

# Состояние и перспективы развития вычислительных систем сверхвысокой производительности

С.М. Абрамов, Е.П. Лилитко

**Аннотация.** В статье обсуждаются состояние и перспективы развития суперкомпьютерных технологий как за рубежом, так и в России. Основное внимание уделяется системам сверхвысокой производительности — суперкомпьютерам, которые соответствуют первым десяти позициям в мировом рейтинге Top500. Рассматривается имеющийся у Российской академии наук задел в области систем сверхвысокой производительности.

**Ключевые слова:** высокопроизводительные вычисления, суперкомпьютеры, Top500.

## Введение

В последнее время суперкомпьютерные технологии в России объявлены как один из приоритетов государственной политики и заботы<sup>1</sup>. О суперкомпьютерах появилось много публикаций и не только в специализированной прессе. Публично доступная информация — например, мировой рейтинг пятисот самых производительных машин в мире,— создает иллюзию возможности проведения простейшего анализа суперкомпьютерной отрасли даже непрофессионалами. В результате появляются не вполне продуманные анализы и весьма спорные (часто просто ложные) выводы из них. Самое печальное, что некоторые из этих выводов с удивительной настойчивостью цитируются, в том числе — в правительственной переписке. Таким образом, проведение глубокого профессионального анализа состояния и перспектив развития суперкомпьютерной отрасли

ли — всегда актуальная работа. Это обстоятельство послужило для авторов первой мотивацией при написании данной статьи.

Дополнительную мотивацию дал встреченный в деловой переписке термин «вычислительные системы *сверхвысокой* производительности». Что-то заставило «зацепиться» за данный термин и серьезно подумать... Действительно, все мы привыкли к англоязычным терминам «HPC — high performance computing» и «supercomputer», привыкли к соответствующей русской терминологии «высокопроизводительные вычисления», «суперкомпьютер», «суперЭВМ» и «вычислительные системы высокой производительности». Возникает вопрос, какой содержательный смысл мог бы быть у термина «вычислительные системы *сверхвысокой* производительности»? Есть ли причины для введения такого термина? Есть ли какие-то серьезные отличия между вычислительными системами высокой производительности и *сверхвысокой* производительности? Желание аккуратно разобраться в этих вопросах послужило для авторов второй мотивацией при написании данной статьи.

<sup>1</sup> Например, Указ Президента Российской Федерации №899 от 07.07.2011г. «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации»

## 1. Вычислительные системы высокой производительности, суперкомпьютеры

Казалось бы, базовые термины, например, «суперкомпьютер», должны были бы пониматься специалистами одинаково. Но, как показывает практика, такого единодушия в нашей отрасли нет. Для того чтобы исключить неверное толкование, приведем используемые нами определения некоторых терминов.

**Производительность.** Среди важнейших технических характеристик компьютеров традиционно выделяют производительность — количество операций с плавающей точкой, выполняемых вычислителем за секунду<sup>2</sup>. Различают

- пиковую (теоретическую) производительность — максимальное число операций в секунду, которое может выполнить установка в идеальном случае — в принципе;

- реальную производительность на некоторой задаче — реальное количество операций, выполненных при решении задачи, деленное на реальное время решения задачи.

Пиковую производительность оценивают теоретически, исходя из состава оборудования компьютера. Реальную производительность измеряют опытным путем, решая на системе некоторую задачу.

Отношение реальной производительности к пиковой называют коэффициентом полезного действия компьютера на данной задаче (*КПД*). На разных задачах реальная производительность (и КПД) одного и того же компьютера могут быть разными.

Для сравнения производительности различных суперкомпьютеров между собой чаще всего используют реальную производительность на задаче Linpack<sup>3</sup>. В последнее время набирают популярность и другие тесты реальной производительности суперкомпьютеров, например,

основанные на задачах с интенсивной обработкой данных<sup>4</sup>.

*Суперкомпьютеры, вычислительные системы высокой производительности.* К вычислительным системам высокой производительности — суперкомпьютерам — отнесем вычислительные машины, значительно превосходящие по своим техническим параметрам большинство существующих компьютеров. То есть, если среди всех существующих в настоящий отрезок времени компьютеров отобрать самые мощные — например, пятьсот самых производительных — то они и определяют термин «суперкомпьютер» на данный момент времени.

*Top500.* С 1993 года два раза в год (в июне и ноябре) выходит мировой рейтинг пятисот самых мощных машин мира — Top500. Рейтинг использует измерение реальной производительности суперкомпьютеров на задаче Linpack. На сегодня в открытом доступе [1] имеются данные 39 выпусков рейтинга — с июня 1993 года по июнь 2012 года. Информация, представленная в рейтинге, включает сведения о стране и месте расположения, области применения, различные технические сведения и т.п. Профессиональный анализ выпусков списка Top500 позволяет строить весьма достоверные<sup>5</sup> суждения о состоянии и перспективах суперкомпьютерных технологий в мире и в России.

## 2. Классы суперкомпьютеров

Как мы увидим, суперкомпьютеры очень сильно отличаются друг от друга по производительности. Сегодня<sup>6</sup> производительности су-

<sup>2</sup> 1 Gflops — гигафлопс,  $10^9$  операций в секунду, 1 Tflops — терафлопс,  $10^{12}$  операций в секунду, 1 Pflops — петафлопс,  $10^{15}$  операций в секунду, 1 Eflops — эксафлопс,  $10^{18}$  операций в секунду.

<sup>3</sup> Решение системы линейных уравнений с большим числом неизвестных. Используется в мировом рейтинге суперкомпьютеров Top500 [1].

<sup>4</sup> Например, задача поиска в большом графе в ширину — используется как тест в другом мировом рейтинге суперкомпьютеров — Graph500 [2].

<sup>5</sup> Конечно, всегда и во всех странах существуют суперкомпьютерные установки, которые не включаются в рейтинг Top500 из соображений государственной безопасности или по другим причинам. Однако можно ожидать, что данное обстоятельство более или менее одинаково работает для всех стран и не искажает результатов анализа Top500. Аналогично тому как вполне достоверно можно сравнивать между собою айсберги, анализируя только их надводные — видимые — части.

<sup>6</sup> Здесь и далее, если не оговорено иное, используются данные из актуальной редакции рейтинга Top500 [1] — июньской редакции 2012 года.

перкомпьютеров, занимающих первое и последнее место в Top500, отличаются в 268 раз.

Априори ясно, что системы, так сильно различающиеся по производительности, будут основаны на совершенно разных технических решениях, будут ориентированы на совершенно разные классы задач и области применений, будут различаться еще по ряду важнейших характеристик. Ниже все эти различия будут обсуждены более детально.

Таким образом, для проведения корректного анализа надо разбить все суперкомпьютеры на некоторые классы, так, чтобы отличие по производительности внутри класса не было бы таким большим. Имеющиеся в Top500 данные

среди всех суперкомпьютерных установок позволяют выделить четыре класса (Табл. 1).

**2.1. Распределение суперкомпьютеров по ведущим странам и областям применения**

Сегодня в США, странах объединенной Европы, Китае и Японии установлено большинство суперкомпьютеров, перечисленных в Top500: 456 систем (из 500 — 91,2%) с суммарной Linpack-производительностью 116 242 Tflops (из 123 418 Tflops — 94,2%). На Россию приходится 5 систем (1,0%) с суммарной Linpack-производительностью 1 293 Tflops (1,0%).

