

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

*Введение в суперкомпьютерные вычисления,
квантовую информатику,
нейросетевые и генетические алгоритмы*

Кафедра Суперкомпьютеров и квантовой информатики ВМК МГУ

<http://sqi.cs.msu.ru>

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

*Межфакультетский учебный курс
“Введение в суперкомпьютерные вычисления, квантовую информатику,
нейросетевые и генетические алгоритмы”*

Введение в суперкомпьютерные технологии

Воеводин Вл.В.

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

voevodin@parallel.ru

ВМК МГУ - 2017

Суперкомпьютеры – что это?

- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые работают значительно быстрее остальной массы современных компьютеров;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые занимают большой зал;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые весят больше 1 тонны;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, которые стоят больше 1 млн.долл.;*
- *Суперкомпьютеры – это компьютеры, мощности которых немного не хватает для решения актуальных вычислительно сложных задач;*

Суперкомпьютеры – что это?

*... мобильные устройства –
персональные компьютеры – серверы –
суперкомпьютеры*

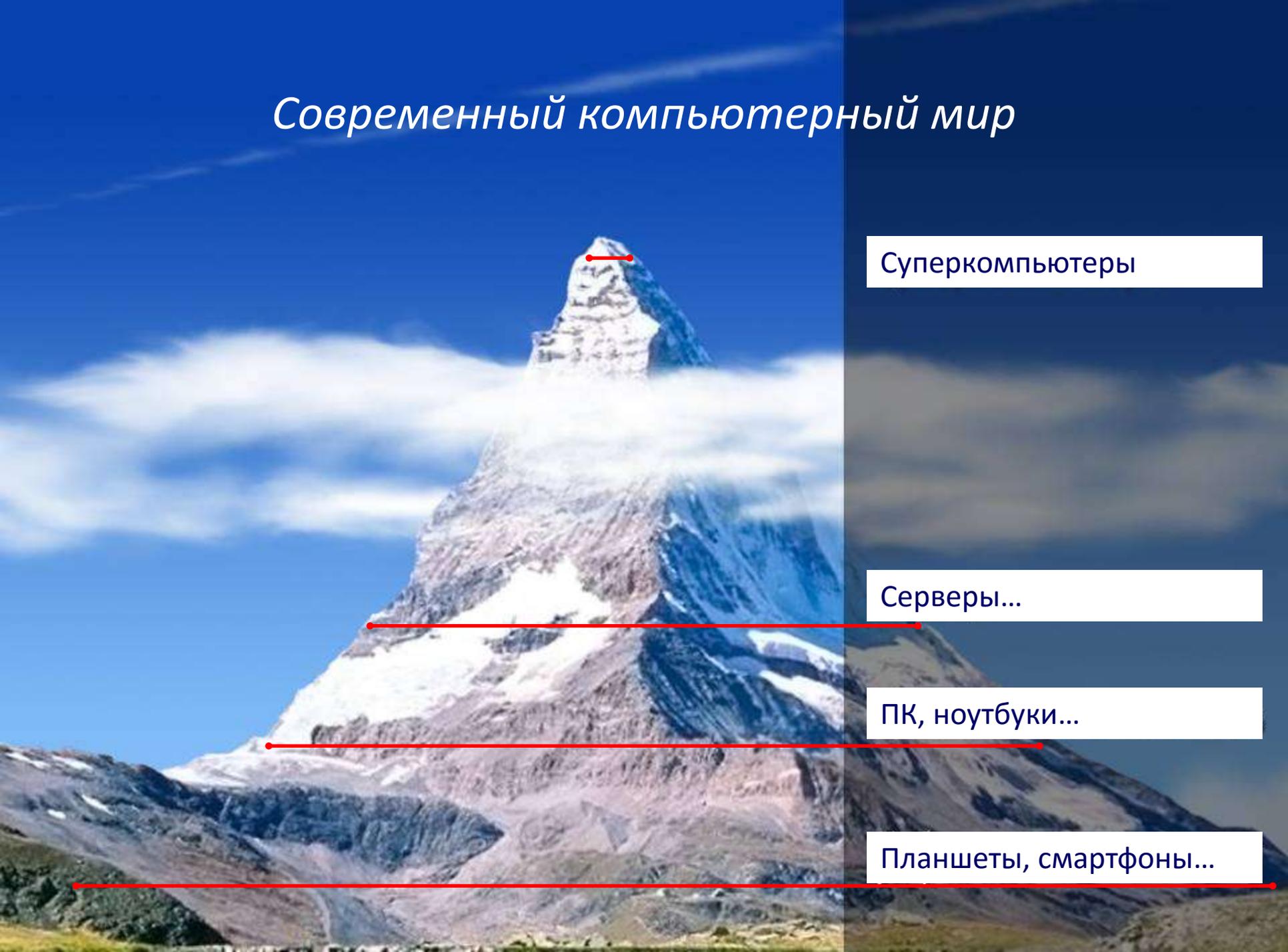
Современный компьютерный мир

Суперкомпьютеры

Серверы...

ПК, ноутбуки...

Планшеты, смартфоны...



Персональный компьютер, 2017 г. – какой он?



Производительность:
около **10-100 млрд. оп/с.**

Память – 8-32 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 second

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

Персональный компьютер, 2017 г. – какой он?



Производительность:
около **10-100 Гфлоп/с.**

Память – 8-32 Гбайт

Диски – 500 Гбайт

Важные сокращения

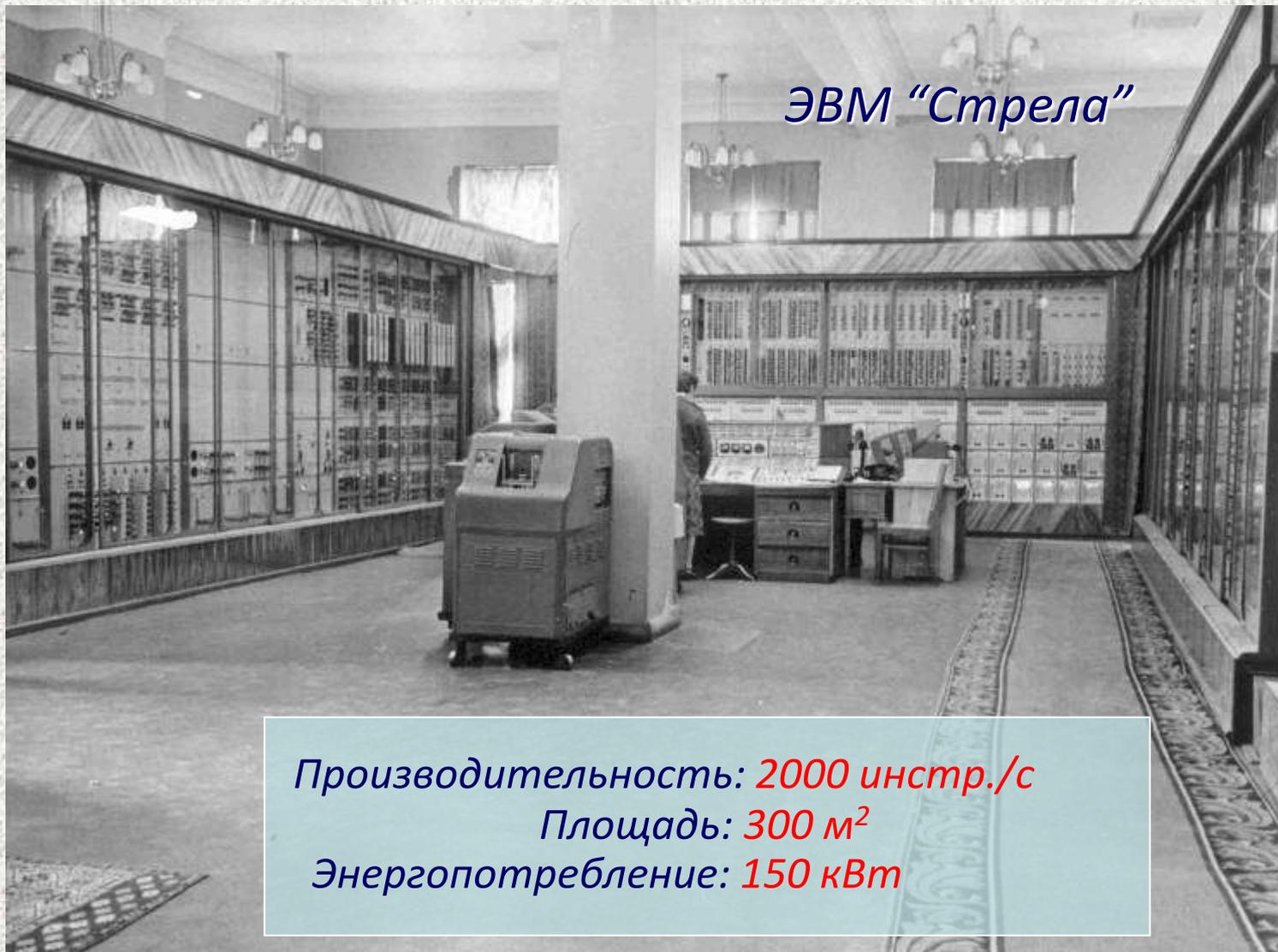
(взгляд в недалекое будущее)

