ISSN 2079-3316 ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ т. 10, № 3(42), с. 3–40

ББК 65.23:32.971.321.1
ГРНТИ 50.33.04,50.01.11
УДК 004.382.2+519.257

С. М. Абрамов

# Июнь 2019: анализ развития суперкомпьютерной отрасли в России и в мире

Аннотация. Статья продолжает цикл работ автора, посвященных анализу суперкомпьютерной отрасли на основании открытых данных из мирового рейтинга 500 самых мощных суперкомпьютеров — Top500. Новые данные из последних редакций Top500 и ранее не опубликованных результатов (например, анализ некоторых технических аспектов, связанных с гибридными архитектурами и новыми решениями для интерконнекта) обсуждаются в данной статье впервые. Актуальность работы определяется современной тенденцией, связанной с цифровой экономикой, для которой суперкомпьютерные технологии (СКТ) необходимы, как инфраструктурный базис.

*Ключевые слова и фразы:* Top500, суперкомпьютер, интерконнект, гибридные архитектуры.

## Введение

В ведущих странах мира СКТ властью и обществом достаточно давно рассматриваются как единственный инструмент обеспечения конкурентных преимуществ. Одно из ярких высказываний на эту тему было сделано еще в 2004 году Президентом Совета по конкурентоспособности США Деборой Винс-Смит: «Технологии, таланты и деньги сейчас доступны [многим странам] по всему миру, США сталкивается с беспрецедентной иностранной экономической конкуренцией. Страна, желающая победить в конкуренции, **обязана победить в вычислениях**»[1]. Сегодня, в эпоху построения цифровой экономики, только усиливается роль суперкомпьютерной отрасли и роль суперкомпьютерной инфраструктуры (СК-инфраструктуры) ведущих стран. Это подтверждается и новыми публикациями [1] с говорящими сами за себя заголовками.

Работа частично поддержана НИР государственного задания Минобрнауки России, номер государственной регистрации АААА-А19-119020690043-9.

© С. М. Абрамов, 2019
© Институт программных систем имени А. К. Айламазяна РАН, 2019
© Программные системы: теория и приложения (дизайн), 2019

10.25209/2079-3316-2019-10-3-3-40

Учитывая сказанное и планы России совершить рывок и построить в стране цифровую экономику, важными и актуальными становятся истинная оценка сегодняшнего состояния СК-инфраструктуры нашей страны, достоверное сравнение наших позиций в суперкомпьютерной отрасли с позициями ведущих стран мира, точное представление о современных тенденциях развития СКТ. В статье дано дальнейшее развитие ранее предложенных [**3**, **4**] методов анализа тенденций развития СКТ за счет обработки общедоступных ретроспективных данных рейтинга Top500. Одна из главных отличительных черт используемой методики — концентрация на анализе доли тех или иных категорий суперкомпьютеров в суммарной производительности всех суперкомпьютеров мира, а не на анализе количества этих суперкомпьютеров.

Впервые детально проанализирован характер роста производительности суперкомпьютеров, выявлен период возникновения замедления этого роста и рассчитана величина замедления. Также впервые аналогично проанализированы гибридные архитектуры.

Статья актуализирует данные по ранее рассмотренным в [**3**, **4**] аспектам: технологии интерконнекта, национальные суперкомпьютерные инфраструктуры стран.

Вводится интегральный показатель для оценки развития СКТ в различных странах — индекс цифровизации, формализующий оценку объема суперкомпьютерных вычислений, приходящихся в среднем на единицу выпущенной продукции.

В разделе 1 вводятся основные понятия, особое внимание уделяется формализации термина «суперкомпьютер». Раздел 2 посвящен описанию и обоснованию используемых методов анализа данных Top500 [**2**]. Далее методы применяются для анализа различных аспектов и тенденций в СКТ: раздел 3 — темпы развития СКТ, раздел 4 — гибридные архитектуры, раздел 5 — технологии интерконнекта, раздел 6 — национальные суперкомпьютерные инфраструктуры различных стран. В разделе 7 приводятся основные выводы.

---

[1] “With technology, talent and capital now available globally, the U.S is facing un-precedented economic competition from abroad. The country that wants to out compete **must out-compute**.” — Deborah Wince-Smith, President of the Council on Competitiveness, 4 Jun 2004, opening «Supercharging Innovation, Competitiveness: HPC Conference».

## 1. Терминология и методология

### Определение термина «суперкомпьютер»

Общепринятое определение термина *суперкомпьютер* в Википедии это «⟨ . . . ⟩ вычислительная машина, значительно превосходящая по своим техническим параметрам и скорости вычислений большинство существующих в мире компьютеров» — требует уточнения. Строго базироваться на этом определении невозможно: в нем неясно, какое именно (по величине) превосходство в скорости вычислений следует признать значительным и что именно надо считать большинством существующих в мире компьютеров? Такая расплывчатость неприемлема в научной терминологии.

Правильнее суперкомпьютерами называть несколько ($N$) самых мощных по производительности вычислительных систем. Осталось определить разумным образом число $N$. Очевидно, что суперкомпьютеров не может быть слишком мало или слишком много. Величина $N = 500$ представляется разумной. Тем более что в мире, начиная с 1993 года, два раза в год (в июне и в ноябре) на крупнейших мировых суперкомпьютерных форумах объявляют очередную редакцию рейтинга пятисот самых мощных компьютеров в мире — Top500 [**2**].

Таким образом, получаем прозрачное, естественное и чёткое определение: если система вошла в Top500, то это суперкомпьютер, если не вошла — то не суперкомпьютер.

В Top500 системы ранжируются по реальной производительности, измеренной на тесте Linpack (Linpack-производительность). В статье мы будем под производительностью понимать только Linpack-производительность, даже когда это явно не подчеркивается. В списке Top500 ее обозначают Rmax. Производительность измеряют во внесистемных единицах flops (1 flops — это одна операция с плавающей точкой в секунду) и в производных от нее: 1 Kflops = $10^3$ flops, 1 Mflops = $10^6$ flops, 1 Gflops = $10^9$ flops, 1 Tflops = $10^{12}$ flops, 1 Pflops = $10^{15}$ flops, 1 Eflops = $10^{18}$ flops и т. д.

Еще одно необходимое уточнение определения связанно с тем, что из-за различных соображений (например, из-за секретности) заявки на включение в рейтинг Top500 подаются не для всех систем. С учетом этого, формулируем окончательное определение.

Определение. *Суперкомпьютер — это вычислительная система, производительность которой не ниже производительности одной из машин списка Top500.*

### Типичные ошибки в альтернативных определениях термина «суперкомпьютер»

Приведенное выше формальное и точное определение термина «суперкомпьютер» соответствует и общепринятым подходам, и этимологии (то есть, истинному значению) слова: суперкомпьютер — это сверхвычислитель, устройство с рекордными способностями в вычислениях.

Но, при таком определении термина «суперкомпьютер» оказывается, что в современной России до обидного мало суперкомпьютеров. Уверен, что именно это обстоятельство мотивирует сотрудников в различных ведомствах к сочинению альтернативного определения термина «суперкомпьютер», в соотвествии с которым получится более пристойная картина состояния суперкомпьютерной отрасли России.

В этом творчестве типичны два подхода, и оба они являются ошибочными:

- *Фиксированные требования на характеристики, связанные с производительностью.* Примеры подобных ошибочных определений: «суперкомпьютер — это вычислительная система, имеющая производительность не менее 2 Tflops», «суперкомпьютер — это вычислительная система, имеющая не мене 100 вычислительных ядер». Ошибка этих и всех подобных определений состоит в том, что проходит совсем немного времени после принятия такого определения и одиночный сервер с небольшим количеством ускорителей начинает превышать зафиксированые в определении требования.
- *Фиксированные требования на характеристики, никак не связанные с производительностью.* Примеры таких ошибочных определений: «суперкомпьютер — это вычислительная система, занимающая площадь не менеее 100 кв. м», «суперкомпьютер — это вычислительная система, имеющая вес не менее 5 тонн», и наконец, «суперкомпьютер — это вычислительная система, имеющая стоимость не менее $500 000». Ясно, что все эти определения антинаучны. В соответствии с подобными определениями, если взять любой заурядный сервер и добавить к нему что-то бесполезное с точки зрения производительности, но что увеличит его вес, занимаемую площадь или стоимость, то мы получим систему, удовлетворяющую данному определению.

К сожалению, в современных официальных бумагах, имеющих отношение к развитию российской суперкомпьютерной отрасли,

находим определение, связанное именно с ценовым параметром: «суперкомпьютер, это вычислительная система, имеющая стоимость не менее $500 000». В России, несомненно, найдется значительное количество систем с многоядерными процессорами, удовлетворяющих такому определению, причем эти системы будут в личном владении. Примеры подобных лже-суперкомпьютеров — премиумные смартфоны: Gresso Luxor Las Vegas Jackpot $1 000 000, Diamond Crypto Smartphone $1 300 000, iPhone 3G King's button $2 400 000, Supreme Goldstriker iPhone 3G $3 200 000, iPhone 4 Diamond Rose $8 000 000, iPhone 5 Diamond Black $15 000 000, Falcon SuperNova Pink Diamond iPhone 6 $95 500 000.

Активность по сочинению определений термина «суперкомпьютер», приукрашивающих действительность, продолжается. И эта активность, несомненно, и антинаучна, и вредна, так как формирует у лиц, принимающих решения, ложную картину состояния и перспектив развития суперкомпьютерной отрасли России.

## 2. Методология анализа данных из различных редакций рейтинга Top500

Итак, *суперкомпьютер* — это вычислительная система, имеющая такую производительность, которая отвечает производительностям машин из соответствующей редакции Top500.

При таком определении массив данных, свободно доступный на сайте Top500, является достоверным и многоплановым описанием состояния суперкомпьютерной отрасли. Причем, это описание ретроспективное — доступны все редакции рейтинга, начиная с июня 1993 года с шагом в полгода, — и весьма подробное. Каждая редакция рейтинга — это таблица из 500 записей, в каждой записи около 40 полей с различными сведениями про каждый суперкомпьютер.

В работах [**3**, **4**] предложена методика анализа этого массива данных. Ключевые моменты методики:

- Суперкомпьютеры, входящие в список Top500, очень сильно отличаются друг от друга по своей ключевой характеристике — производительности. И, как следствие, они сильно отличаются по используемым техническим решениям, цене, потребительским свойствам и т. д. Крайне сильное «расслоение» в мире суперкомпьютеров на примере редакции Top500 за июнь 2019 года иллюстрирует рисунок 1.

