

Суперкомпьютерные технологии России: объективные потребности и реальные возможности

С.М. Абрамов

В статье рассматривается природа суперкомпьютерных технологий, их роль в обеспечении конкурентоспособности различных отраслей экономики и страны в целом. Анализируются киберинфраструктуры развитых стран (США, объединенная Европа) — грид-системы национальных и региональных суперкомпьютерных центров. Дается оценка объективных потребностей России в суперЭВМ различного уровня производительности. Рассматривается имеющийся в России потенциал и научный задел для создания суперкомпьютерных технологий и оснащения России отечественными средствами высокопроизводительных вычислений в необходимом объеме. Анализируется возможность использования результатов суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД» для: эффективного достижения запланированных показателей (от транспетафлопсных систем до компактных суперЭВМ) сегодняшних российских суперкомпьютерных инициатив: обеспечения в перспективе выхода на эксафлопсную производительность (на рубеже 2018–2020 годов).

1. Суперкомпьютерные технологии

1.1. Роль и место суперкомпьютерных технологий

Сегодня критические (прорывные) технологии в государствах, строящих экономику, основанную на знаниях, исследуются и разрабатываются на базе широкого использования высокопроизводительных вычислений на суперЭВМ. 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 (СКТ) по праву считаются важнейшим фактором обеспечения конкурентоспособности экономики страны, а *единственным* способом победить конкурентов объявляют возможность обогнать их в расчетах. Здесь характерны слова Президента Совета по конкурентоспособности США: «*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*»¹.

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* суперЭВМ, *самые мощные* прикладные пакеты и *уметь использовать* эти ресурсы в интересах экономики.

Тем самым, краткое определение сегодняшней роли суперкомпьютерных технологий может быть таким: это ключевая критическая технология, *единственный инструмент*, дающий возможность победить в конкурентной борьбе.

¹ “*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.

1.2. Киберинфраструктура страны — забота государства

Каждая эпоха развития экономики требовала создания соответствующей инфраструктуры страны. В разные периоды это были национальные сети железных дорог или автомагистралей, национальные энергетические системы, системы газо- и нефтепроводов и т.п. Чаще всего инфраструктура страны (как «общественное благо», необходимое всем отраслям экономики, всем слоям населения) создается либо исключительно государством и только за счет бюджета страны, либо при значительной доле участия государства.

Сегодня, исходя из роли суперкомпьютерных технологий, в развитых странах мира для перехода к экономике знаний создается новая инфраструктура государства — государственная система из мощных национальных суперкомпьютерных центров (СКЦ), объединенных сверхбыстрыми каналами связи в грид-систему. Для такой системы часто используют термин *киберинфраструктура* [1]. В этих странах на создание национальной киберинфраструктуры выделяются большие финансы из государственных бюджетов: в 2005–2008 гг. США тратили на эти цели от 2 до 4 млрд. долларов в год.

1.3. Природа экономической эффективности киберинфраструктуры

В развитых странах¹ государство вкладывает бюджетные деньги в создание национальных суперкомпьютерных центров, в их объединение в грид-систему, в ее содержание: оплату электроэнергии, ремонтов, зарплаты персонала, поддержки сервисов. Созданные и поддерживаемые за бюджетные средства ресурсы киберинфраструктуры предоставляются не только научным и образовательным организациям, но и коммерческим компаниям, например таким как: IBM, General Electric, Pratt & Whitney. Причем, ресурсы предоставляются бесплатно, но на конкурсной основе: чья идея, требующая суперкомпьютерных расчетов, сулит больший эффект. Получив по конкурсу необходимые ресурсы, компании выполняют свои НИОКР, результаты которых являются интеллектуальной собственностью данных компаний. В рамках таких НИОКР компании разрабатывают принципиально новые изделия (материалы, технологии и т.п.), обладающие подавляющими конкурентными преимуществами. Это позволяет потеснить конкурентов, расширить свое присутствие на рынке, свои объемы продаж. Как следствие, такие компании платят больше налогов. И только в этот момент, через уплаченные в большем объеме налоги, в бюджет возвращаются средства, ранее вложенные в киберинфраструктуру.