<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

Компьютер 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

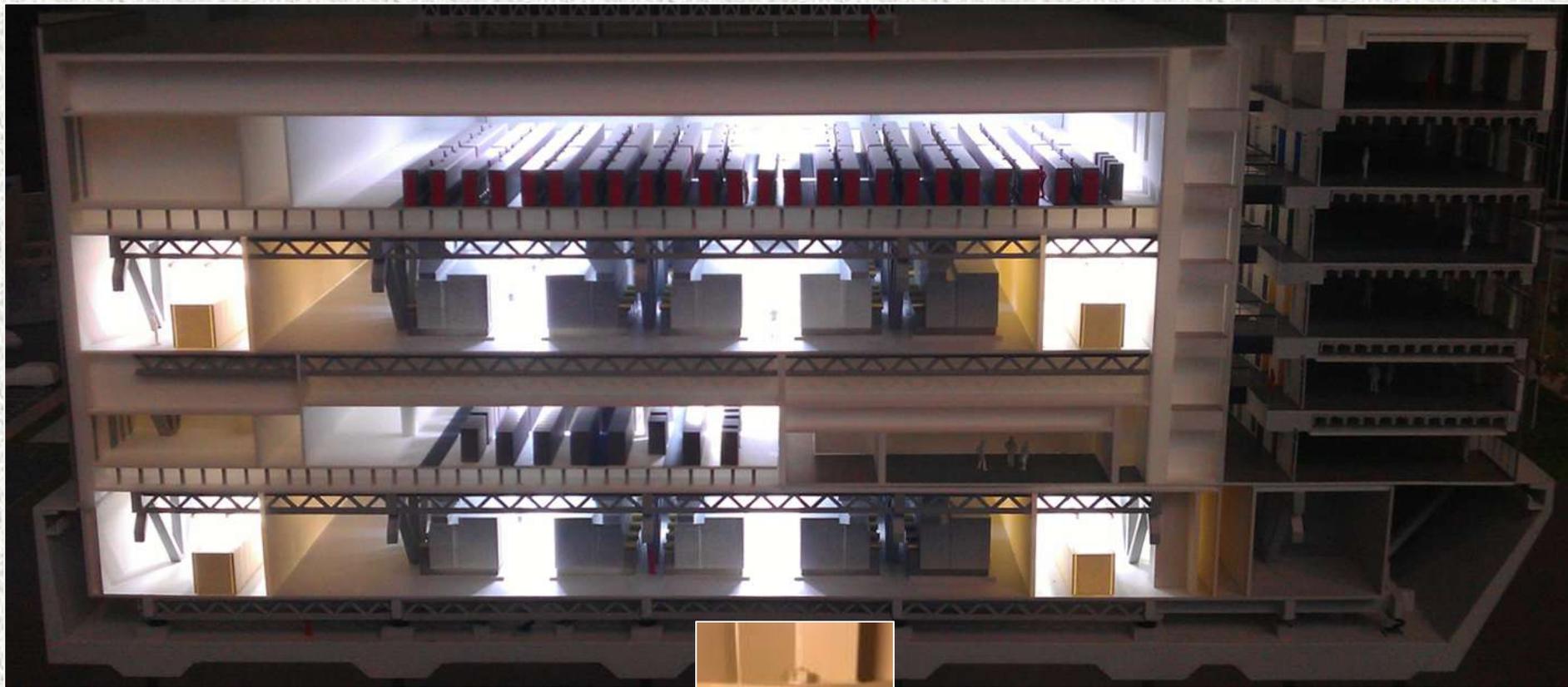
Связь между процессорами: Tofu, 6D mesh/torus

Энергопотребление: 12.6 МВт



“K Computer”, Япония

(#1 Top500 в 2011 г.)



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

Lawrence Livermore
National Laboratory



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

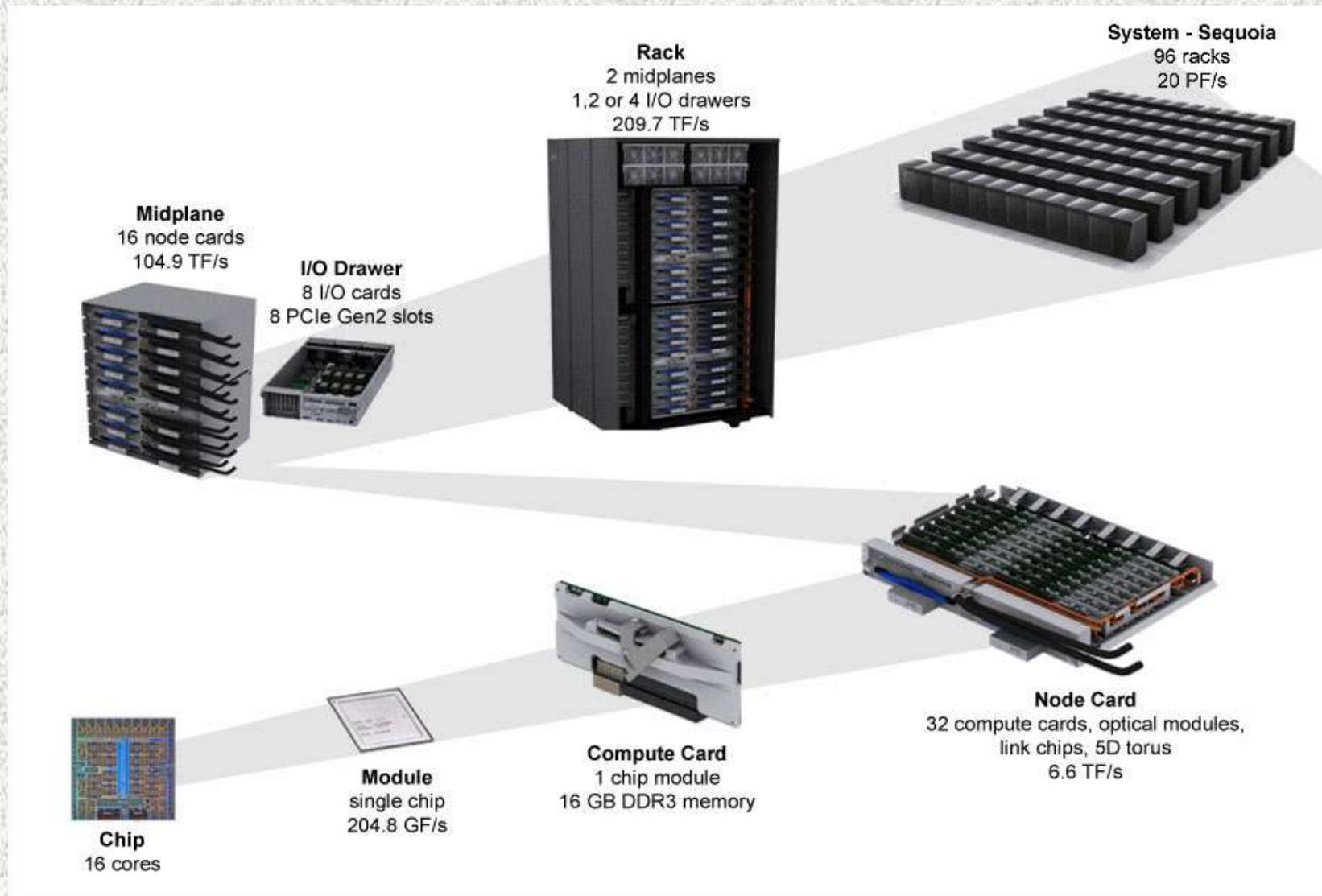


1 572 864 ядра,
IBM PowerPC A2 (64-bit),
1.6 GHz.