На Рис.1 показано распределение систем по упомянутым регионам, по классам и областям

Табл. 1. Классы суперкомпьютеров

№ класса	Место в Top500	Описание класса	Linpack-производительность, июнь 2012, Tflops
1	1–10, 11–20	Крупнейшие национальные суперкомпьютерные центры	16 325–1 271 1 243–1 035
2	21–100	Крупнейшие региональные и отраслевые суперкомпьютерные центры	919–173
3	101–250	Крупные региональные и корпоративные суперкомпьютерные центры	173–87
4	251–500	Суперкомпьютерные центры предприятий и научных учреждений	86–61

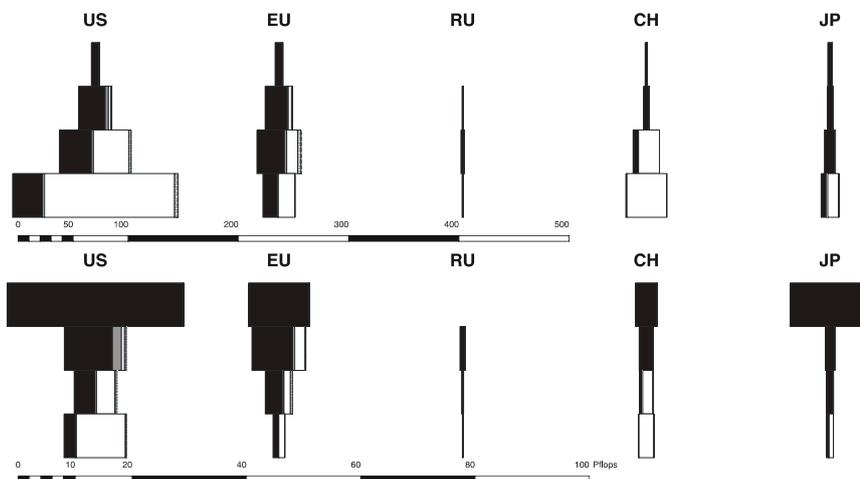


Рис. 1. Распределение суперкомпьютеров по ведущим странам и России, классам и областям использования

US — США, EU — страны объединенной Европы, RU — Россия, CH — Китай, JP — Япония.

Системы из разных классов показаны в разных слоях «пирамидок»: верхний слой — Top1–20, далее — Top21–100 и Top101–250, нижний слой — Top251–500.

В верхней части рисунка показано количество систем, в нижней части — суммарная Linpack-производительность. Затраты на создание и сопровождение систем можно считать пропорциональными производительности (нижняя часть рисунка).

Области применения обозначены заливкой: ■ — использование в интересах науки (фундаментальные и задельные исследования, частично — НИР), □ — использование в промышленности и других секторах экономики (инженерные расчеты, ОКР, и т.п.), ▨ — государственные и оборонные нужды, ■ — неизвестно, данные не приведены

Табл. 2. Распределение суперкомпьютеров ведущих стран и России по областям использования

Топ1-20: суперкомпьютеры высшего класса						
Распределение систем						
	US	EU	JP	CH	RU	Total
ac	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Распределение Linpack-производительности						
	US	EU	JP	CH	RU	Total
ac	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Топ1-500: все суперкомпьютеры						
Распределение систем						
	US	EU	JP	CH	RU	Total
ac	35%	64%	66%	19%	100%	42%
n/a	3%	4%	3%			3%
com	60%	28%	31%	81%		53%
gov	2%	4%				2%

Распределение Linpack-производительности						
	US	EU	JP	CH	RU	Total
ac	75%	81%	95%	61%	100%	78%
n/a	3%	2%				2%
com	20%	15%	5%	39%		18%
gov	1%	2%				1%

Страны: US — США, EU — страны объединенной Европы, JP — Япония, CH — Китай, RU — Россия, Total — в сумме, по названным странам.

Области использования: «ac» — использование в интересах науки (фундаментальные и перспективные исследования, НИР), «com» — использование в промышленности и других секторах экономики (инженерные расчеты, ОКР, и т.п.), «gov» — государственные и оборонные нужды, «n/a» — не известно, данные не приведены.

Табл. 3. Разница в Linpack-производительности между суперкомпьютерами разных классов

Место в Top500	Linpack-производительность, max-min (Tflops)	Разница Linpack-производительности, max/min (разы)	Разница Linpack-производительности от Top1 (разы)
Top1–10	16 325–1 271	12,8	1–13
Top11–20	1 243–1 035	1,2	13–16
Top21–100	919–173	5,3	18–95
Top101–250	173–87	2,0	95–188
Top251–500	86–61	1,4	189–268

применения. Бросается в глаза, что хотя по количеству систем большая доля приходится на использование в промышленности и других секторах экономики, но в распределении Linpack-производительности, а значит, и в распределении финансовых ресурсов, выделяемых на создание и эксплуатацию систем, пропорция обратная — в пользу использования суперкомпьютеров в интересах науки, фундаментальных и задельных исследований.

А самые производительные системы — системы высшего класса (Топ1–20) — сегодня все используются исключительно в интересах исследований — фундаментальных и задельных, пусть и ориентированных в перспективе на конкретные области, например, энергетику или оборону. Детально данное распределение представлено в Табл.2.

Разница в Linpack-производительности суперкомпьютеров различных классов представлено в Табл.3.

Еще раз подчеркнем, что разница (Табл.1, Табл.3) по Linpack-производительности самой

мощной и самой слабой системы в первом классе составляет 15,8 раза<sup>7</sup>, во втором классе — 5,3 раза, в третьем — 2,0 раза, в четвертом — 1,4 раза. Таким образом, системы из первого класса (и особенно — системы Топ1–Топ10) очень сильно выделяются среди других, а в классах 2–4 расположены системы не принципиально отличающиеся друг от друга по производительности.

На основании этого представляется обоснованным определить отдельную категорию суперкомпьютеров: вычислительные системы сверхвысокой производительности.

### 3. Вычислительные системы сверхвысокой производительности

Вычислительные системы сверхвысокой производительности в соответствии со своим названием - это вычислительные машины, значительно превосходящие по своим техническим

<sup>7</sup> Топ1–10 — 10.1 раза, Топ10–20 — 1.8 раза.

параметрам большинство существующих суперкомпьютеров, то есть, это суперкомпьютеры, соответствующие уровню Top1–10<sup>8</sup>.

Системы сверхвысокой производительности не только сильно отличаются по производительности от остальных суперкомпьютеров, они также сильно отличаются по использованным архитектурным и техническим решениям, что обсуждается ниже.

Системы, входившие в Top1–10, создавались в США (256, 65,6%)<sup>9</sup>, Японии (64; 16,4%), Европе (53; 13,6%)<sup>10</sup>, Китае (13; 3,3%), Индии (2; 0,5%) и Канаде (2; 0,5%).

Сегодня системы сверхвысокой производительности расположены в США (3 системы), Китае (2), Германии (2), Японии (1), Италии (1) и во Франции (1); семь из десяти систем разработаны и изготовлены собственными (национальными) суперкомпьютерными компаниями<sup>11</sup>.

*Роль и место вычислительных систем сверхвысокой производительности.* Сегодня критические (прорывные) технологии в государствах, строящих экономику, основанную на знаниях, исследуются и разрабатываются на базе широкого использования суперкомпьютерных технологий. И другого пути — нет. Без серьезной суперкомпьютерной инфраструктуры:

- невозможно создать современные изделия высокой (аэрокосмическая техника, суда, энергетические блоки электростанций различных типов) и даже средней сложности (автомобили, конкурентоспособная бытовая техника и т. п.);

- невозможно быстрее конкурентов разрабатывать новые лекарства и материалы с заданными свойствами;

- невозможно развивать перспективные технологии (биотехнологии, нанотехнологии, решения для энергетики будущего и т.п.).