Подчеркнем, в большинстве национальных суперкомпьютерных центров в мире никто не пытается продавать машинное время, оказывать платные вычислительные услуги. Для них применяется механизм бюджетного финансирования и извлечения экономического эффекта за счет бюджетной эффективности (за счет увеличения налоговых поступлений), а не за счет прямой коммерческой эффективности (прямая продажа услуг или ресурсов СКЦ). Более того, постепенно такой подход к делу реализуется и на региональном уровне: появились первые региональные² суперкомпьютерные центры, созданные и содержащиеся за счет местных бюджетов, работающие на принципе бюджетной эффективности.

Нам в России, привыкшим за последние годы преувеличивать роль рыночных механизмов, предстоит перенимать опыт ведущих стран:

- с одной стороны, рассчитывать на получение отдачи от национальной киберинфраструктуры не за счет прямых продаж, а за счет ее бюджетной эффективности;
- с другой стороны, создавать условия для успешной работы механизма экономической эффективности. Что, среди прочего, включает усилия по подготовке и переподготовке кадров, повышению мотивации предприятий в области инноваций и, как следствие, повышение их потребности в использовании суперкомпьютерных технологий и их готовности к этому.

¹ В первую очередь речь пойдет о США и объединенной Европе.

² Суперкомпьютерные центры штатов Техас и Нью-Мексико, см. места 8 и 17 в рейтинге Top500 за июнь 2009 года. СуперЭВМ в каждом из этих региональных суперкомпьютерных центров мощнее, чем самая мощная суперЭВМ в России.

Иначе бюджетные средства, вложенные в киберинфраструктуру России, окажутся «закопанными в землю».

1.4. Многогранные суперкомпьютерные технологии

Развитие суперкомпьютерных технологий в России включает целый комплекс задач, охватывающий следующие сферы:

- **разработка, реализация и производство аппаратных средств суперЭВМ**, что включает элементную базу, печатные платы и конструктивы, различные модули суперЭВМ и вычислительные системы целиком;
- **разработка, реализация и производство базового системного программного обеспечения (ПО) суперЭВМ**, что включает операционные системы, параллельные файловые системы, базовые библиотеки поддержки параллельных вычислений, обработчики очередей и планировщики заданий, системы мониторинга и управления суперЭВМ и т.п.;
- **разработка, реализация и производство программного обеспечения поддержки разработки параллельных приложений**, что включает различные языки и системы параллельного программирования, другие средства параллельного программирования (библиотеки шаблонов, параллельные реализации библиотек подпрограмм, высокоуровневые библиотеки поддержки параллельного программирования и т.п.), инструментальные системы поддержки создания параллельных приложений, вспомогательные средства (отладчики, трассировщики и визуализаторы трасс, профилировщики, средства оптимизации и т.п.);
- **разработка, реализация и производство прикладного программного обеспечения**, что включает различные пакеты для параллельных вычислений, визуализации результатов вычислений, поддержки ввода-вывода и хранения данных и т.п.,— для различных прикладных областей;
- **создание и эксплуатация СКЦ, объединение их в грид-систему, формирование служб и сервисов на их основе**: предоставление вычислительной мощности, поддержка пользователей готовых прикладных пакетов, консультации, разработка заказного ПО под новые задачи, проведение расчетов «под ключ» — от интуитивной постановки задачи, через выработку математической модели, выбора расчетной схемы, ее программной параллельной реализации, отладки, выполнения расчета и передачи результатов заказчику в пригодной для него форме;
- **подготовка и переподготовка кадров для суперкомпьютерной отрасли**. Речь идет о всех сторонах поддержки образовательного процесса: разработка учебно-методических материалов, учебной базы, организация учебного процесса и т.п. Необходима подготовка специалистов для решения всех задач, перечисленных выше: разработчики (аппаратных средств и различных классов ПО), специалисты по производству, монтажу и запуску суперЭВМ, персонал поддержки эксплуатации — операторы, инженеры по эксплуатации, системные администраторы,— сотрудники для поддержки сервисов СКЦ — от консультантов до специалистов, способных по начальной постановке задачи построить математическую модель, ее программную параллельную реализацию и выполнить расчеты.

Практически каждая упомянутая выше разработка требует проведения фундаментальных поисковых исследований. И только затем возможен выход на уровень НИР, НИОКР и ОКР.

1.5. Уровни суперкомпьютерных технологий

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, недоступные на рынке. На их базе создают суперкомпьютеры, которые сильно вырываются вперед. Как правило, это машины, соответствующие первым 5–10 местам списка Top500 [2]. Эти суперЭВМ обладают мощностью, которая радикально отличает их от всех других машин. И на платформе таких суперЭВМ можно выполнить расчеты, которые невозможно повторить (ни за какое разумное время) на суперЭВМ более низ-

кого 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, широкодоступные на рынке. СуперЭВМ 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.