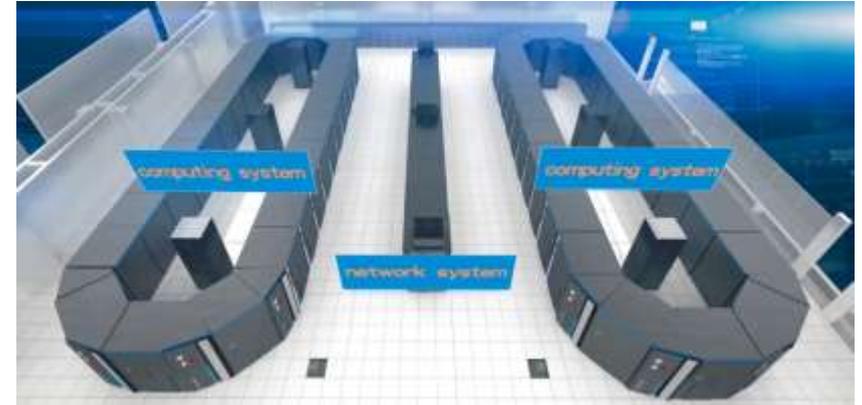
Связь между процессорами:
5-мерный тор

Производительность:
16.32 Pflop/s

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



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

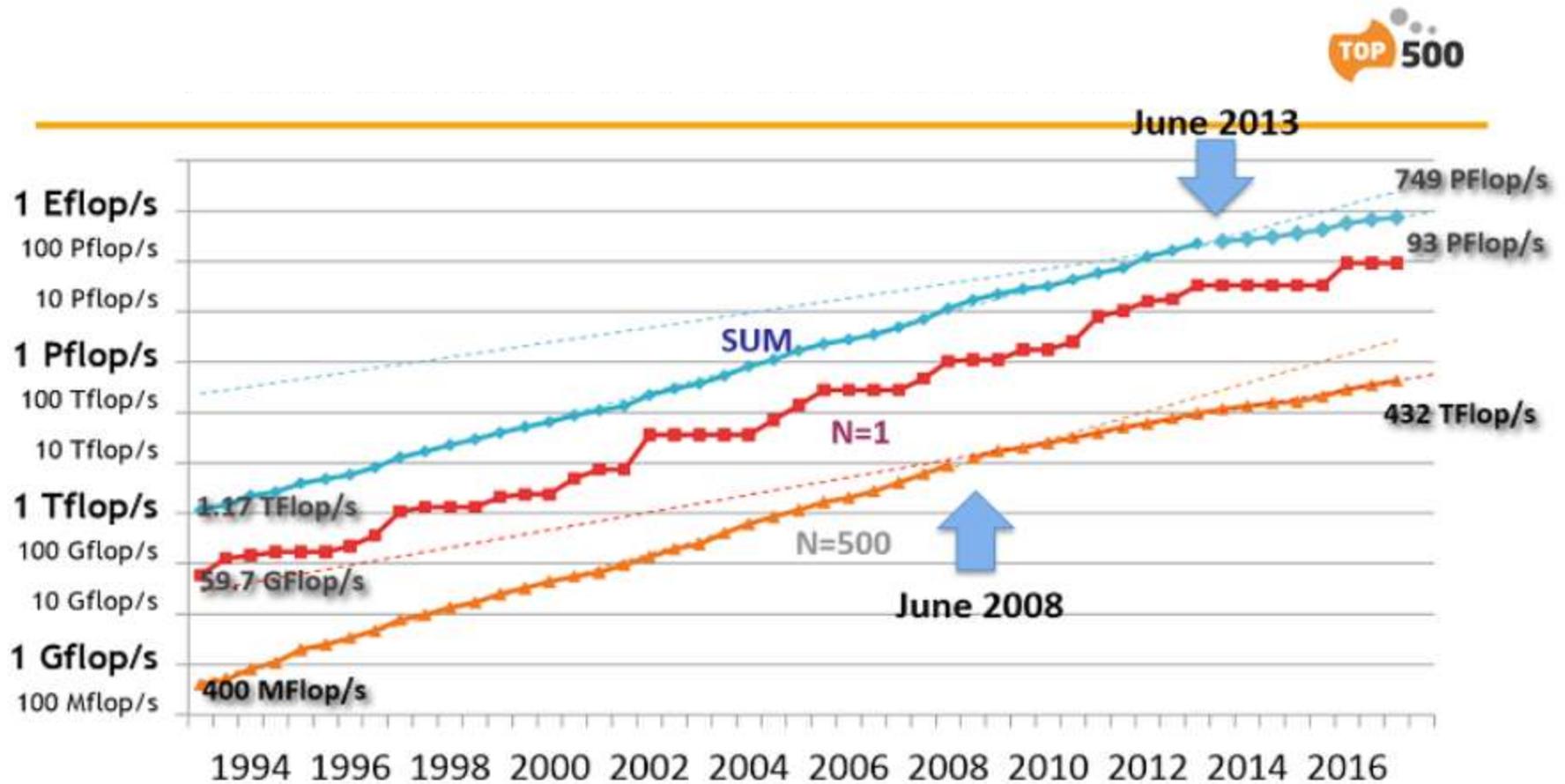
Производительность:
Пик (теория): 125.4 Pflop/s
Тест Linpack: 93 Pflop/s (74%)

Оперативная память = 1.31 Пбайт
HDD = 20 Пбайт

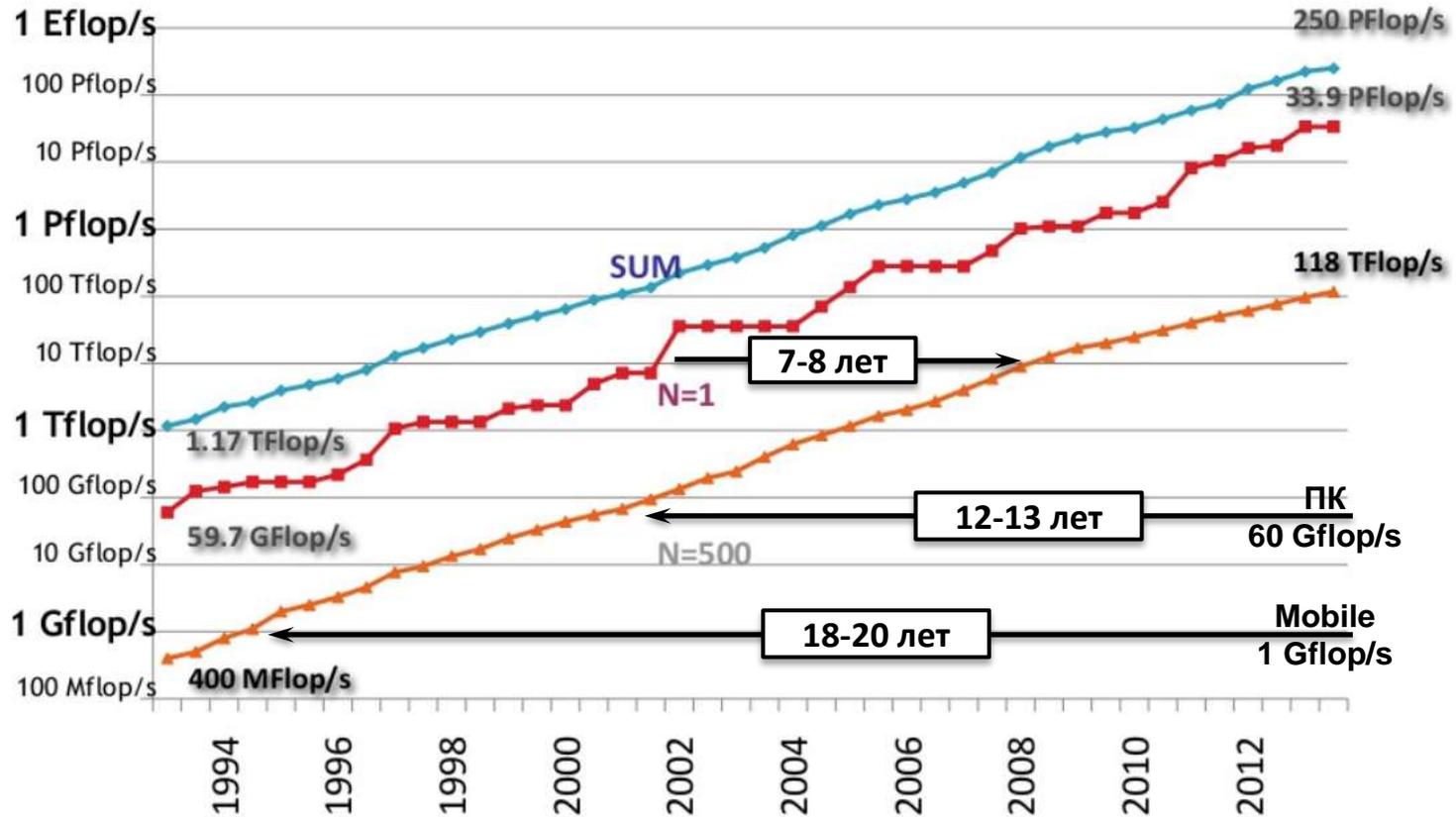
Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира (<http://top500.org>, июнь, 2017 г.)

Rank	System	Cores	R _{max} (TFlop/s)	R _{peak} (TFlop/s)	Power (kW)
1	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
2	Tianhe-2 (MilkyWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P , NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
3	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect , NVIDIA Tesla P100 , Cray Inc. Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	361,760	19,590.0	25,326.3	2,272
4	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x , Cray Inc. DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
5	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom , IBM DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
6	Cori - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect , Cray Inc. DOE/SC/LBNL/NERSC United States	622,336	14,014.7	27,880.7	3,939
7	Oakforest-PACS - PRIMERGY CX1640 M1, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Intel Omni-Path , Fujitsu Joint Center for Advanced High Performance Computing Japan	556,104	13,554.6	24,913.5	2,719
8	K computer , SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect , Fujitsu RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	705,024	10,510.0	11,280.4	12,660

Производительность суперкомпьютеров



Рост производительности компьютеров (закономерности отрасли)



Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира (<http://top500.org>, июнь, 2017 г.)

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	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
2	Tianhe-2 (MilkyWay-2) - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P , NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
3	Piz Daint - Cray XC50, Xeon E5-2690v3 12C 2.6GHz, Aries interconnect , NVIDIA Tesla P100 , Cray Inc. Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	361,760	19,590.0	25,326.3	2,272
4	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x , Cray Inc. DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
5	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom , IBM DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
6	Cori - Cray XC40, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Aries interconnect , Cray Inc. DOE/SC/LBNL/NERSC United States	622,336	14,014.7	27,880.7	3,939
7	Oakforest-PACS - PRIMERGY CX1640 M1, Intel Xeon Phi 7250 68C 1.4GHz, Intel Omni-Path , Fujitsu Joint Center for Advanced High Performance Computing Japan	556,104	13,554.6	24,913.5	2,719
8	K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect , Fujitsu RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	705,024	10,510.0	11,280.4	12,660

Gflops/Watt

Лидеры по энергоэффективности (июнь 2017)