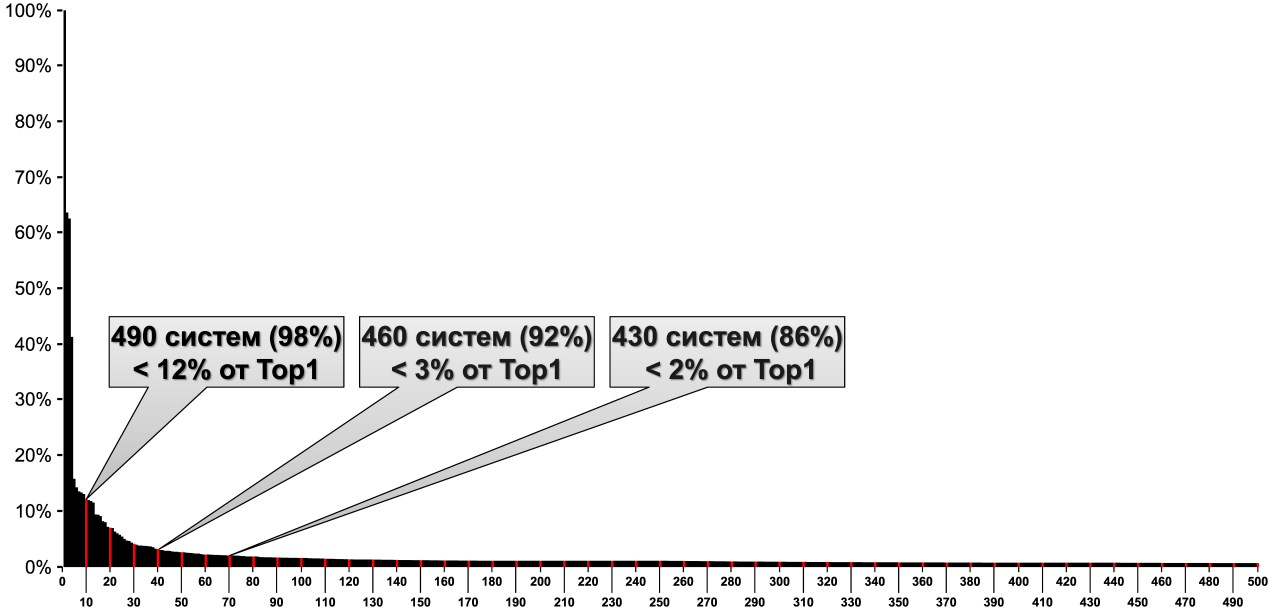



Рисунок 1. Относительная производительность 500 систем, вошедших в рейтинг Top500 в июне 2019 года. За 100% принята производительность системы Top1. Из 500 систем
490 (то есть, 98%) имеют производительность менее 12% от производительности Top1,
460 систем (92%) имеют производительность менее 3% от Top1,
430 систем (86%) имеют производительность менее 2% от Top1

- Как следствие, ошибочно считать суперкомпьютеры «штуками», надо опираться на ключевую характеристику — производительность. Например, если сравнивать оснащенность различных стран суперкомпьютерной техникой, надо обращать больше внимания на суммарную производительность доступных стране суперкомпьютеров, а не на их количество.

### О новизне предлагаемой методики

Автору не известны работы других авторов, посвященные анализу данных Top500 и основанные на методах, аналогичных используемым в данной работе и в [**3**, **4**]. Известная автору аналитика по рейтингу Top500, в том числе [**2**], [**5**] и [**6**] и также сопровождающая публикацию каждой редакции рейтинга аналитика, опирается на изучение количества суперкомпьютеров в той или иной категории, а не на анализ суммарной производительности этих суперкомпьютеров.

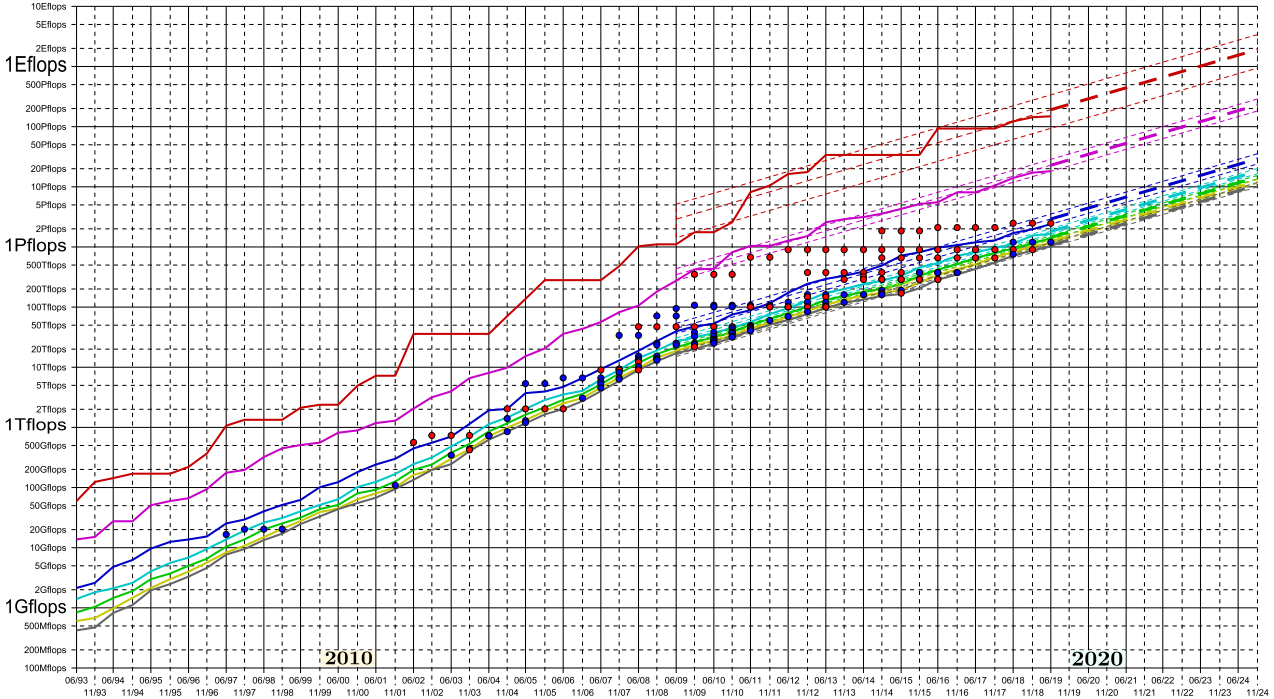
В следующих разделах анализируются:

- темпы развития суперкомпьютерных технологий;
- тенденции развития гибридных архитектур;
- тенденции в технологиях интерконнекта;
- состояние суперкомпьютерной отрасли в мире и в России.

## 3. Темпы развития суперкомпьютерных технологий

Общую оценку темпов развития СКТ можно получить из анализа достигнутой производительности суперкомпьютеров в различные моменты времени. На рисунке 2 цветными линиями представлена динамика развития производительности систем, соответствующих 1, 10, 100, 200, 300, 400 и 500 месту в рейтинге Top500 на период с июня 2009 по ноябрь 2024 года. На оси абсцисс отмечены моменты времени (месяц и год) выхода редакций Top500, на оси ординат — производительность, шкала полулогарифмическая; Для вычисления прогноза использована линейная регрессия на отрезке последних 10 лет — с июня 2009 по июнь 2019.

Цветные точки на графике отмечают все системы, установленные в России и попавшие в соответствующую редакцию списка Top500. Цвет разделяет суперкомпьютеры, закупленные за рубежом и суперкомпьютеры российского производства.




Цвет означает 1 место, 10 место, 100 место, 200 место, 300 место, 400 место, 500 место

пунктиром обозначены среднее значение прогноза и интервал 90% достоверности

Рисунок 2. Динамика производительности российских импортных (•) и отечественных (•) суперкомпьютеров, вошедших в различные редакции рейтинга Top500

Графики, подобные приведенным на рисунке 2, часто публикуются и служат иллюстрацией экспоненциальной скорости развития суперкомпьютерной отрасли. И правда, *на первый взгляд* цветные линии на рисунке 2 близки к прямым линиям, что с учетом полулогарифмической шкалы соответствует экспоненциальной зависимости. Но *пристальный анализ* показывает, что более всего графики похожи на ломаную линию из двух прямых отрезков — до 2008 года линейная регрессия имеет один наклон, а после 2008 года другой, более пологий.

Следует констатировать [**6**], что на рубеже 2008 года, при сохранении экспоненциального характера роста производительности, уменьшилась скорость роста (основание) этой самой экспоненты. До 2008 года достаточно точно выдерживалось следующее: удвоение производительности самой мощной системы в мире происходило за 18 месяцев; за 11 лет ее производительность росла в 1000 раз. Так, достаточно точно можно утверждать, что рубежи производительности были преодолены: 1 Mflops в 1975 году, 1 Gflops в 1986 году, 1 Tflops в 1997 году, 1 Pflops в 2008 году.

Если бы эта тенденция сохранилась, то в 2019 году была бы достигнута производительность 1 Eflops. Но это, очевидно, произойдет позже, судя по рисунку 2, в 2022 году.

Рассмотрим подробнее анализ скорости роста производительности систем, перечисленных в рейтинге Top500.

### Редакции рейтинга Top500

Первая редакция Top500 опубликована в июне 1993 года. Редакция, вышедшая в июне 2019 года, имеет номер 53. Пусть $i \in [1, 53]$, тогда редакция Top500 с номером $i$ вышла в году $y = 1992 + \lceil i/2 \rceil$ в июне, если $i$ нечетное; в ноябре, если $i$ четное.

### Производительность систем, входящих в Top500

Пусть $i \in [1, 53]$ — номер редакции Top500, $j \in [1, 500]$ — строка в рейтинге Top500. Введем обозначения:

$Rmax_{i,j}$ — величина (в Gflops) производительности системы, занимающей в $i$-той редакции Top500 строку $j$. Будем опускать индексы $i$ и $j$, если из контекста будет ясно, о какой редакции Top500 и о какой системе идет речь.

$r_{i,j}$ — натуральный логарифм величины (в Gflops) производительности системы, занимающей в $i$-той редакции Top500 строку $j$, $r_{i,j} = \ln \mathrm{Rmax}_{i,j}$.

$\Sigma Rmax_i$ — сумма величин (в Gflops) производительностей всех систем, входящих в $i$-тую редакцию Top500:

$$\Sigma\mathrm{Rmax}_i = \sum_{j=1}^{500} \mathrm{Rmax}_{i,j}.$$

Будем опускать индекс $i$, если из контекста будет ясно, о какой редакции Top500 идет речь.

### Предположение об экспоненциальном росте производительности

Для систем, занимающих некоторую фиксированную строку $j \in [1, 500]$ в различных редакциях Top500, наблюдается, что $r_{i,j}$ приблизительно равно некоторой линейной функции $f(i) = a \cdot i + b$.

Рисунок 2 показывает близкий экспоненциальный рост систем, занимающих строки $j \in J$ из некоторого фиксированного набора строк $J \subseteq [1, 500], J \neq \varnothing$: для всех $j \in J$ величины $r_{i,j}$ при разных $i$ приблизительно равны значениям линейных функций $f_j(i) = a \cdot i + b_j$ с одним и тем же коэффициентом $a$ при $i$.

