

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

*Межфакультетский курс
“Сложные процессы с точки зрения квантовой физики”*

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

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 – ноябрь, 2019

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 – 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 2018 году:

Позиция в рейтинге	Название компании	Страна	Отрасль
1	Walmart	США	Торговля
2	State Grid	Китай	Энергетика
3	Sinopec Group	Китай	Нефтегазовая отрасль
4	China National Petroleum	Китай	Нефтегазовая отрасль
5	Royal Dutch Shell	Нидерланды	Нефтегазовая отрасль
6	Toyota Motor	Япония	Автомобилестроение
7	Volkswagen	Германия	Автомобилестроение
8	BP	Великобритания	Нефтегазовая отрасль
9	Exxon Mobil	Великобритания	Нефтегазовая отрасль
10	Berkshire Hathaway	США	Страхование

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



Суперкомпьютеры

Серверы...

ПК, ноутбуки...

Планшеты, смартфоны...

Персональный компьютер, 2019 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* – *F*loating point *o*perations
per *s*econd

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 Tfloп/s = 15 * 10¹² **арифметических** операций
в секунду над **вещественными** числами,
представленными в форме **с плавающей точкой**.

Персональный компьютер, 2019 г. – какой он?



Производительность:
около **100 Гфлоп/с.**

Память – 8-64 Гбайт

Диски – 500 Гбайт

Важные сокращения

(взгляд в недалекое будущее)

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

1 000 000 000 000 000 000 000 — 'Экза'

*Большие машины и
суперкомпьютеры: какие они?*

Вычислительный центр МГУ, 1956 г.



ЭВМ "Стрела"

Производительность: 2000 инстр./с

Площадь: 300 м²

Энергопотребление: 150 кВт

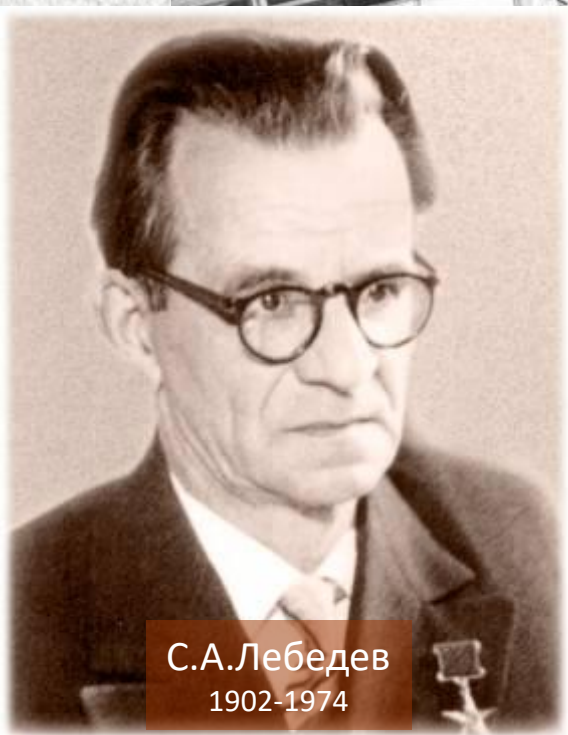
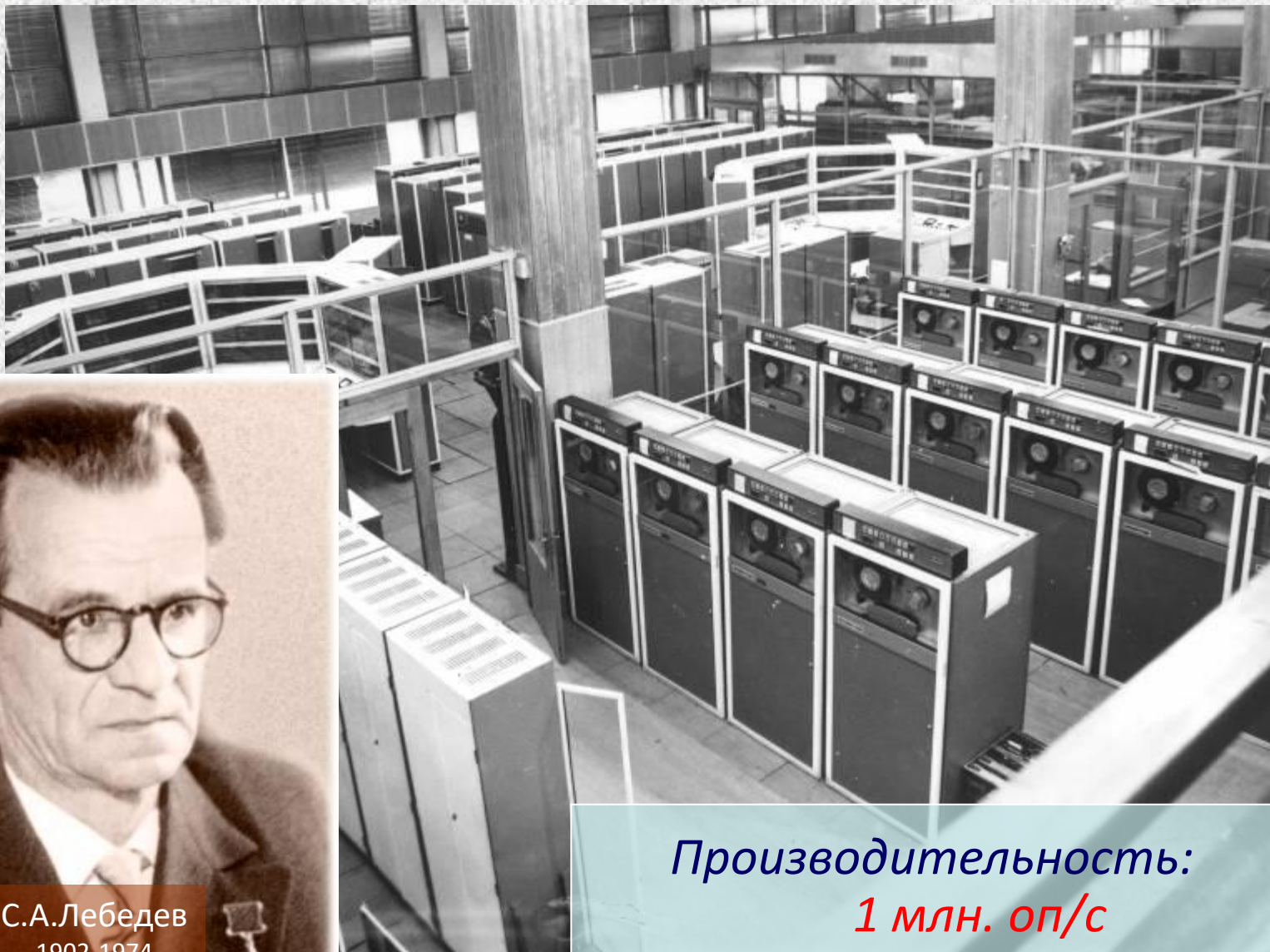
Вычислительный центр МГУ, 1959 г.

ЭВМ "Сетунь"



"Сетунь" – это первый компьютер, построенный не на двоичной, а на троичной системе счисления.