The GREEN 500

MOST ENERGY EFFICIENT ARCHITECTURES

TOP 500

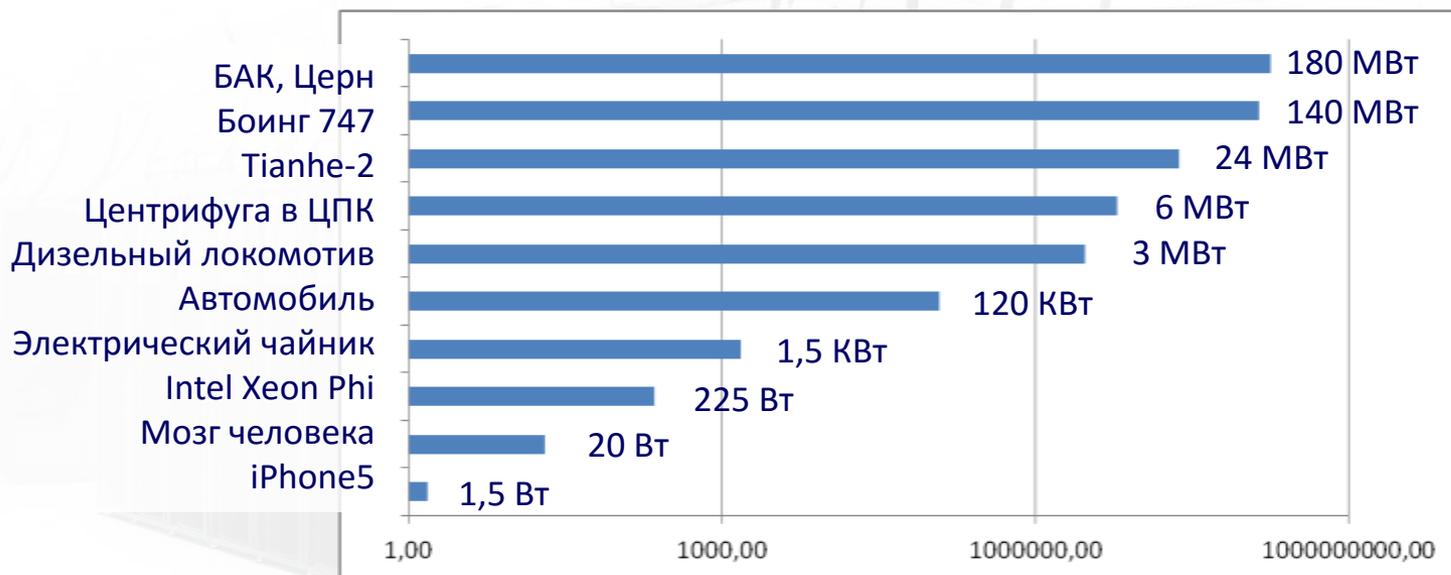
Computer				Rmax/ Power
Tsubame 3.0, SGI ICE XA,	Xeon 14C 2.4GHz	Intel Omni-Path	Tesla P100 SXM2	14.11
kukai, ZettaScaler-1.6 GPGPU System	Xeon 14C 1.7GHz	Infiniband FDR	Tesla P100	14.05
AIST AI Cloud, NEC 4U-8GPU	Xeon 10C 1.8GHz	Infiniband EDR	Tesla P100 SXM2	12.68
RAIDEN GPU subsystem, NVIDIA DGX-1	Xeon 20C 2.2GHz	Infiniband EDR	Tesla P100	10.60
Wilkes-2, Dell C4130	Xeon 12C 2.2GHz	Infiniband EDR	Tesla P100	10.43
Piz Daint, Cray XC50	Xeon 12C 2.6GHz	Aries interconnect	Tesla P100	10.40*
Gyoukou, ZettaScaler-2.0 HPC system	Xeon 16C 1.3GHz	Infiniband EDR	PEZY-SC2	10.22**
RCF2, SGI Rackable C1104-GP1	Xeon 12C 2.2GHz	Infiniband EDR	Tesla P100	9.80
NVIDIA DGX-1/Relion 2904GT	Xeon 20C 2.2GHz	Infiniband EDR	Tesla P100/Quadro GP100	9.46
DGX SaturnV, DGX-1	Xeon 20C 2.2GHz	Infiniband EDR	Tesla P100	9.46

* Power optimized ratio: HPL-13%; Power-28% **Systems with derived power [Gflops/Watt]

[Gflops/Watt]

Courtesy of E. Strohmaier, LBNL, USA

Энергопотребление вокруг нас

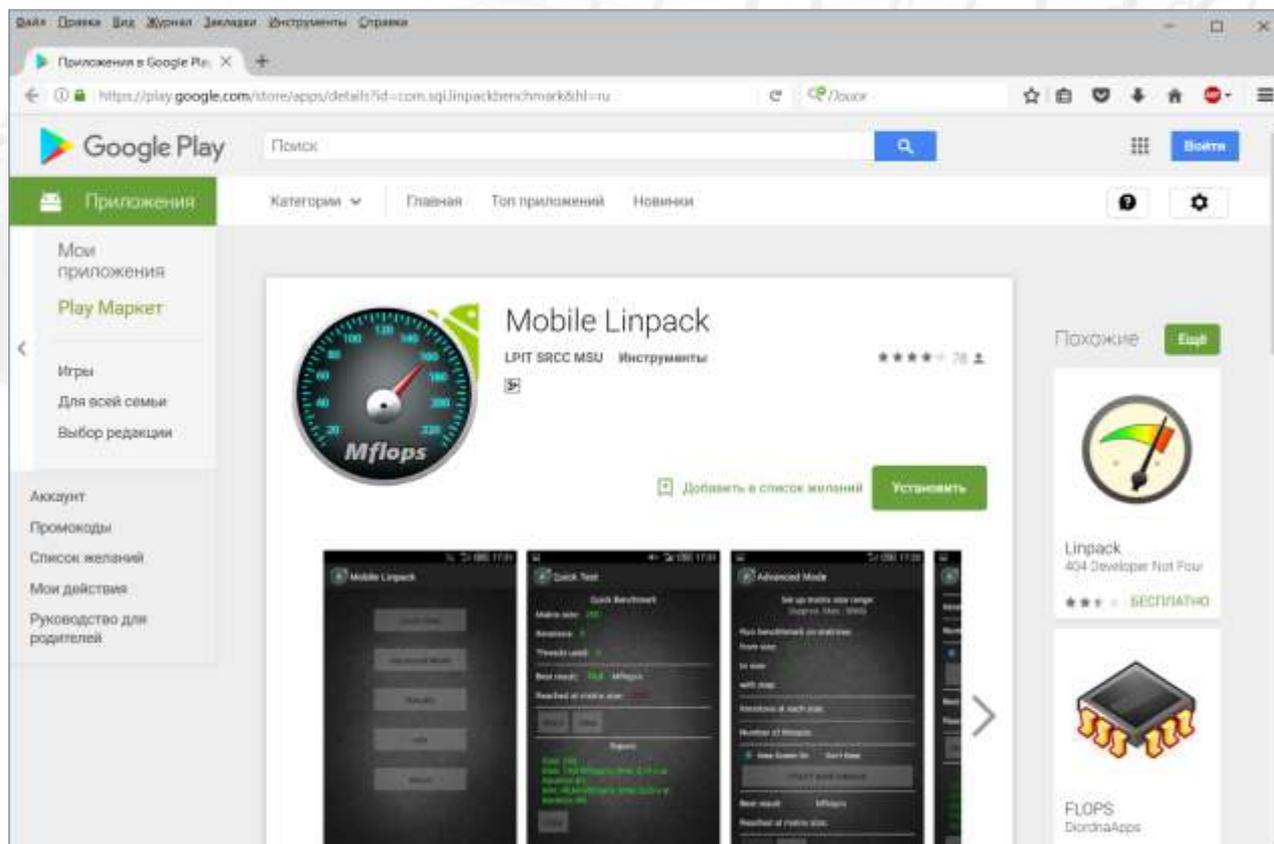


Автомобиль - БАК (Церн) - Боинг 747 - Дизельный локомотив
Мозг человека - Центрифуга в ЦПК - Электрический чайник
Intel Xeon Phi - iPhone5 - Tianhe-2

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.



Адрес для отзывов: ml@parallel.ru

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”

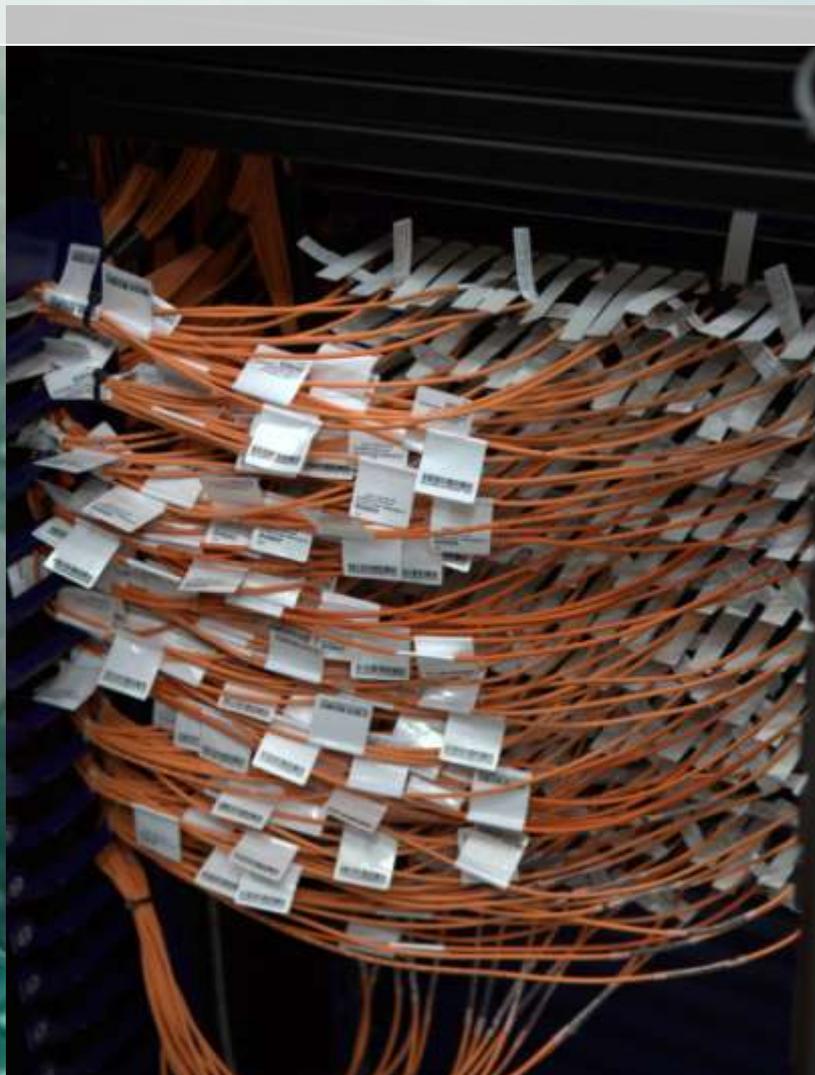


Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



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

Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Общая длина кабелей более 80 км