Сегодня суперкомпьютерные технологии по праву считаются важнейшим фактором обеспе-

чения конкурентоспособности экономики страны, а единственным способом победить конкурентов объявляют возможность обогнать их в расчетах. Здесь характерны слова Президента Совета по конкурентоспособности США Деборы Винс-Смит: «Технологии, таланты и деньги доступны многим странам. Поэтому США стоит перед лицом непредсказуемых зарубежных экономических конкурентов. Страна, желающая победить в конкуренции, должна победить в вычислениях»<sup>12</sup>.

Отметим два обстоятельства в данном высказывании:

- 1) речь идет об экономике в целом, обо всех секторах экономики — сказанное верно для добывающих и перерабатывающих секторов экономики, и особенно это верно при разработке новых технологий;

- 2) для победы в конкуренции требуется победа в вычислениях — мало быть способным проводить вычисления, надо иметь самые мощные суперкомпьютеры, самые мощные прикладные пакеты и уметь использовать эти ресурсы в интересах экономики.

Тем самым, краткое определение сегодняшней роли вычислительных систем сверхвысокой производительности может быть таким: это ключевая критическая технология, единственный инструмент, дающий возможность победить в конкурентной борьбе.

Отметим еще одно важное обстоятельство. В каждый момент времени, если посмотреть уровень развития суперкомпьютерной отрасли, то можно выделить два слоя.

- Технологии уровня «N». Это суперкомпьютерные технологии будущего, которые еще не вполне освоены, а только-только разрабатываются. Инновационные, совершенно новые технические решения, не доступные на рынке. На их базе создают суперкомпьютеры, которые сильно вырываются вперед. Как правило, это машины, соответствующие первым 10 местам списка Top500. Эти вычислитель-

<sup>8</sup> Первая половина первого класса, в терминах Табл. 1.

<sup>9</sup> В скобках: количество и частота вхождений в Top1–10 за всю историю рейтинга Top500.

<sup>10</sup> Германия (22; 5,6%), Франция (11; 2,8%), Великобритания (10; 2,6%), Испания (5; 1,3%), Нидерланды (2; 0,5%), Швейцария (1; 0,3%), Швеция (1; 0,3%).

<sup>11</sup> В ноябрьской редакции 2011 года рейтинга Top500,— все системы Top1–10 были изготовлены национальными суперкомпьютерными компаниями.

<sup>12</sup> “With technology, talent and capital now available globally, the U.S is facing unprecedented 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».

ные системы сверхвысокой производительности обладают мощностью, которая радикально отличает их от всех других машин. И на платформе таких систем можно выполнить расчеты, которые невозможно повторить (ни за какое разумное время) на суперкомпьютерах более низкого класса. На базе таких расчетов можно создать в разных отраслях принципиально новые материалы, новые технологические решения, новые изделия, которые позволят обладающей ими стороне быть вне конкуренции и существенно оторваться от других игроков в соответствующей отрасли.

– Технологии уровня «N-1». Технологии более низкого уровня, отработанные решения, широко доступные на рынке. Суперкомпьютеры на их базе доступны (и даже могут быть воспроизведены) во многих странах. Соответственно, расчеты, выполняемые на таких машинах, могут быть воспроизведены многими. На базе таких расчетов можно создать в разных отраслях конкурентоспособные материалы, технологические решения, изделия, — достичь нормального качества, заурядной конкурентоспособности. С такими изделиями можно выходить на мировой рынок, но на нем придется вести изнурительную конкурентную борьбу с десятком подобных товаров, созданных на базе подобных расчетов.

Таким образом:

1. Для того чтобы страна победила в конкуренции, ей необходимо победить в вычислениях.

2. Для того чтобы победить в вычислениях, необходимо создавать свои собственные вычислительные системы сверхвысокой производительности.

3. Необходимые для этого ключевые технические решения относятся к суперкомпьютерным технологиям уровня N. Они не доступны на рынке по двум причинам: многие из них еще не доведены до «продуктовой готовности» и никто не заинтересован отдавать в чужие руки «оружие победы» в конкуренции.

4. Таким образом, для того чтобы страна победила в конкуренции, ей предстоит создать свои собственные суперкомпьютерные технологии уровня N. По крайней мере, в части ключевых технических решений, необходимых для

разработки вычислительных систем сверхвысокой производительности.

*Состав технических средств вычислительных систем сверхвысокой производительности.* На сегодняшний день и ближайшую (не менее 6 лет) перспективу в составе систем сверхвысокой производительности можно выделить:

- аппаратные средства
  - вычислительные узлы — процессоры, оперативная память, возможно ускорители вычислений и локальные диски;
  - системная сеть — связывает вычислительные узлы и используется для организации вычислительного процесса (синхронизация и обмен данными между вычислительными фрагментами);
  - системы хранения данных (СХД), подсистемы ввода-вывода данных и визуализации;
  - инфраструктура системы:
    - вспомогательная сеть (управление задачами, передача файлов);
    - подсистема мониторинга и управления аппаратурой;
    - подсистемы охлаждения и электропитания;
- базовое и системное программное обеспечение, в том числе:
  - операционная система;
  - системы низкоуровневой поддержки эффективного и отказоустойчивого использования аппаратных средств и реализации перспективных подходов к программированию;
  - средства поддержки программирования — языки, инструменты и системы программирования.

#### **4. Особенности систем сверхвысокой производительности**

Как уже отмечалось выше, системы уровня Top1–Top10 по производительности сильно выделяются среди всех других суперкомпьютеров. И, как следствие, у них есть много весьма специфичных свойств (Табл.4).

Табл. 4. Специфика вычислительных систем сверхвысокой производительности

	← Вычислительные системы сверхвысокой производительности		Остальные суперкомпьютеры (системы высокой производительности) →
	Top1 ← Top10	← Top20 ... Top100 →	Top250 → Top500
Решаемые задачи	Наука: фундаментальные и заделные исследования, сложнейшие НИР	↔	Приложения в отраслях реальной экономики, инженерные расчеты, ОКР
Спектр задач	Широкий спектр задач — он характерен для научного поиска	↔	Задачи, специфичные для данной отрасли
Универсальность системы	Чаще — универсальные системы. Спецвычислители, лучше реконфигурируемые	↔	Универсальные системы и спецвычислители — под специфику задач отрасли
Реализация	Только отечественная разработка, возможно, на зарубежной элементной базе	↔	Либо отечественная разработка, либо закупка зарубежной системы
Используемые решения	Для многих подсистем нет коммерчески доступных решений — нужна собственная разработка	↔	Для всех подсистем (и системы в целом) доступны готовые решения
Расходы на создание и эксплуатацию	Из бюджета государства	↔	Из средств заинтересованных предприятий (ведомств)
Размещение	Крупнейшие национальные научные и исследовательские центры	↔	Лаборатории и КБ предприятий и учреждений

Системы сверхвысокой производительности — это всегда системы на пределе существующих технических возможностей: процессоров и спецпроцессоров (ускорителей вычислений), системной сети, подсистем охлаждения и электропитания и т.д. В таких системах новые оригинальные разработки используются гораздо чаще, чем коммерчески доступные решения. И для этого есть несколько причин, в том числе:

- часто используются самые свежие разработки, которые только что созданы и еще не успели выйти на рынок как коммерчески доступные решения (для вывода их на рынок потребуется несколько лет, причем задержка может быть и умышленной — сохранение отрыва от конкурентов);
- системы строятся как уникальные объекты в единичных экземплярах — для многих коммерческих компаний единичные проекты не интересны.