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%

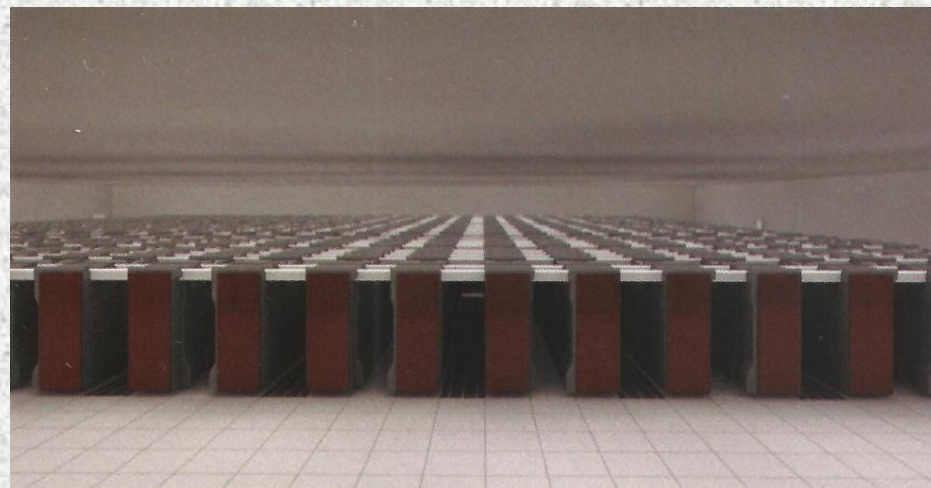
Число стоек: 800+

Процессор: SPARC64 VIIIfx, 2.0 GHz

Число процессорных ядер: 705 024

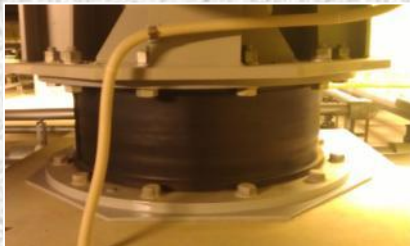
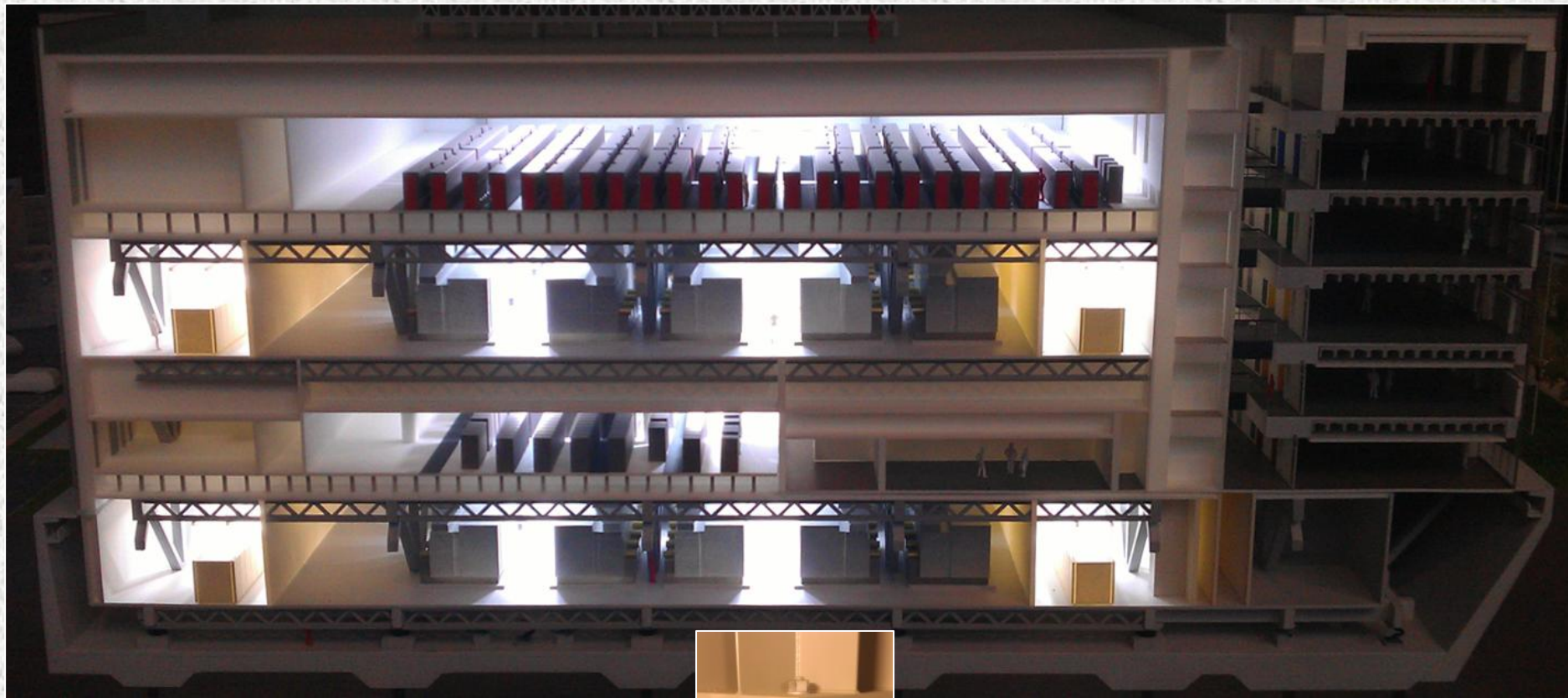
Связь между процессорами: Tofu, 6D mesh/torus

Энергопотребление: 12.6 MW



“K Computer”, Япония

(#1 Top500 в 2011 г.)



Суперкомпьютер "Sequoia", IBM BlueGene/Q, США (#1 Top500 в 2012 г., июнь)