Коэффициент $a$ характеризует скорость изменения производительности: величина $r_{i,j}$ растет примерно на $a$ при увеличении номера редакции на 1. То есть, за полгода производительность систем, занимающих строку $j \in J$, вырастает примерно в $\exp(a)$ раз, а за год примерно в $\exp(2a)$ раз. Наконец, в 1000 раз производительность вырастет примерно за $y = \frac{\ln 1000}{2a}$ лет.

### Оценка скорости роста производительности в разные моменты времени

В предыдущих трех абзацах не говорилось о том, для каких значений $i \in [1, 50]$ мы аппроксимируем $r_{i,j}$ линейной функцией. Естественно, если мы хотим оценить скорость изменения производительности систем в момент публикации рейтинга с номером $i_0$, то надо рассматривать редакции с номерами $i$ из некоторой разумной окрестности $i_0$. Будем рассматривать рейтинги за 3,5 года до и 3,5 года после публикации рейтинга с номером $i_0$. Таких рейтингов 15 с номерами $i \in [i_0 - 7, i_0 + 7]$[2].

[2]Размер отрезка (15 рейтингов) был подобран экспериментально: рассматривались и другие размеры, но они не давали принципиально иных результатов и показались менее выразительными.

### Описание метода

Рассмотрим набор строк $J \subseteq [1, 500], J \neq \varnothing$. Рассмотрим момент публикации рейтинга с номером $i_0$. Нам требуется оценить скорость роста производительности систем, занимающих строки $j \in J$ в рейтинге Top500 в этот момент времени. Рассматриваем $I(i_0) = [i_0 - 7, i_0 + 7]$. Предполагаем, что для всех $j \in J$ величины $r_{i,j}$ при разных $i \in I(i_0)$ приблизительно равны значениям линейных функций $f_j(i) = a \cdot i + b_j$ с одним и тем же коэффициентом $a$ при $i$. Неизвестные значения $a$ и $b_j$ находятся методом наименьших квадратов — из условия минимизации выражения:

$$\sum_{i \in I(i_0)} \sum_{j \in J} (r_{i,j} - a \cdot i - b_j)^2.$$

Найденное таким образом $a$ характеризует скорость изменения производительности: величина $r_{i,j}$ растет примерно на $a$ при увеличении номера редакции на 1. Нас будет интересовать величина:

$$y_J(i_0) = \frac{\ln 1000}{2a},$$

которая оценивает, примерно за сколько лет производительность систем, занимающих строки из набора $J$, вырастет в 1000 раз, начиная с момента времени выхода $i_0$-ой редакции Top500.

На рисунке 3 показаны графики функций $y_J$ для трех различных множеств:

$J = \{1\}$ — оценка скорости роста производительности Top1, самой мощной в мире системы.

$J = [1, 10]$ — оценка скорости роста производительности Top10, десяти самых мощных в мире систем.

$J = [1, 100]$ — оценка скорости роста производительности Top100, «первой сотни».

Так как аппроксимация в третьем случае опирается на значительно более широкий статистический набор, то и функция для $J = [1, 100]$ получилась более гладкой, чем для $J = [1, 10]$ и, тем более, для $J = \{1\}$.

### Выводы

- До 2008–2009 года темпы роста производительности систем из Top500 в целом отвечали описанию «рост в 1 000 раз за 11 лет».
- Начиная с 2008–2009 годов снижаются темпы роста производительности систем из Top500, и с 2015 года они соответствуют

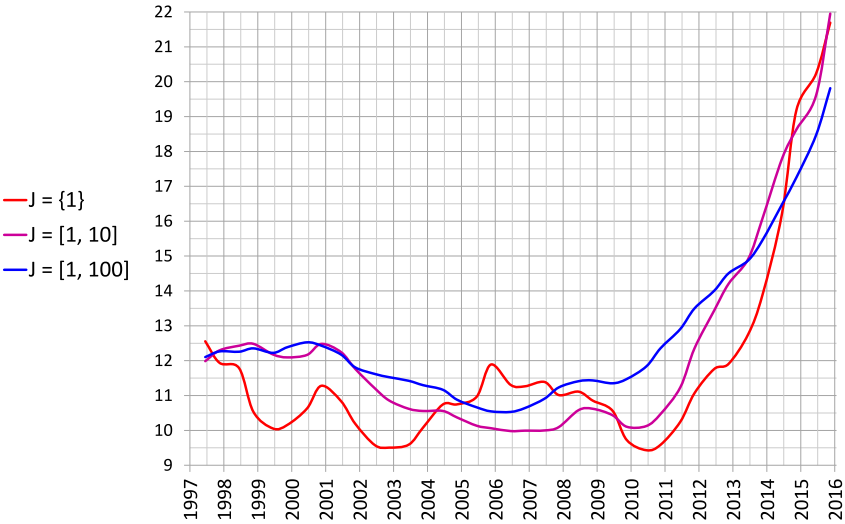



Рисунок 3. Оценка: за сколько лет вырастет в 1 000 раз производительность систем, занимающих в Top500 строки с номерами из множества $J$?

описанию «рост в 1 000 раз за 17–20 лет и более». Несомненно, что мировая суперкомпьютерная отрасль на рубеже 2008–2009 годов столкнулась с научно-техническими сложностями на пути развития СКТ.

- Требуется пересмотр прогнозов достижения новых рубежей производительности: 1 Eflops при сохранении темпа развития будет достигнут в 2022 году, а 1 Zflops — после 2039 года.

Сохранится ли на текущем уровне показатель экспоненты? Сохранятся ли связанные с ним прогнозы, высказанные выше? Или ситуация может ухудшиться? Или улучшиться? — Ответы на эти вопросы зависят от решения стоящих перед отраслью научно-технических проблем. Используемый здесь ретроспективный анализ отрасли не позволяет ответить достоверно на подобные вопросы — они выходят за рамки тематики статьи. Но, по мнению автора, на ближайшую перспективу можно весьма достоверно предполагать отсутствие резких изменений нынешнего показателя экспоненты.

## 4. Тенденции развития гибридных архитектур

*Гибридными суперкомпьютерами* называют системы, в которых вычислительные узлы в дополнение к основным стандартным процессорам оснащены специализированными процессорами — ускорителями. Идея ускорителей в суперкомпьютерной отрасли использовалась давно, но широкое применение гибридные архитектуры нашли в последнее десятилетие. Поля, детализирующие использование ускорителей в суперкомпьютерах (Accelerator и Accelerator Cores), появились в записях списка Top500, начиная с июня 2011 года. С этого времени мы и будем анализировать гибридные архитектуры, а каждый суперкомпьютер отнесем к одному из следующих классов:

*NONE:* в суперкомпьютере не используются ускорители — однородная (не гибридная) архитектура;

*IBM:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители IBM PowerXCell 8i;

*AMD:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители от компании AMD;

*NVIDIA:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители от компании NVIDIA;

*Intel:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители от компании Intel — семейства Intel MIC / Intel Xeon Phi;

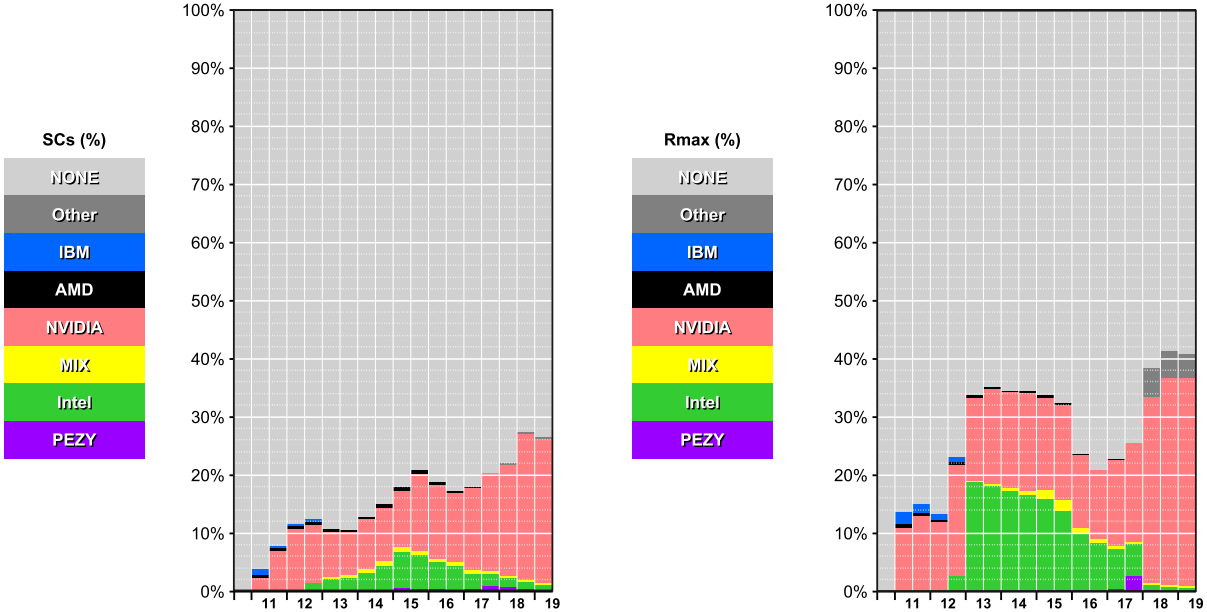
*MIX:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители и от компании NVIDIA, и от компании Intel;

*PEZY:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители от компании PEZY Computing;

*Other:* в суперкомпьютере в качестве ускорителей используются спецвычислители, не упомянутые выше — на сегодня это китайские спецвычислители Matrix-2000 и Deep Computing Processor.

Рассмотрим 17 редакций рейтинга Top500 с июня 2011 года по июнь 2019 года. На рисунках 4*а* и 4*б* показаны доли различных классов гибридных суперкомпьютеров в рейтинге Top500 для этих 17 редакций. Подписи по оси абсцисс — года, две столбчатые диаграммы подряд за один год соответствуют двум редакциям Top500 этого года.

На рисунке 4*а* видны доли суммарной производительности (Rmax) для каждого класса, за 100% принята суммарная производительность всего списка Top500 — ΣRmax.




(*а*) доли в общем количестве систем (500 систем — 100%, одна система — 0,2%)

(*б*) доли производительности систем в ΣRmax

Рисунок 4. Классы гибридных суперкомпьютеров в рейтинге Top500 с июня 2011 г. по июнь 2019 г.

На рисунке 4*б* представлены доли в количестве систем (SCs) и за 100% принято 500 систем, так что каждая система — это 0,2%.

Можно заметить следующие тенденции за последние годы:

- Доля гибридных систем выросла за период с 2014 по 2019 год:
  - доля в количестве систем выросла с 15% до 27%;
  - доля в ΣRmax выросла с 35% до 41%.
- Ускорители IBM (к 2013) и AMD (к 2017) практически исчезли.
- На пути исчезновения ускорители Intel: в период с 2013 по 2019 год их доля уменьшилась с 19% ΣRmax до 1% ΣRmax.
- Сегодня практически все гибридные системы относятся к классам NVIDIA, PEZY[3] и Other.
- Доля NVIDIA выросла в период с 2014 по 2019 год с 18% ΣRmax до 35% ΣRmax.
- Появились новые интересные решения с заметной долей (PEZY и Other составляют около 7% ΣRmax), на которые стоит обратить внимание: ускорители PEZY, Matrix-2000 и Deep Computing Processor. Для Китая (Matrix-2000 и Deep Computing Processor) и Японии (PEZY) это были короткие и успешные проекты создания полностью собственных ускорителей, что должно послужить вдохновляющим примером для России.