Надо отметить, что все разработанные в предыдущие годы отечественные суперЭВМ и суперкомпьютерные технологии относились к технологическому уровню N-1. И России, для того, чтобы победить в вычислениях, предстоит создать свои собственные технологии уровня N. График отставания России от технологического уровня N приведен на рисунке 1 (построен на основе анализа данных мирового рейтинга Top500).

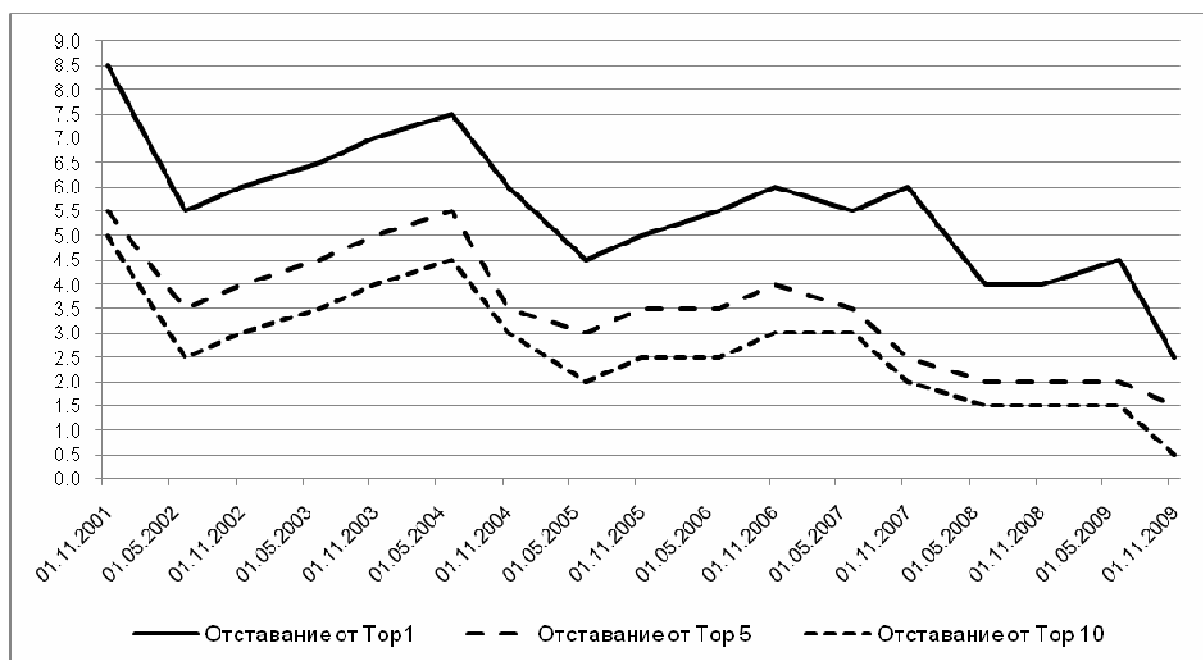


Рис 1. Отставание (в годах) уровня самых мощных суперЭВМ в России от передового мирового технологического уровня

1.6. Иерархия киберинфраструктуры

В каждый момент времени в развитых странах (в первую очередь — в США и объединенной Европе) в части их оснащения суперЭВМ прослеживается наличие «пирамиды» — для обеспечения сбалансированной киберинфраструктуры страны выпускаются суперЭВМ различных уровней производительности:

- **суперЭВМ в крупнейших национальных центрах** — единичные установки в стране, соответствующие местам 1–20 в мировом рейтинге Top500;
- **суперЭВМ в крупнейших региональных и отраслевых центрах** — два–четыре десятка установок в стране, соответствующих местам 21–100 в мировом рейтинге Top500;
- **суперЭВМ в крупных региональных и корпоративных центрах** — от четырех десятков до сотни установок в стране, соответствующих местам 101–250 в мировом рейтинге Top500;

- **суперЭВМ предприятий и научных учреждений** — одна–три сотни установок в стране, соответствующих местам 251–500 в мировом рейтинге Top500;
- **суперЭВМ небольших исследовательских компаний, отдельных лабораторий и научных подразделений** — сотни установок в стране, составляющих самый нижний уровень пирамиды киберинфраструктуры и не входящих в мировой рейтинг Top500 или вышедших из него в силу быстрого развития отрасли.