Lawrence Livermore
National Laboratory



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

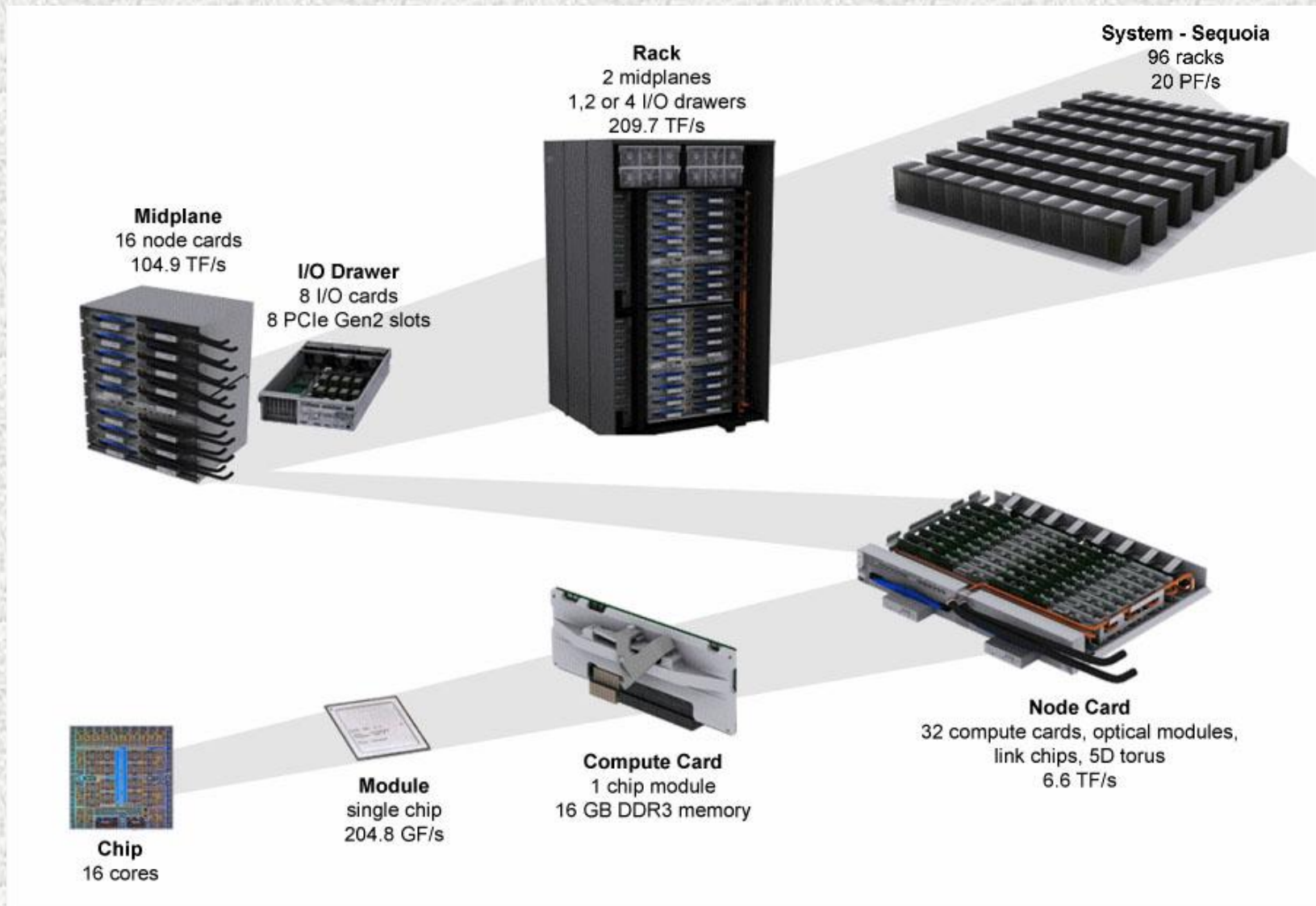


1 572 864 ядра,
IBM PowerPC A2 (64-bit),
1.6 GHz.

Связь между процессорами:
5-мерный тор

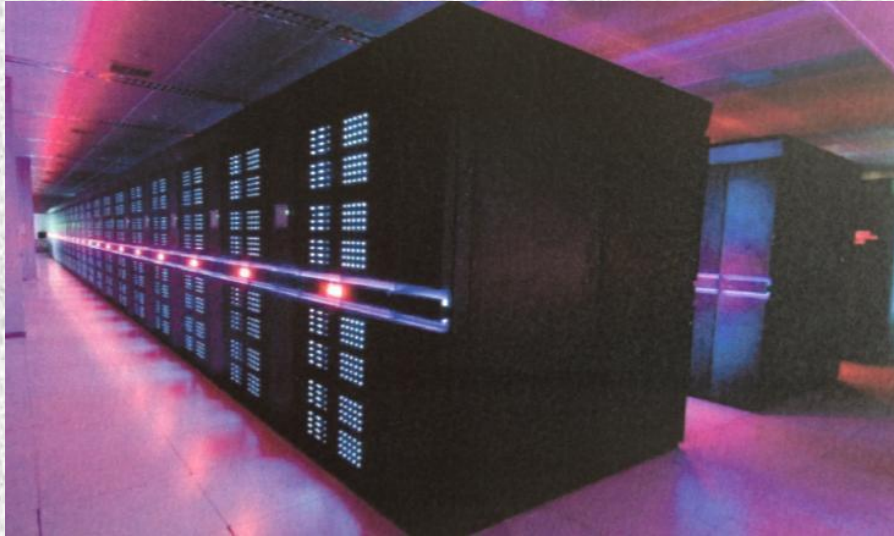
Производительность:
16.32 Pflor/s

Иерархичность архитектуры и параллелизма суперкомпьютеров (IBM BlueGene/Q, Sequoia, 2012 г.)



Суперкомпьютер “Tianhe-2”, Китай

(#1 Top500 в 2013-2015 г.)



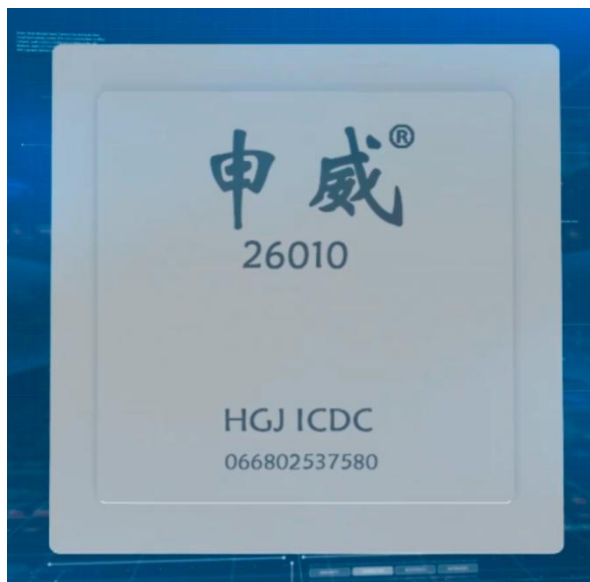
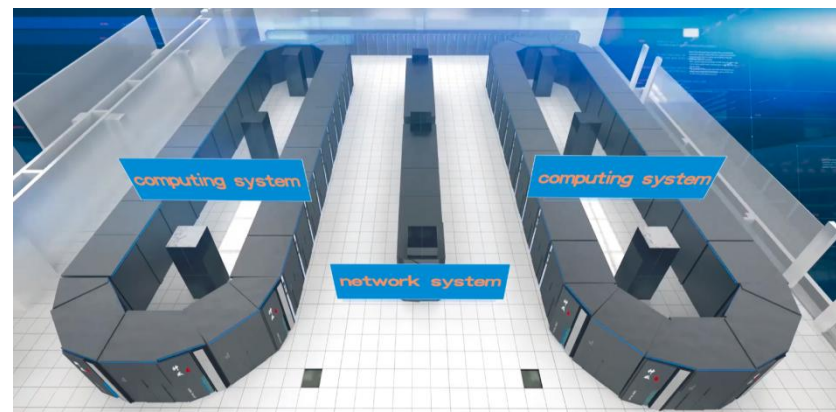
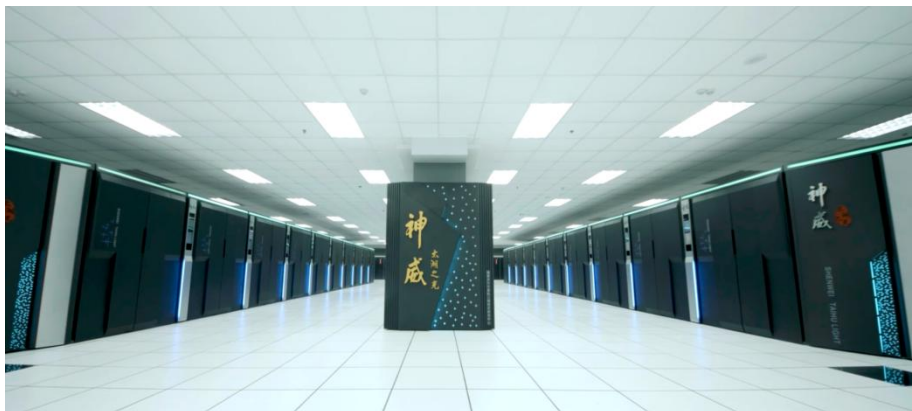
16 000 вычислительных узлов