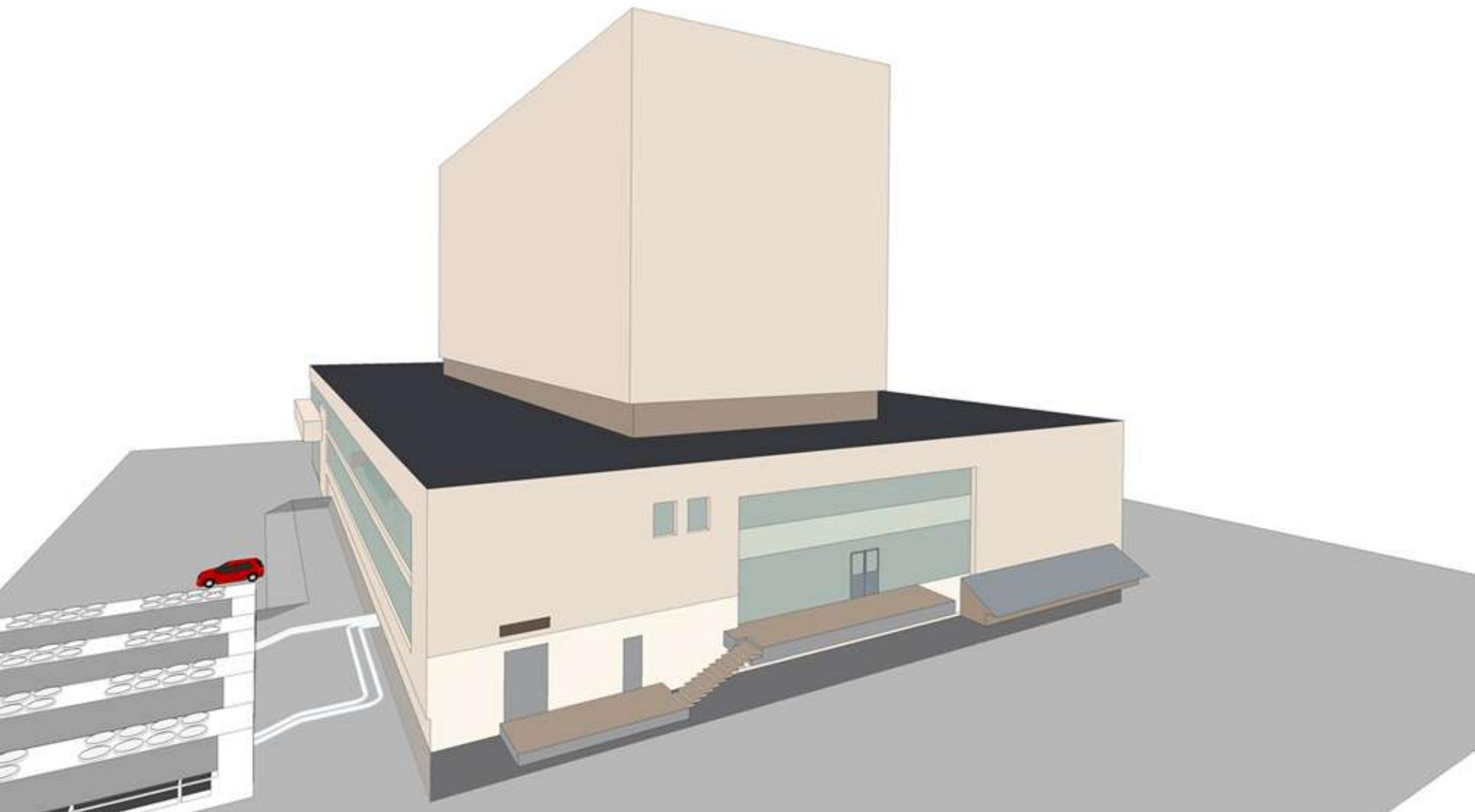
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



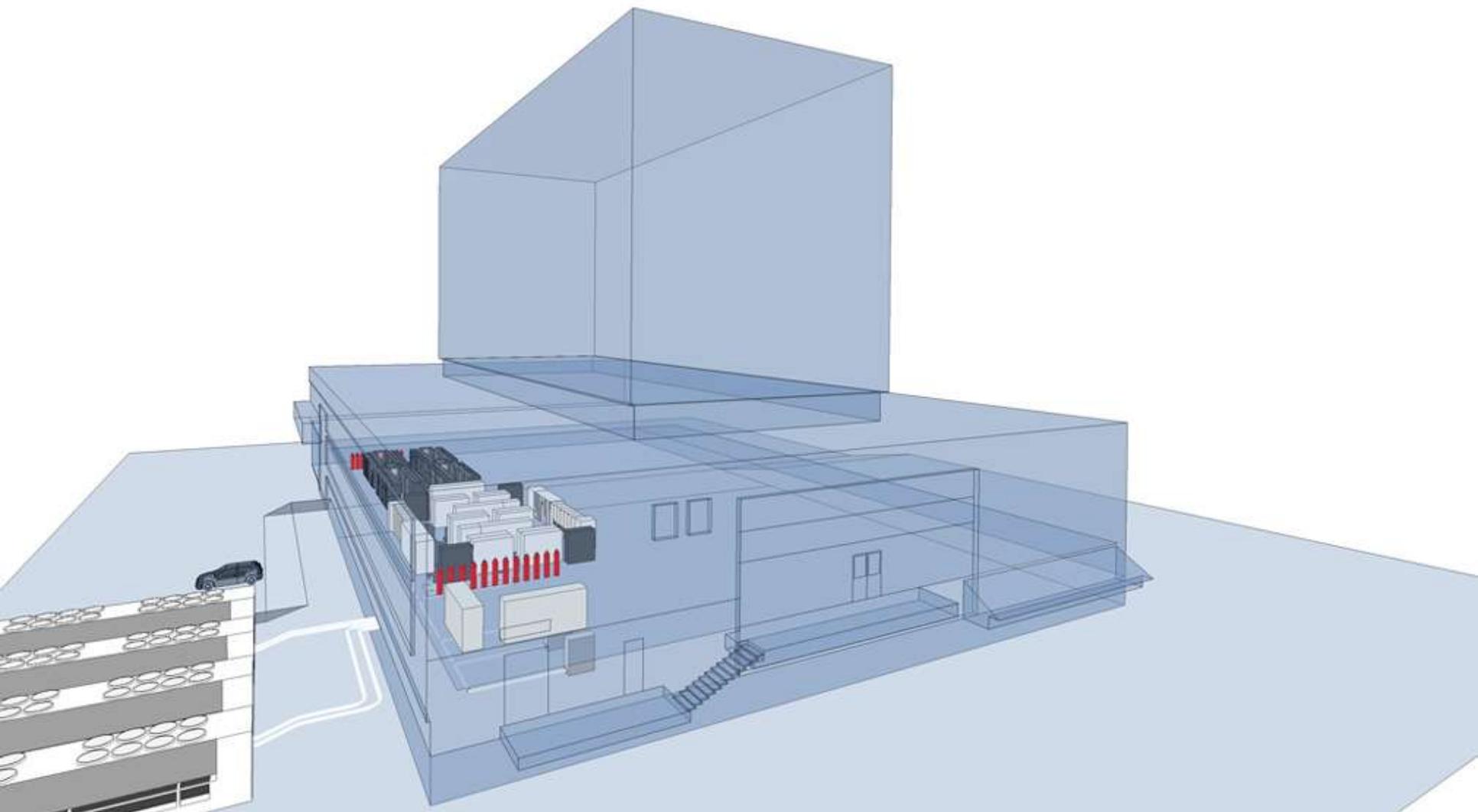
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



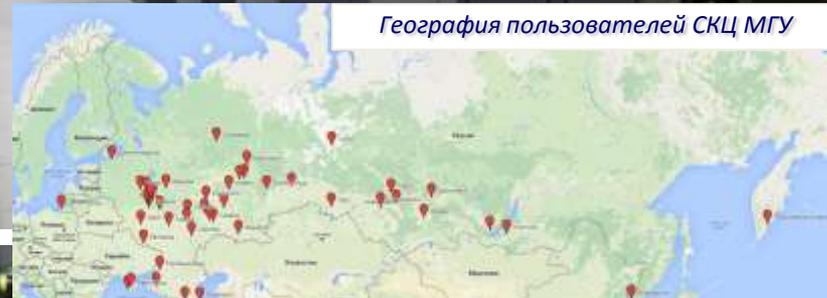
TOP500[®]
This Site is ranked
NO. 13 in the TOP500 List
published **06/2011**

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

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= 515 Tflor/s
Суперкомпьютер “Ломоносов-2” = 2.9 Pflor/s

Компьютерный мир в сравнении

Производительность Энергопотребление
Вес Цена

10^6

100 т

3 МВт

\$30М

Суперкомпьютеры

10

10 кг

1 кВт

\$10K

Серверы...

1

1.5 кг

90 Вт

\$1K

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

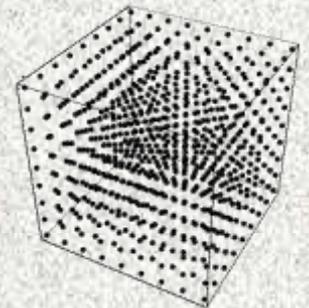


Вычислительная сложность – ~~10^n~~ n^2 операций !

Сверхвысокая производительность - зачем?