*Процессоры и сопроцессоры.* Сегодня в системах сверхвысокой производительности используются как традиционные i86-совместимые процессоры Intel и AMD (пять систем из десяти), так и эксклюзивные решения — процессоры IBM Power BQC (четыре системы) и SPARC64 VIIIfx (одна система). Графические процессоры как ускорители вычислений используются в двух случаях из десяти.

*Системная сеть.* Технические характеристики системной сети — темп выдачи сообщений, задержка, пропускная способность — самым серьезным образом влияют на реальную производительность суперкомпьютера. Это влияние тем больше, чем больше размер системы. Для систем сверхвысокой производительности требуется системная сеть с рекордными техническими характеристиками. Вот почему в этих системах чаще всего используются для системной сети либо решения собственной разработки, либо дорогие и самые высококачественные коммерчески доступные решения (Рис.2). Отметим, что Российская академия наук имеет серьезный опыт в разработке и практической реализации отечественных системных сетей такого класса (подробнее ниже).

*Инфраструктура.* Для систем уровня Top1–10, как правило, приходится разрабатывать оригинальные решения для инфраструктуры: подсистем охлаждения, энергоснабжения, управления. Например, именно в настоящее время происходит перелом в используемых подходах в подсистеме охлаждения. Инженерная логика здесь весьма простая:

- системы сверхвысокой производительности имеют высокие показатели электропотребления — как правило, от десятка мегаватт и выше, а значит, они имеют очень высокий уро-

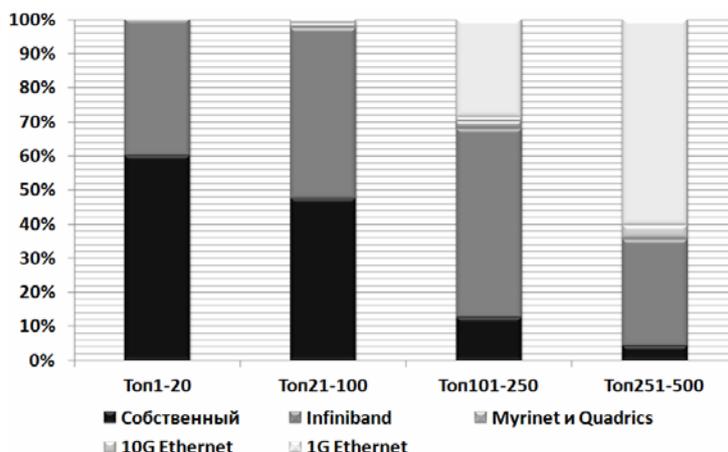


Рис. 2. Доли использования различных технологий для системной сети в суперкомпьютерах различного уровня производительности (июньская редакция рейтинга Top500 2012 года)

Черный цвет — решения для системной сети собственной разработки и/или не доступные коммерчески — сведены в класс «Собственный».

Оттенки серого — коммерчески доступные (как отдельные изделия) решения для системной сети: Infiniband, 10G Ethernet, 1G Ethernet, Myrinet и Quadrics. Более темные оттенки серого: сеть дороже и у нее выше качество.

вень выделения тепла в вычислителе, и общая тенденция связана с ростом электропотребления (и, соответственно — тепловыделения);

- стремление к максимальной производительности влечет стремление к увеличению плотности расположения электроники вычислителя: меньше длина проводников — значит, меньше задержки на передачу сигналов, выше производительность;

- как результат, мы имеем все большее и большее тепловыделение, приходящееся на единицу объема;

- значит, технологии охлаждения вычислителя должны непрерывно совершенствоваться.

В результате, в последние годы мы наблюдаем смену технологий охлаждения электроники вычислителей.

Десять лет назад большинство суперкомпьютеров охлаждалось воздухом, причем схемы охлаждения были весьма простыми. Далее, технологии охлаждения воздухом пришлось усложнять, организуя эффективные, упорядоченные потоки воздуха как хладоносителя системы охлаждения. Далее, вода (или смеси гликолей) как хладоноситель прочно вошла в машинный зал суперкомпьютеров — стали использоваться внутрирядные кондиционеры («вода на уровне зала») и монтажные шкафы с охлаждаемыми гранями («вода на уровне шкафа»). Дальнейшее развитие технологии охлаждения очевидно: пе-

реход к охлаждению электронных компонентов жидкостью. Сегодня этот переход происходит стремительно (Табл.5).

Прогноз Linpack-производительности (Pflops) для суперкомпьютеров уровней Top1 и Top10 приведен в Табл. 6.

В области технологий охлаждения и других инфраструктурных решений для систем сверхвысокой производительности у Российской академии наук имеется серьезные, доведённые до практической реализации наработки и даже приоритет мирового уровня.

*Другие особенности систем сверхвысокой производительности.* Широкий спектр задач, решаемых на системах уровня Top1–10, обуславливает особое — осторожное — отношение к ускорителям вычислений.

Ускорители вычислений обычно очень эффективно решают только некоторый, весьма узкий, класс задач. В то же время для других задач использование ускорителей нецелесообразно или даже вредно<sup>13</sup>. Поэтому при построении систем уровня Top1–10 ускорители чаще не применяют вовсе или применяют только в некоторой части системы.

<sup>13</sup> В Top500 ускорители вычислений имеются только в 52 суперкомпьютерах — 10,4 % установок. КПД на тесте Linpack у этих систем от 25% до 57%. В то время как у суперкомпьютеров на стандартных процессорах без ускорителей КПД, как правило, от 80% до 96%.

Табл. 5. Технологии охлаждения, используемые в системах Top1–10

Технология	Системы из Top1–10 (количество)	
	Ноябрь 2011 года	Июнь 2012 года
Жидкостное охлаждение	2	7
Смешанная технология <sup>1)</sup>	1	1
Воздушное охлаждение <sup>2)</sup>	5	1
Сведения не найдены	2	1
<sup>1)</sup> Самые горячие микросхемы охлаждаются жидкостью, остальные — воздухом		
<sup>2)</sup> Воздушное охлаждение с монтажными шкафами с охлаждаемыми жидкостью гранями		

Табл. 6. Прогноз Linpack-производительности (Pflops) для суперкомпьютеров уровней Top1 и Top10

Дата	Top1			Top10		
	Up	Avg	Dn	Up	Avg	Dn
15.11.2012	20.9	17.2	16.3	2.5	1.9	1.5
15.11.2013	39.1	24.2	15.8	4.6	3.6	2.8
15.11.2014	73.3	45.2	29.6	8.6	6.6	5.2
15.11.2015	137.1	84.7	55.3	16.2	12.4	9.7
15.11.2016	256.7	158.6	103.6	30.3	23.3	18.2
15.11.2017	480.6	296.8	193.9	56.7	43.6	34.0
15.11.2018	899.6	555.6	362.9	106.1	81.6	63.7
15.11.2019	1,684.1	1,040.1	679.4	198.7	152.8	119.3
15.11.2020	3,152.6	1,947.1	1,271.8	372.0	286.1	223.3
Прогнозы составлены на базе анализа всех 39 редакций рейтинга Top500: Up — оптимистичный, Avg — реалистичный, Dn — пессимистичный. Оценка вероятности попадания в интервал [Up...Dn] — 80%.						