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)

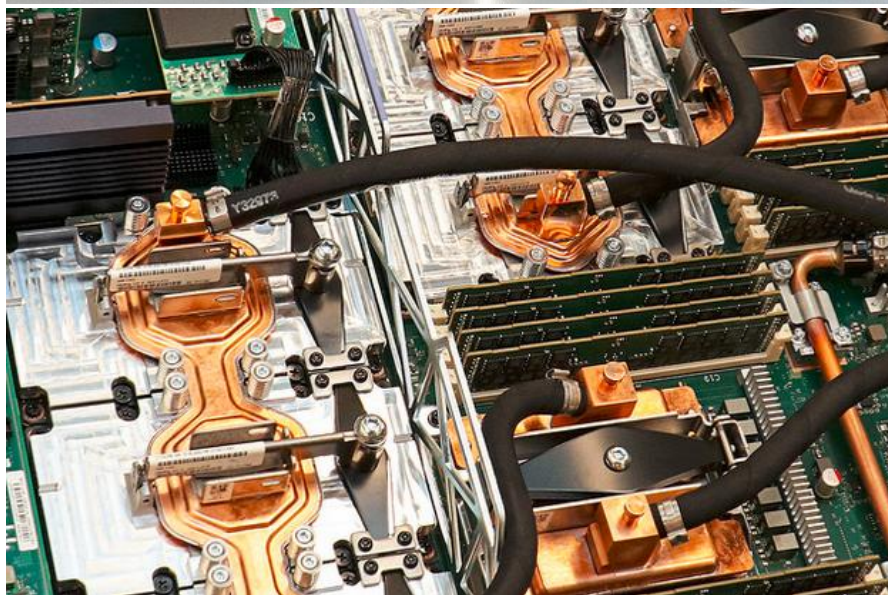
Всего: **10 649 600** процессорных ядер

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

Суперкомпьютеры и их характеристики

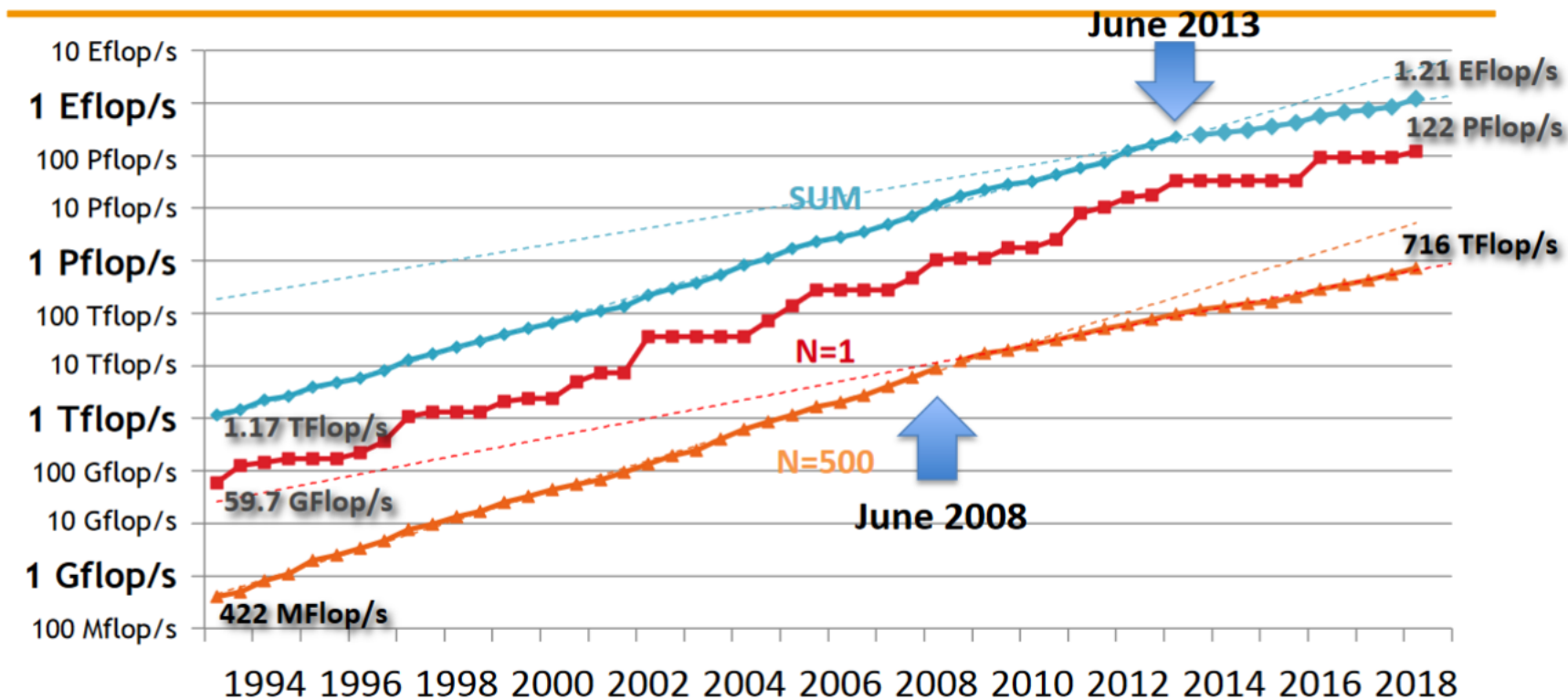
(производительность, память, диски, ленты)

- *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”

