

# Системы высокопроизводительных вычислений в 2014–2015 годах: обзор достижений и анализ рынков

## Часть III. Суперкомпьютеры

Сергей Павлов, Dr. Phys.

Внимание читателей предлагается 3-я часть обзора систем высокопроизводительных вычислений (**ВПВ**) или *High-Performance Computing (HPC)*. Напомним, что такой пятичастный комплексный обзор мы готовим уже третий раз. В этом году уже были опубликованы первая [1] и вторая [2] части. Все обзоры свободно доступны на сайте нашего журнала [www.cad-cav-cae.ru](http://www.cad-cav-cae.ru).

Далее мы рассмотрим результаты развития мировой суперкомпьютерной отрасли, фиксируемые в рейтинге **Top500** ([www.top500.org](http://www.top500.org)), который был основан 23 года назад. Списки публикуются два раза в год – в июне и ноябре; новейший **46-й список** появился 16 ноября 2015 г. Аккумулируемые в этом рейтинге данные мы анализируем с 2005 года. Еще раз отметим, что достижения российского рынка ВПВ, отраженные в суверенном российском рейтинге **Топ50**, оцениваются через призму **Top500** в контексте прогресса общемирового суперкомпьютеростроения.

При изложении материала практически полностью сохранена структура 3-й части прошлогоднего обзора [3].

### Интегральные показатели рейтинга Top500

Суммарная производительность систем, включенных в 46-й список **Top500**, в сравнении с показателями, обнародованными год назад в 44-м списке, увеличилась более чем на треть (36.1%) – с 308.85 до 420.31 петафлопсов; напомним, что 1 *Pflops* =  $10^{15}$  операций с плавающей точкой (*flops*). При этом темпы роста производительности выросли в полтора раза: год назад этот показатель составлял 23.5% в сравнении с 42-м списком (250.08 *Pflops*).

За год суммарная производительность суперкомпьютеров, включенных в **Top500**, выросла на 36.1% и составила почти 420 *Pflops*.

Петафлопсовый барьер реального (по *LINPACK*) быстродействия преодолели 80 суперкомпьютеров из пятисот, или 16%. Эти системы инсталлированы в 17-ти странах (год назад таких стран было 13): США (30 систем), Япония (9), Германия (8), Китай (8), Великобритания (5), Франция (5), Австралия (2), Италия (2), Саудовская Аравия (2), Южная Корея (2), Нидерланды (1), Польша (1), Россия (1), Финляндия (1), Чехия (1), Швейцария (1) и Швеция (1).

Число “петафлопсников” за прошедший год увеличилось на 30, и распределились они по миру

следующим образом: США (+11), Германия (+4), Китай (+4), Япония (+4), Саудовская Аравия (+2), Южная Корея (+2), Австралия (+1), Польша (+1), Чехия (+1).

Реальное быстродействие, превышающее 1 петафлопс, сегодня демонстрируют 80 суперкомпьютеров, построенных в 17-ти странах.

Если оценивать по пиковой производительности, то к супервычислителям петафлопсного класса можно отнести, помимо упомянутых 80-ти, еще 71 систему. По странам они распределяются так: Китай (40), США (14), Япония (6), Германия (3), Австралия (1), Италия (1), Россия (1), Саудовская Аравия (1), Швейцария (1); кроме того, здесь появляются Индия (2 системы) и Испания (1), которые пока не располагают “петафлопсниками” по критерию реальной производительности.

По пиковому быстродействию к петафлопсному классу можно отнести 151 систему (30.2% из 500) из 19-ти стран.

### Лидеры рейтинга Top500

“Горячая десятка” новейшего 46-го списка **Top500** (табл. 1) отличается от первой десятки 44-го списка годичной давности [3, табл. 1] и первой десятки 42-го списка двухлетней давности [4, табл. 1] тремя новыми позициями.

Первая пятерка осталась неизменной, система *Piz Daint* опустилась на ступеньку ниже (с 6-го на 7-е место), а система *Stampede* съехала с 7-го места на 10-е. За подробным описанием параметров этих семи систем отсылаем читателя к позапрошлогоднему обзору [4]. При этом изменились их места в рейтинге энергоэффективности – *Green500* (табл. 1), 18-й список которого опубликован вслед за 46-м списком **Top500**.

Теперь, пропустив пункты 1–5, 7 и 10, перейдем к описанию новых систем:

6 На шестое место в 46-м списке рейтинга **Top500** поднялся супервычислитель **Trinity**, собранный американской компанией *Cray* в 2015 году в Лос-Аламосской национальной лаборатории (*Los Alamos National Laboratory*), расположенной в штате Нью-Мексико в США. Система с архитектурой *Cray XC-40* создана на базе 16-ядерных процессоров *Intel Xeon E5-2698v3* с тактовой частотой 2.3 GHz. Общее число ядер – 301 056, реальная

производительность – **8.101 Pflops**, пиковая (расчетная) производительность – 11.079 Pflops, вычислительная эффективность (отношение реальной производительности к пиковой) – 73.1%.

При этом по энергоэффективности (1377.7 Mflops/W) суперкомпьютер **Trinity** может претендовать лишь на 143-е место в *Green500* (в *Top500* эти данные указаны только для 241 системы из 500), но в первой десятке *Top500* он выглядит лучше – 8-е место.

8 Восьмое место в 46-м списке занимает суперкомпьютер **Hazel Hen** (тоже крейевский), инсталлированный в 2015 году в Центре высокопроизводительных вычислений (*Hochleistungsrechenzentrum*) в гор. Штутгарт в Германии. Система с архитектурой *Cray XC-40* создана на базе 12-ядерных процессоров *Intel Xeon E5-2680v3* с тактовой

частотой 2.5 GHz. Общее число ядер – 185 088, реальная производительность – **5.64 Pflops**, пиковая производительность – 7.404 Pflops, вычислительная эффективность – 76.2%.

Энергоэффективность (1560.21 Mflops/W) суперкомпьютера **Hazel Hen** соответствует 127-му месту в *Green500*, а в первой десятке *Top500* – 7-му месту.

9 На десятом месте в 46-м списке рейтинга расположился опять же крейевский суперкомпьютер **Shaheen II**, появившийся в предыдущем 45-м списке на 7-м месте. Система построена в Научно-технологическом университете имени короля Абдаллы (*King Abdullah University of Science and Technology*) в Саудовской Аравии. Зарекомендовавшая себя архитектура *Cray XC-40* применена и в этой системе, отличающейся от занявшего 6-ю позицию

**Таблица 1. Первая десятка международного суперкомпьютерного рейтинга Top500 в ноябре 2015 года**

Место в рейтинге Top500	Реальная производительность Pflops	Общее число процессорных ядер	Название компьютера, архитектура, применяемые процессоры и ускорители	Компания-производитель	Организация, где инсталлирован суперкомпьютер	Место в рейтинге Green500	Энергоэффективность, Mflops/W
1	33.86	3 120 000	<b>Tianhe-2</b> (NUDT TH-IVB-FEP) <i>Intel Xeon E5-2692</i> (12 ядер, 2.2 GHz) <i>Intel Xeon Phi 31S1P</i>	NUDT (Китай)	Национальный университет оборонных технологий (NUDT) (Чанша, Китай)	90	1901.5
2	17.59	56 0640	<b>Titan (Cray XK7)</b> <i>Opteron 6274</i> (16 ядер, 2.2 GHz) <i>NVIDIA K20x</i>	Cray (США)	Окридджская национальная лаборатория (штат Теннеси, США)	63	2142.8
3	17.17	1 572 864	<b>Sequoia (BlueGene/Q)</b> <i>Power BQC</i> (16 ядер, 1.6 GHz)	IBM (США)	Ливерморская национальная лаборатория им. Э. Лоуренса (штат Калифорния, США)	55	2176.6
4	10.51	705 024	<b>K computer</b> <i>SPARC64 VIIIfx</i> (8 ядер, 2.0 GHz)	Fujitsu (Япония)	Институт физико-химических исследований (Кобе, Япония)	214	830.2
5	8.59	786 432	<b>Mira (BlueGene/Q)</b> <i>Power BQC</i> (16 ядер, 1.6 GHz)	IBM (США)	Аргонская национальная лаборатория (штат Иллинойс, США)	56	2176.6
6	8.10	301 056	<b>Trinity (Cray XC40)</b> <i>Intel Xeon E5-2698v3</i> (16 ядер, 2.3 GHz)	Cray (США)	Лос-Аламосская национальная лаборатория (штат Нью-Мексико, США)	143	1377.7
7	6.27	115 984	<b>Piz Daint (Cray XC30)</b> <i>Xeon E5-2670</i> (8 ядер, 2.6 GHz) <i>NVIDIA K20x</i>	Cray (США)	Швейцарский национальный суперкомпьютерный центр (Лугано, Швейцария)	20	3185.9
8	5.64	185 088	<b>Hazel Hen (Cray XC40)</b> <i>Intel Xeon E5-2680v3</i> (12 ядер, 2.5 GHz)	Cray (США)	Центр высокопроизводительных вычислений (Штутгарт, Германия)	127	1560.2
9	5.54	196 608	<b>Shaheen II (Cray XC40)</b> <i>Intel Xeon E5-2698v3</i> (16 ядер, 2.3 GHz)	Cray (США)	Научно-технологический университет имени короля Абдаллы (Саудовская Аравия)	80	1953.8
10	5.17	462 462	<b>Stampede (PowerEdge C8220)</b> <i>Intel Xeon E5-2680</i> (8 ядер, 2.7 GHz) <i>Intel Xeon Phi SE10P</i>	Dell (США)	Техасский центр передовых компьютерных технологий (Остин, штат Техас, США)	157	1145.9

суперкомпьютера меньшим количеством 16-ядерных процессоров *Intel Xeon E5-2698v3 2.3 GHz* и меньшим общим числом ядер – 196 608. Соответственно, она обладает меньшей реальной (**5.537 Pflops**) и пиковой производительностью (7.235 Pflops), при чуть большей вычислительной эффективности – 76.5%.