## 5. Тенденции в технологиях интерконнекта

Интерконнект связывает все вычислительные узлы суперкомпьютера в единую систему. Сетевые технологии, используемые в интерконнекте, чаще всего отличаются от сетевых технологий, используемых в локальных, региональных и глобальных компьютерных сетях, в силу специфических требований, предъявляемых к интерконнекту: не только высокая пропускная способность, но и максимально низкая задержка и максимально высокий темп выдачи сообщений, и ряд дополнительных, специфических требований. В суперкомпьютерной отрасли это определяет серьезную роль технологий интерконнекта.

В перечне 10-ти критических технологических вызовов [7], стоящих перед отраслью на пути к эксафлопсным системам, разработка перспективных технологий интерконнекта занимает весьма высокое место — второе.

Поля, детализирующие использование различных технологий интерконнекта в суперкомпьютерах, присутствуют во всех редакциях

[3] К сожалению, последние 4 редакции Top500 у PEZY падает доля и в ΣRmax и в общем количестве суперкомпьютеров. Но до июня 2019 включительно системы PEZY все еще входят в Top500.

списка Top500. Опираясь на данные в этих полях, каждый суперкомпьютер во всех редакциях списка Top500 отнесем к следующим классам:

*Infiniband,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются решения семейства Infiniband. Такие суперкомпьютеры встречаются в Top500 с ноября 2003 года до сего дня, а технология реализована в нескольких версиях, с различными техническими характеристиками: Infiniband SDR, Infiniband DDR, Infiniband FDR, Infiniband QDR, Infiniband EDR...

*Ethernet,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются решения семейства Ethernet. Такие суперкомпьютеры встречаются в Top500 с ноября 1997 года до сего дня, а технология реализована в нескольких версиях, с различными техническими характеристиками — от Fast Ethernet (100 Mbps) до 100G Ethernet (100 Gbps).

*Myrinet,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются решения семейства Myrinet. Такие суперкомпьютеры встречаются в Top500 с ноября 1999 года до июня 2013 года.

*Quadrics,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются решения семейства Quadrics. Такое встречается в Top500 с июня 1999 года до июня 2010 года.

*SCI,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются решения семейства SCI. Встречаются такие суперкомпьютеры в Top500 с июня 2002 года до июня 2004 года.

*OpTsIntel,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются решения от компании Intel семейств Omni-Path / TrueScale. Такие суперкомпьютеры встречаются в Top500 с июня 2015 года до сего дня.

*Custom,* если в суперкомпьютере для реализации интерконнекта используются специфичные решения (Proprietary Network) или недоступные как отдельное коммерческое решение — доступное только в составе законченной системы.

Подчеркнем отличие между классами:

*Infiniband, Ethernet, Myrinet, Quadrics, SCI* — эти технологии интерконнекта доступны как отдельные коммерческие продукты. Любой разработчик своего собственного суперкомпьютера (например, со своей архитектурой вычислительных узлов, с теми или иными процессорами) может купить и применить любое из этих решений.

*Custom* — эти технологии интерконнекта не доступны как отдельные коммерческие продукты. Либо недоступны вообще, либо

доступны только в составе законченной системы от единственного поставщика.

*OpTsIntel* — промежуточную позицию занимают технологии компании Intel семейств Omni-Path / TrueScale. С одной стороны, эти технологии интерконнекта доступны как коммерческие продукты. С другой стороны, эти решения невозможно применить в суперкомпьютере, если вычислительный узел не имеет соответствующие архитектуру и процессор от компании Intel. И эта ситуация очень близка к ситуации «интерконнект доступен только в составе законченной системы от единственного поставщика» — близка по жесткости технологической зависимости от единственного разработчика и поставщика, зависимости от компании Intel.

На рисунке 5 показаны доли производительности суперкомпьютеров с различными интерконнектами в суммарной производительности (ΣRmax) рейтинга Top500 для 53 редакций с июня 1993 года по июнь 2019 года. Подписи по оси абсцисс — года, две столбчатые диаграммы в год соответствуют двум редакциям этого года. Анализируя рисунок 5, можно заметить следующие тенденции:

- Технологии, соответствующие классам Myrinet, Quadrics, SCI в последние годы в отрасли не используются. На рисунке 5 хорошо видны годы появления этих решений, годы «рассвета» этих технологий, пик популярности и годы «заката». Сегодня актуально обсуждать только 4 класса: Infiniband, Ethernet, OpTsIntel и Custom.
- В период 2012–2017 годов самая большая доля суммарной производительности Top500 у суперкомпьютеров с интерконнектом класса Custom: 58%–42% от ΣRmax. Следующей по величине является доля Infiniband: 40%–26%. Затем Ethernet: 18%–22%. И, наконец, OpTsIntel: 0%–20%.
- В 2018–2019 годах доля Infiniband выросла до 38% от ΣRmax (+12%), а доля Custom уменьшилась до 26% (−16%), незначительно выросли доли Ethernet 25% (+3%) и OpTsIntel 21% (+1%).
- Технологии компании Intel семейств Omni-Path / TrueScale имеют весьма серьезные технические характеристики, и это им позволило успешно войти в отрасль и отвоевать в короткие сроки долю в 21%. Отвоевать, в первую очередь, за счет уменьшения долей Infiniband и Custom. Слабой стороной решения OpTsIntel является жесткая технологическая зависимость всей системы от компании Intel.

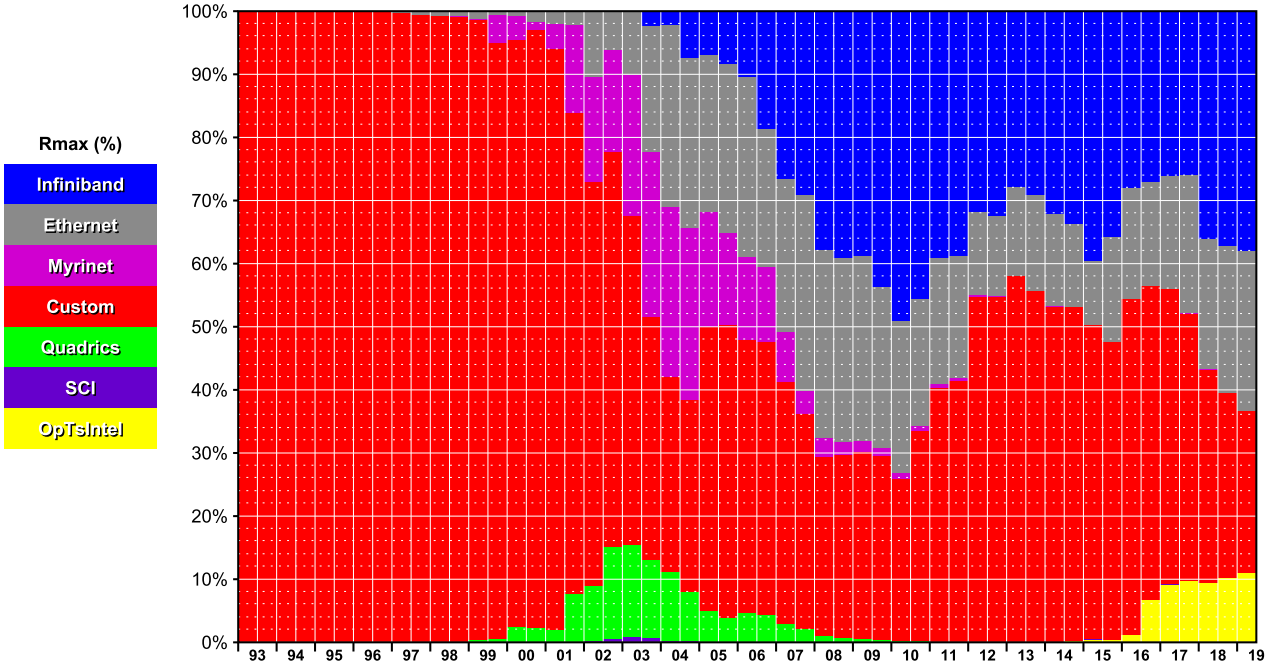



Рисунок 5. Доли суммарной производительности суперкомпьютеров с различными интерконнектами в суммарной производительности рейтинга Top500 ΣRmax, редакции с июня 1993 года по июнь 2019 года

Очень важно понимать области применимости каждого класса интерконнектов. Для этого поступим следующим образом: разобьем весь список Top500 (а он отсортирован по производительности суперкомпьютеров) на пять групп: группа A — несколько самых мощных суперкомпьютеров из списка; за нею группы B, C, D, E. Размер групп выберем так, чтобы сумма производительности всех суперкомпьютеров, входящих в одну группу, была бы максимально близка к 20% от ΣRmax. То есть, группы A, B, C, D и E имеют (примерно) равные производительности, но, конечно, содержат разное количество суперкомпьютеров. Для редакции июня 2019 такое деление имеет вид:

*A:* 3 системы, Top1–3 — 21,6% от ΣRmax;
*B:* 15 систем, Top4–18 — 19,4% от ΣRmax;
*C:* 68 систем, Top19–86 — 19,9% от ΣRmax;
*D:* 169 систем, Top87–255 — 19,9% от ΣRmax;
*E:* 245 системы, Top256–500 — 19,2% от ΣRmax.

Теперь для каждой группы посмотрим доли классов Infiniband, Ethernet, OpTsIntel и Custom — рисунок 6. Анализируя подобные диаграмы за последние пять с половиной лет (одинадцать редакций рейтинга Top500), можно сделать следующие выводы:

- В семи редакциях из этих одиннадцати мощнейшие суперкомпьютеры (группа A) используют только интерконнект Custom. Редакция июня 2019 и еще три редакции являются исключениями, которые подтверждают правило: хотя в них в группе A и используется технология Infiniband, но интерконнект на ее основе в группе A создан с серьезными доработками, которые трудно повторить в режиме «купил, смонтировал и все заработало», без серьезной инженерной поддержки компании-производителя решений Infiniband.
- В суперкомпьютерах группы B также преимущественно используют интерконнект Custom.
- Технологию Infiniband преимущественно используют для систем групп B, C, D, E и заметно преимущественное использование Infiniband в системах группы C.
- Технологию Ethernet чаще используют в слабых системах (D, E) и наиболее часто в самых слабых системах (E).
- Использование решений OpTsIntel пока ограничено группами B, C, D, E и заметно преимущественное использование их в системах группы C.