### 5. Примеры систем сверхвысокой производительности

Суперкомпьютер «*Sequoia*» (Рис.3) занимает первое место в июньской редакции 2012 года списка Top500. Суперкомпьютер создан и расположен в США<sup>14</sup>, область использования: исследования. Разработка компании IBM на базе собственных процессоров IBM Power BQC 16C 1.600GHz, 16 ядер в процессоре. Система создана без использования ускорителей вычислений. В системе: 98 304 процессоров, 1 572 864 ядер. Системная сеть собственной разработки компании IBM, как отдельное решение — не доступно. Охлаждение — жидкостное.

Linpack-производительность 16,32 Pflops при пиковой производительности 20,13 Pflops, КПД=81,09%. Электропотребление 7,89 МВт. Энергоэффективность: менее 0,5 МВт на 1 Pflops.

Суперкомпьютер «*K computer*» (Рис.4) занимал первое место в ноябрьской редакции 2011 года списка Top500. Суперкомпьютер создан и расположен в Японии<sup>15</sup>, область исполь-

зования: исследования. Разработка компании Fujitsu на базе процессоров SPARC64 VIIIfx 8C 2.000GHz (8 ядер в процессоре), в создании которых компания Fujitsu принимала участие. Система создана без использования ускорителей вычислений. В системе: 88 128 процессоров, 705 024 ядер. Системная сеть собственной разработки компании Fujitsu, как отдельное решение — не доступно. Охлаждение — жидкостное.

Linpack-производительность 10,51 Pflops при пиковой производительности 11,28 Pflops, КПД=93,17%. Электропотребление 12,65 МВт. Энергоэффективность: около 1,2 МВт на 1 Pflops.

Суперкомпьютер «*Sunway BlueLight*» (Рис.5) занимал 14 место в ноябрьской редакции 2011 года списка Top500. Формально, система не имеет сверхвысокой производительности (система не входила в Top1–10), но используемые решения явно соответствуют этому уровню. Суперкомпьютер создан и расположен в Китае<sup>16</sup>, область использования: исследования. Разработан кооперацией китайских компаний<sup>17</sup> на базе китайских процессоров ShenWei SW1600 16C

<sup>14</sup> Lawrence Livermore National Laboratory, National Nuclear Security Administration, DOE.

<sup>15</sup> RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS).

<sup>16</sup> National Supercomputing Center in Jinan.

<sup>17</sup> — В Top500 как разработчик указан «National Research Center of Parallel Computer Engineering & Technology».



Рис. 3. Суперкомпьютер «Sequoia»



Рис. 5. Суперкомпьютер «K computer»



Рис. 6. Суперкомпьютер «Sunway BlueLight»

975MHz (16 ядер в процессоре). Система создана без использования ускорителей вычислений. В системе: 8575 процессоров, 137 200 ядер. Системная сеть собственной разработки, как отдельное решение — не доступно. Охлаждение — жидкостное.

Linpack-производительность 795,9Tflops при пиковой производительности 1070,2 Tflops, КПД=74,4%. Электропотребление 1,07 МВт. Энергоэффективность: около 1,34 МВт на 1 Pflops.

## 6. Проблемы разработки вычислительных систем сверхвысокой производительности

*Производительность систем уровня Top1–10.* При задании технических требований при разработке вычислительных систем сверхвысокой производительности следует учитывать прогноз Linpack-производительности у таких систем (Табл.6).

*Направления наиболее важных исследований и разработок при создании систем уровня Top1–10.* Для создания систем сверхвысокой производительности необходимы решения для различных компонентов системы. В качестве некоторых компонентов могут быть использованы свободно доступные или коммерчески доступные решения. Для других компонентов подходящие решения будут, скорее всего, недоступны — их предстоит разработать самостоятельно. Успешный опыт таких разработок в России имеется, в том числе, и у Российской академии наук.

*Направления наиболее важных исследований и разработок — НИР и ОКР — на ближайшую перспективу, до 6 лет:*

- аппаратные решения для сверхвысокой производительности;
  - o перспективная архитектура вычислительных узлов: перспективные процессоры, ускорители вычислений (GPU, FPGA и др.), процессоры в памяти и т.п.;
  - o перспективные системные сети, в том числе, с аппаратной поддержкой:
    - перспективных подходов к параллельному программированию — например, односторонних коммуникаций, PGAS, vSMP;
    - различных операций во время межпроцессорных обменов: синхронизация, коллективные операции, «вычисления в сети»;
    - адаптивной маршрутизации (обход отказавших, либо перегруженных элементов сети);
    - маршрутизации, реконфигурируемой под особенности задачи;
  - o системы хранения данных (СХД) для систем сверхвысокой производительности [3], включая решение проблем: эффективного параллельного обмена данными между СХД и вычислителем, поддержки перспективных концепций СХД для систем сверхвысокой производительности — активное хранилище [4] и др.;
  - o инфраструктура сверхбольших установок: вспомогательные сети, сервис-

ные сети (мониторинг и управление для сверхбольших установок), подсистемы охлаждения [5] и электропитания;

- базовое и системное программное обеспечение для систем сверхвысокой производительности:

- o ОС для систем сверхвысокой производительности, в том числе:
  - планировщики ресурсов, система очередей;
  - «лёгкие» и «малошумящие» ОС для вычислительных узлов;
  - поддержка надежности на уровне ОС — например, поддержка контрольных точек на уровне ОС;
  - сервисные подсистемы ОС — например, мониторинг и управление, парирование сбоев и отказов;
- o системная (низкоуровневая) поддержка эффективного и отказоустойчивого использования аппаратных средств и реализации перспективных подходов к программированию систем сверхвысокой производительности — драйверы, библиотеки, языки и системы программирования;
- o средства поддержки программирования для систем сверхвысокой производительности — профилировщики, отладчики, верификаторы, системы анализа и преобразования программ, интегрированные среды разработки.

*На перспективу до 9 лет* наиболее важным являются фундаментальные и задельные исследования (ФИ и ЗИ<sup>18</sup>), НИР и ОКР с целью создания прорывных решений по направлениям исследований:

- оптические соединения и их влияние на архитектуру;

- реализация нетрадиционных подходов к параллельным вычислениям — data-flow [6], обратимые вычисления и т.п.

<sup>18</sup> Используется традиционная четырехэтапная классификация производства знаний и наукоемкой продукции: фундаментальные исследования (ФИ — basic research (BR)), задельные исследования (ЗИ — advanced research (AR)), научно-исследовательские работы и конструкторские работы (НИР и ОКР — research (R) and development (R&D)).

Отметим, что горизонт в 6–9 лет (2018–2020 годы) соответствует ожидаемому сроку освоения экзафлопсной производительности и выходу на следующие уровни.

## 7. Задел Российской академии наук по основным направлениям разработки систем сверхвысокой производительности

Рассматривая возможность разработки в России вычислительных систем сверхвысокой производительности, мы в данном разделе анализируем возможности и научный задел Российской академии наук. Это не значит, что отрицается наличие и значимость подобных наработок у других участников российской суперкомпьютерной отрасли. Просто авторы гораздо больше ознакомлены с академическими разработками и их результатами, и есть объективные основания полагать, что у Российской академии наук на сегодня накоплен наибольший опыт подобных работ.

### 7.1. Ближайшая перспектива — до 6 лет

*Перспективная архитектура вычислительных узлов.* В большинстве современных систем сверхвысокой производительности используются коммерчески доступные решения для вычислительных узлов на базе стандартных процессоров и ускорителей вычислений. Однако при решении некоторых важных задач данные установки показывают крайне низкую эффективность.