По энергоэффективности (1953.77 Mflops/W) система **Shaheen II** заняла 80-е место в *Green500*, а в первой десятке *Top500* – 5-е место.

✓ **Былые рекордсмены еще в строю**

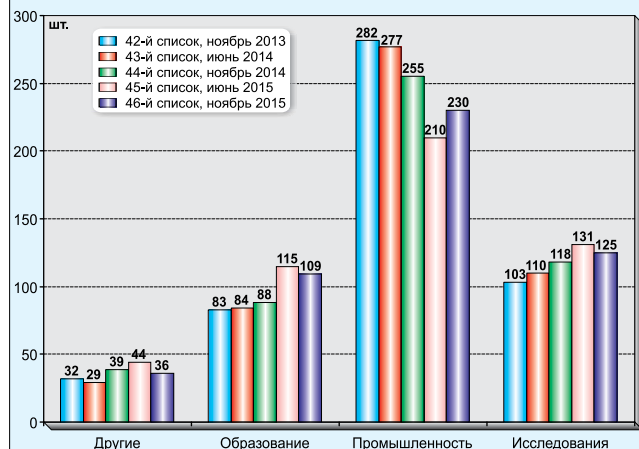
Краткая характеристика прежних систем-победителей, попавших и в первую десятку 46-го списка *Top500*:

• **лидером 46-го и пяти предыдущих (41–45) списков *Top500*** остается китайский суперкомпьютер **Tianhe-2** (на английском языке название звучит как *Milky Way-2*), разработанный и инсталлированный в

Национальном университете оборонных технологий (*National University of Defense Technology – NUDT*) в гор. Чанша. Рекордный на настоящий момент уровень его реальной производительности – **33.8627 Pflops**. Пиковая производительность составляет 54.9024 Pflops, а вычислительная эффективность – 61.68%. Система объединяет 32 тысячи 12-ядерных процессоров *Intel Xeon E5-2692* с тактовой частотой 2.2 GHz и 48 тысяч сопроцессоров *Intel Xeon Phi 31S1P* с 57-ю ядрами и тактовой частотой 1.1 GHz. Общее число процессорных ядер – 3 120 000.

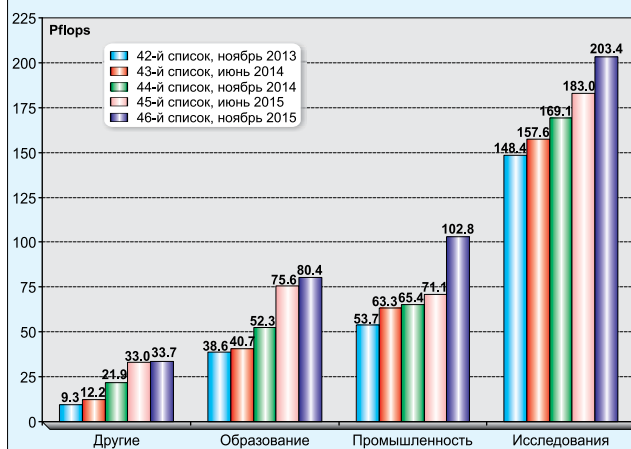
Рекордное быстродействие 33.8627 Pflops (по *LINPACK*), зафиксированное в шести последних списках *Top500* (с 41-го по 46-й), демонстрирует китайский суперкомпьютер *Tianhe-2*, сочетающий в себе 3 120 000 ядер процессоров и сопроцессоров от компании *Intel*.

*Implementation segments of supercomputers: amount of systems, listed in Top500 (2013–2015, 42<sup>nd</sup>–46<sup>th</sup> lists)*



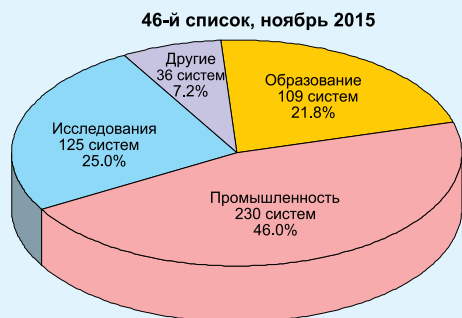
*Рис. 1. Области применения суперкомпьютеров в период 2013–2015 гг.: количество систем, включенных в Top500 (списки 42–46)*

*Implementation segments of supercomputers: total performance of systems, listed in Top500 (2013–2015, 42<sup>nd</sup>–46<sup>th</sup> lists)*



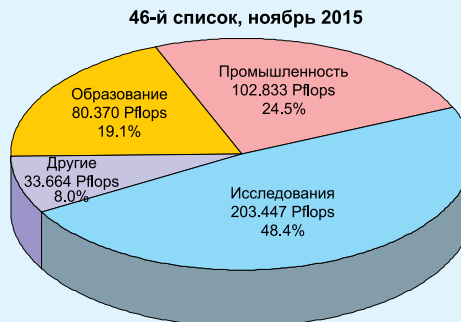
*Рис. 2. Области применения суперкомпьютеров в период 2013–2015 гг.: суммарная производительность систем, включенных в Top500 (списки 42–46)*

*Shares of amount of systems, which correspond to implementation segments of supercomputers, listed in Top500: 2015, 46<sup>th</sup> list*



*Рис. 3. Количественное распределение систем из Top500 по областям применения в 2015 г. (список 46)*

*Shares of total performance, which correspond to implementation segments of supercomputers, listed in Top500: 2015, 46<sup>th</sup> list*



*Рис. 4. Распределение суммарной производительности систем из Top500 по областям применения в 2015 г. (список 46)*

CAD/CAM/CAE Observer по данным портала [www.top500.org](http://www.top500.org)

CAD/CAM/CAE Observer по данным портала [www.top500.org](http://www.top500.org)

- суперкомпьютер **Titan** с гибридной архитектурой от американской компании **Cray** – лидер 40-го списка **Top500**. Реальное быстроедействие – **17.59 Pflops**, пиковое – 27.113 **Pflops**, вычислительная эффективность – 64.9%;

- суперкомпьютер **Sequoia** от компании **IBM** – победитель из 39-го списка. Реальная производительность – **17.173 Pflops**, пиковая – 20.133 **Pflops**, вычислительная эффективность – 85.3%;

- японский **K computer** компании **Fujitsu** – лидер 37-го и 38-го списков. Реальная производительность – **10.51 Pflops**, пиковая – 11.28 **Pflops**, вычислительная эффективность – 93.2%.

### ✓ Лучшие производители лучших систем

Среди производителей лидирующих суперкомпьютеров рекордсменом стала компания **Cray**: в первую десятку 46-го списка входят пять её систем с общей производительностью 43.139 **Pflops**. Год назад в первую десятку попали три её системы, в сумме обеспечивающие 27.438 **Pflops**. Два года назад в первой десятке было две системы **Cray** с суммарным показателем 23.861 **Pflops**.

Второе место – у компании **IBM**: в первую десятку 46-го списка входят теперь только две её системы с общей производительностью 25.76 **Pflops**. Год и два года назад компания **IBM** лидировала – с четырьмя и пятью системами, которые выдавали на-гора 35.061 и 37.959 **Pflops** соответственно.

Компания **Cray** – лидирующий производитель систем из первой десятки **Top500**; суммарная производительность пяти её лучших суперкомпьютеров составляет 43.139 **Pflops**.

## Области применения систем ВПВ

Наибольшее количество суперкомпьютеров из **Top500** работает в промышленности (**industry**): в 46-м списке таких 230 (46% от общего числа систем). Для научных исследований (**research**) применяются 125 систем (25%), а в образовании (**academic**) – 109 систем или 21.8% (рис. 1, 3). Год назад, в 44-м списке, распределение было следующим: в промышленности – 255 систем (51%); в научных исследованиях – 118 систем (23.6%), в образовании – 88 (17.6%).

Если рассматривать число систем для каждого пользовательского сегмента на более длительном временном отрезке, то изменения можно интерпретировать как колебания относительно средних значений, причем средние значения за 5 и 10 лет отличаются незначительно. Для списков с 37-го (июнь 2010 года) по 46-й (ноябрь 2015 года) средние значения получаются следующими: промышленность – 260, исследования – 117, образование – 92, а для списков с 26-го (ноябрь 2005 года) по 46-й – 273, 111, 87 систем соответственно.

По суммарной производительности впереди идут суперкомпьютеры для науки – 203.4 **Pflops**

(48.4% от общей производительности всех систем, включенных в рейтинг). На промышленность работает совокупная вычислительная мощность 102.8 **Pflops** (24.5%), а на образование – 80.4 **Pflops** или 19.1% (рис. 2, 4). Следует подчеркнуть, что во всех пользовательских сегментах наблюдается значительный прирост производительности. И год, и два года назад показатели суммарной производительности были намного скромнее: в 44-м списке – 169.1, 65.4 и 52.4 **Pflops**; а в 42-м списке – 148.4, 53.7 и 38.6 **Pflops**. Напомним, что сфера образования опережала промышленность по этому важному параметру в 39-м, 40-м и 45-м списках.

Сфера исследований по суммарной производительности применяемых суперкомпьютеров в ноябре 2015 года обгоняет и промышленность, и образование – в 2 и 2.5 раза соответственно. Эта тенденция сохраняется на длительном временном отрезке – средние значения опережения, взятые за период с ноября 2005 года по ноябрь 2015 года, составляют соответственно 2 и 2.8 раза.

Опережающими темпами растет вычислительная мощность научно-исследовательского сектора, обеспечивающего перспективное развитие всех отраслей, где будут востребованы суперкомпьютеры.

В группу “другие” на рис. 1÷4 объединены области применения, которые не столь велики – как по числу инсталляций, так и по суммарной производительности. Туда попадают суперкомпьютеры, являющиеся объектом экспериментов, которые проводят их разработчики (**vendor**); системы, применяемые для решения задач распознавания и шифрования (**classified**), а также для задач государственного управления (**government**).

