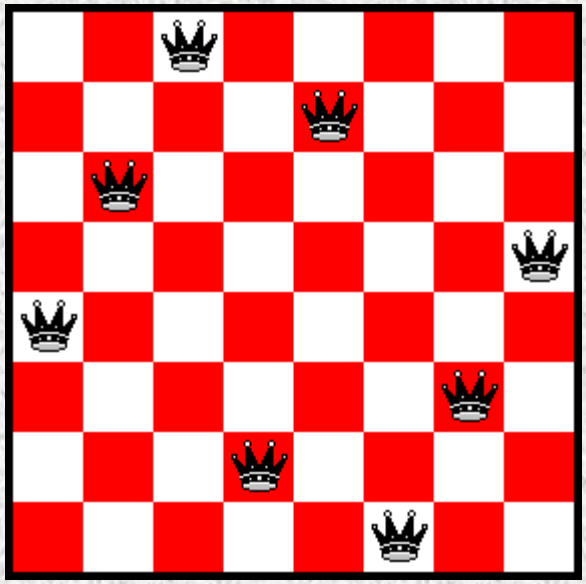
```
count = 0;
for ( I1 = 0; I1 < 10; ++i1)
  for ( I2 = 0; I2 < 10; ++i2)
    for ( I3 = 0; I3 < 10; ++i3)
      for ( I4 = 0; I4 < 10; ++i4)
        for ( I5 = 0; I5 < 10; ++i5)
          for ( I6 = 0; I6 < 10; ++i6) {
              if( i1+i2+i3 == i4+i5+i6 )
                  count = count+1;
}
```

Intel Core Duo 2.6 ГГц:
8 цифр – 0.1 с
10 цифр – 10 с
12 цифр – 1780 с

Вычислительная сложность – ~~10^n~~ операций !

А далеко ли вычислительно сложные задачи?

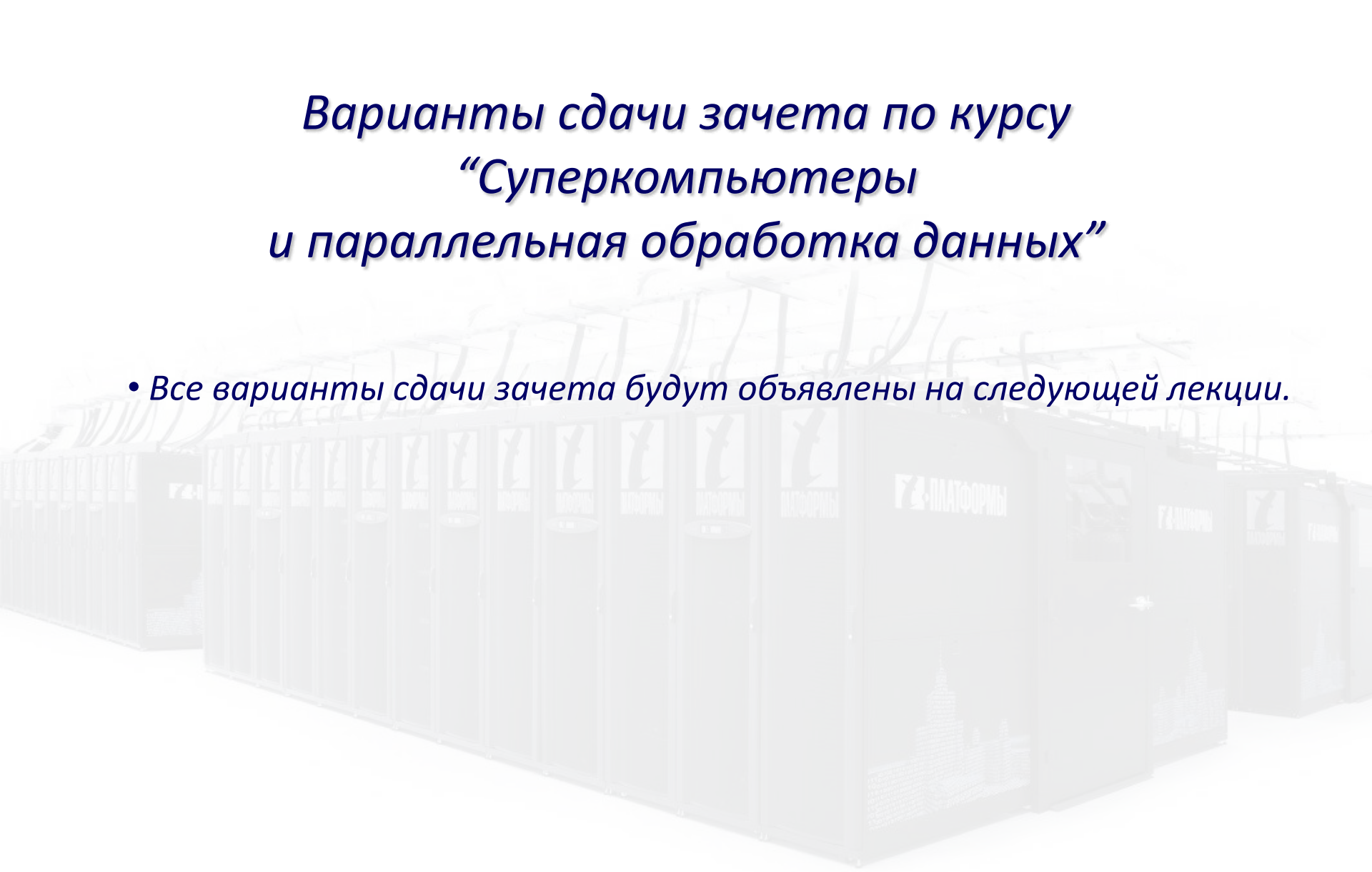
Как разместить 8 ферзей
*на шахматной доске размером 8*8 ?*



Как разместить N ферзей
*на шахматной доске размером K*K ?*

Варианты сдачи зачета по курсу “Суперкомпьютеры и параллельная обработка данных”

- *Все варианты сдачи зачета будут объявлены на следующей лекции.*



Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Факультет Вычислительной математики и кибернетики

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

(часть 1)

Вл.В.Воеводин

Зав.кафедрой Суперкомпьютеров и квантовой информатики ВМК МГУ,
Директор НИВЦ МГУ,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

voevodin@parallel.ru

ВМК МГУ, 2020