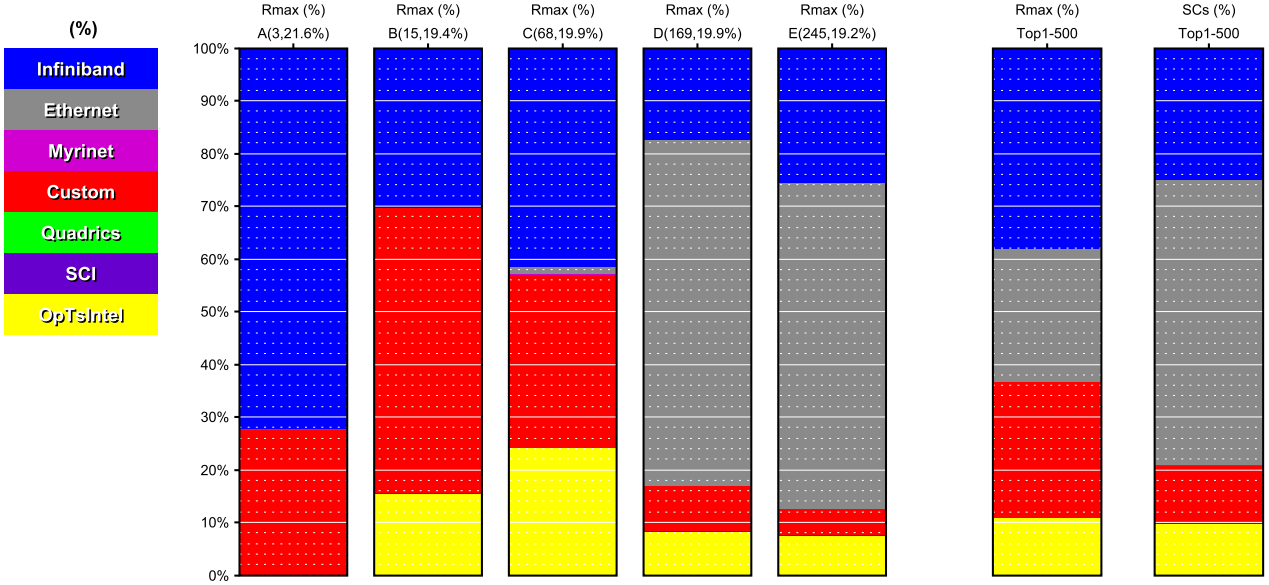



Рисунок 6. Доли суммарной производительности суперкомпьютеров с различными интерконнектами в суммарной производительности групп A, B, C, D и E рейтинга Top500 редакции за июнь 2019 года

Несомненным выводом из этого анализа является следующее: разработка российских суперкомпьютеров высшей производительности, скорее всего, не сможет обойтись без интерконнекта Custom. Так как его невозможно купить, то, с неизбежностью, его придется разработать самим. Такое в России не раз весьма успешно делалось [8–12], только эта тема достойна отдельной статьи.

## 6. Состояние суперкомпьютерной отрасли в мире и в России

### Оснащенность стран суперкомпьютерами

Важный интегральный показатель степени освоения СКТ страной является суммарная производительность всех ее суперкомпьютеров. Графики этого показателя для США, Китая, Японии, Евросоюза и России представлены на рисунке 7. По оси абсцисс указано время (месяц и год), по оси ординат — суммарная производительность всех суперкомпьютеров страны, шкала полулогарифмическая.

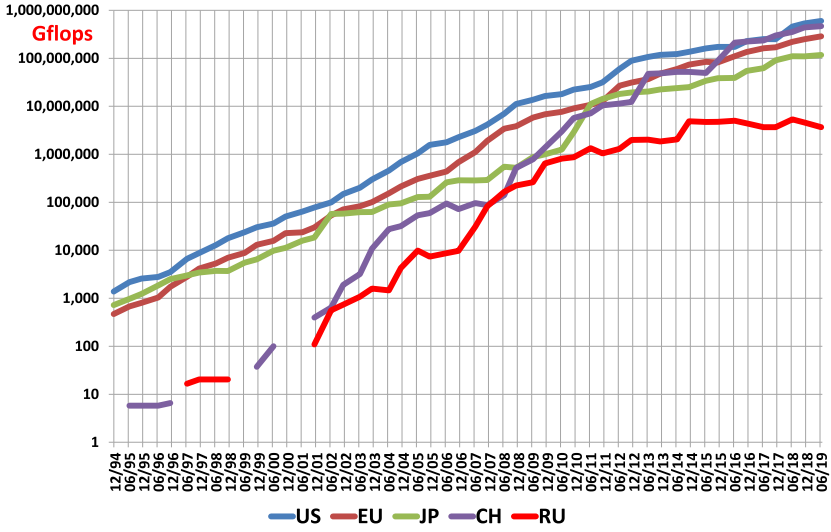



Рисунок 7. Суммарная производительность всех суперкомпьютеров США (US), стран Евросоюза (EU), России (RU), Китая (CH) и Японии (JP)

Отметим несколько фактов:

- За весь период наблюдений (1994–2018 годы) США, Евросоюз и Япония обеспечивали практически экспоненциальный рост суммарной производительности своих суперкомпьютеров.
- Только с конца 2002 года Россия и Китай имеют постоянное присутствие в Top500. До этого времени Россия и Китай обладали суперкомпьютерами эпизодически.
- На рубеже 2002 года Россия и Китай имели практически равные позиции по рассматриваемому показателю и отставали на пару порядков от остальных стран. В период 2002–2010 годов Россия и Китай ускоренными темпами догоняли лидирующие страны, а далее:
  - Китай сохранил в 2011–2015 годах опережающий (по сравнению со странами-лидерами) рост показателя, надежно обогнал и Японию, и Евросоюз, практически сравнялся с США. В период 2015–2019 Китай и США имеют близкие значения показателя (с точностью 10%–20%), время от времени уступая друг другу первенство.
  - Показатель России в 2011–2014 годах еще сохранял небольшой рост, а после этого застыл на месте, иногда даже уменьшаясь. Сегодня Россия уступает два порядка США, Китаю и Евросоюзу, чуть меньше — Японии.

### Отставание России от других стран в освоении СКТ

Сравнивая между собою суммарные производительности всех суперкомпьютеров стран в различные моменты времени, можно объективно и достоверно оценить отставание России (в годах) в области СКТ от других стран — США, стран Евросоюза, Китая и Японии.

Для США эта оценка вычисляется следующим образом:

- берем любую редакцию Top500, например, за ноябрь 2009 года, и вычисляем суммарную производительность всех суперкомпьютеров России в этот момент времени;
- далее находим, в какую ближайшую редакцию Top500 такое же или меньшее значение было у данного показателя США (такой редакцией является июнь 2004 года, т.е. на 11 редакций=5,5 лет ранее ноября 2009 года);
- получаем, что в ноябре 2009 года отставание России от США в освоении СКТ составляло 5,5 лет.

Эти вычисления повторяем для каждой редакции Top500. Получаем функцию отставания России от США в освоении СКТ в каждый момент выхода в свет редакций Top500. Повторяя эти построения для Китая, Евросоюза и Японии, получаем функцию отставания России от этих стран.

### Формальное определение отставания

Пусть две функции $f : [1, 53] \to \mathbb{R}$ и $g : [1, 53] \to \mathbb{R}$ являются некоторыми показателями (вещественными числами), вычисленными для различных редакций $i \in [1, 53]$ рейтинга Top500. Тогда, определим отставание в годах $g$ от $f$, как функцию $d : [1, 53] \to \mathbb{R}\,[0, 26, 5]$ следующим образом:

$$d(i) = 0,5 \times \min_{\Delta i \in [0, i-1]} \{\Delta i \,|f(i - \Delta i) \leq g(i)\} \,/$$

На рисунке 8 представлены графики отставания (в годах) России от США, Китая, Евросоюза и Японии по суммарной производительности

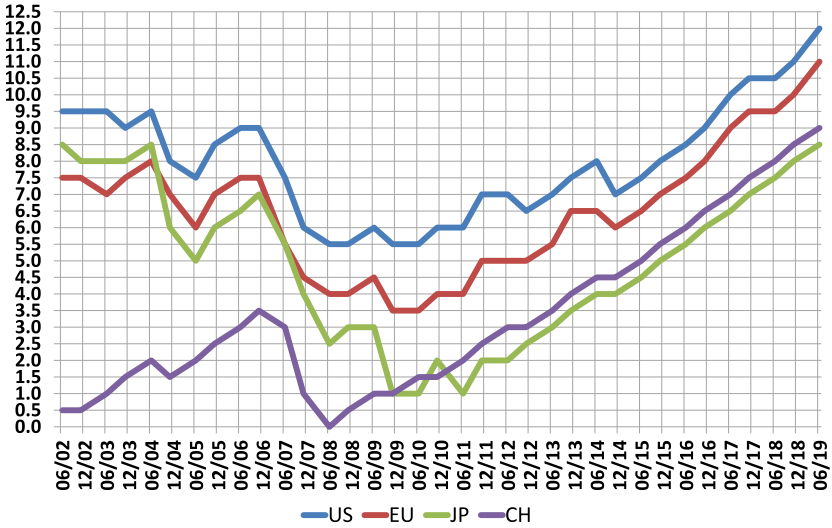



Рисунок 8. Отставание России (в годах) по суммарной производительности суперкомпьютеров от США (US), стран Евросоюза (EU), Китая (CH) и Японии (JP)

суперкомпьютеров. Ось абсцис — момент вычисления отставания, ось ординат — величина отставания в годах.

Видно, что в 2006–2008 годах Россия резко сокращала свое отставание от США, Евросоюза, Китая и Японии.

К моменту завершения (2010 год) суперкомпьютерных программ Союзного государства «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» [**13**–**15**] отставание России от стран-лидеров было минимальным, за все время наблюдений: 5,5 лет от США, 3,5 года от Евросоюза, 1 год от Японии. Начиная с 2010 года Россия практически неуклонно ежегодно наращивает свое отставание от всех стран. Сегодня это отставание достигло максимума за весь период наблюдения: 12 лет от США, 11 лет от Евросоюза, 9 лет от Китая (при этом в июне 2008 Россия от Китая не отставала), 8,5 лет от Японии.

### Технологическое отставание

Для всех редакций $i \in [1, 53]$ в рейтинге Top500 рассмотрим производительность топового суперкомпьютера в России. Вычислим отставание в годах этой величины от $\mathrm{Rmax}_{i,1}$, $\mathrm{Rmax}_{i,5}$, $\mathrm{Rmax}_{i,10}$ — от производительности систем, занимающих 1, 5 и 10 место в Top500. По сути, это будет отставание России (в годах) от соответствующих уровней технологий, от готовности иметь и использовать системы уровня Top1, Top5 и Top10.

На рисунке 9 показано рассчитанное таким образом отставание России от технологий уровня Top1, Top5 и Top10. Видны периоды сокращения технологического отставания и периоды его увеличения. В конце суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства (2009–2010 годы) технологическое отставание было минимальным: 0,5–1,5 года от Top10, 1,5–2,5 года от Top5, 2,5–3,5 года от Top1. Однако, в последующие годы технологическое отставание росло, и на сегодняшний день оно достигло максимума за весь период наблюдения: 6,5 лет от Top10, 7,5 лет от Top5, 9 лет от Top1.