Согласно данным российского рейтинга **Top50** (рис. 5), в сентябре 2015 г. для научных

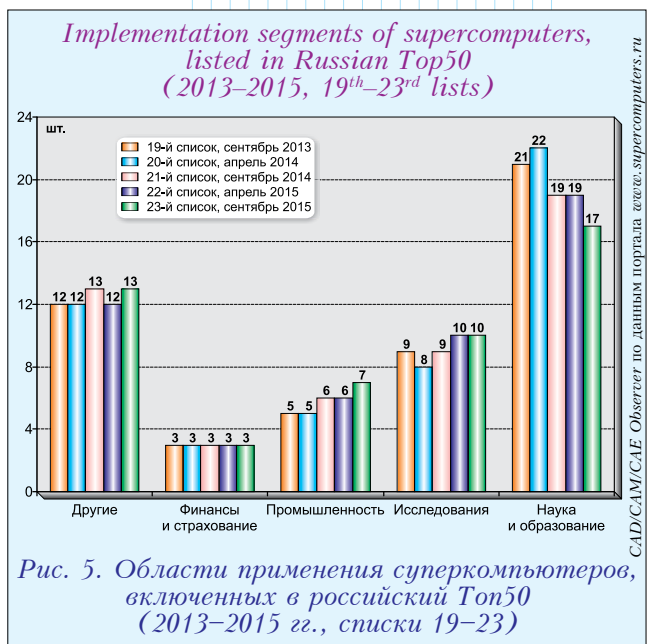
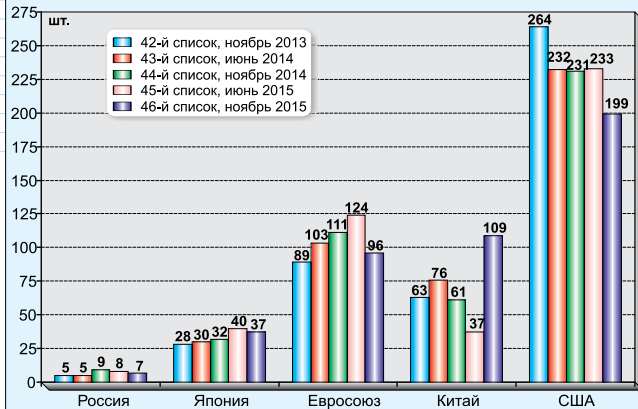


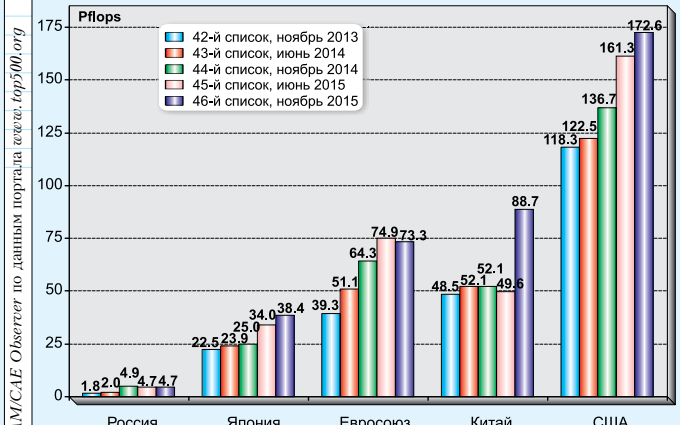
Рис. 5. Области применения суперкомпьютеров, включенных в российский **Top50** (2013–2015 гг., списки 19–23)

*Amount of supercomputers, listed in Top500, installed in developed and emerging regions (2013–2015, 42<sup>nd</sup>–46<sup>th</sup> lists)*



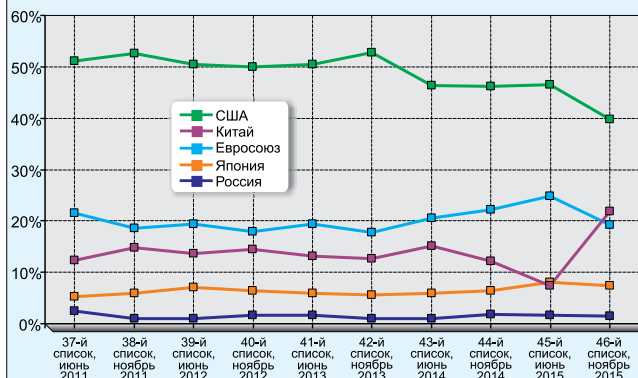
*Рис. 6. Количество суперкомпьютеров из Top500 в развитых и развивающихся регионах мира (2013–2015 гг., списки 42–46)*

*Total performance of supercomputers, listed in Top500, installed in developed and emerging regions (2013–2015, 42<sup>nd</sup>–46<sup>th</sup> lists)*



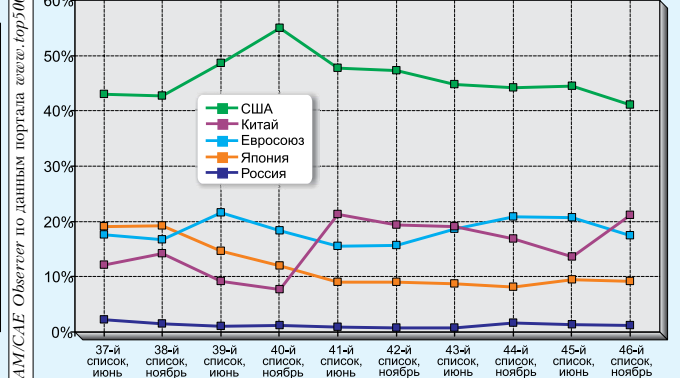
*Рис. 7. Суммарная производительность суперкомпьютеров из Top500 в развитых и развивающихся регионах мира (2013–2015 гг., списки 42–46)*

*Regional shares of amount of supercomputers for 2011–2015 (Top500, 37<sup>th</sup>–46<sup>th</sup> lists)*



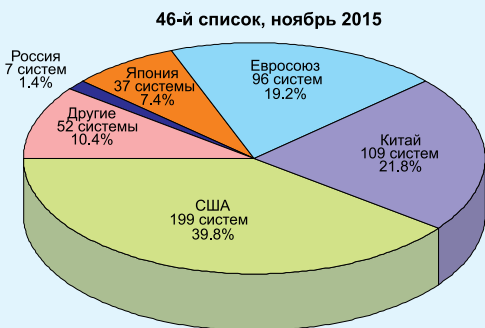
*Рис. 8. Изменение региональных долей от общего количества суперкомпьютеров из Top500 в период 2011–2015 гг. (списки 37–46)*

*Regional shares of total performance of supercomputers for 2011–2015 (Top500, 37<sup>th</sup>–46<sup>th</sup> lists)*



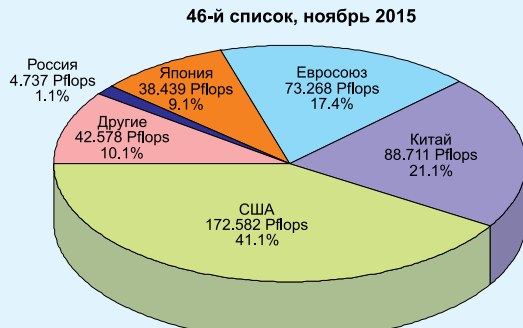
*Рис. 9. Изменение региональных долей от суммарной производительности суперкомпьютеров из Top500 в период 2011–2015 гг. (списки 37–46)*

*Shares of amount of supercomputers, installed in developed and emerging regions, listed in Top500 – 2015, 46<sup>th</sup> list*



*Рис. 10. Региональное распределение суперкомпьютеров из Top500 в 2015 г. (список 46)*

*Shares of total performance of supercomputers, installed in developed and emerging regions, listed in Top500 – 2015, 46<sup>th</sup> list*



*Рис. 11. Региональное распределение суммарной производительности суперкомпьютеров из Top500 в 2015 г. (список 46)*

исследований в России было задействовано 10 систем, на промышленность работало 7 систем, в области финансов и страхования – 3. В сфере высшего образования и науки сейчас занято 17 супервычислителей (напомним, что в марте 2011 года в этой сфере работало 30 систем, то есть на 13 больше). Для сравнения с состоянием годичной и двухгодичной давности приведем цифры на сентябрь 2014-го (9, 6, 3 и 19 систем) и на сентябрь 2013-го (9, 5, 3 и 21 система) соответственно.

## Региональный срез рейтинга Top500

Наша региональная “табель о рангах” позволяет препарировать состояние дел в США, Японии, Евросоюзе, Китае и России. Данные за два последних года (списки 42÷46 рейтинга Top500) наглядно отображены на диаграммах (рис. 6÷12). На рис. 8, 9 можно проследить тенденции в развитии регионов, построивших супервычислители петафлопсного класса и имеющих амбиции достичь экзафлопсный рубеж, за последние пять лет (списки 37÷46).

### ✓ США

По данным на ноябрь 2015 года, в США инсталлировано 199 суперкомпьютеров или 39.8% от общего числа систем уровня Top500 – на 34 меньше, чем полгода назад. В 43-м, 44-м и 45-м списках этот показатель составлял 46.4%, 46.2%, 46.6% соответственно. Ранее, на протяжении всего периода существования наших обзоров (2005–2013 гг.), доля США неизменно превышала половину.

В ноябре 2015 года доля функционирующих в США суперкомпьютеров уровня Top500 впервые стала ниже 40% от общего числа систем, включенных в этот рейтинг.

В ноябре 2015 года суммарная производительность упомянутых систем достигла 172.6 Pflops. За год этот показатель вырос на 36.1% – с 136.7 Pflops. Доля США в общей производительности Top500 составила 41.1%. Напомним, что, начиная с июня 2011 года, доля США постоянно составляла менее половины; исключением был только 40-й список в ноябре 2012 года – 54.9%.