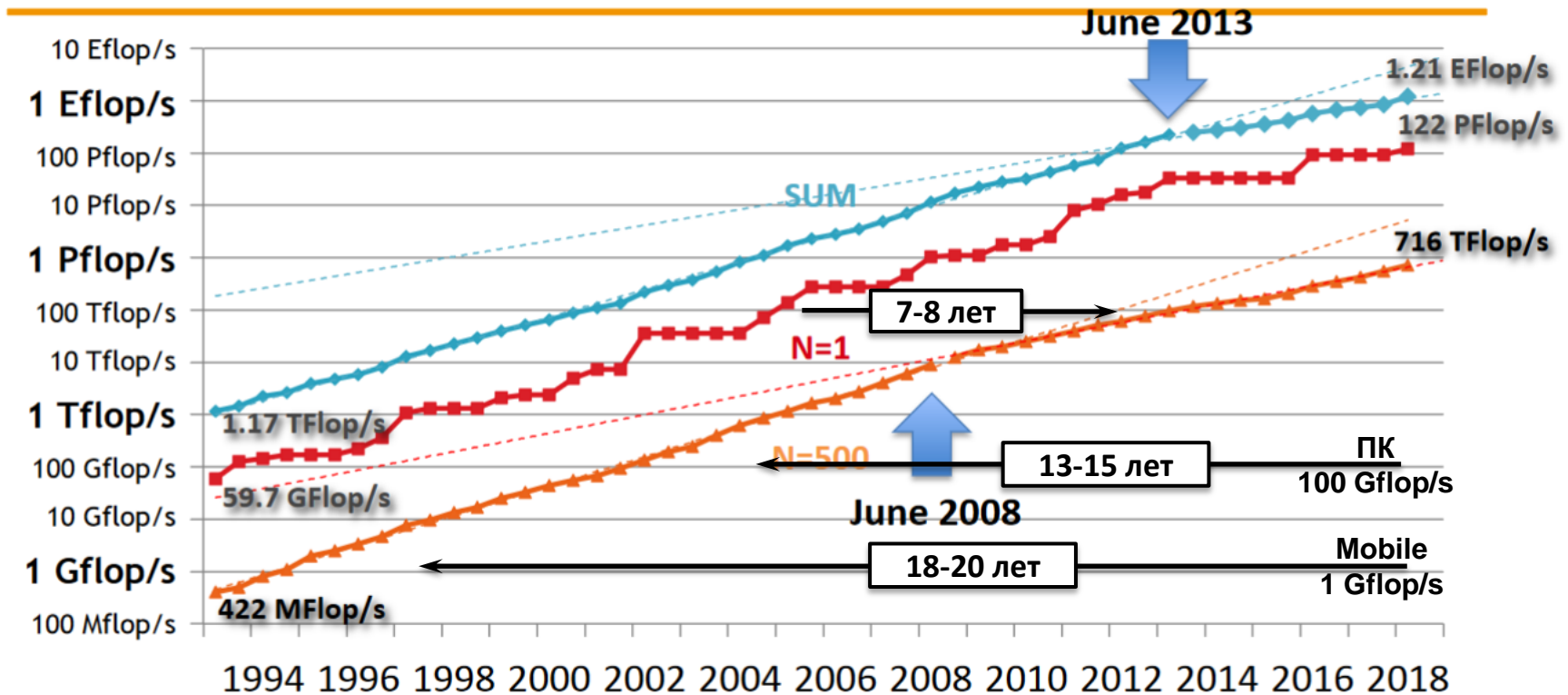
Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира (<http://top500.org>, июнь, 2019 г.)

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (KW)
1	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
2	DOE/NNSA/LLNL United States	Sierra - IBM Power System S922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM / NVIDIA / Mellanox	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
3	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 NUDT	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	Frontera - Dell C6420, Xeon Platinum 8280 28C 2.7GHz, Mellanox InfiniBand HDR Dell EMC	448,448	23,516.4	38,745.9	
6	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect , NVIDIA Tesla P100 Cray Inc.	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
7	DOE/NNSA/LANL/SNL United States	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect Cray Inc.	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
8	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR Fujitsu	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649

Производительность суперкомпьютеров



Рост производительности суперкомпьютеров (закономерности отрасли)



Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира (<http://top500.org>, июнь, 2019 г.)

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
2	DOE/NNSA/LLNL United States	Sierra - IBM Power System S922LC, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband IBM / NVIDIA / Mellanox	1,572,480	94,640.0	125,712.0	7,438
3	National Supercomputing Center in Wuxi China	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway NRCPC	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
4	National Super Computer Center in Guangzhou China	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000 NUDT	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482
5	Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	Frontera - Dell C6420, Xeon Platinum 8280 28C 2.7GHz, Mellanox InfiniBand HDR Dell EMC	448,448	23,516.4	38,745.9	
6	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect, NVIDIA Tesla P100 Cray Inc.	387,872	21,230.0	27,154.3	2,384
7	DOE/NNSA/LANL/SNL United States	Trinity - Cray XC40, Xeon E5-2698v3 16C 2.3GHz, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect Cray Inc.	979,072	20,158.7	41,461.2	7,578
8	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR Fujitsu	391,680	19,880.0	32,576.6	1,649

Gflops/Watt

Лидеры по энергоэффективности

(<http://top500.org>, Green500 list, июнь 2019)



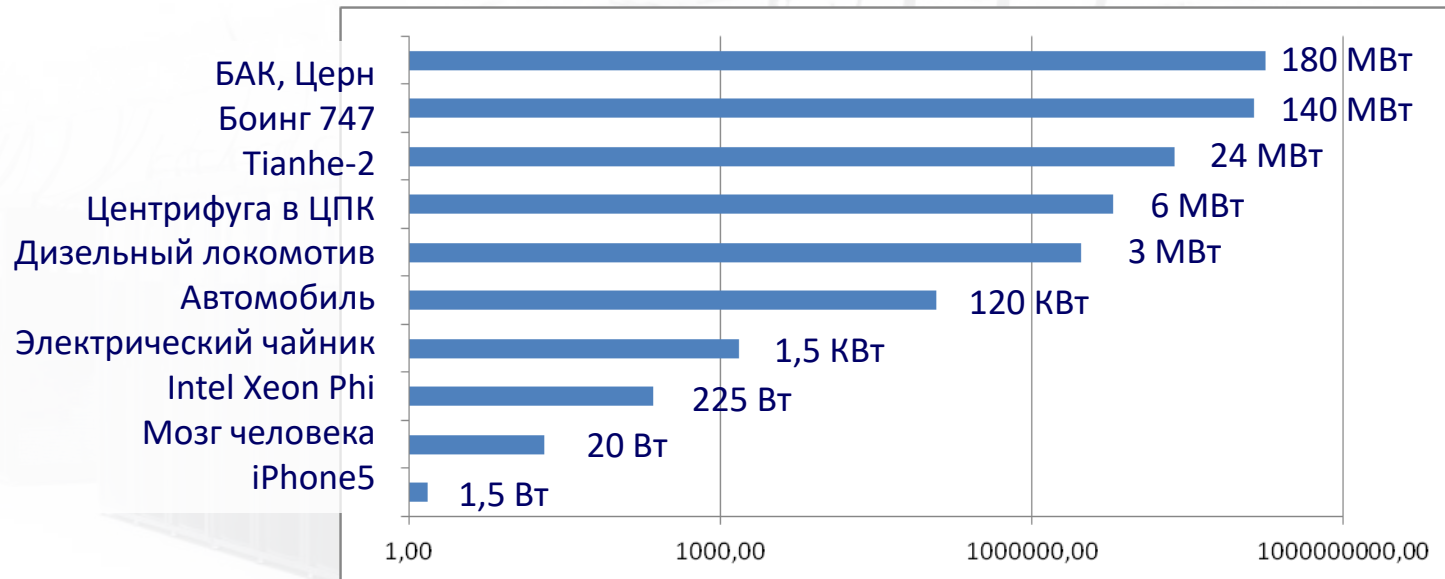
Rank	TOP500 Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Power (kW)	Power Efficiency (GFlops/watts)
1	469	DGX SaturnV Volta - NVIDIA DGX-1 Volta36, Xeon E5-2698v4 20C 2.2GHz, Infiniband EDR, NVIDIA Tesla V100 , Nvidia NVIDIA Corporation United States	22,440	1,070.0	97	15.113
2	1	Summit - IBM Power System AC922, 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	10,096	14.719
3	8	AI Bridging Cloud Infrastructure (ABCI) - PRIMERGY CX2570 M4, Xeon Gold 6148 20C 2.4GHz, NVIDIA Tesla V100 SXM2, Infiniband EDR , Fujitsu National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan	391,680	19,880.0	1,649	14.423
4	393	MareNostrum P9 CTE - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, NVIDIA Tesla V100 , IBM Barcelona Supercomputing Center Spain	18,360	1,145.0	81	14.131
5	25	TSUBAME3.0 - SGI ICE XA, IP139-SXM2, Xeon E5-2680v4 14C 2.4GHz, Intel Omni-Path, NVIDIA Tesla P100 SXM2 , HPE GSIC Center, Tokyo Institute of Technology Japan	135,828	8,125.0	792	13.704

[Gflops/Watt]

Courtesy of E.Strohmaier, LBNL, USA



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

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.