Заметим, что рассчитанная здесь величина отставания от технологии Top1 — 5,5 лет в начале 2016 года, — совпадает с экспертной оценкой, приведенной в работе [**1**]. Методика оценки в работе [**1**] не указана, но точное совпадение величин является косвенным подтверждением разумности оценок на рисунке 9.

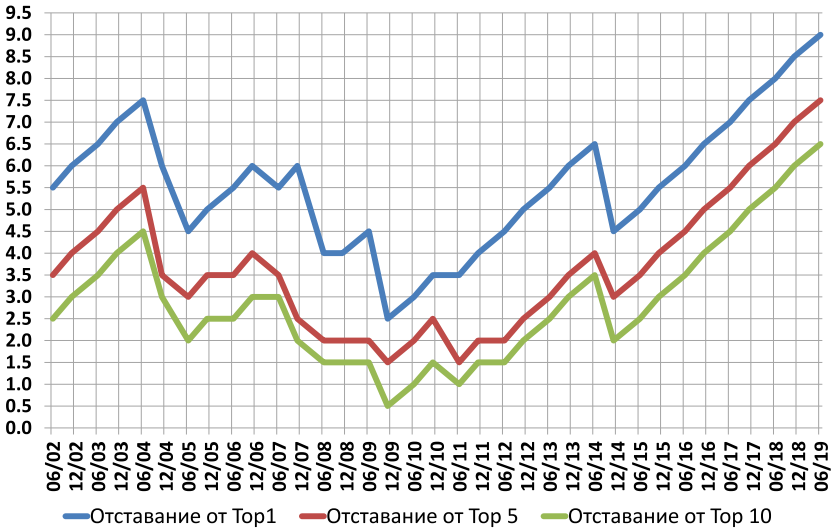



Рисунок 9. Отставание России от технологий уровней Top1, Top5 и Top10 (в годах)

### Доли стран в ΣRmax и в мировом ВВП. Индекс цифровизации экономики

Доля страны в ΣRmax — отношение суммарной производительности суперкомпьютеров, установленных в данной стране, к суммарной производительности всего списка Top500, — хорошо характеризует роль страны в мировой суперкомпьютерной отрасли. Доля России в совокупной мировой вычислительной производительности (рисунок 10) за весь период наблюдения достигала максимума в 2,51% в июне 2010 года, в период завершения суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства [13–15]. С тех пор доля России в ΣRmax уменьшилась почти в 11 раз и составила 0,24% в июне 2019 года.

По своему смыслу доля страны в ΣRmax аналогична доле экономики страны в мировом ВВП. Обсудим это подробнее.

Мировой ВВП можно рассматривать как единицу измерения выпущенной за год продукции. Доля России в мировом ВВП составляет 1,8%. Таким образом, Россия в год выпускает 0,018 указанных

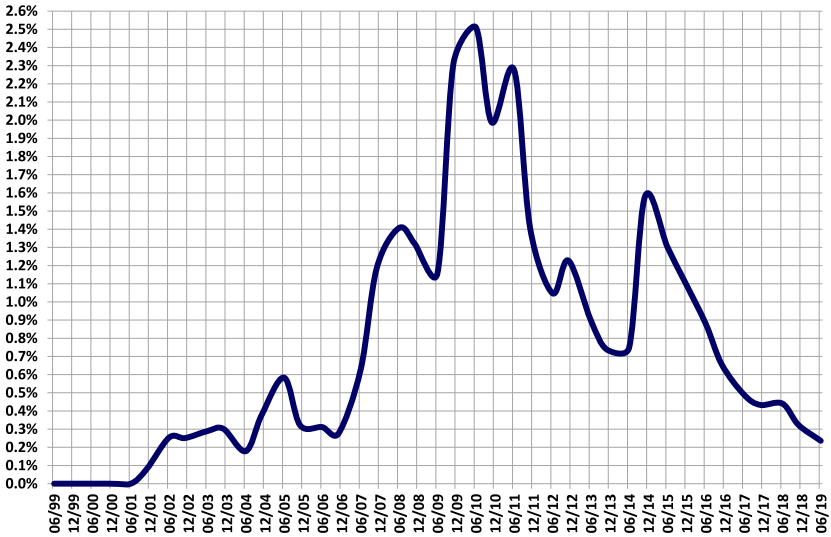



Рисунок 10. Доля России в совокупной мировой вычислительной производительности суперкомпьютеров

единиц продукции в год.

Производительность суперкомпьютера можно рассматривать и как меру скорости вычисления (количество вычислений в единицу времени), и как меру объема выполненных вычислений за год. Действительно, объем выполненных за год вычислений равняется $\mathrm{Rmax} \times T \times \eta$, где Rmax — производительность, $T$ — длительность года в секундах, $\eta$ — среднегодовой КПД — коэффициент, учитывающий долю простоя суперкомпьютера и эффективность реализации решаемых задач. Оба коэффициента $T$ и $\eta$ с большой долей достоверности можно считать примерно одинаковыми для всех суперкомпьютерных центров (СКЦ) мира: для $T$ пояснения не требуются, а близость $\eta$ для всех суперкомпьютеров следует из широкой доступности эффективных планировщиков, максимально уменьшающих простой элементов суперкомпьютера, и близкая для разных СКЦ доступность средств оптимизации вычислений.

Таким образом, $\Sigma\mathrm{Rmax}$ можно рассматривать как единицу объема выполненных за год вычислений, а долю страны в $\Sigma\mathrm{Rmax}$ — как объем

(в указанных единицах) выполненных данной страной вычислений за год. По определению, доля всего мира в ΣRmax составляет 100% — весь мир выполняет за год одну единицу вычислений. Доля России в июне 2019 года составила 0,24% от ΣRmax, то есть, Россия за год выполнила 0,0024 указанных единиц вычислений.

Отношение доли страны в ΣRmax к доле страны в мировом ВВП будем называть *индексом цифровизации* экономики страны. По своему определению индекс цифровизации показывает, какой объем вычислений за год приходится на единицу продукции, выпущенной за год, а именно:

- Для всего мира, по определению, доля в ΣRmax составляет 100%, доля в мировом ВВП тоже 100% и индекс цифровизации — единица. Единица — это среднемировой уровень отношения объема вычислений за год на единицу продукции, выпущенной за год.
- Если у страны индекс цифровизации *больше единицы*, то именно во столько раз эта страна выполняет расчетов *больше* на каждую единицу продукции, чем в среднем по миру. Экономика такой страны «более цифровая», чем в среднем по миру.
- Если у страны индекс цифровизации *меньше единицы*, то эта страна соответственно *меньше* выполняет расчетов на каждую единицу продукции, чем в среднем по миру. Экономика такой страны «менее цифровая», чем в среднем по миру.
- Наконец, отношение индексов цифровизации двух стран показывает, во сколько раз больше (меньше) одна страна выполняет вычислений на единицу продукции, чем другая страна.

В таблице 1 приведены доли различных стран в ΣRmax (на июнь 2019), их доли в мировой экономике — доли в мировом ВВП[4], — и их индексы цифровизации. Сортировка по индексу цифровизации очевидным образом отражает устремление стран к продвижению по пути к цифровой экономике. У России индекс цифровизации не просто худший, он хуже в разы данного показателя других стран: индекс цифровизации у России в 15 раз хуже, чем у Китая; в 12 раз хуже, чем у США; в 10 раз хуже, чем у Японии; в 7 раз хуже, чем

[4]Данные о ВВП стран взяты из сети Интернет: `https://www.businesslive.co.za/fm/fm-fox/numbers/2017-03-13-the-global-economy-by-gdp/`.

у Евросоюза. А это значит, что Россия ровно в такое количество раз меньше вычисляет в среднем на единицу продукции, чем указанные страны. Россия не просто не цифровая, она «в разы не цифровая».

Таблица 1. Доли стран в совокупной мировой производительности суперкомпьютеров (A), в мировом ВВП (B) и индекс цифровизации стран (отношения A/B), июнь 2019 года

| Страна | Доля ΣRmax (A) | Доля ВВП (B) | Отношение A/B |
|---|---|---|---|
| Китай | 29,86% | 14,84% | 2,01 |
| США | 38,47% | 24,32% | 1,58 |
| Япония | 7,52% | 5,91% | 1,27 |
| Евросоюз | 18,36% | 21,37% | 0,86 |
| Россия | 0,24% | 1,8% | 0,13 |

### Национальные СК-инфраструктуры

Когда мы анализируем суперкомпьютерную инфраструктуру страны, нам важно понять, сколько суперкомпьютеров того или иного уровня имеется в стране, какая их суммарная производительность, в каких областях они используются. Будем выделять четыре уровня СК-инфраструктуры:

*Высший уровень.* Системы уровня Top1–20, то есть, занимающие первые 20 мест в рейтинге. На практике, эти системы устанавливают в крупнейших национальных суперкомпьютерных центрах;

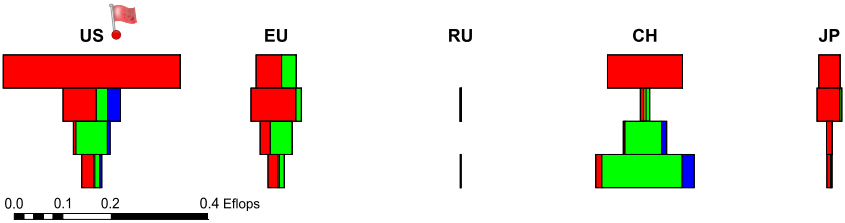
*Высокий уровень.* Системы уровня Top21–100 — крупнейшие региональные и отраслевые СКЦ;

*Средний уровень.* Системы уровня Top101–250 — крупные региональные и корпоративные СКЦ;

*Начальный уровень.* Системы уровня Top251–500 — СКЦ предприятий и научных учреждений.

На рисунке 11 представлены характеристики суперкомпьютерных инфраструктур США, Евросоюза, России, Китая и Японии на июнь 2019 года:

(*а*) количество систем




(*б*) их суммарная производительность

Рисунок 11. Июнь 2019 года: четырёхуровневая суперкомпьютерная инфраструктура США, стран Евросоюза, России, Китая и Японии по областям:
■ — исследования и разработки,
■ — индустриальные применения,
■ — государственные нужды и оборона,
■ — нет информации

- В верхней части рисунка для каждой страны размер каждого слоя «пирамиды» указывает количество суперкомпьютеров каждого из 4-х уровней — высшего, высокого, среднего и начального. В нижней части показана суммарная производительность суперкомпьютеров этих уровней. Нижняя и верхняя части рисунка снабжены своими масштабными линейками;
- Флажком отмечена страна, в которой расположен самый мощный суперкомпьютер в мире;
- Цветами выделены доли декларированных областей применения этих суперкомпьютеров.

Отчётливо заметно следующее:

*Все страны (кроме России)* имеют сбалансированную СК-инфраструктуру — в заметном количестве присутствуют суперком-

пьютеры всех четырех уровней.