### ✓ Китай

За прошедший год доля Китая в Top500 выросла в 1.79 раза – до 21.8% (109 систем) в 46-м списке по

сравнению с 14.4% (61 система) в 44-м списке. Таким образом, превзойден максимум, который был зафиксирован в июне 2014 года (43-й список) – 76 систем (15.2%).

По суммарной производительности топовых суперкомпьютеров (88.7 Pflops или 21.1%) в 46-м списке Китай вновь обошел Евросоюз и занял 2-е место. До этого Поднебесная занимала вторую позицию в списках 41÷43 – после “великого китайского скачка” с 4-й позиции (40-й список), когда почти четырехкратный прирост суммарной производительности позволил обогнать ЕС и Японию, которые до этого не раз получали серебро. Причиной столь стремительного взлета стала установка рекордсмена шести последних списков – суперкомпьютера Tianhe-2.

Обойдя Евросоюз, на 2-ю позицию в региональном рейтинге вернулся Китай, что стало результатом годового прироста числа китайских систем в Top500 на 78.7%. Сегодня 109 их суперкомпьютеров демонстрируют суммарную производительность 88.7 Pflops; за год этот показатель увеличился на 70.3%.

Если сравнивать 46-й список с 45-м, то показатели роста числа систем и суммарной производительности китайских суперкомпьютеров окажутся еще более внушительными. Таким образом, можно констатировать, что американские протекционистские меры (мы о них упоминали в первой части обзора [1]), введенные против четырех организаций,

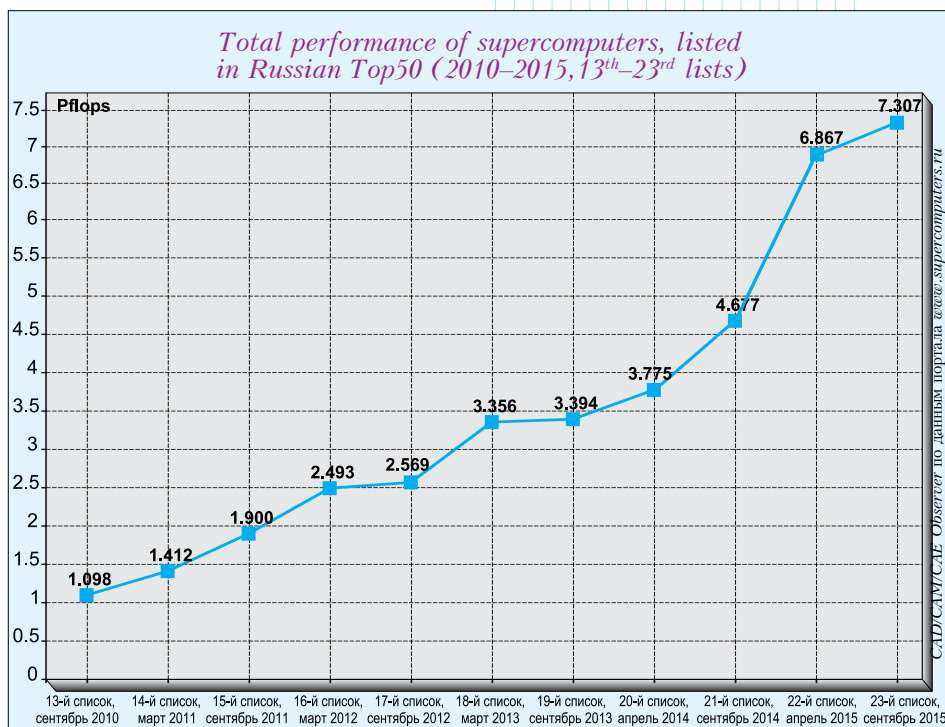


Рис. 12. Динамика роста суммарной производительности суперкомпьютеров, включенных в российский Top50, за период 2010–2015 гг. (списки 13–23)

обладающих наиболее развитым потенциалом в китайской суперкомпьютерной отрасли, скорее сыграли на руку Китаю, поскольку способствовали становлению двух крупных компаний – производителей супервычислителей.

### ✓ Евросоюз

Число систем из стран ЕС в 46-м списке *Top500* составило 96 (19.2%), причем за последний год оно сократилось: в ноябре 2014 года таких систем было 111 (22.2%).

Суммарная производительность этих 96-ти систем составляет 73.3 *Pflops* (17.4% от общего значения для *Top500*), что соответствует 3-му месту, занятому ЕС. За год суммарная производительность увеличилась только в 1.14 раза, что не позволило ЕС сохранить 2-е место: в ноябре 2014 года этот показатель был равен 64.3 *Pflops* (20.8% от общего значения для *Top500*).

Три первых места в Евросоюзе стабильно занимают Германия (29.9 *Pflops*, 33 системы), Франция (12.3 *Pflops*, 18 систем) и Великобритания (11.6 *Pflops*, 18 систем). На долю этих трех стран приходится 71.9% суперкомпьютеров из *Top500* на территории ЕС и 73.3% их суммарной производительности.

Год назад, в ноябре 2014-го, показатели лидеров суперкомпьютерной отрасли ЕС были следующими:

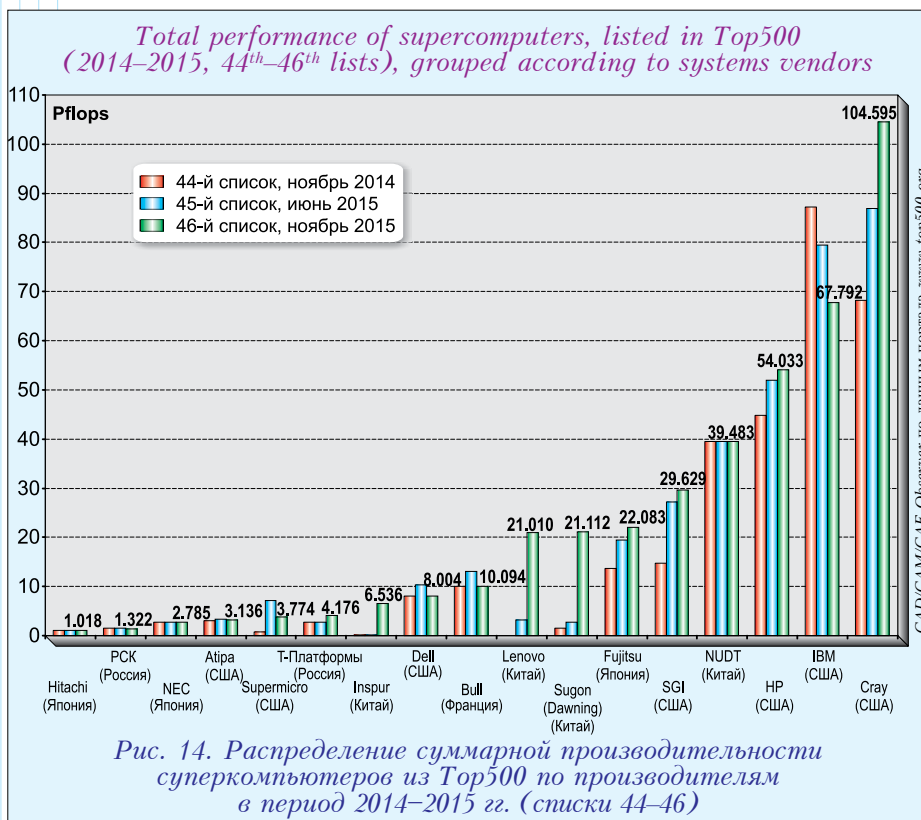
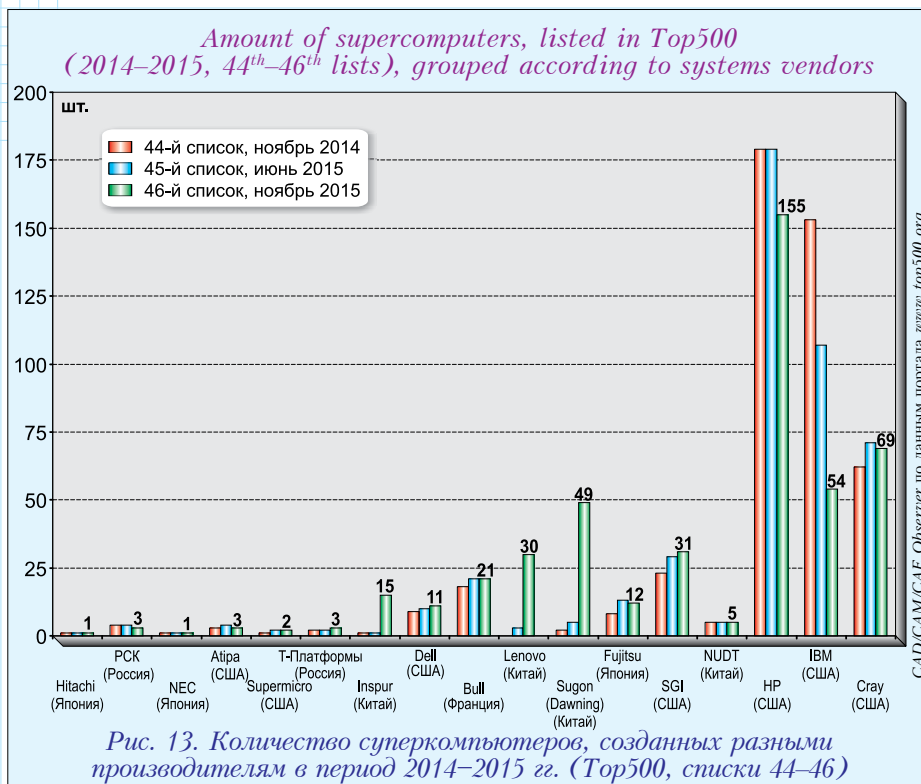
Германия (29.9 *Pflops*, 33 системы), Великобритания (15.4 *Pflops*, 30 систем) и Франция (14.1 *Pflops*, 30 систем), что соответствовало наличию у этих стран 77.5% суперкомпьютеров из *Top500* на территории ЕС и 77.1% их суммарной производительности.