Для поддержки эффективного решения задач такого рода необходимо производить исследования по разработке вычислительных узлов с перспективной архитектурой, в том числе, с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или специализированных процессоров (ускорителей). Опыт таких исследований и разработок, доведенных до практического использования, в Российской академии наук имеется, в том числе, у ИПС имени А.К. Айламазяна РАН и ИПМ имени М.В. Келдыша РАН: использование ПЛИС как ускорителей в суперкомпьютере СКИФ-Аврора ([7, 8], головной исполнитель ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, установлен в ЮУрГУ,

Челябинск), система РВС-КП<sup>19</sup> ([9], ИПМ имени М.В. Келдыша). Необходимо упомянуть и об отечественных установках с графическими ускорителями — система «МВС-Экспресс» и суперкомпьютер «К-100»<sup>20</sup> ([10, 11], ИПМ имени М.В. Келдыша РАН с партнерами). При этом разрабатывались программные средства эффективного использования ПЛИС-ускорителей [12, 13] и инструментальные средства переноса существующего программного обеспечения на гибридные установки [14, 15].

*Перспективная отечественная системная сеть.* Выше приводились причины, по которым в системах сверхвысокой производительности используются только системные сети собственной разработки или самые передовые коммерчески доступные решения — на сегодняшний день это сеть Infiniband<sup>21</sup> FDR, — зачастую находящиеся под тем или иным уровнем экспортного контроля.

Подчеркнем, системы, занимавшие первое место в списке Top500, практически всегда (за единственным исключением<sup>22</sup>), строились на сетях собственной разработки.

Поэтому для создания систем сверхвысокой производительности исключительно важно проводить весь цикл исследований и разработок (ФИ, ЗИ, НИР и ОКР) в двух направлениях:

- анализ лучших образцов коммерчески доступных решений и возможности их использования для создания систем уровня Top1–10;
- создание собственных системных сетей для систем уровня Top1–10, которые будут обладать более высокими характеристиками и позволят более эффективно решать прикладные задачи.

В институтах РАН при сотрудничестве с другими организациями накоплен значительный опыт таких исследований и разработок, доведенных до практического использования. Были разработаны собственные системные сети, опере-

<sup>19</sup> <http://www.kiam.ru/MVS/research>

<sup>20</sup> <http://www.kiam.ru/MVS/resources/>

<sup>21</sup> Наибольшую популярность сеть Infiniband получила в системах средней и высокой производительности. Однако для систем сверхвысокой производительности коммерчески доступная сеть Infiniband не всегда обеспечивает приемлемую реальную эффективность для важнейших приложений.

<sup>22</sup> Система IBM Roadrunner, построенная в 2008 г.

жающие по техническим характеристикам лучшие коммерчески доступные решения:

- в ИПМ имени М.В. Келдыша РАН совместно с ФГУП «НИИ «Квант» была разработана коммуникационная сеть МВС-Экспресс, которая используется в суперкомпьютере К-100 [11], установленном в ИПМ имени М.В. Келдыша РАН;

- в ИПС имени А.К. Айламазяна РАН разработана сеть СКИФ 3D-Тор [16, 17, 18, 19] для суперкомпьютера СКИФ-Аврора [20, 21], установленного в Южно-Уральском государственном университете.

В обоих случаях были реализованы и отечественные аппаратные решения для системной сети, и полный стек всего необходимого программного обеспечения.

*Аппаратная поддержка перспективных систем программирования.* Разработка собственных систем, таких как вычислители и коммуникационные сети, позволяют реализовать аппаратную поддержку различных актуальных и перспективных систем программирования, которые могут значительно поднять как эффективность, так и продуктивность решения задач на системах сверхвысокой производительности. Многие из подобных перспективных систем программирования были уже реализованы в упомянутых выше работах Российской академии наук.

*Системы хранения данных (СХД).* При решении больших задач на системах сверхвысокой производительности необходимо иметь быстрый доступ к большим объемам данных: исходные данные, промежуточные и окончательные результаты. Хотя коммерчески доступные СХД и обеспечивают большую скорость доступа к данным, она во многих случаях будет недостаточна для систем из сотен тысяч и миллионов вычислительных узлов<sup>23</sup>.

Поэтому необходимо создавать технологии эффективного доступа к данным, эффективного кэширования данных на отдельных вычислительных узлах, проведения подготовительных вычислений непосредственно в системе хранения данных (концепция «активного хранилища»). Российская академия наук в сотрудниче-

<sup>23</sup> Уже сегодня системы уровня Top1–10 содержат до сотен тысяч вычислительных узлов и более миллиона ядер.

стве с другими организациями накопила серьезные наработки в данном направлении [3, 4] и способна эффективно и результативно продолжать эти работы.

*Инфраструктура для систем уровня Top1–10.* Для систем сверхвысокой производительности приходится создавать эксклюзивные инфраструктурные подсистемы: подсистемы мониторинга и управления, подсистемы охлаждения и электропитания. Коммерчески доступные решения не обладают достаточными показателями эффективности и надежности. Зачастую они просто не рассчитаны на масштаб сверхбольших систем — сотни тысяч и миллионы вычислительных узлов.

В Российской академии наук в данном направлении имеется опыт исследований и разработок, доведенных до практического использования. Упомянем для примера только решения<sup>24</sup>, использованные в суперкомпьютерах семейства СКИФ:

- СКИФ-Аврора — первый в мире суперкомпьютер на стандартных (i86-совместимых) процессорах с жидкостным охлаждением всей электроники вычислителя и с перспективной подсистемой электропитания;

- сервисная сенсорная сеть семейства СКИФ-Servnet — полный мониторинг всех аппаратных средств и управление ими, и программная подсистема к ней — SKIF-Mon;

- начаты разработки цифровых блоков питания, которые ориентированы на применение в системах сверхвысокой производительности.

*Базовое и системное программное обеспечение для систем сверхвысокой производительности.* Широко распространенные операционные системы разрабатывались, в первую очередь, для обеспечения надежной и комфортной работы пользователя и исполнения нескольких задач на одном процессоре. В суперкомпьютерных системах ситуация обратная: одна задача выполняется на многих вычислительных узлах. Поэтому многие наработки для «настолевых» систем сильно снижают эффективность использования систем высокой и

<sup>24</sup> Головной исполнитель — ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, участники разработки — 10 организаций РАН, 13 ВУЗов и НИИ при них, 14 отраслевых НИИ и коммерческих исследовательских компаний.

сверхвысокой производительности. Необходимо проводить весь цикл исследований и разработок — ФИ, ЗИ, НИР и ОКР — для создания операционных систем для суперкомпьютеров сверхвысокой производительности. Российская академия наук имеет задел в данном направлении и способна, в партнерстве с другими участниками российской суперкомпьютерной отрасли, результативно продолжать эти работы. Их целью является повышение как эффективности исполнения задач, так и эффективности и управляемости отдельных узлов и системы в целом.

Одной из отличительных особенностей параллельного программирования, которые особенно проявляются на сверхбольших системах, является трудность отладки, профилирования, анализа процесса исполнения параллельных программ. Многие широко используемые средства предназначены для последовательных программ. Существующие средства для параллельных программ не всегда позволяют эффективно проводить анализ параллельного исполнения. В организациях РАН накоплен большой опыт по разработке и отладке параллельных программ, который должен быть использован в разработке систем поддержки параллельного программирования для суперкомпьютеров сверхвысокой производительности.