В таблице 1 приведены подготовленные на основе анализа текущего (ноябрь 2009 г.) мирового рейтинга Top500 сведения о количестве таких суперЭВМ и об их суммарной Linpack-производительности (сумма считалась отдельно по каждому классу суперЭВМ) — колонки с (1) по (4) для США, Единой Европы, Китая и России. В таблице 2 приведен уровень сегодняшнего отставания России в оснащенности суперЭВМ от США, Единой Европы и Китая.

Таблица 1. Состояние (на июнь 2009 года) оснащенности суперЭВМ различных стран и оценка потребностей России на ближайший период (до 2012 года)

	(1) США	(2) Единая Европа	(3) Китай	(4) Россия	(5) Потребности России
Топ1–20: СуперЭВМ в крупнейших национальных центрах	12 шт. 7 062 Tflops ¹	3 шт. 1 274 Tflops	2 шт. 743 Tflops	1 шт. 350 Tflops	2 шт.
Топ21–100: СуперЭВМ в крупнейших региональных и отраслевых центрах	34 шт. 2 911 Tflops	29 шт. 2 458 Tflops	1 шт. 102 Tflops	1 шт. 107 Tflops	15 шт.
Топ101–250: СуперЭВМ в крупных региональных и корпоративных центрах	83 шт. 2 856 Tflops	37 шт. 1 313 Tflops	11 шт. 366 Tflops	3 шт. 117 Tflops	30 шт.
Топ251–500: СуперЭВМ предприятий и научных учреждений	148 шт. 3 586 Tflops	75 шт. 1 777 Tflops	7 шт. 167 Tflops	3 шт. 71 Tflops	60 шт.
Топ1–500: ВСЕГО	277 шт. 16 416 Tflops	144 шт. 6 822 Tflops	21 шт. 1 379 Tflops	8 шт. 646 Tflops	107 шт.

Таблица 2. Уровень отставания России в оснащенности суперЭВМ (на июнь 2009 года, разы)

	От США	От Единой Европы	От Китая
По числу СуперЭВМ Топ1–500	34,6	18,0	2,6
По суммарной производительности СуперЭВМ Топ1–500	25,4	10,6	2,1

2. Оценка объема объективных потребностей России в суперкомпьютерных технологиях

Конечно, оценка потребностей России в суперкомпьютерных технологиях должна выполняться с учетом всей многогранности (раздел 1.4) данного понятия. Однако это невозможно сделать в рамках короткой статьи. Ограничимся оценкой объективной потребности в парке суперЭВМ, рассчитывая на то, что из этого может быть оценен хотя бы порядок необходимого

¹ 1 Gflops — миллиард (10^9) операций с плавающей точкой в секунду. 1 Tflops — триллион (10^{12}) операций с плавающей точкой в секунду; 1 Pflops — квинталион (10^{15}) операций с плавающей точкой в секунду.

уровня развития всех остальных аспектов (программное обеспечение, сервисы, приложения, кадры и т.п.).

Полагая, что для России необходимо обеспечение паритета в оснащенности разными классами суперЭВМ — по крайней мере, на уровне, сравнимом с Единой Европой (или отстающем не более 2–3 раз), получаем оценку объективной потребности России, указанную в колонке (5) таблицы 1.

Следует учитывать, что производительность суперЭВМ, соответствующая тому или иному месту в мировом рейтинге Top500, очень быстро меняется. Поэтому в оценке потребности России на период 2010–2012 годов должны быть учтены тенденции и прогноз развития мирового состояния отрасли: какие (по производительности) к тому времени суперЭВМ будут в странах-конкурентах в национальных центрах (места 1–20 в мировом рейтинге); какие — в крупнейших региональных и отраслевых центрах (места 21–100 в мировом рейтинге) и т.д. Данные сведения приведены в таблице 3.