Отметим, что в 46-й список *Top500* попали супервычислители 15-ти из 28-ми стран Евросоюза. Год назад таких стран было меньше – 13.

### ✓ Япония

Число установленных в Стране Восходящего Солнца систем за год увеличилось

с 32-х (6.4%) в 44-м списке до 37-ми (7.4%) в 46-м списке. Их суммарная производительность достигла 38.4 *Pflops* (9.2% от общей), увеличившись в полтора раза.



В последних шести списках (с 41-го по 46-й) Япония неизменно занимает четвертое место по величине суммарной производительности. Напомним, что на 2-й позиции с показателями 11.2 *Pflops* (19% от общей) и 14.2 *Pflops* (19.2%) эта страна находилась в июне и ноябре 2011 года благодаря рекордсмену 37-го и 38-го списков – *K computer*.

✓ **Россия**

Российская Федерация в 46-м списке *Top500* представлена семью системами (1.4% от общего числа) с суммарной производительностью 4.737 *Pflops* (1.13% от общего значения). Год назад, в 44-м списке, показатели были выше: девять систем (1.8% от общего числа) с суммарной производительностью 4.883 *Pflops* (1.58% от общей). Два года назад, в 42-м списке, показатели были хуже: пять систем (1% от общего числа) с суммарной производительностью 1.885 *Pflops* (0.74% от общей). Три года назад в юбилейный 40-й список вошло восемь систем (1.6%) с суммарной производительностью 1.991 *Pflops* (1.2% от общей).

Надо отметить, что по состоянию на ноябрь 2015 года суммарная мощность российских суперкомпьютеров из *Top500* (4.737 *Pflops*) оказалась существенно меньше общей производительности всех систем, включенных в сентябре 2015 года в 23-й список российского рейтинга *Top50* – 7.307 *Pflops* (рис. 12).

Год назад, в ноябре 2014-го, суммарная производительность российских суперкомпьютеров из *Top500* (4.883 *Pflops*) была немного больше общей производительности всех систем, включенных в сентябре 2014 года в 21-й список российского рейтинга *Top50* – 4.667 *Pflops*. Это было связано с запуском первого российского петафлопсника (суперкомпьютера с реальной производительностью, превышающей один петафлопс), введенного в строй

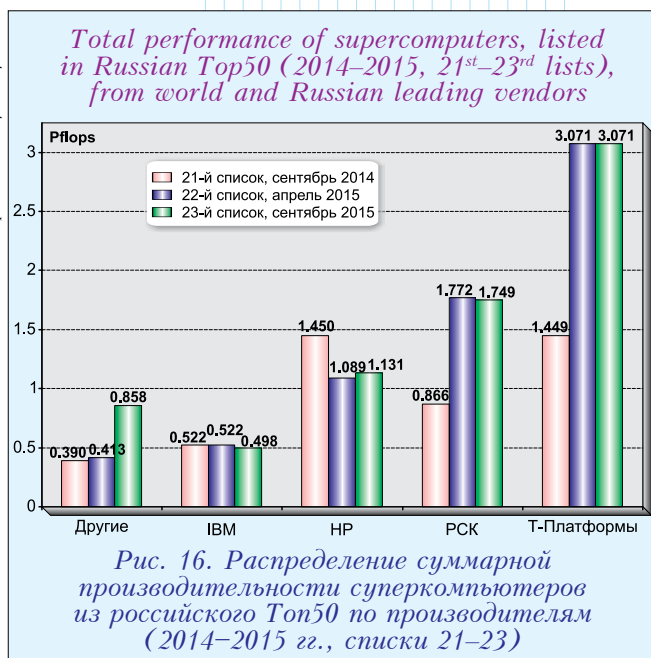
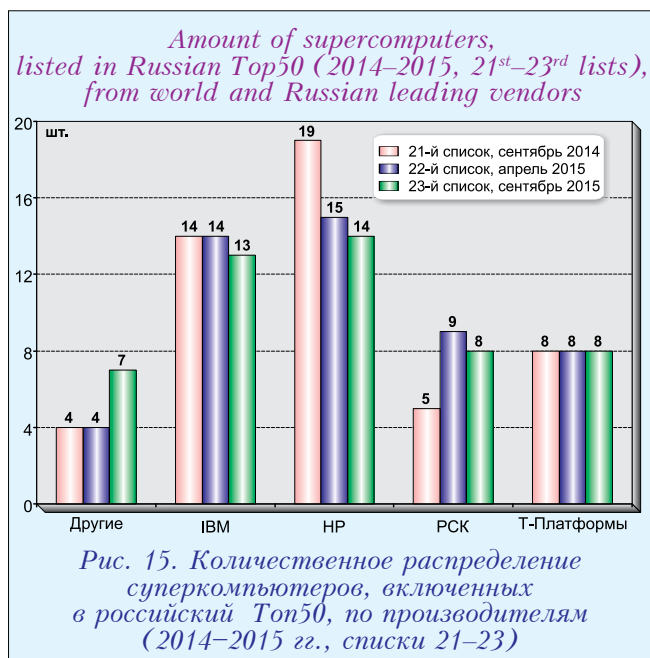
компанией “Т-Платформы” уже после обнародования 21-го списка *Top50*. Работает он в Суперкомпьютерном центре МГУ им. М.В. Ломоносова, имеет реальную производительность 1.849 *Pflops*, пиковую (расчетную) производительность 2.576 *Pflops* и вычислительную эффективность 71.7%; отставание по производительности от мирового лидера, китайского *Tianhe-2*, составляет 18.3 раза. По состоянию на ноябрь 2015 года, уровень быстродействия этого супервычислителя соответствует 35-му месту в *Top500*. Год назад, в 44-м списке, этот показатель соответствовал 22-му месту.

Новым достижением компании “Т-Платформы” является завершение постройки суперкомпьютера **JURECA** в Исследовательском центре Юлих (*Forschungszentrum Juelich*) в Германии. Система имеет реальную производительность 1.425 *Pflops*, пиковую производительность 1.678 *Pflops* и вычислительную эффективность 85.3%. Это первый зарубежный петафлопсник, построенный на базе вычислительного оборудования, разработанного российской компанией. Достижение соответствует 49-му месту в *Top500*.

Первый зарубежный петафлопсник, созданный российской компанией “Т-Платформы” (реальное быстродействие – 1.425 *Pflops*), занял 49-е место в 46-м списке *Top500*.

**Ведущие производители суперкомпьютеров**

Показатели ведущих производителей суперкомпьютеров из *Top500* представлены на рис. 13, 14. Компании отранжированы в соответствии с суммарной реальной производительностью их систем, набравшие проходной балл в *Top500*. Производители, не набравшие в сумме петафлопс, в расчет не принимались.





Рассматриваемые компании (организации) относятся к следующим трем группам (каждая компания упоминается только один раз):

1) производители суперкомпьютеров, входящих в первую десятку *Top500*, – *National University of Defense Technology (NUDT)*, *Cray*, *IBM*, *Fujitsu*, *Dell*;

2) участники мирового рынка *HPC*-систем – *Hewlett-Packard*, *SGI*, *Lenovo*, *Bull*;

3) участники региональных рынков *HPC*-систем – *Sugon Information Industry (Dawning)*, *Inspur*, “Т-Платформы”, *Super Micro Computer*; *Atipa Technologies* (гор. Лоренс, штат Канзас, США), *HPC*-подразделение компании *Microtech Computers*; *NEC*, “РСК”, *Hitachi*.

Напомним, что в *Top500* всё еще входят две системы, которые инсталлировала компания *Sun Microsystems*, приобретенная в 2009 году компанией *Oracle*, хотя сама *Oracle* разработкой суперкомпьютеров не занимается, даже несмотря на наличие 32-ядерного процессора собственной разработки.

По количеству установленных суперкомпьютеров, начиная с 41-го списка, лидирует *Hewlett-Packard (HP)*. В трех последних списках (ноябрь 2014 г., июнь и ноябрь 2015 г.) показатели *HP* такие: 179, 179 и 155 систем соответственно (рис. 13). На 2-е место в 46-м списке вышла компания *Cray*, в активе которой 62, 71 и 69 систем. На 3-е место в 46-м списке (после продажи своего серверного бизнеса, базирующегося на процессорах с системой команд *x86*) переместилась корпорация *IBM*, построившая 153, 107 и 54 системы из пятисот соответственно.

*Amount of supercomputers, listed in Top500, 37<sup>th</sup>–46<sup>th</sup> lists, based on various multicore processors – rise of popularity and the skids for processors with 2, 4, 6, 8, 9, 10 cores for 2011–2015*

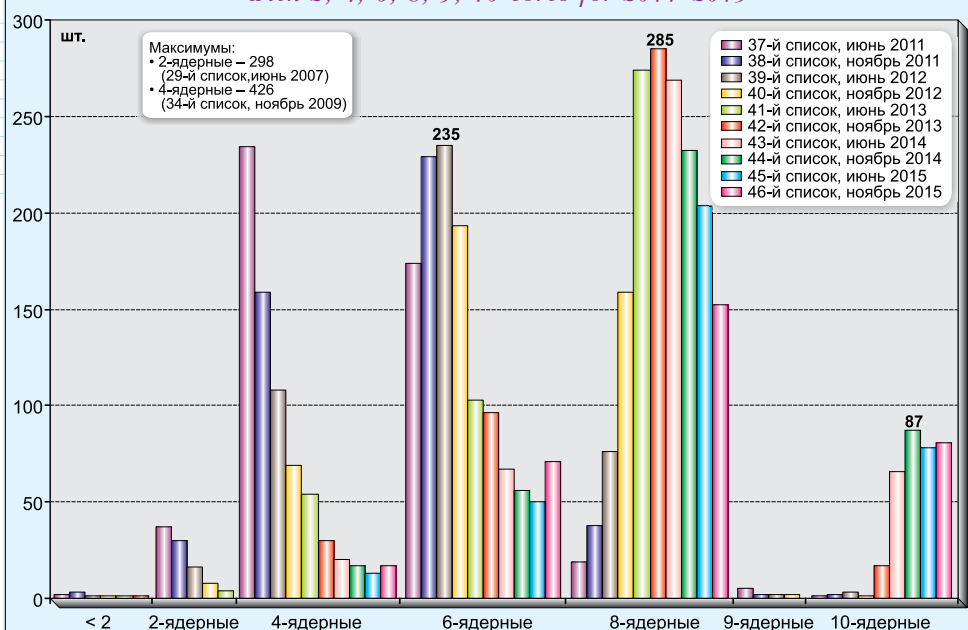


Рис. 17. Рост и падение популярности процессоров с 2, 4, 6, 8, 9 и 10 ядрами в суперкомпьютерах из *Top500* в период 2011–2015 гг. (списки 37–46)