*Китай* создал очень сбалансированную СК-инфраструктуру с ярко выраженным пирамидальным строением. В составе СК-инфраструктуры Китая 2 суперкомпьютера высшего уровня, 7 — высокого, 47 — среднего и 163 — начального уровня. Всего 219 суперкомпьютеров.

Суммарная производительность СК-инфраструктуры Китая составляет 29,86% от ΣRmax. ВВП Китая составляет 14,84% мирового ВВП, индекс цифровизации Китая равен $29,86/14,84 = 2,01$ и он указывает, что Китай на единицу продукции считает в 2 раза больше, чем это есть в среднем по всему миру.

СК-инфраструктура Китая, пожалуй, более серьезная, чем даже у США. Видна жесткая воля внедрения СКТ и в исследования, и в приложения реальной экономики. Отметим, что все это достигнуто Китаем всего лишь за последние 10 лет: в 2009 году практически никакой СК-инфраструктуры Китай не имел.

*США* на сегодняшний день имеют эффективную суперкомпьютерную инфраструктуру, в составе которой 9 суперкомпьютеров высшего уровня, 28 — высокого, 45 — среднего и 34 — начального уровня. Всего 116 суперкомпьютеров.

Суммарная производительность СК-инфраструктуры США составляет 38,47% от ΣRmax. ВВП США составляет 24,32% мирового ВВП, индекс цифровизации США равен 1,58 и он указывает, что США на единицу продукции считает в 1,58 раз больше, чем это есть в среднем по всему миру.

*Япония* имеет СК-инфраструктуру, в составе которой 3 суперкомпьютера высшего уровня, 12 — высокого, 6 — среднего и 8 — начального уровня. Всего 29 суперкомпьютеров.

Суммарная производительность СК-инфраструктуры Японии составляет 7,52% от ΣRmax. ВВП Японии составляет 5,91% мирового ВВП, индекс цифровизации Японии равен 1,27 и он указывает, что Япония на единицу продукции считает в 1,27 раз больше, чем это есть в среднем по всему миру.

*Евросоюз* имеет СК-инфраструктуру, в составе которой 5 суперкомпьютеров высшего уровня, 25 — высокого, 38 — среднего и 28 — начального уровня. Всего 96 суперкомпьютеров.

Суммарная производительность СК-инфраструктуры Евросоюза составляет 18,36% от ΣRmax. ВВП Евросоюза составляет

21,37% мирового ВВП, индекс цифровизации Евросоюза равен 0,86 — немного меньше единицы. Это указывает, что Евросоюз на единицу продукции считает немного меньше, чем это есть в среднем по всему миру.

*Россия* на сегодняшний день не имеет СК-инфраструктуры с внятным составом, которая содержала бы разумные количества суперкомпьютеров всех уровней производительности. Сегодня в составе СК-инфраструктуры России всего два суперкомпьютера — один высокого и один начального уровня. Системы высшего и среднего уровня отсутствуют.

Суммарная производительность СК-инфраструктуры России составляет 0,24% от ΣRmax. ВВП России составляет 1,8% мирового ВВП, индекс цифровизации России равен 0,13 и он указывает, что Россия на единицу продукции считает почти в 8 раз меньше, чем это есть в среднем по всему миру.

Таким образом, Россия не обладает никакой СК-инфраструктурой. По крайней мере, такой, которая отвечала бы ее планам по развитию цифровой экономики и вхождению в пятерку самых мощных экономик мира.

### Какая СК-инфраструктура России необходима?

Ответ на этот вопрос получить несложно. Вспомним: Россия на единицу продукции считает в 15 раз меньше, чем Китай; в 12 раз меньше, чем США; в 10 раз меньше, чем Япония; в 7 раз меньше, чем Евросоюз. Таким образом, чтобы уровень развития СК-инфраструктуры России обеспечивал бы построение цифровой экономики и *вхождение в пятерку крупнейших мировых экономик*, надо индекс цифровизации довести хотя бы до уровня Японии. Значит, надо как минимум в 10 раз увеличить долю России в ΣRmax: суммарная производительность СК-инфраструктуры России должна составлять как минимум 2,4% от ΣRmax.

Полученная выше оценка (2,4% от ΣRmax) необходимой производительности СК-инфраструктуры России вычислена при условии сохранении доли России в мировом ВВП. А так как эта доля должна расти для *вхождения в пятерку крупнейших мировых экономик*, то для поддержания необходимого значения индекса цифровизации (на уровне

Японии) пропорциально росту доли России в мировом ВВП потребуется наращивать производительность СК-инфраструктуры России. Так что, 2,4% от ΣRmax — это стартовый, сегодняшний ориентир.

### СК-инфраструктура, которую мы растеряли

Цели, поставленные в предыдущем абзаце, не являются недостижимыми. Россия уже имела такой уровень развития СК-инфраструктуры, но растеряла его. В конце выполнения суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства (головной исполнитель от России — ИПС им. А.К. Айламазяна РАН) в 2010 году СК-инфраструктура России включала 11 суперкомпьютеров всех четырех уровней: 1 высшего, 2 высокого, 2 среднего и 6 начального уровня. Суммарная производительность СК-инфраструктуры России составляла 2,51% от ΣRmax, что даже больше, чем упомянутая выше цель — 2,4% от ΣRmax. Индекс цифровизации был 1,39, что лучше, чем сегодня у Японии (и, тем более, Евросоюза).

## 7. Заключение

На рубеже 2008 года, при сохранении экспоненциального характера роста производительности суперкомпьютеров в списке Top500, уменьшилась скорость роста (основание) этой самой экспоненты. До 2008 года достаточно точно выдерживалось увеличение производительности самой мощной системы в мире в 1 000 раз за 11 лет, после 2008 года темпы роста снижались и с 2015 года увеличение в 1 000 раз следует ожидать за 17–20 лет и более. Мировая суперкомпьютерная отрасль на рубеже 2008 года, несомненно, столкнулась с научно-техническими сложностями на пути развития СКТ. Это приводит к пересмотру прогнозов достижения новых рубежей производительности: 1 Eflops скорее всего, будет достигнут в 2022 году, а 1 Zflops — после 2039 года, если не будет реализован какой-либо технологический прорыв.

Анализ гибридных архитектур в редакциях Top500 позволяет установить, что вклад гибридных архитектур в общую производительность Top500 никогда не являлся и не является доминирующим, хотя их вклад в ΣRmax и вырос с 15% в 2014 году до 41% сегодня. Ускорители IBM и AMD изчезли из Top500, и на пути исчезновения ускорители Intel — 1% ΣRmax. Среди актуальных решений для гибридных систем

на сегодня лидируют ускорители NVIDIA — 35% ΣRmax. Отдельно стоит выделить (как пример для России, достойный подражания) новые, заслуживающие внимания, ускорители PEZY Computing, Matrix-2000 и Deep Computing Processor, с заметной совокупной долей 7% ΣRmax.

В мире продолжают интенсивно развиваться различные технологии интерконнекта. Они играют исключительно высокую роль для всего комплекса СКТ. На сегодняшний день, из коммерчески доступных технологий используется Infiniband, Ethernet (различных производителей) и технологии компании Intel семейств Omni-Path / TrueScale. Последние имеют весьма высокие технические характеристики, но диктуют жесткую технологическую привязку к решениям Intel: архитектура вычислительного узла и процессоры должны быть от компании Intel. В 2012–2017 годах самая большая доля в ΣRmax у суперкомпьютеров с интерконнектами, которые недоступны, как отдельные коммерческие решения (класс Custom). Среди суперкомпьютеров высшего уровня доля этого класса подавляющая. Для России это означает:

- Разработка российских систем высшей производительности, скорее всего, не сможет обойтись без интерконнекта класса Custom. А так как его невозможно купить, то, с неизбежностью, его придется разработать самим. Такая разработка России по силам и ранее она уже не раз успешно выполнялась [**8**–**12**].
- Для средних и младших по производительности российских суперкомпьютеров можно использовать для интерконнекта технологии Infiniband и Ethernet.
- Использование в российских суперкомпьютерах технологий компании Intel семейств Omni-Path / TrueScale создает высокие риски технологической зависимости и экспортных ограничений.

На сегодня США, Китай, Япония и Евросоюз выстроили добротную СК-инфраструктуру, как базис перехода к цифровой экономике, имеют весомые доли своих стран в совокупной мировой производительности суперкомпьютеров, серьезные показатели индекса цифровизации: Китай — 2,01; США — 1,58; Япония — 1,27, Евросоюз — 0,86. Все это хорошо иллюстрирует реальное продвижение стран на пути к цифровой экономике. Россия не имеет сегодня никакой осмысленной СК-инфраструктуры, а ее доля в совокупной мировой производительности суперкомпьютеров составляет 0,24%. Индекс цифровизации России — 0,13, что хуже в 15 раз, чем у Китая, в 12 раз, чем у США; в 10 раз, чем у Японии, в 7 раз, чем у Евросоюза. В последние годы в области

СКТ неуклонно растет отставание России от других ведущих стран и отставание России от мирового уровня развития СКТ.

Для решения задач построения цифровой экономики в России и вхождения в пятерку крупнейших экономик мира надо развивать российские СКТ и создавать продуманную СК-инфраструктуру страны с суммарной производительностью 2,4% ΣRmax. Эта цель достижима: в 2010 году СК-инфраструктура России включала 11 суперкомпьютеров всех четырех уровней: 1 высшего, 2 высокого, 2 среднего и 6 начального уровня, ее суммарная производительность была 2,51% от ΣRmax, идекс цифровизации России был 1,39, что лучше, чем сегодня у Японии и у Евросоюза.

Все указанные выше обстоятельства следует самым серьезным образом учитывать при формировании государственной политики в области СКТ и цифровых технологий.

## Благодарности

Автор статьи благодарен многим сотрудникам ИПС им. А. К. Айламазяна РАН, оказавшим существенную помощь при подготовке данного материала. Среди них особо выделим:

- Е. П. Лилитко, работа с которым в предыдущие годы позволила отполировать методологию, используемую в статье;
- М. Г. Химшиашвили, выполнившую большую часть работы по подготовке верстки и исправлению опечаток и иных ошибок;
- И. В. Шафранского, подготовившего в необходимом векторном формате иллюстрации к статье;
- Научно-ТЕХнических редакторов журнала за активную работу по улучшению изложения.