Тем самым, объективно необходимый уровень обеспеченности России суперЭВМ, оцененный из соображений паритета или хотя бы сравнимости с Единой Европой, на период до 2012 года диктуют следующие потребности:

- создание двух или более суперЭВМ для крупнейших федеральных или региональных центров с производительностью 1 Pflops в 2010 году, с их расширением до 5–10 Pflops в 2012 году — **за счет федерального бюджета;**
- создание 15 и более суперЭВМ для крупных региональных и отраслевых центров с производительностью 200–500 Tflops в 2010 году, с их расширением до 500–1600 Tflops в 2012 году — **за счет федеральных, региональных и отраслевых средств;**
- создание 30 и более суперЭВМ для региональных и корпоративных центров с производительностью 100 Tflops в 2010 году, с их расширением до 450–500 Tflops в 2012 году — **за счет региональных, отраслевых и корпоративных средств;**
- создание 60 и более суперЭВМ для ведущих высокотехнологичных предприятий, научных учреждений и инновационных университетов с производительностью до 100 Tflops в 2010 году, с их расширением до 350–450 Tflops в 2012 году — **за счет отраслевых и внебюджетных средств;**
- создание в 2010–2012 годах «фундамента отечественной пирамиды» суперЭВМ за счет производства сотен компактных суперкомпьютеров для оснащения высокопроизводительными вычислительными ресурсами отдельных научных подразделений высокотехнологичных предприятий, исследовательских лабораторий и подразделений инновационной направленности, с обеспечением следующего уровня производительности компактных суперЭВМ: 2010 год — 2–4 Tflops, 2011 год — 6–12 Tflops, 2012 год — 12–25 Tflops.

Таблица 3. Оценка потребностей России в оснащенности суперЭВМ на ближайший период (до 2012 года) с учетом изменения уровня производительности суперЭВМ в различных частях рейтинга Top500

	Количество	2010	2011	2012
Top1–20: СуперЭВМ в крупнейших национальных центрах	2 шт.	до 4 Pflops	до 7 Pflops	до 15 Pflops
Top21–100: СуперЭВМ в крупнейших региональных и отраслевых центрах	15 шт.	до 430 Tflops	до 850 Tflops	до 1,600 Tflops
Top101–250: СуперЭВМ в крупных и региональных и корпоративных центрах	30 шт.	до 130 Tflops	до 250 Tflops	до 490 Tflops
Top251–500: СуперЭВМ предприятий и научных учреждений	60 шт.	90–120 Tflops	180–240 Tflops	350–470 Tflops

Любые другие сценарии развития отечественной отрасли суперЭВМ неизбежно приведут к накоплению степени отставания в технологическом и экономическом развитии России от стран — мировых лидеров.

3. Возможности России в развитии СКТ

В России еще в советский период и последующие годы участниками отечественной отрасли высокопроизводительных систем были такие организации как: Институт точной механики и вычислительной техники имени С.А. Лебедева АН СССР (ИТМиВТ, ведущие разработчики академики В.С. Бурцев, В.А. Мельников), головной центр разработок программы «ЕС ЭВМ» — Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники (сейчас — ОАО «НИ-ЦЭВТ»), ФГУП НИИ «Квант» (академик В.К. Левин), Всероссийский НИИ экспериментальной физики — Институт теоретической и математической физики (ВНИИЭФ-ИТМФ, г. Саров), Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем (НИИ МВС, академик А.В. Каляев), Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН (МСЦ РАН, академик Г.И. Савин), головной исполнитель от России суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» — Институт программных систем РАН (ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, чл.-корр. С.М. Абрамов), Научно-исследовательский институт системных исследований РАН (НИИСИ РАН, академик В.Б. Бетелин), группа разработчиков систем на базе архитектуры микропроцессора серии «Эльбрус» (сейчас — ЗАО «Московский центр спарк технологий», «МЦСТ») и многие другие организации. За счет выполнения специальных и оборонных заказов, эти и многие другие организации сохранили высокий уровень научно-технической экспертизы, кадровый потенциал.

В настоящее время основные отечественные разработчики суперкомпьютерных технологий и систем остались прежними, однако время, политические и экономические преобразования наложили существенный отпечаток на состояние и научный потенциал этого суперкомпьютерного сообщества.