*Amount of supercomputers, listed in Top500, 37<sup>th</sup>–46<sup>th</sup> lists, based on various multicore processors – rise of popularity and the skids for processors with 12, 14, 16, 18, 32, 60 cores for 2011–2015*

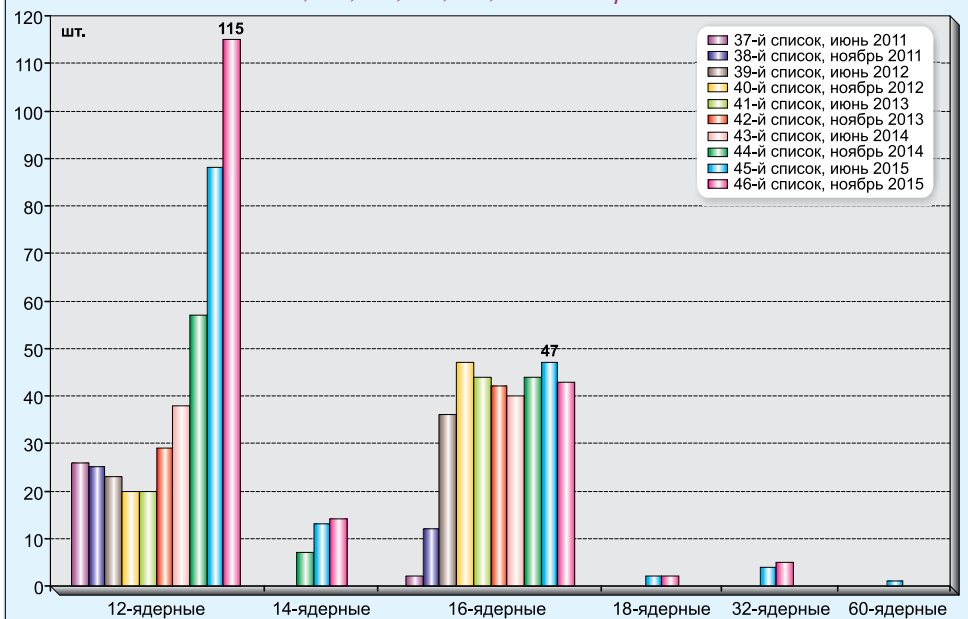


Рис. 18. Изменение популярности процессоров с 12, 14, 16, 18, 32 и 60 ядрами в суперкомпьютерах из *Top500* в период 2011–2015 гг. (списки 37–46)

Лидером по числу построенных суперкомпьютеров уровня *Top500* является компания *Hewlett-Packard* – на её счету 155 систем.

Следующие три места заняли компании *Sugon*, *SGI* и *Lenovo* – в ноябре 2015 года в *Top500* вошло 49, 31 и 30 их систем соответственно. Таким образом, китайские компании подбираются к лидирующей тройке.

В аспекте суммарной производительности установленных систем лидером *Top500*, начиная с 45-го списка, стала компания *Cray* (рис. 14). В ноябре 2014 года, в июне и ноябре 2015 года этот важнейший показатель имел значения 68.2, 86.9 и 104.6 *Pflops* соответственно.

На второй позиции по суммарной производительности теперь находится *IBM*. Этот показатель в ноябре 2014 года, в июне и ноябре 2015 года имел значения 87.1, 79.4 и 67.8 *Pflops* соответственно.

Третью позицию занимают системы от *HP* – 44.9, 52 и 54 *Pflops*.

На 4-м месте с показателем 39.5 *Pflops* в 46-м списке находится *NUDT*, разработчик рекордсмена – *Tianhe-2*. Наиболее высоким достижением для *NUDT* было 2-е место (41-й список *Top500*).

С 44-го списка пятую позицию в 46-м списке занимает компания *SGI* (показатель – 29.6 *Pflops*). Шестой компанией остается *Fujitsu* (22.1 *Pflops*).

Компания *Cray* остается бесспорным лидером по суммарной производительности систем в *Top500*, и теперь её суперкомпьютеры впервые преодолели порог в сто петафлопс – 104.6 *Pflops*.

На российском рынке ситуация следующая. После снятия запрета на профессию компания “Т-Платформы” вернула себе лидерство: в сентябре 2015 года, по данным 23-го списка *Top500* (рис. 15, 16) суммарная производительность восьми её систем составила **3.071 Pflops**. На 2-е место поднялась компания “РСК” (1.749 *Pflops*, 8 систем). Третьим местом теперь довольствуется *Hewlett-Packard* (1.131 *Pflops*, 14 систем). Четвертое место досталось компании *IBM*, производительность 13-ти систем которой на российском рынке не достигает и половины петафлопса – 0.498 *Pflops*.

### Число процессорных ядер в суперкомпьютерах

Статистика использования многоядерных процессоров для построения суперкомпьютеров, входящих в *Top500*, показана на рис. 17, 18.

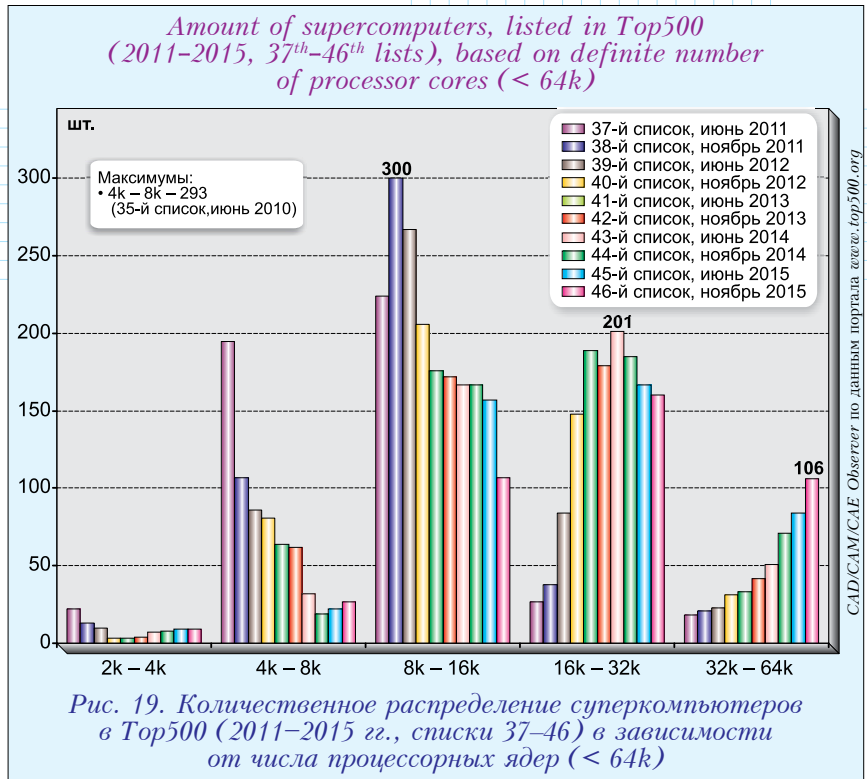


Рис. 19. Количественное распределение суперкомпьютеров в *Top500* (2011–2015 гг., списки 37–46) в зависимости от числа процессорных ядер (< 64k)

В 46-м списке наиболее популярными остаются 8-ядерные процессоры – на их базе построено 152 системы. Напомним, что пик популярности 8-ядерных процессоров пришелся на 42-й список – на их базе было построено 285 систем; 6-ядерные процессоры были наиболее применяемыми в 39-м списке (235 систем), а 4-ядерные – в 34-м списке (426 систем).

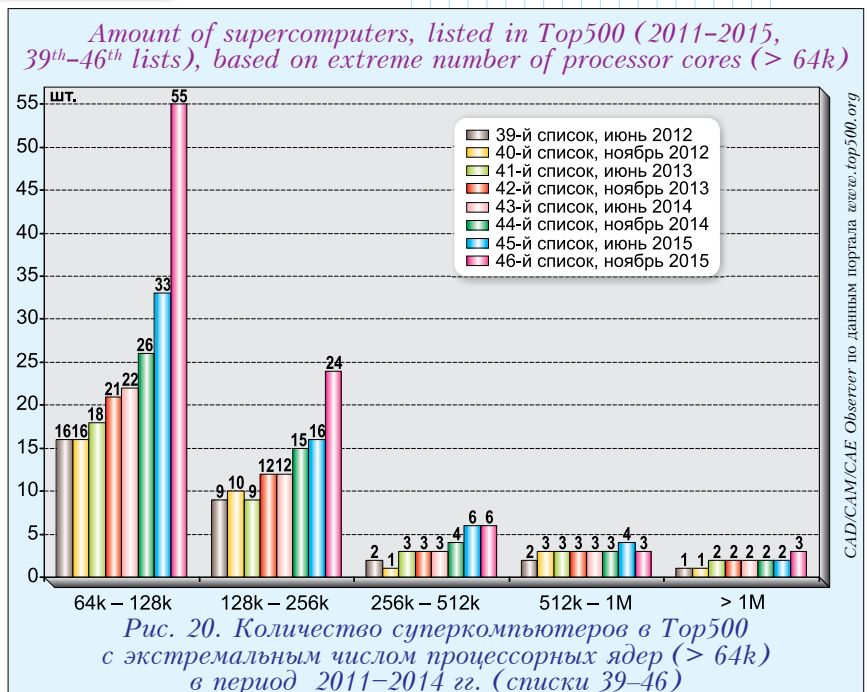


Рис. 20. Количество суперкомпьютеров в *Top500* с экстремальным числом процессорных ядер (> 64k) в период 2011–2014 гг. (списки 39–46)

Наибольшей популярностью при строительстве суперкомпьютеров, включенных в 46-й список *Top500*, пользовались 8-ядерные процессоры, на базе которых создано 152 системы.