Моделирование нефтяных резервуаров:

- нефтеносная область – $100*100*100$ точек
- в каждой точке вычисляется от 5 до 20 функций (скорость, давление, концентрация, температура, ...)
- 200-1000 операций для вычисления каждой функции в каждой точке
- 100-1000 шагов по времени
- Итого: 10^6 (точек сетки) * 10 (функций) *
* 500 (операций) * 500 (шагов) =
= 2500 млрд. операций



Автомобилестроение

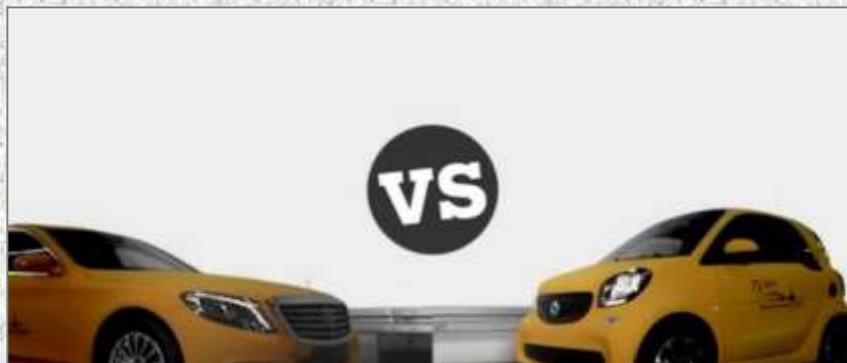
(BMW, Audi, Ford, Chevrolet, Renault,... – BCE!)



Автомобилестроение

(BMW, Audi, Ford, Chevrolet, Renault,... – BCE!)

Mercedes
E-class

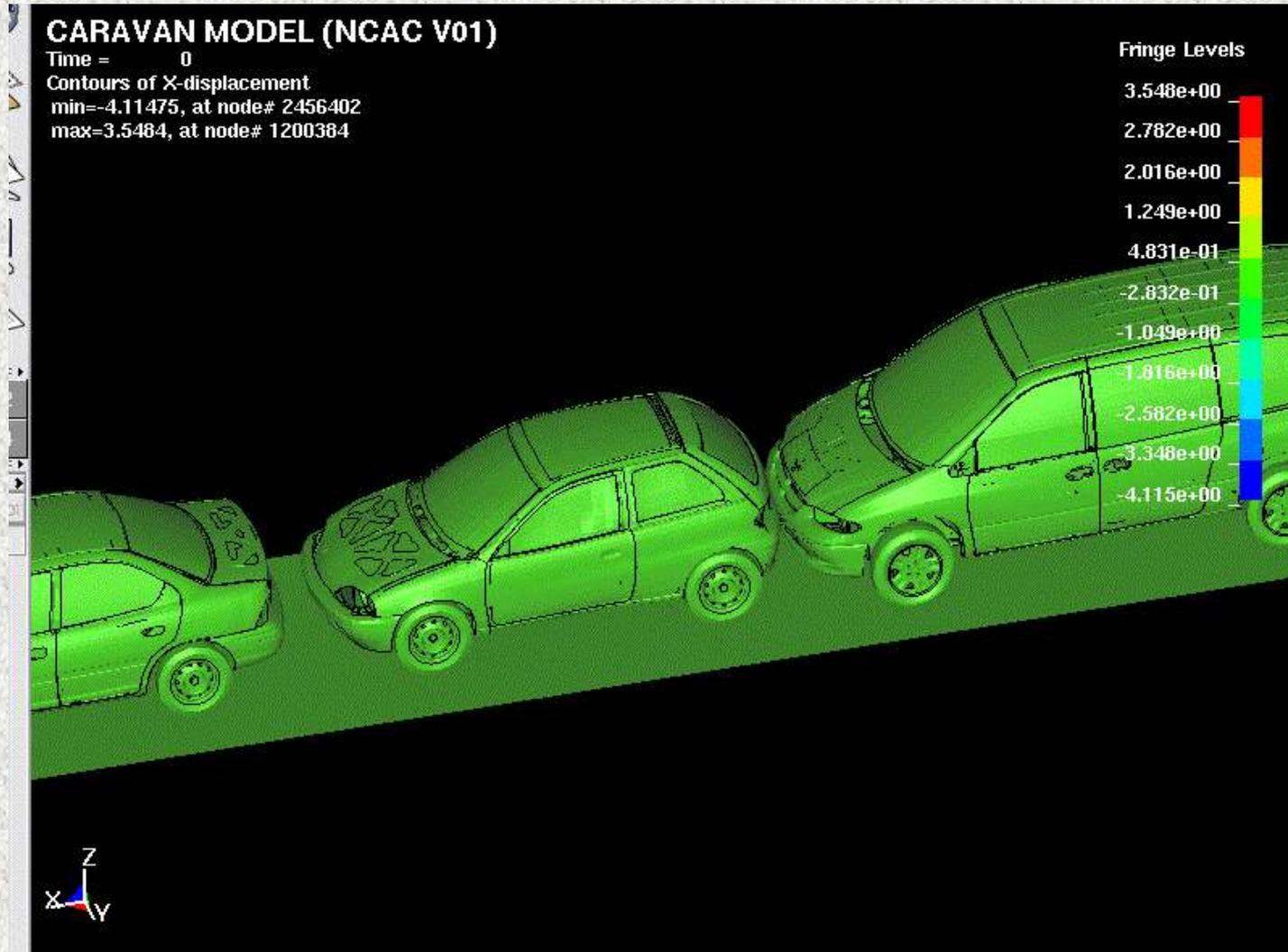


Smart



Автомобилестроение

(BMW, Audi, Ford, Chevrolet, Renault,... – BCE!)

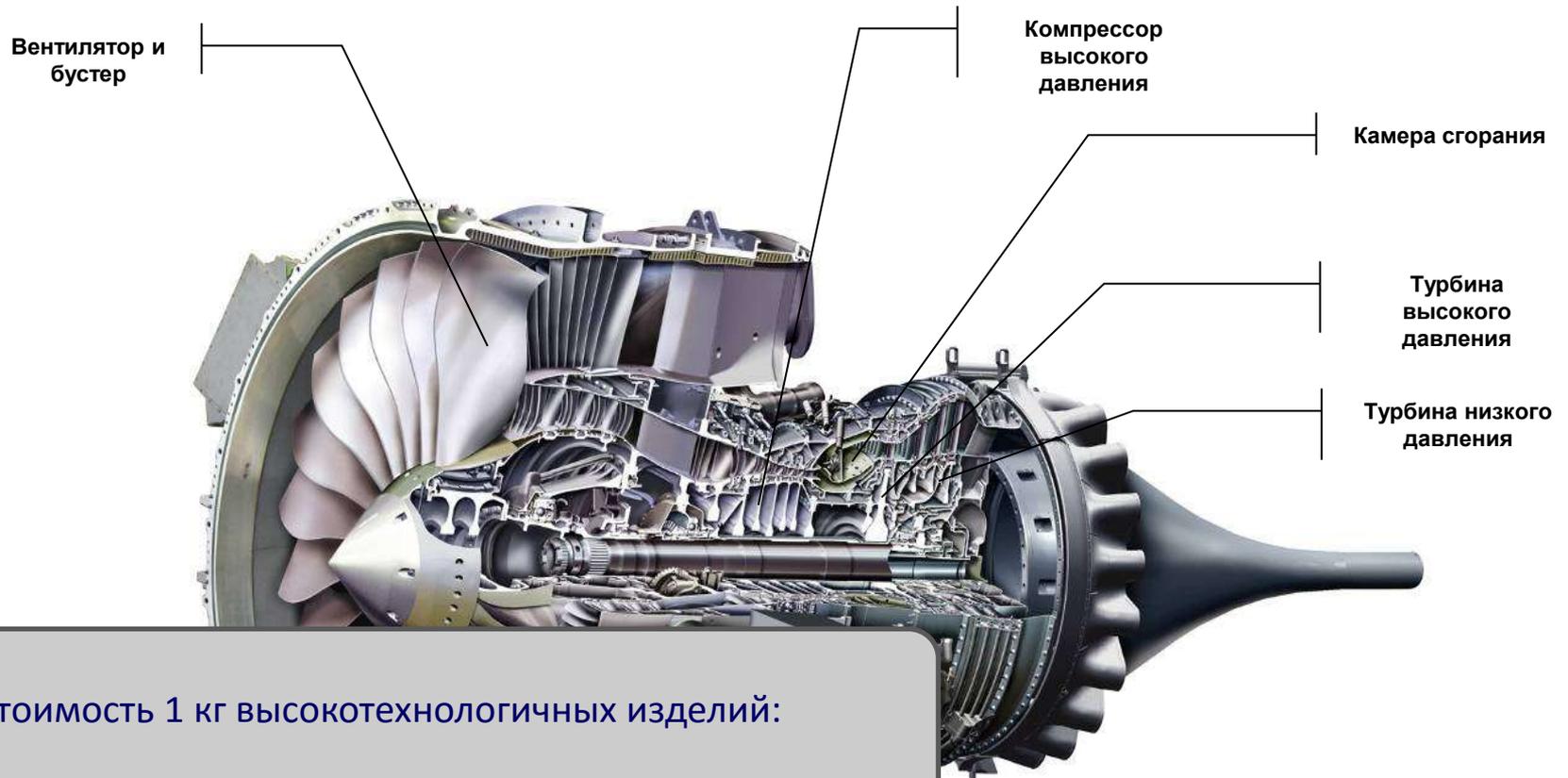


НПО "САТУРН"

(авиационные двигатели и газовые турбины)



Основные узлы ГТД



Стоимость 1 кг высокотехнологичных изделий:

Автомобиль: \$25

Истребитель пятого поколения: \$1000

Двигатель истребителя пятого поколения: \$5000

Суперкомпьютер: \$400-500

Объем расчетов

Стационарные режимы

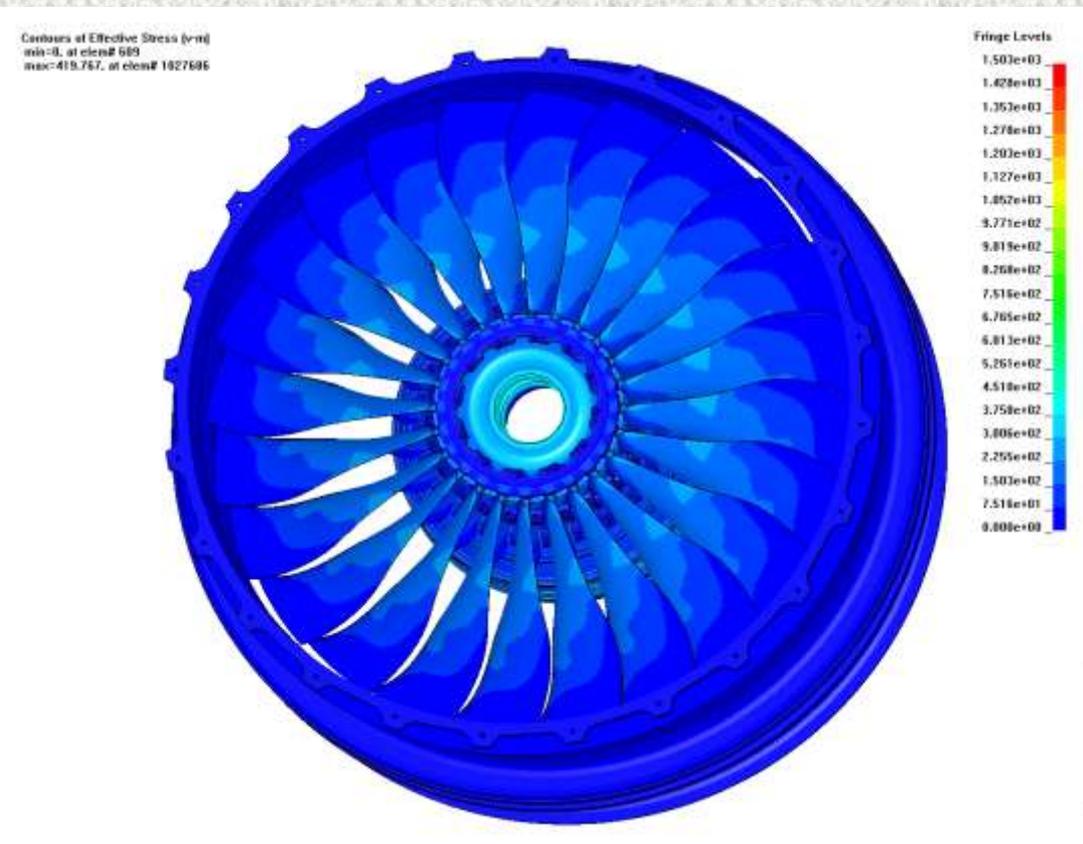
Узел	Размер задачи (млн. ячеек)	Кол-во операций с плавающей точкой для расчета узла
Вентилятор	10	$2,5 * 10^{16}$
Компрессор низкого давления	8	$1,5 * 10^{16}$
Компрессор высокого давления	10	$4,5 * 10^{16}$
Камера сгорания	20	$2,4 * 10^{17}$
Турбина высокого давления	8	$1,1 * 10^{17}$
Турбина низкого давления	8	$1,1 * 10^{16}$

10^{12} – Тера, 10^{15} – Пета, 10^{18} - Экса

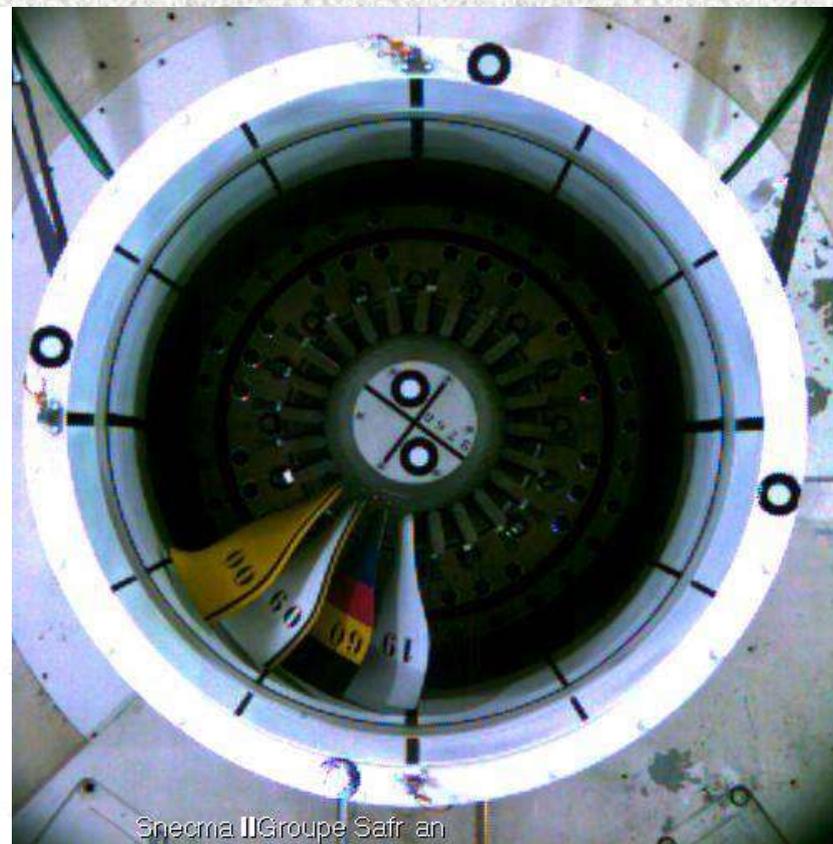
Для нестационарных режимов объем расчетов увеличивается в ~ 10 раз.

НПО "САТУРН"

(авиационные двигатели и газовые турбины)



Расчет



Эксперимент

Задачи аэродинамики и аэроакустики

Моделирование простых элементов летательного аппарата: крыло без механизации, отдельной области механизации или шасси, несущего винта вертолета, отсека вооружения и т.д.:

Сетка: около 50 млн.ячеек,

Трудоемкость на ячейку: 10-30 тыс.операций,

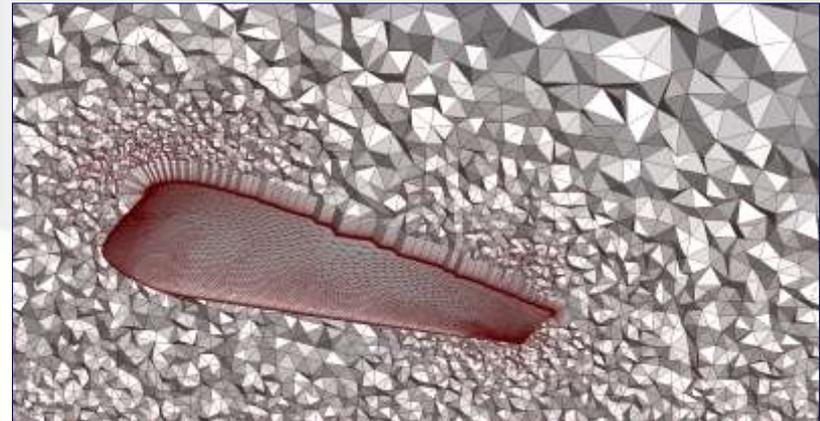
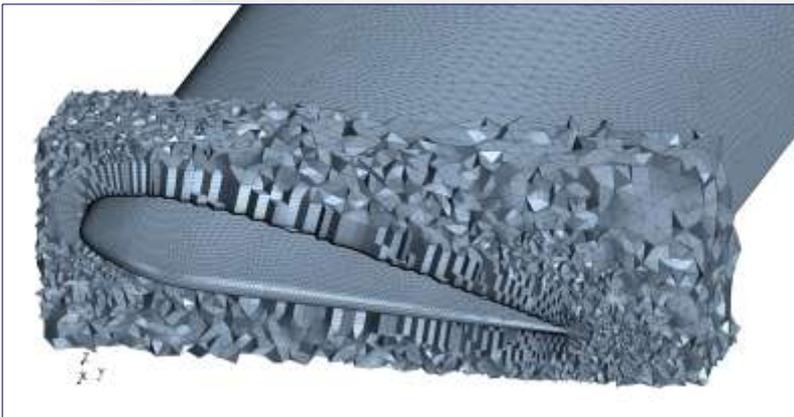
Шагов по времени: около 250 тыс.,

Итого: $50 \cdot 10^6 + 20 \cdot 10^3 + 250 \cdot 10^3 = 2.5 \cdot 10^{16}$ операций.

Несколько режимов: разные углы атаки, разная скорость потока, итого – 10^{17} операций.

Расчет сложных конфигураций: крыло с механизацией, крыло с двигателем, несущий винт с учетом фюзеляжа вертолета и т.д.:

Минимальная сетка порядка 100-200 млн.ячеек, итого – 10^{18} операций.



Моделирование течения вокруг лопасти несущего винта вертолета

Расчет турбулентных течений методом прямого численного моделирования (DNS)

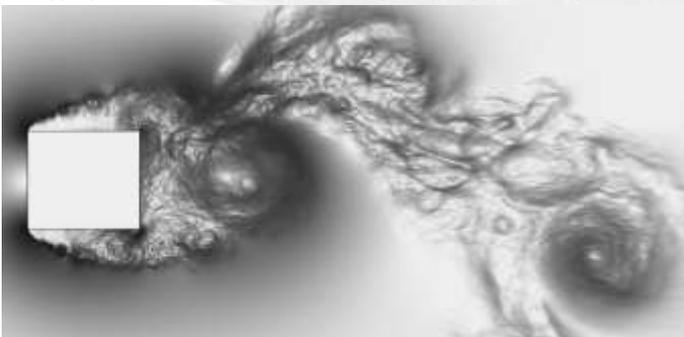
Течение вокруг бесконечного цилиндра квадратного сечения
Сетка 300 млн. ячеек, схема 4-го порядка
0.7 млн. шагов по времени
Стоимость расчета: около 10^{18} операций.