В последние 6–8 лет потребности рынка серверов и высокопроизводительных систем выдвинули в этот сектор информационных технологий ряд новых игроков — системных интеграторов, специализирующихся на поставках в Россию готовых решений крупных зарубежных компаний, таких как IBM, HP, Sun и других, и организацию сборки кластерных систем из доступных на зарубежном рынке компонентов и сетевых плат с помощью «отверточной технологии». Некоторые компании из этой группы, накопив достаточный опыт, перешли к собственным разработкам отдельных узлов высокопроизводительных систем, однако называть эти устройства законченными отечественными разработками несколько преждевременно, так как значительная их часть производится за рубежом (Китай, Тайвань, Гон-Конг), а решения заимствованы или на их репликацию получена лицензия, что само по себе уже определяет отставание от лучших зарубежных образцов. К таким компаниям в первую очередь относятся «Открытые технологии», «Т-платформы», «Эр-Стайл», «Арбайт», «Крафтвэй», «Крок» и другие.

Следует отметить, что все представленные на российском рынке отечественные суперкомпьютеры, кроме специализированных, созданы с использованием элементной базы зарубежных производителей, поскольку сегодняшние отечественные микропроцессорные решения значительно уступают по своим параметрам решениям ведущих мировых производителей (Intel, AMD, IBM). С учетом этого разумно сочетать:

- развитие отечественных суперкомпьютерных технологий (аппаратных средств и программного обеспечения) на базе зарубежных микросхем;
- создание отечественной элементной базы для современных суперЭВМ.

Это позволит избежать периода ожидания достижения российской микропроцессорной техникой нужного уровня развития и быть всегда в готовности для немедленного использования отечественных микропроцессоров по мере их появления.

В последние годы государством проводился ряд мер, направленных на ускоренное развитие в области высокопроизводительных систем. Сюда стоит отнести научно-технические программы «СКИФ» (2000–2004) [3] и «СКИФ-ГРИД» (2007–2010), государственный заказчик-координатор от России — Роснаука, головной исполнитель от России — ИПС имени А.К. Айламазяна РАН. В следующем разделе рассмотрены более подробно результаты данных программ и возможности их использования в сегодняшних планах развития суперкомпьютерных технологий в России.

4. Суперкомпьютеры семейства «СКИФ»: реальный ответ на объективные потребности

4.1. Ранее полученные результаты по программам «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД»

К настоящему времени в рамках программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» создано три поколения (Ряды 1, 2 и 3) семейства отечественных суперкомпьютеров «СКИФ» [4]. Подготовлена конструкторская и программная документация с литерой О₁. Выпущено 18 опытных образцов. Как результат программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД»:

Суперкомпьютерные программы «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» внесли серьезный вклад в развитие суперкомпьютерной отрасли и суперкомпьютерного рынка России. По данным национального рейтинга 50 самых мощных суперкомпьютеров в СНГ [5], в последние годы 75–80% суперкомпьютеров отечественной разработки обеспечиваются суперЭВМ семейства СКИФ и установками с использованием технологических решений семейства СКИФ. За время выполнения программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» шесть систем семейства «СКИФ» 14 раз вошли в престижный всемирный рейтинг суперЭВМ Top500 (с максимально высокой позицией № 36 в июне 2008 г.):

- **СКИФ-Аврора ЮУрГУ**, 21.8/24¹ Tflops — 11'2009 № 450;
- **СКИФ МГУ «Чебышёв»**, 47.17/60 Tflops — 06'2008 № 36, 11'2008 № 54, 06'2009 № 82, 11'2009 № 103;
- **СКИФ Урал**, 12.2/15.94 Tflops — 06'2008 № 283;
- **СКИФ Cyberia**, 9.01/12 Tflops — 06'2007 № 105, 11'2007 № 200, 06'2008 № 485;
- **СКИФ К-1000**, 2.032/2.534 Tflops — 11'2003 № 98, 06'2005 № 182, 11'2005 № 331, 06'2006 № 489;
- **СКИФ К-500**, 0.424/0.717 Tflops — 11'2003 № 406.

Отметим: за всю историю только восемь машин, разработанных в России, входили в мировой рейтинг Top500, шесть из них (75%) — суперкомпьютеры семейства «СКИФ».

Создано базовое, системное, инструментальное и прикладное программное обеспечение (ПО) в самых разных областях применения суперЭВМ «СКИФ». Разработанные технологии используются в науке, образовании и реальных отраслях экономики России. Результаты программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» неоднократно докладывались и демонстрировались на ведущих суперкомпьютерных конференциях и выставках (трижды на самой известной международной суперкомпьютерной конференции и выставке ISC — ноябрь 2006 г. в г. Тампа, США, июнь 2009 г. в г. Гамбург, Германия, ноябрь 2009 г. Портленд, США).