Растет популярность 12-ядерных процессоров, на которых построено 115 систем, включенных в 46-й список *Top500*. Пик использования 16-ядерных процессоров пока приходится на 45-й список (47 супервычислителей), а 10-ядерных процессоров – на 44-й список (87 систем). Суперкомпьютеры на 9-ядерных процессорах присутствовали в *Top500* лишь до 40-го списка.

За прошедший год появились суперкомпьютеры на базе 18-ядерных (2 системы в 46-м списке), 32-ядерных (5 систем). Опробована одна система, построенная с использованием только 60-ядерных ускорителей (45-й список).

Наиболее распространенное суммарное число ядер в одной системе сейчас лежит в пределах от 16k до 32k, где  $k = 1024$ . В текущем 46-м списке таких систем оказалось 160, а пик популярности пока приходится на 43-й список – 201 система (рис. 19).

Суперкомпьютеры с рекордными характеристиками содержат значительно больше ядер – их число превышает 256k (рис. 20). За четыре года количество таких систем возросло с двух до двенадцати. Рекордсменом в этой номинации является *Tianhe-2*, лидер 41-го списка *Top500*: общее число его ядер равно 3 120 000 или 2.98M ( $M = 1024 \times 1024$ ). Далее следуют системы:

- *Sequoia*, лидер 39-го списка *Top500*, у которой 1 572 864 ядра (1.5M);
- *Shoubu* с 1 181 952 ядрами (1.13M), занимающая 133-е место в 46-м списке (разработчики – японские компании *PEZY Computing* и *Exascalcr*);
- *Mira* – 786 432 ядра (0.75M);
- *K computer*, лидер списков 2011 года, – 705 024 ядра (0.67M);
- *Titan*, лидер 40-го списка, – 560 640 ядер (0.53M).

Отметим, что из шести названных систем три являются гибридными.

Для супервычислителей из российского *Top500* этот показатель значительно скромнее (рис. 21). В 23-м списке, опубликованном в сентябре 2015 года, всего пять систем из 50-ти имеют от 16k до 32k процессорных ядер (а это наиболее популярная конфигурация в *Top500* – 160 систем). Как и три года назад, лишь один супервычислитель – “Ломоносов”, предыдущий лидер российского *Top500*, – может похвастаться

Amount of supercomputers, listed in Russian Top50 (2014–2015, 21<sup>st</sup>–23<sup>rd</sup> lists), based on definite number of processor cores

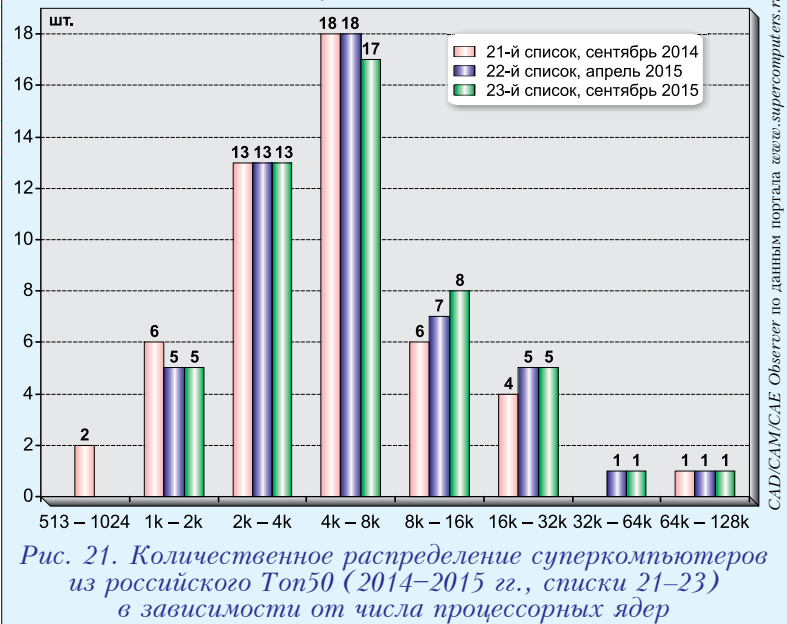


Рис. 21. Количественное распределение суперкомпьютеров из российского Top50 (2014–2015 гг., списки 21–23) в зависимости от числа процессорных ядер

наличием более 64k ядер (система имеет гибридную архитектуру). Общее количество ядер у него достигает 78 660 (чуть меньше 76.8k), в том числе 29 820 ядер графических процессоров. К категории систем с числом ядер от 32k до 64k (это вторая наиболее популярная конфигурация в *Top500* – 106 систем) относится только нынешний лидер российского *Top500*, у которого насчитывается 37 120 ядер (в том числе 19 200 ядер графических процессоров).

Amount of supercomputers, listed in Top500 (2014–2015, 44<sup>th</sup>–46<sup>th</sup> lists), with hybrid architecture based on definite number of co-processor and graphic (GPU) processor cores

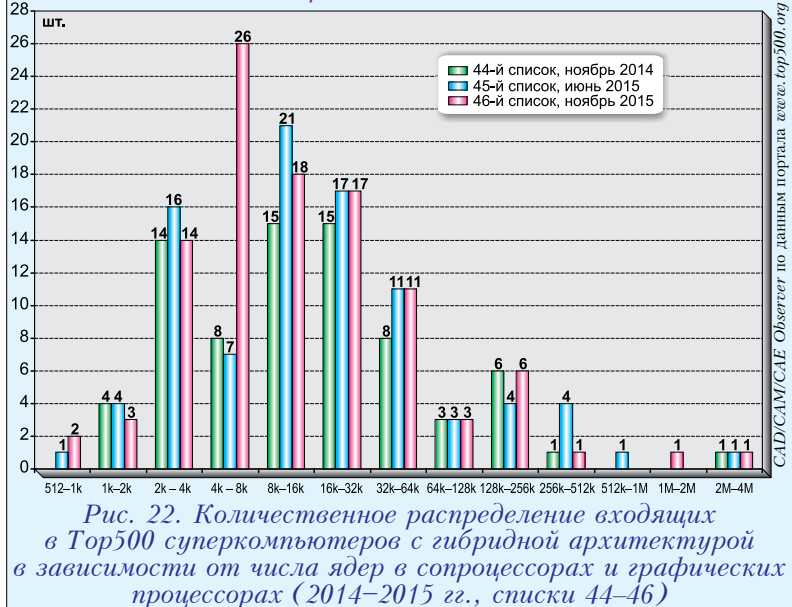


Рис. 22. Количественное распределение входящих в *Top500* суперкомпьютеров с гибридной архитектурой в зависимости от числа ядер в сопроцессорах и графических процессорах (2014–2015 гг., списки 44–46)

## Суперкомпьютеры с гибридной архитектурой

В текущем 46-м списке *Top500* доля систем с гибридной архитектурой превысила пятую часть (20.6% или 103 системы), увеличившись более чем на треть по сравнению с 44-м списком годичной давности, когда их было 15% (75 систем). Диаграмма на рис. 22 позволяет сопоставить число гибридных супервычислителей, обладающих различным суммарным количеством ядер графических процессоров или сопроцессоров, используемых для ускорения вычислений.

За год число суперкомпьютеров с гибридной архитектурой выросло более чем на треть и достигло 103, что составляет 20.6% от включенных в *Top500* систем.

В первой десятке *Top500* сейчас представлено четыре гибридных системы: *Tianhe-2* (1-е место), *Titan* (2-е место), *Piz Daint* (7-е место) и *Stampede* (10-е место).

В ноябре 2015 года среди гибридных систем наиболее популярной является комбинация “*Intel + NVIDIA GPU*”. Всего в *Top500* таких систем насчитывается 63 (рис. 23), а год и два назад их было 43 и 34 соответственно. На втором месте находится сочетание “*Intel + Xeon Phi*” (28 суперкомпьютеров); за год с ноября 2014 года прибавилось 7 таких систем, а с ноября 2013 года это направление приросло 16-тью системами.