The screenshot displays the Google Play Store interface for the 'Mobile Linpack' application. The app is developed by LPIT SRCC MSU and is categorized as an 'Instrument' (Инструменты). It features a speedometer icon and a 'Mflops' logo. The app's rating is 4.5 stars based on 78 reviews. Below the app title, there are three screenshots showing the app's interface: 'Quick Start', 'Quick Benchmark' (showing a matrix size of 200, 5 iterations, and a best result of 74.8 Mflop/s), and 'Advanced Mode' (showing matrix size range settings). A sidebar menu on the left includes options like 'Мои приложения', 'Игры', and 'Аккаунт'. On the right, there is a 'Похожие' (Similar) section with a 'Ещё' (More) button and a preview of the 'Linpack' app by 404 Developer Not Four, which is free (БЕСПЛАТНО). Another app, 'FLOPS' by DiordnaApps, is also visible below it.

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”

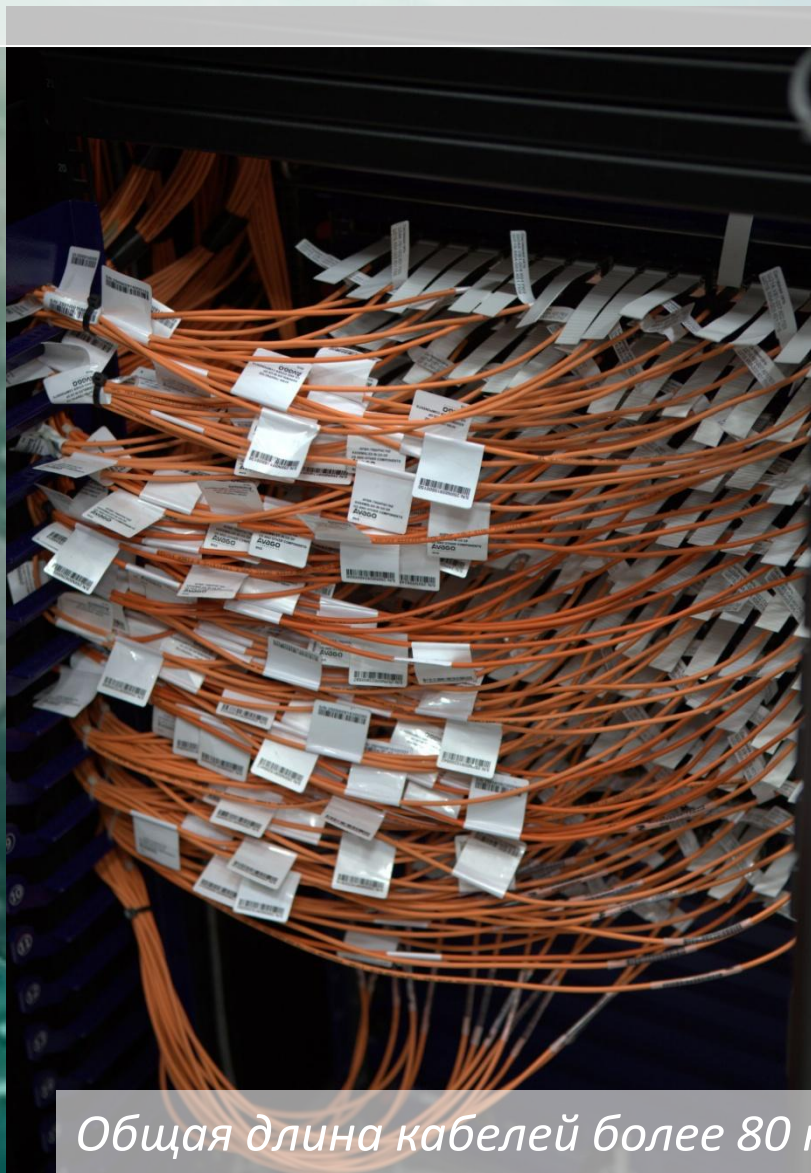


Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



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

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Общая длина кабелей более 80 км

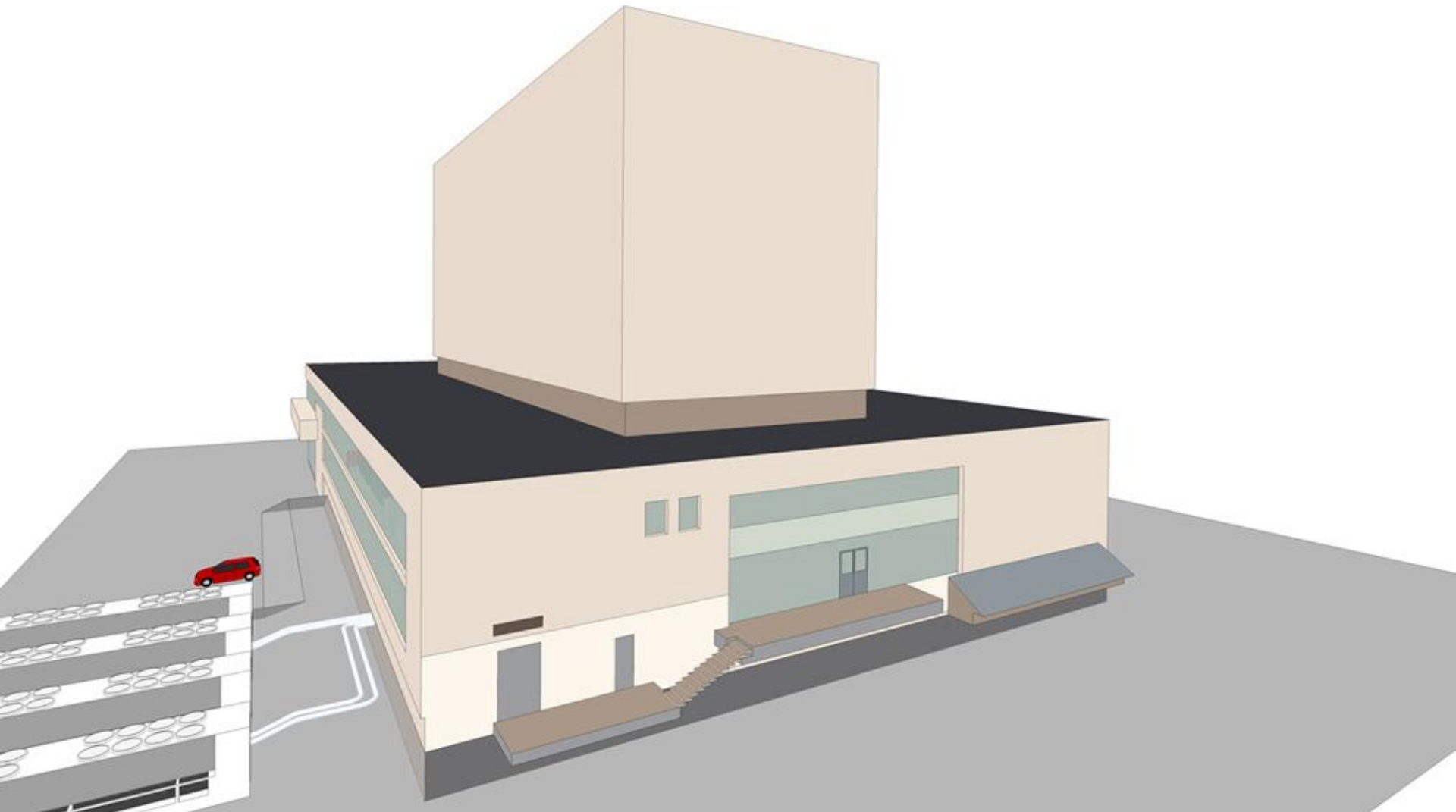
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