В рамках программы «СКИФ-ГРИД» традиционные направления разработки («суперЭВМ семейства СКИФ и ПО для них», «прикладные системы», «информационная безопасность») дополнены разработками GRID-технологий — отечественное ПО промежуточного уровня для территориально-распределенных грид-систем, с поддержкой интеграции вычислительных ресурсов (вычислительный грид), метакомпьютинга, распределенного хранения данных и их обработки, управления пользователями и ресурсами грид-сети, и других грид-технологий.

4.2. СуперЭВМ ряда 4 семейства «СКИФ»: отечественные решения от компактных суперЭВМ до транспетафлопсных

На сегодняшний день важнейшим проектом является разработка и выпуск первых моделей суперкомпьютеров ряда 4 семейства «СКИФ» [6] — для них так же используется название «СКИФ-4» и СКИФ-Аврора.

Состояние разработки позволило 23–25 июня 2009 года на международной суперкомпьютерной конференции ISC'09 в Гамбурге представить работоспособные модули суперкомпьютера СКИФ-Аврора, рисунок 2. Демонстрировались разобранный вычислительный узел и работающее полущасси с водяным охлаждением, на котором считались реальные задачи (например, расчет прогноза погоды), функционировала подсистема мониторинга и управления установкой.

¹ Указана производительность на тесте Linpack и, через дробь, пиковая производительность.

Экспозиция получила высокую оценку от ведущих специалистов из России, среди которых были академик Г.И. Савин, Б.М. Шабанов (МСЦ РАН), чл.-корр. РАН В.В. Воеводин, А.В. Тихонравов (НИВЦ МГУ), Г.С. Елизаров (НИИ «Квант») и специалисты других стран. На полушасси СКИФ-Авроры был получен сертификат совместимости *Intel Cluster Ready*, что свидетельствует о гарантированной работоспособности на данной платформе большинства прикладных пакетов программ.



Рис 2. Представление суперЭВМ СКИФ 4/Н на конференции ISC'09, Гамбург, 23–25 июня 2009. Слева направо: общий вид экспозиции; работающее полушасси с водяным охлаждением; расчет прогноза погоды и панель подсистемы мониторинга СКИФ-Авроры.

Полушасси — основные модули СКИФ-Авроры с производительностью 1,5 Tflops, — могут устанавливаться в монтажный шкаф — по 8 штук с двух сторон, рисунок 3. Таким образом, в монтажном шкафу может быть собран суперкомпьютер с производительностью 24 Tflops. Сегодня в мире это высшая производительность на один шкаф.

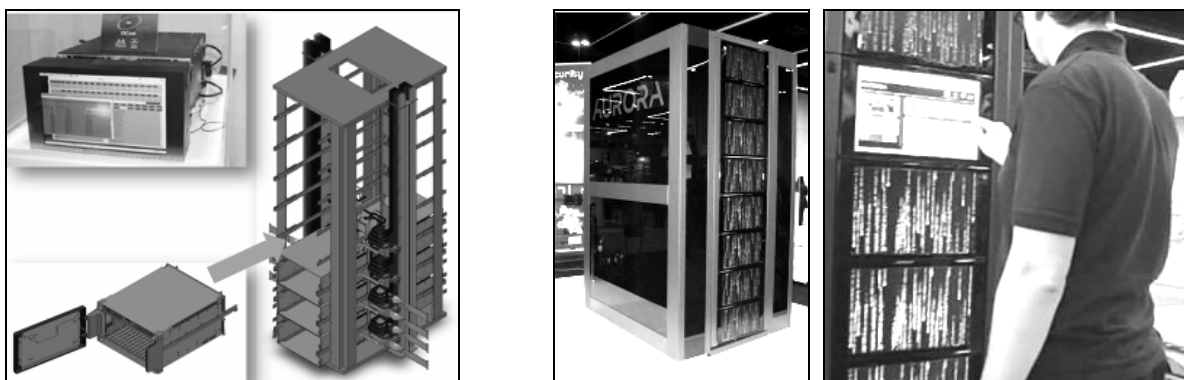


Рис 3. Слева схема размещения 16 полушасси в монтажном шкафу. Справа демонстрация установка СКИФ-Аврора на конференции SC'09 (Портленд, США) в конфигурации одного шкафа.