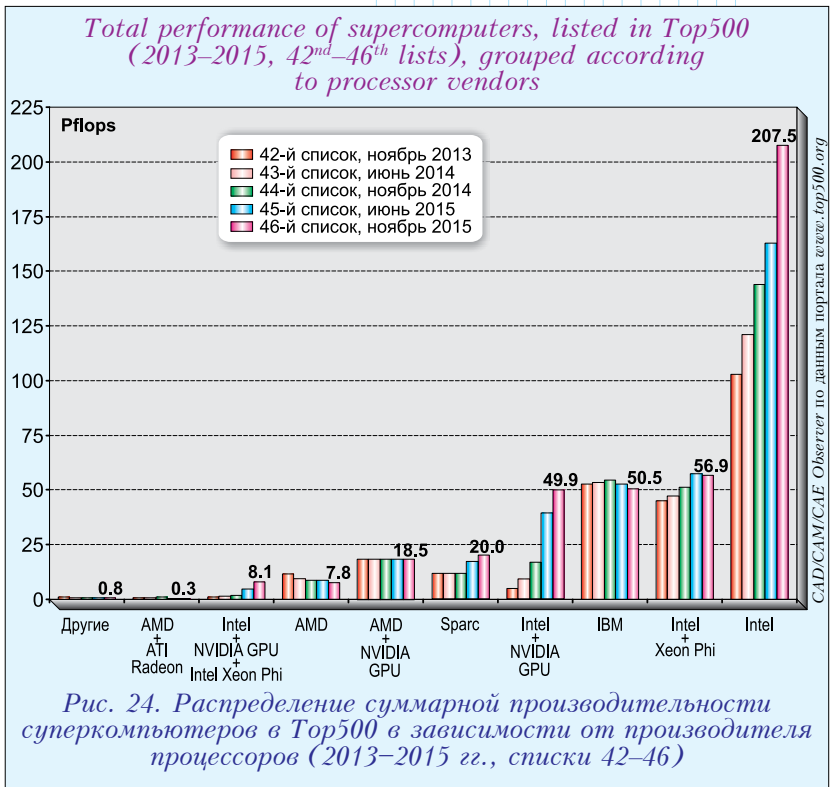
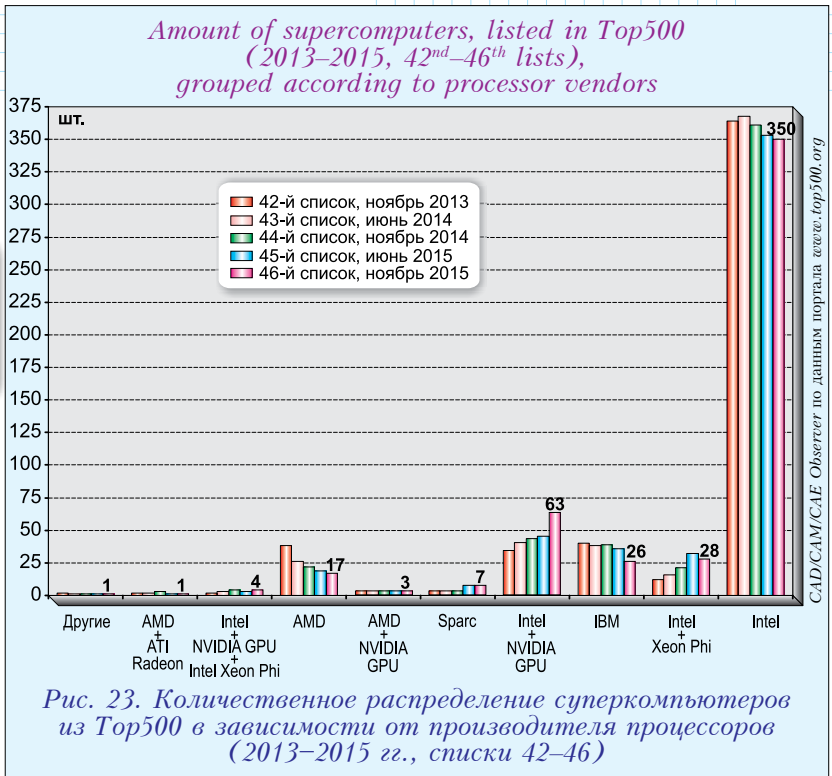
По суммарной производительности среди гибридных суперкомпьютеров на лидирующих позициях находится комбинация “*Intel + Xeon Phi*” – 56.9 *Pflops* (рис. 24), представленная в том числе и рекордсменом *Tianhe-2*. Для этой категории гибридных систем прирост за год составил +5.7 *Pflops*.

Второй по популярности комбинацией процессоров и ускорителей стало сочетание “*Intel + NVIDIA GPU*” – 49.9 *Pflops*, показавшее трехкратный прирост (16.6 *Pflops* год назад).

На третьем месте остается мало распространенная (всего три системы) комбинация “*AMD + NVIDIA GPU*”, чей показатель остался без изменений – 18.5 *Pflops*.

Наибольшую суммарную производительность показали те гибридные суперкомпьютеры, в которых применяется сочетание “*Intel + Xeon Phi*” – 56.9 *Pflops* (число систем – 28).

В сентябре 2015 года в 23-м списке российского *Top50* гибридную архитектуру имеют 23 системы из 50-ти (рис. 25); год и два года назад таких было 22 и 18 соответственно. Наиболее популярной является комбинация “*Intel + NVIDIA GPU*” – 16 систем (за год их стало на три меньше); комбинация



Amount of supercomputers, listed in Russian Top50 (2013–2015, 19<sup>th</sup>–23<sup>rd</sup> lists), grouped according to processor vendors

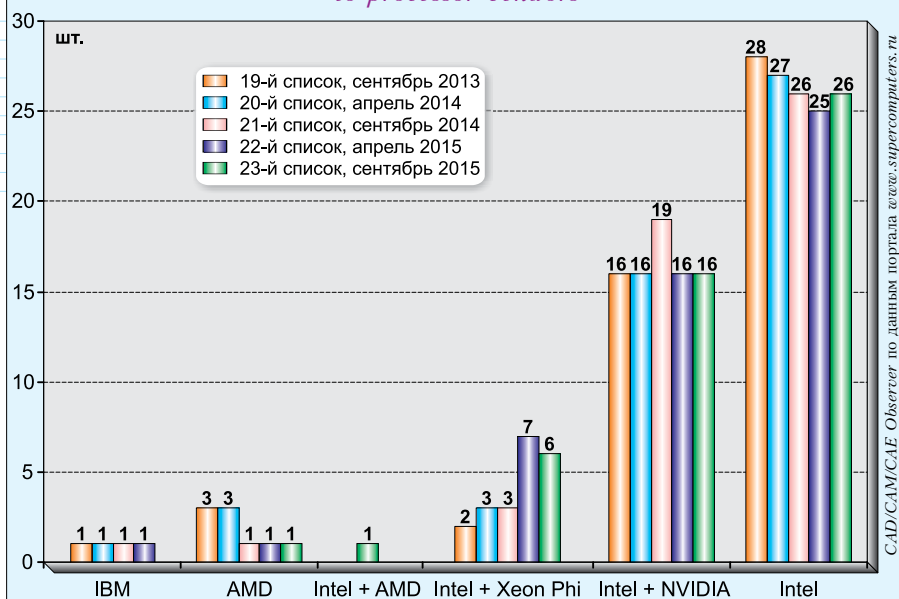


Рис. 25. Сравнение количества суперкомпьютеров на базе процессоров различных производителей в российском Top50 (2013–2015 гг., списки 19–23)

Компания *Intel* является лидером по количеству и суммарному быстродействию суперкомпьютеров, построенных на базе её процессоров и сопроцессоров – 445 систем и 322.5 *Pflops*.

Интеловские процессоры распределяются по следующим семействам: *Clovertown*, *Harper-town*, *Nehalem*, *Westmere*, *Haswell*, *IvyBridge* и *SandyBridge*.

Все процессоры “Толубого гиганта” принадлежат к семейству *POWER*, процессоры *AMD* – к семейству *AMD Opteron*, а процессоры *Fujitsu* имеют архитектуру *SPARC*.

Как свидетельствует российский рейтинг Top50, ведущими производителями процессоров, на базе которых построены суперкомпьютеры, установленные на территории РФ, являются три компании: *Intel*, *AMD* и *IBM* (рис. 25). В 23-м списке зафиксировано, что подавляющее

большинство систем (48 из 50-ти, включая 22 гибридные системы) основывается на интеловских процессорах; на базе микроприборов от *AMD* и *IBM* построено всего по одной системе.

## Ведущие производители процессоров для суперкомпьютеров

Поставщиком процессоров для подавляющего большинства суперкомпьютеров, входящих в *Top500*, является компания *Intel* (рис. 23). В ноябре 2014 года, июне и ноябре 2015 года количество систем на базе интеловских процессоров составляло 429, 433 и 445 соответственно (в том числе, гибридных систем – 68, 80, 95).

На втором месте идет компания *AMD* – 28, 23 и 21 системы (в том числе гибридных систем – 6, 4, 4) соответственно.

Третье место занимает *IBM* – 39, 36 и 26 систем. В активе компаний *Fujitsu* – 3, 7 и 7 систем (гибридные отсутствуют).

Сравнение по показателю суммарной производительности систем, построенных на процессорах соответствующих вендоров, для последних трех списков также оказывается в пользу *Intel* – 213.5, 264.3 и 322.5 *Pflops* (рис. 24), включая весомый вклад гибридных систем (69.7, 101.5 и 114.9 *Pflops*).

Компания *IBM* поднялась на второе место – 54.4, 52.9 и 50.5 *Pflops*.

На третьем месте – *AMD*, для которой цифры получились следующими: 28.4, 27.4 и 26.6 *Pflops*; вклад гибридных систем составляет 19.6, 18.8 и 18.8 *Pflops* соответственно.

Четвертое место досталось *Fujitsu* – 11.7, 17.3 и 20.0 *Pflops*.

## Литература

1. Павлов С. Системы высокопроизводительных вычислений в 2014–2015 годах: обзор достижений и анализ рынков. Часть I. Серверы, компьютеры, планшетики, смартфоны // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2015, №5, с. 63–76.
2. Павлов С. Системы высокопроизводительных вычислений в 2014–2015 годах: обзор достижений и анализ рынков. Часть II. Процессоры // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2015, №6, с. 56–63.
3. Павлов С. Системы высокопроизводительных вычислений в 2013–2014 годах: обзор достижений и анализ рынков. Часть III. Суперкомпьютерные рейтинги // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2014, №8, с. 75–86.
4. Павлов С. Системы высокопроизводительных вычислений в 2012–2013 годах: обзор достижений и анализ рынков. Часть III. Суперкомпьютерные рейтинги // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2013, №8, с. 77–89.

## Об авторе:

**Павлов Сергей Иванович** – *Dr. Phys.*, ведущий научный сотрудник Лаборатории математического моделирования окружающей среды и технологических процессов Латвийского университета ([Sergejs.Pavlovs@lu.lv](mailto:Sergejs.Pavlovs@lu.lv)), автор аналитического *PLM*-журнала “*CAD/CAM/CAE Observer*” ([sergey@cadcamcae.lv](mailto:sergey@cadcamcae.lv)).