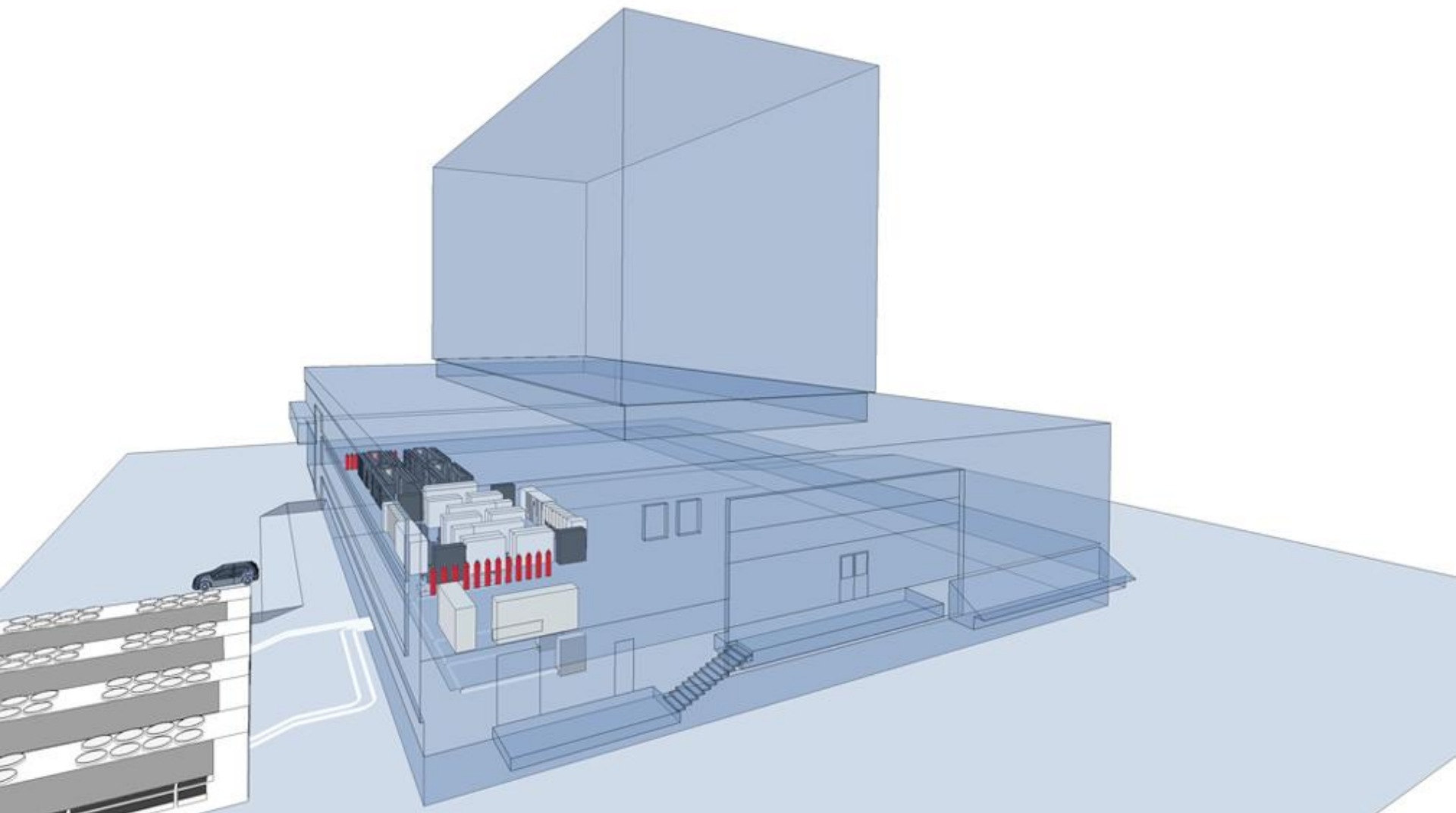
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



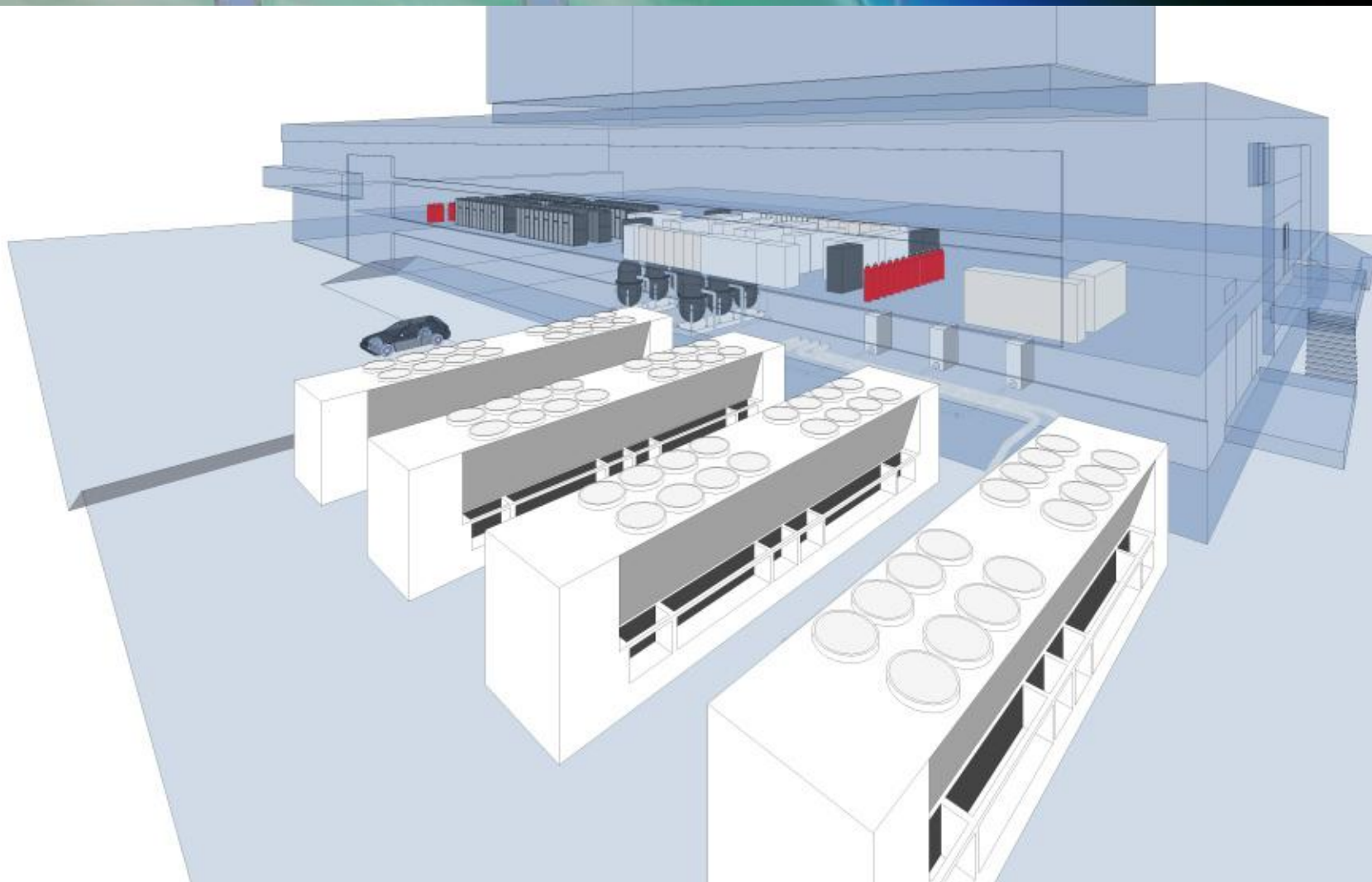
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