## Список литературы

[1] S. J. Ezell, R. D. Atkinson. *The vital importance of high-performance computing to U.S. competitiveness*, ITIF, Washington, DC, USA, 2016, 58 pp. URL ↑3,26

[2] J. J. Dongarra, H. W. Meuer, E. Strohmaier. *TOP500 Report 1996*, 1996. URL ↑4,5,9

[3] С. М. Абрамов. Правда, искажающая истину. Как следует анализировать Top500? *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Выч. матем. информ.*, **2**:3 (2013), с. 5–31. doi ↑4,7,9

[4] С. М. Абрамов, Е. П. Лилитко. «Состояние и перспективы развития вычислительных систем сверхвысокой производительности», *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2013, №2, с. 6–22. URL ↑4,7,9

[5] J. J. Dongarra, H. W. Meuer, H. D. Simon, E. Strohmaier. “Changing technologies of HPC”, *Future Generation Computer Systems*, **12**:5 (1997), pp. 461–474. doi ↑9

[6] E. Strohmaier, H. W. Meuer, J. Dongarra, H. D. Simon. “The TOP500 List of Supercomputers and Progress in High Performance Computing”, *Computer*, **48**:11 (2015), pp. 42–49. doi ↑9,11

[7] R. Lucas et al. (DOE ASCAC Subcommittee). *Top ten exascale research challenges*, DOE ASCAC Subcommittee Report, DOE ASCAC, Office of Science, Washington, DC, February 10, 2014, 86 pp. doi ↑17

[8] И. А. Адамович, Анд. В. Климов, Ю. А. Климов, А. Ю. Орлов, А. Б. Шворин. «Опыт разработки коммуникационной сети суперкомпьютера «СКИФ-Аврора»», *Программные системы: теория и приложения*, **1**:3 (3) (2010), с. 107–123. URL ↑23,35

[9] А. И. Слуцкин, А. С. Симонов, И. А. Жабин, Д. В. Макагон, Е. Л. Сыромятников. «Разработка межузловой коммуникационной сети ЕС8430 «Ангара» для перспективных российских суперкомпьютеров», *Успехи современной радиоэлектроники*, 2012, №1, с. 6–10. ↑23,35

[10] В. К. Левин, Б. Н. Четверушкин, Г. С. Елизаров, В. С. Горбунов, А. О. Лацис, В. В. Корнеев, А. А. Соколов, Д. В. Андрюшин, Ю. А. Климов. «Коммуникационная сеть МВС-Экспресс», *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2014, №1, с. 10–24. URL ↑23,35

[11] В. Г. Басалов, В. М. Вялухин. «Адаптивная система маршрутизации для отечественной системы межпроцессорных обменов СМПО-10G», *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов*, 2012, №3, с. 64–70. ↑23,35

[12] Ю. А. Климов, А. Б. Шворин, А. Ю. Хренов, И. А. Адамович, А. Ю. Орлов, С. М. Абрамов, Ю. В. Шевчук, А. Ю. Пономарев. «Паутина: высокоскоростная коммуникационная сеть», *Программные системы: теория и приложения*, **6**:1 (24) (2015), с. 109–120. URL ↑23,35

[13] С. В. Абламейко, С. М. Абрамов, В. В. Анищенко, Н. Н. Парамонов, О. П. Чиж. «Совместная белорусско-российская программа «СКИФ»», *Труды Международной научной конференции «Суперкомпьютерные системы и их применение. SSA’2004»* (26–28 октября, 2004), ОИПИ НАН Беларуси, Минск, 2004, с. 23–27. URL ↑26,27

[14] С. В. Абламейко, С. М. Абрамов, В. В. Анищенко, С. В. Медведев, О. П. Чиж. *Суперкомпьютерные конфигурации «СКИФ»*, ОИПИ НАН Беларуси, Минск, 2005, ISBN 985-6744-19-9, 170 с.; С. В. Абламейко, С. М. Абрамов, В. В. Анищенко, С. В. Медведев, Н. Н. Парамонов, О. П. Чиж. *Суперкомпьютерные конфигурации «СКИФ»*, 195 с. URL ↑26,27

[15] С. М. Абрамов, В. В. Анищенко, В. Ф. Заднепровский, А. М. Криштофик. «Основные результаты и эффективность выполнения программы Союзного государства «СКИФ-ГРИД»», *Доклады Четвертой Международной научной конференции «Суперкомпьютерные системы и их применение»*, SSA'2012 (23–25 октября 2012 г.), ОИПИ НАН Беларуси, Минск, ISBN 978-985-6744-76-4, с. 7–11. ↑26,27

| | |
|---|---|
| *Поступила в редакцию* | 24.07.2019 |
| *Переработана* | 15.09.2019 |
| *Опубликована* | 30.09.2019 |

Рекомендовал к публикации *к.т.н. С. А. Амелькин*

*Пример ссылки на эту публикацию:*

С. М. Абрамов. «Июнь 2019: анализ развития суперкомпьютерной отрасли в России и в мире». *Программные системы: теория и приложения*, 2019, **10**:3(42), с. 3–40. doi 10.25209/2079-3316-2019-10-3-3-40
URL http://psta.psiras.ru/read/psta2019_3_3-40.pdf

*Об авторе:*

**Сергей Михайлович Абрамов**

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН. Научный руководитель от России суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства. Директор Института программных систем им. А.К. Айламазяна РАН. Область интересов: суперкомпьютерные, облачные и грид-технологии (аппаратура и программное обеспечение); компьютерные и сенсорные сети, IoT (аппаратура и программное обеспечение); теоретические основания информатики: метавычисления и их применение.

iD 0000-0001-6603-7971
**e-mail:** abram@botik.ru

CSCSTI 50.33.04,50.01.11
UDC 004.382.2+519.257

Sergey Abramov. *June 2019: Analysis of the Development of the Supercomputer Industry in Russia and Worldwide.*

Abstract. This work continues the series of publications by the author devoted to the supercomputer industry analysis based on open data from the Top500 List of the world's most powerful supercomputers — Top500.

This article discusses for the first time new data from recent releases of Top500 and previously unpublished results. It analyses some technical aspects related to hybrid architectures and new interconnect solutions.

Today's focus on the digital economy's needs in supercomputer technologies as a basis of infrastructure highlights the relevance of this work.

*Key words and phrases:* Top500, supercomputer, interconnect, hybrid architectures.

2010 *Mathematics Subject Classification*: 65Y05; 68M20, 62Q05

*References*

[1] S. J. Ezell, R. D. Atkinson. *The vital importance of high-performance computing to U.S. competitiveness*, ITIF, Washington, DC, USA, 2016, 58 pp. URL ↑3,26

[2] J. J. Dongarra, H. W. Meuer, E. Strohmaier. *TOP500 Report 1996*, 1996. URL ↑4,5,9

[3] S. M. Abramov. True judgments that distort the real truth. How to analyze the Top500? *Vestn. YuUrGU. Ser. Vych. matem. inform.*, **2**:3 (2013), pp. 5–31 (in Russian). doi ↑4,7,9

[4] S. M. Abramov, Ye. P. Lilitko. "Current state and development prospects of high-end HPC systems", *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy*, 2013, no.2, pp. 6–22 (in Russian). URL ↑4,7,9

[5] J. J. Dongarra, H. W. Meuer, H. D. Simon, E. Strohmaier. "Changing technologies of HPC", *Future Generation Computer Systems*, **12**:5 (1997), pp. 461–474. doi ↑9

[6] E. Strohmaier, H. W. Meuer, J. Dongarra, H. D. Simon. "The TOP500 List of Supercomputers and Progress in High Performance Computing", *Computer*, **48**:11 (2015), pp. 42–49. doi ↑9,11

[7] R. Lucas et al. (DOE ASCAC Subcommittee). *Top ten exascale research challenges*, DOE ASCAC Subcommittee Report, DOE ASCAC, Office of Science, Washington, DC, February 10, 2014, 86 pp. doi ↑17

---

This paper was partially supported by the research work of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia, state registration number AAAA-A19-119020690043-9.

© S. Abramov, 2019
© Ailamazyan Program Systems Institute of RAS, 2019
© Program Systems: Theory and Applications (design), 2019

doi 10.25209/2079-3316-2019-10-3-3-40

[8] I. A. Adamovich, And. V. Klimov, Yu. A. Klimov, A. Yu. Orlov, A. B. Shvorin. “Thoughts on the development of SKIF-Aurora supercomputer interconnect”, *Program Systems: Theory and Applications*, **1**:3 (3) (2010), pp. 107–123 (in Russian). URL ↑23,35

[9] A. I. Slutskin, A. S. Simonov, I. A. Zhabin, D. V. Makagon, Ye. L. Syromyatnikov. “Development of the ES8430 "Angara" interconnect for future Russian supercomputers”, *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2012, no.1, pp. 6–10 (in Russian). ↑23,35

[10] V. K. Levin, B. N. Chetverushkin, G. S. Yelizarov, V. S. Gorbunov, A. O. Latsis, V. V. Korneyev, A. A. Sokolov, D. V. Andryushin, Yu. A. Klimov. “Communication fabric MVS-express”, *Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel’nyye sistemy*, 2014, no.1, pp. 10–24 (in Russian). URL ↑23,35

[11] V. G. Basalov, V. M. Vyalukhin. “Adaptive routing system for the domestic system of interprocessor exchanges SMPO-10G”, *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov*, 2012, no.3, pp. 64–70 (in Russian). ↑23,35

[12] Yu. A. Klimov, A. B. Shvorin, A. Yu. Khrenov, I. A. Adamovich, A. Yu. Orlov, S. M. Abramov, Yu. V. Shevchuk, A. Yu. Ponomarev. “Pautina: the high performance interconnect”, *Program Systems: Theory and Applications*, **6**:1 (24) (2015), pp. 109–120 (in Russian). URL ↑23,35

[13] S. V. Ablameyko, S. M. Abramov, V. V. Anishchenko, N. N. Paramonov, O. P. Chizh. “Joint Belarusian-Russian program “SKIF””, *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Superkomp’yuternyye sistemy i ikh primeneniye. SSA’2004”* (26–28 oktyabrya, 2004), OIPI NAN Belarusi, Minsk, 2004, pp. 23–27 (in Russian). URL ↑26,27

[14] S. V. Ablameyko, S. M. Abramov, V. V. Anishchenko, S. V. Medvedev, O. P. Chizh. *Supercomputer configurations “SKIF”*, OIPI NAN Belarusi, Minsk, 2005, ISBN 985-6744-19-9 (in Russian), 170 pp.; S. V. Ablameyko, S. M. Abramov, V. V. Anishchenko, S. V. Medvedev, N. N. Paramonov, O. P. Chizh. *Supercomputer configurations “SKIF”* (in Russian), 195 pp. URL ↑26,27

[15] S. M. Abramov, V. V. Anishchenko, V. F. Zadneprovskiy, A. M. Krishtofik. “The main results and effectiveness of the Union State program “SKIF-GRID””, *Doklady Chetvertoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Superkomp’yuternyye sistemy i ikh primeneniye”*, SSA‘2012 (23–25 oktyabrya 2012 g.), OIPI NAN Belarusi, Minsk, ISBN 978-985-6744-76-4, pp. 7–11 (in Russian). URL ↑26,27

*Sample citation of this publication:*

Sergey Abramov. “June 2019: Analysis of the Development of the Supercomputer Industry in Russia and Worldwide”. *Program Systems: Theory and Applications*, 2019, **10**:3(42), pp. 3–40. (*In Russian*).

doi 10.25209/2079-3316-2019-10-3-3-40

URL `http://psta.psiras.ru/read/psta2019_3_3-40.pdf`