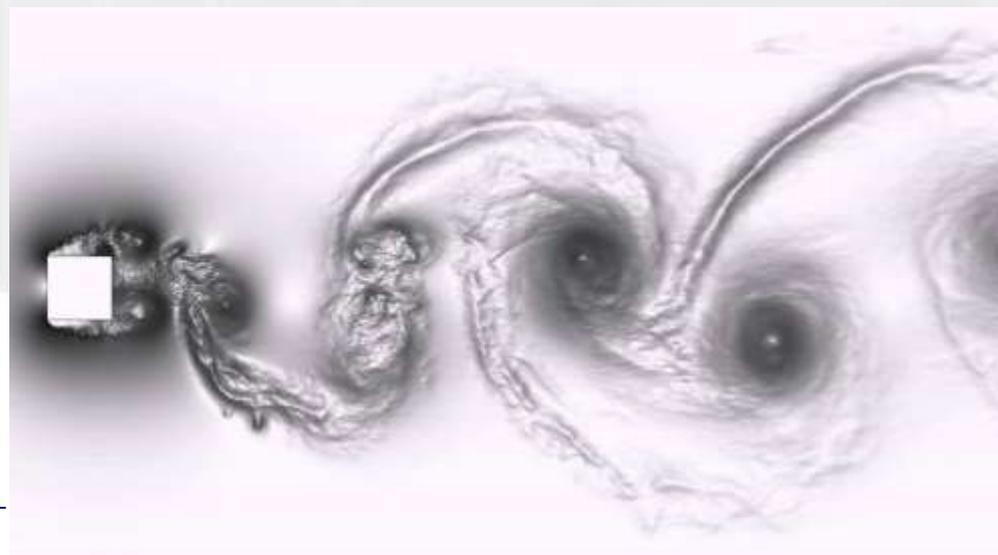
Ламинарное (на переднем плане) и турбулентное течение вокруг подлодки



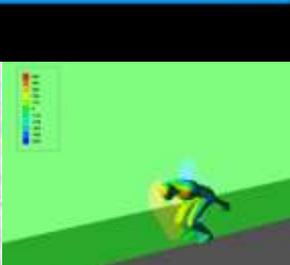
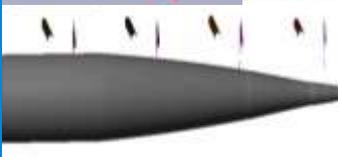
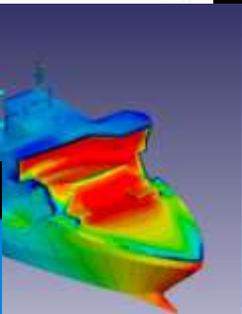
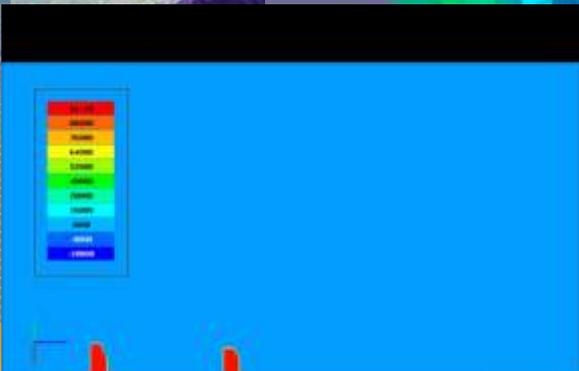
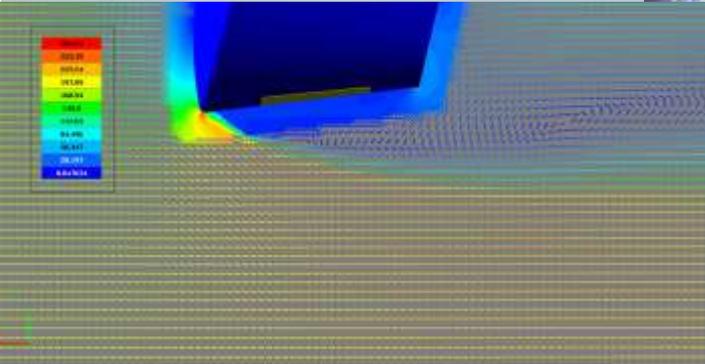
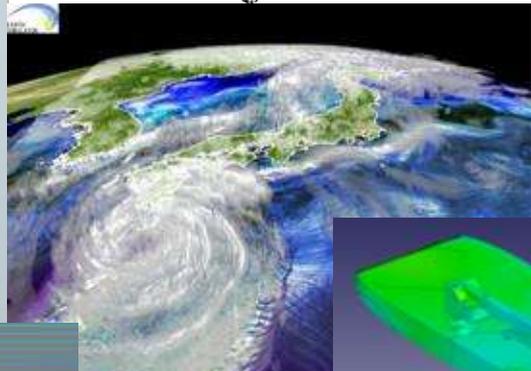
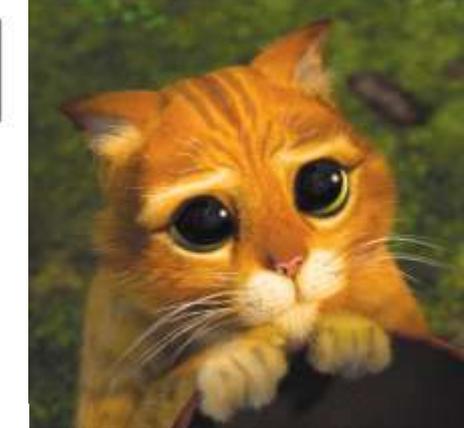
Турбулентный след за цилиндром (дорожка Кармана)



Увеличение в области препятствия. Развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (тонкие вихревые дорожки от передних углов цилиндра)



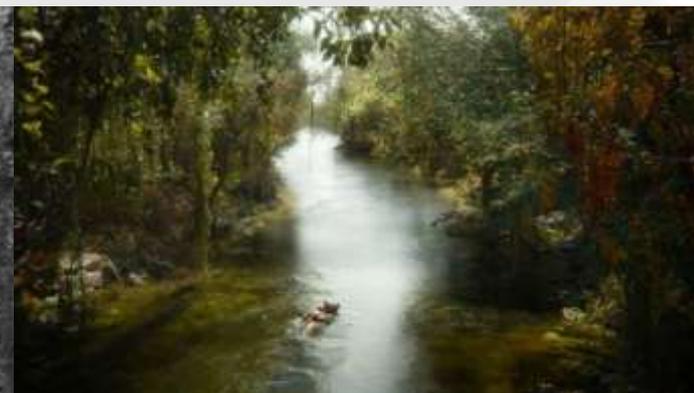
Предоставлено сектором вычислительной аэроакустики ИПМ им М.В.Келдыша РАН.



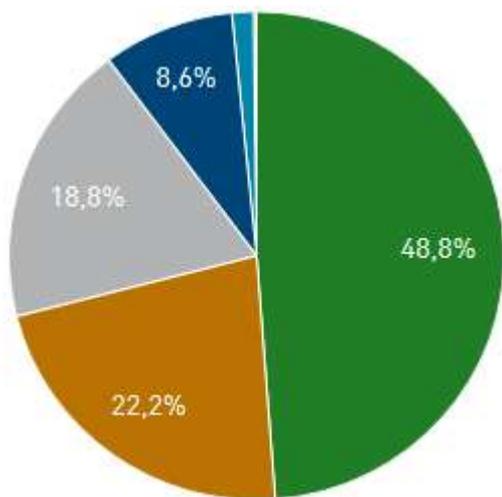


Суперкомпьютеры и анимация (“Книга Джунглей”, 2016 год)

- 24 кадра в секунду,
 - более 152 000 кадров в фильме,
 - кадр обрабатывается одним процессором,
 - в среднем 19 часов на рендеринг одного кадра,
 - всего: 30 млн. процессорочасов
(потребовалось бы 3400 лет работы одного процессора).
- Бюджет: \$175 млн. Сборы в мире: \$966 млн.

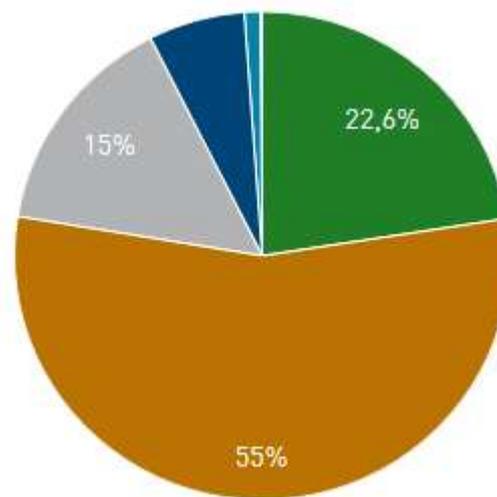


Топ500 самых мощных суперкомпьютеров мира. Распределение по областям (июнь, 2016)



По числу систем

- Industry
- Research
- Academic
- Government
- Vendor
- Classified



По производительности

Файл Правка Вид Журнал Закладки Инструменты Справка

Council on Competitiveness x +

www.compete.org Поиск

COUNCIL ON COMPETITIVENESS
www.compete.org

Member Login Donate

Compete.
Council on Competitiveness

About the Council Initiatives Publications News Events Membership Contact Us

educate next-generation innovators
deepen science and engineering skills
explore knowledge intersections
equip workers for change
support collaborative creativity
energize entrepreneurship
reward long-term strategy
build world-class infrastructure
invest in frontier research
attract global talent
create high-wage jobs

INNOVATE AMERICA

COMPETITIVENESS IS INNOVATION

Innovation occurs at the intersection of invention, insight, and investment that leads to the creation of social and economic value—it is

More →

ate of Technology

“If we want to out compete, we have to out compute”

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

*Межфакультетский учебный курс
“Введение в суперкомпьютерные вычисления, квантовую информатику,
нейросетевые и генетические алгоритмы”*

Введение в суперкомпьютерные технологии

Воеводин Вл.В.

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

voevodin@parallel.ru

ВМК МГУ - 2017