В организациях РАН имеется также большой опыт разработки средств анализа и преобразования программ. Для параллельных программ, когда анализ процесса исполнения затруднен или невозможен, анализ исходных текстов может стать эффективным подходом к поиску ошибок и доказательству правильности программ. Используя разрабатываемые в организациях РАН методы [22, 23], можно реализовать инструментарий по автоматизированному созданию параллельных программ для систем сверхвысокой производительности на основе последовательных программ.

## 7.2. Среднесрочная перспектива — до 9 лет

Горизонт в 9 лет (2018–2020 годы) соответствует ожидаемому сроку освоения эксафлопсной производительности и переходу к новым уровням. В перспективе до 9 лет отметим следующие актуальные темы для полного цикла

исследований и разработки с целью создания прорывных решений по направлениям:

- оптические соединения и их влияние на архитектуру;
- реализация нетрадиционных подходов к параллельным вычислениям — data-flow, обратимые вычисления и т.п.

Российская академия наук имеет значимые результаты в указанных направлениях. Немного остановимся на втором направлении.

*Обратимые вычисления.* При переходе к меньшим проектным нормам обязательно придется менять физические принципы организации вычислений в силу термодинамических ограничений<sup>25</sup>. Таким образом, потребуются принципиально новые решения.

1. Потребуется выполнять вычисления почти без производства энтропии, что возможно лишь для обратимых вычислений. Вычислительная техника на уровне электронных компонентов (в том числе: молекулярных или на базе сверхпроводящих элементов) должна будет работать на базе обратимых процессов, тем более что многие из таких элементов обратимы по своей физической природе. Данная смена принципов организации вычислений на нижнем уровне аппаратуры практически неизбежна примерно через 6–9 лет, что неразрывно связано со сроком выхода на эксафлопсный рубеж.

2. В соответствии с предыдущим пунктом потребуется разработать совершенно новые: а) базовую алгебру обратимых вычислений; б) логику обратимых вычислений; в) языки и парадигмы обратимого программирования; г) системы обратимого программирования; д) методы реализации прикладных задач в терминах обратимого программирования.

Первый тезис и пункты (в)–(д) осознаны всеми лидерами суперкомпьютерной отрасли — началась гонка, масштабы исследований в области обратимых вычислений расширяются экспоненциально в последнее время. При этом

<sup>25</sup> Принцип Ландауэра–фон Неймана: выделение энергии на операцию не меньше  $kT \ln 2$ ,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. Принцип Ландауэра–Беннета–Меркле: в случае обратимых операций выделение энергии может быть уменьшено до уровня, необходимого для обмена информацией, в принципе до 0 в случае сверхпроводящих элементов.

на западе накоплен багаж принципиально неверных решений.

У России в данный момент есть преимущества: команда разработчиков (ИПС имени А.К. Айламазяна РАН в сотрудничестве с ИПМ РАН и ИПУ РАН) обладает заделом, которого нет у конкурентов. Отечественный научный приоритет имеется на уровне осознания и строгого математического обоснования ряда позитивных краеугольных идей [24, 25, 26, 27].

Реализация заделных исследований, затем НИР и последующих ОКР на пути обратимых вычислителей и обратимых вычислений в России доступна только Российской академии наук в кооперации с другими партнерами. Это хороший шанс осуществления технологического отрыва России в области вычислительных систем сверхвысокой производительности в перспективе до 2020 года и далее.

## Заключение

В мировой практике самые мощные суперкомпьютеры (Top1–10) в большинстве случаев ориентированы на фундаментальные и заделные исследования<sup>26</sup>. Тем самым, оправдано создание такого класса техники именно на базе Российской академии наук.

Это гарантирует полноценное использование такой системы в самых различных направлениях исследований, поскольку:

- Российская академия наук является крупнейшим средоточием научных ресурсов (не в отдельно взятой области, а по всем отраслям знаний);
- РАН обладает крепчайшими связями с вузовской и отраслевой наукой;
- ученые РАН имеют огромный опыт использования суперкомпьютеров в научных исследованиях и практических разработках.

Российская академия наук действительно занимает лидирующие позиции в отечественной суперкомпьютерной отрасли, что еще не до конца осознано обществом. Именно под руководством организаций РАН и при их непосредственном участии в последние годы разработаны отечественные суперкомпьютерные

технологии мирового класса для суперкомпьютеров высшего уровня производительности — решения в области архитектуры, системы межпроцессорных обменов, системы охлаждения, базового, системного, инструментального и прикладного программного обеспечения, новых математических моделей, адаптированных под архитектуру суперкомпьютеров.

Отметим, что за всю историю в различные выпуски мирового рейтинга Top500 вошли только девять суперкомпьютеров отечественной разработки и в восьми случаях из девяти в их создании участвовали (а во многих случаях были головными разработчиками) академические институты:

- ИПМ имени М.В. Келдыша РАН и МСЦ РАН — суперкомпьютер МВС-1000 (2002);
- ИПС имени А.К. Айламазяна РАН — суперкомпьютеры СКИФ К-500 (2003), СКИФ К-1000 (2004), СКИФ-Cyberia (2007), СКИФ МГУ (2008), СКИФ Урал (2008), СКИФ-Аврора модель 4/N (2010), СКИФ-Аврора модель 4/W (2011).

Системы уровня Top1–10 не могут быть приобретены за рубежом или созданы за счет «отверточной сборки». Конечно, некоторые коммерчески доступные компоненты могут быть и будут использованы: процессоры, память и т.п. Но большинство подсистем, почти наверняка, придется создавать самим. Это включает такие важнейшие подсистемы, как вычислительные узлы в целом, системная сеть, системы хранения данных, инфраструктура. Важно обеспечить серьезное продвижение разработок отечественных суперкомпьютерных технологий уровня Top1–10 в этой части.

*У Российской академии наук есть заделы именно для такой постановки задачи и есть способность сформировать предложения для реализации полного комплекса работ и выполнить их.* Естественно, в сотрудничестве с ведущими участниками суперкомпьютерной отрасли России.

Таким образом, проект разработки вычислительных систем сверхвысокой производительности должен быть ориентирован на развитие отечественных суперкомпьютерных технологий высшего уровня производительности (Top1–10). Проект целесообразно выполнять на

<sup>26</sup> Basic research (BR) и advanced research (AR) — академические и в интересах DARPA.

базе РАН — академия занимает лидирующие позиции в отечественной суперкомпьютерной отрасли. Академия, в сотрудничестве с ведущими участниками суперкомпьютерной отрасли России, гарантированно обеспечит успешное выполнение проекта как в части создания вычислительных систем сверхвысокой производительности, так и, что самое главное, в части их эффективного использования.

Авторы благодарят своих многочисленных коллег, чьи ценные замечания и идеи способствовали написанию данной статьи. Особые благодарности Заднепровскому В.Ф., Климову А.В., Климову Ю.А., Лацису А.О., Непейводе Н.Н., Непейводе А.Н., Орлову А.Ю., Шворину А.Б.