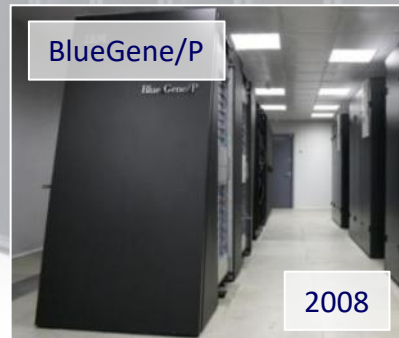
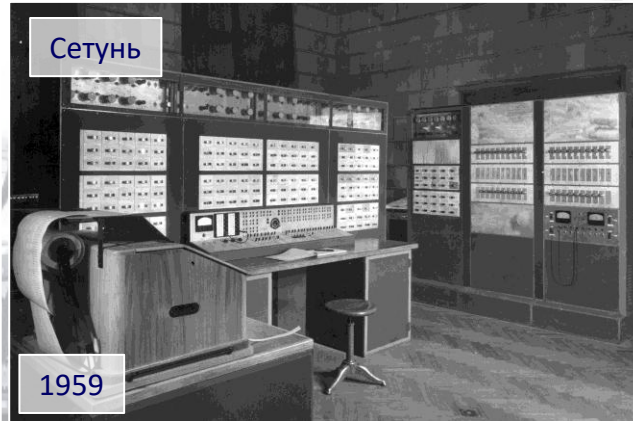
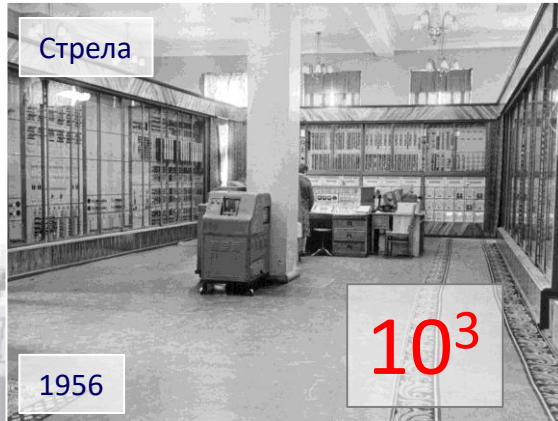
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



TOP500[®]
This Site is ranked
NO. 13 in the TOP500 List
published 06/2011

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

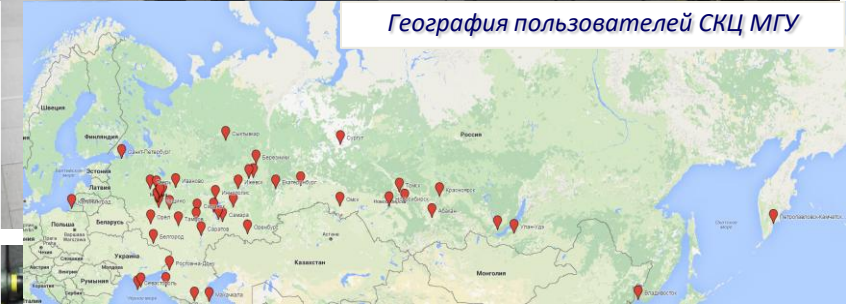
Компьютерный путь Московского университета (с 1956 г. до наших дней)



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов-2”

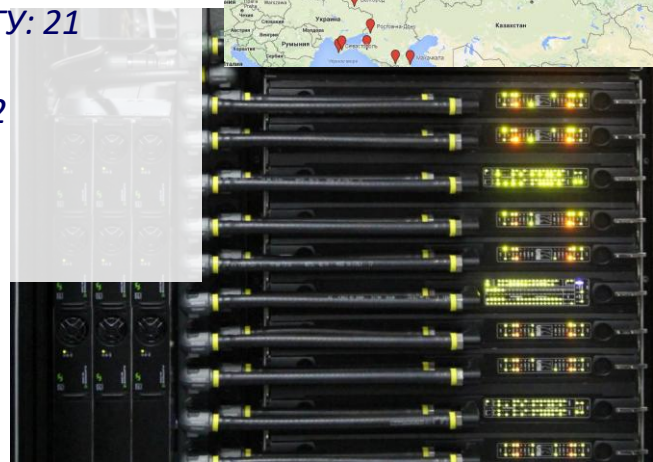


Суперкомпьютерный центр МГУ сегодня:
Пользователи: 2955
Проекты: 880



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 Энергопотребление
Вес 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; 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 < 10 )
              count++;
```

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

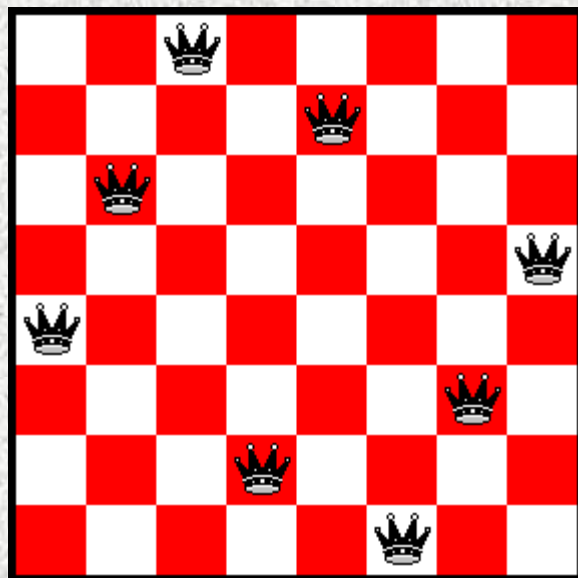
12 цифр – 1780 с



Вычислительная сложность – ~~10ⁿ~~ 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 $K*K$?*

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

*Межфакультетский курс
“Сложные процессы с точки зрения квантовой физики”*

СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

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 – ноябрь, 2019