## Литература

1. Top500 — мировой рейтинг пятисот самых производительных (на тесте Linpack) вычислительных машин мира. Электронный ресурс в сети Интернет, <http://www.top500.org>
2. Graph500 — мировой рейтинг самых производительных (на задаче поиска в большом графе в ширину) вычислительных машин мира. Электронный ресурс в сети Интернет, <http://www.graph500.org>
3. Тютляева Е.О., Московский А.А. Анализ основных тенденций в области хранения данных // Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы», No 2, 2012, с. 64–75. ISSN 2071–8632.
4. Tyutlyaeva E. and Moskovsky A. Programming Templates for Active Storages // Book of abstract of International Young Scientists Conference «High Performance Computing and Simulation», 2012, Amsterdam, Netherlands.
5. Абрамов С.М., Амелькин С.А., Чичковский А.А. Различные подходы к жидкостному охлаждению — PRO & CONTRA // Журнал «Суперкомпьютеры», 2012, № 3 (11), с. 34–35.
6. Климов А.В., Левченко Н.Н., Окунев А.С. Преимущества потоковой модели вычислений в условиях неоднородных сетей // Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы», № 2, 2012, с. 36–45. ISSN 2071–8632.
7. Абрамов С.М., Дбар С.А., Климов А.В., Климов Ю.А., Лацис А.О., Московский А.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. Разработка методов поддержки различных моделей параллельных вычислений и систем гибридного программирования на суперкомпьютерах с ПЛИС // Результаты целевых ориентированных фундаментальных исследований и их использование в российской промышленности // Материалы ежегодной научной конференции. — Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. — С. 49–59.
8. Абрамов С.М., Дбар С.А., Климов А.В., Климов Ю.А., Лацис А.О., Московский А.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. Возможности суперкомпьютеров «СКИФ» ряда 4 по аппаратной поддержке в ПЛИС различных моделей параллельных вычислений // Материалы международной научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии: разработка, программирование, применение» (СКТ-2010), 27 сентября - 2 октября 2010, Дивноморское, Россия. — Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. — Том 1. — С. 11–21.
9. Андреев С.С., Давыдов А.А., Дбар С.А., Лацис А.О., Плоткина Е.А. О разработке и испытаниях суперкомпьютеров с нетрадиционной архитектурой в ИПМ. Тезисы докладов 18-й Всероссийской конференции памяти К. И. Бабенко, Дюрсо, 2010 г.
10. Давыдов А.А., Лацис А.О., Луцкий А.Е., Смольянов Ю.П., Четверушкин Б.Н., Шильников Е.В. Многопроцессорная вычислительная система гибридной архитектуры МВС-Экспресс. Доклады Академии наук. 2010. Т. 434. № 4. с. 459–463.
11. Андреев С.С., Дбар С.А., Давыдов А.А., Лацис А.О., Савельев Г.П., Орлов В.Л., Плоткина Е.А., Простов И.В. Гибридный суперкомпьютер К-100: что дальше? // Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы», № 2, 2012, с. 29–35. ISSN 2071–8632.
12. Андреев С.С., Дбар С.А., Лацис А.О., Плоткина Е.А. Система программирования Автокод HDL и опыт ее применения для схемной реализации численных методов в FPGA. // Труды Всероссийской суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет», сентябрь 2009 г., Новороссийск.
13. Андреев С.С., Давыдов А.А., Дбар С.А., Лацис А.О., Плоткина Е.А. О моделях и технологиях программирования суперкомпьютеров с нетрадиционной архитектурой. // Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет», сентябрь 2010 г., Новороссийск.
14. Климов Ю.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. Перспективные подходы к созданию масштабируемых приложений для суперкомпьютеров гибридной архитектуры. // Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы», № 2, 2012, с. 3–10. ISSN 2071–8632.
15. Климов Ю.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. Программный инструментальный для трафаретных вычислений на гибридных суперкомпьютерах. // Программные системы: теория и приложения: электронный научный журнал. — 2012. — Т. 3, № 2 (11), с. 23–49. — URL: [http://psta.psiras.ru/read/psta2012\\_2\\_23-49.pdf](http://psta.psiras.ru/read/psta2012_2_23-49.pdf)
16. Орлов А.Ю., Шворин А.Б. О реализации в ПЛИС маршрутизатора высокопроизводительной сети. // Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность: Труды Всероссийской научной конференции (21–26 сентября 2009 г., г. Новороссийск). — М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 208–210.
17. Климов Ю.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. Темп выдачи сообщений как мера качества коммуникационной сети. // Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (20–25 сентября 2010 г., г. Новороссийск). — М.: Изд-во МГУ, 2010. — С. 414–417.

18. Адамович И.А., Климов А.В., Климов Ю.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. Опыт разработки коммуникационной сети суперкомпьютера «СКИФ-Аврора». // Программные системы: теория и приложения: электронный научный журнал. — 2010. — № 3 (3). — С. 107–123. — URL: [http://psta.psisras.ru/read/psta2010\\_3\\_107-123.pdf](http://psta.psisras.ru/read/psta2010_3_107-123.pdf).
19. Климов Ю.А., Орлов А.Ю., Шворин А.Б. SkifCh: эффективный коммуникационный интерфейс. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. — 2011. — № 25 (242). — Серия «Математическое моделирование и программирование». — Выпуск 9. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. — С. 98–106.
20. Абрамов С.М., Заднепровский В.Ф., Лилитко Е.П. «Суперкомпьютеры «СКИФ» ряда 4» // Журнал «Информационные технологии и вычислительные системы», № 1, 2012 г., с. 3–16.
21. Абрамов С.М., Заднепровский В.Ф. «Суперкомпьютер СКИФ-Аврора ЮУрГУ». // Труды XIII Международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» (3–7 октября 2011 г.) под редакцией Р.М. Шагалиева. — ИПК ФГУП «РФИЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, с. 4–19.
22. Proceedings of Second International Workshop on Metacomputation in Russia, July 1–5 2010. — Pereslavl-Zalessky: Ailamazyan University of Pereslavl, 2010, 186 p. — ISBN 978-5-901795-21-7.
23. Proceedings of the Third International Valentin Turchin Workshop on Metacomputatio. Pereslavl-Zalessky, Russia, July 5–9, 2012. / Edited by A.V. Klimov and S.A. Romanenko — Pereslavl-Zalessky: Ailamazyan University of Pereslavl, 2012, 260 p. — ISBN 978–5–901795–28–6.
24. Непейвода Н.Н. Реверсивные конструктивные логики. // Логические исследования, № 15 (2009), С. 150–168.
25. Непейвода Н.Н. Уроки конструктивизма. // Geidelberg: Lambert Academic Publishing, 98 pp. (2011)
26. Непейвода А.Н. О реверсивной альтернативе традиционным вычислениям. // Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Технологии высокополигонального моделирования. // Труды Второй международной конференции, Ижевск (2010).
27. Nepejvoda N. Reversivity, reversibility and retractability // Proceedings of the Third International Valentin Turchin Workshop on Metacomputation. Pereslavl-Zalessky, Russia, July 5–9, 2012. / Edited by A.V.Klimov and S.A.Romanenko — Pereslavl-Zalessky: Ailamazyan University of Pereslavl, 2012, — ISBN 978–5–901795–28–6, pp 203–215.

**Абрамов Сергей Михайлович.** Директор Института программных систем имени А.К. Айламазяна Российской академии наук. Окончил МГУ имени М.В. Ломоносова в 1980 году. Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН. Автор 142 печатных работ, в том числе двух монографий. Область научных интересов: метавычисления и функциональное программирование; высокопроизводительные вычисления. E-mail: [abramov@botik.ru](mailto:abramov@botik.ru)

**Лилитко Евгений Петрович.** Главный специалист Института программных систем имени А.К. Айламазяна Российской академии наук. Окончил ТГУ имени В.В. Куйбышева в 1985 году. Область научных интересов: сложные системы, надёжность и отказоустойчивость, высокопроизводительные вычисления. E-mail: [gene@ks.pereslavl.ru](mailto:gene@ks.pereslavl.ru)