В ноябре на конференции SC'09 (Портленд, США) демонстрировалась установка СКИФ-Аврора в конфигурации одного шкафа, рисунок 3; 17 ноября 2009 года СКИФ-Аврора была включена в рейтинг 500 самых мощных машин мира — 450 место с показателями производительности 21.8 Tflops на тесте Linpack, 24 Tflops пиковой производительности, КПД = $21.8/24 = 90.8\%$. Посетители отмечали высокое эстетическое качество исполнения установки и ее уникальную эргономику:

- во-первых, шкаф охлаждается водой, не содержит подвижных частей, является абсолютно бесшумным;
- во-вторых, каждое полушасси закрыто как крышкой сенсорным жидкокристаллическим экраном, который является панелью управления суперкомпьютером при помощи прикосновения пальцев.

Построение крупной системы СКИФ-Аврора необходимой производительности обеспечивается расположением шкафов вдоль непрерывной линии и связью шкафов между собой отечественной системной сетью с топологией 3D-тор. Данная сеть обладает повышенной масштабируемостью и обеспечивает построение систем рекордной производительности. В 2009 году можно было таким образом построить вычислитель в 500 Tflops, который бы занимал объем всего 21 монтажного шкафа, не содержал подвижных частей, был бы надежным и беззвучным.

Подчеркнем, что водяное охлаждение позволяет экономить место и деньги на внутрирядные кондиционеры и на организацию «горячих коридоров».

Суперкомпьютеры СКИФ-Аврора по нескольким параметрам обладают преимуществом перед всеми известными на сегодня разработками (по многим из них речь идет о существенном превышении от мирового уровня: не на несколько процентов, а в 1,5–2 раза):

- в 1,5 раза лучше эффективность использования системой электроэнергии;
- в 2 раза плотнее упаковка вычислительной мощности;
- в 1,5 раза выше пропускная способность системной сети (российская разработка);
- повышенная эффективность реализации массовых операций в системной сети;
- повышенная надежность суперкомпьютера: нет подвижных частей, N+1 резервирование, тройное резервирование в системе управления и мониторинга (российская разработка);
- улучшенная система электропитания;
- улучшенные эргономические и эстетические показатели: сенсорный мультитач для управления, вся система — беззвучная.

За счет российской реализации по четырем технологиям удастся преодолеть ограничения экспортного контроля (поправка Джексона–Вейника) — мы сами разработали технологические решения уровня N — то, что запрещено ввозить в Россию, да и не только в Россию:

- тесно связанный гибридный вычислительный узел: высокая совместимость с существующим программным обеспечением в комбинации с возможностью использования FPGA-ускорителей (как это было сделано в линии Cray XD-x — недоступны в России);
- улучшенная масштабируемость системной сети за счет топологии 3D-тор;
- повышенная эффективность реализации синхронизации за счет отдельной аппаратной сети синхронизации;
- возможность аппаратной поддержки в системной сети не только MPI, но и новых перспективных подходов к реализации параллельных вычислений.

Разработка суперЭВМ ряда 4 (СКИФ-Аврора) семейства СКИФ ведется широкой кооперацией организаций, разработчиков суперкомпьютерных технологий. Непосредственно в разработке участвуют группы из семи организаций: ИПС имени А.К. Айламазяна РАН (головной), ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, ОАО «НИЦЭВТ», ЮУрГУ, ООО «Альт Линукс Технологии», ЗАО «РСК СКИФ», ОИПИ НАН Беларуси. В создании, адаптации и оптимизации системного и прикладного программного обеспечения для суперЭВМ ряда 4 (СКИФ-Аврора) семейства СКИФ участвуют двадцать российских организаций. Эта кооперация разрабатывает в России большинство ключевых решений СКИФ-Аврора, в том числе:

- отечественную системную сеть с топологией 3D-тор и соответствующее программное обеспечение для нее;
- поддержку совместного использования в счете стандартных процессоров и FPGA-ускорителей;
- средства оптимизации синхронизации и массовых операций при помощи аппаратуры системной сети и сети синхронизации;
- средства мониторинга и управления суперЭВМ СКИФ-Аврора;
- перспективные подходы к реализации параллельных вычислений.

В разработке суперЭВМ ряда 4 (СКИФ-Аврора) семейства СКИФ используется равноправное сотрудничество с западными партнерами — речь идет об альянсе с компанией Евротех (Италия). Это обеспечило получение доступа к передовым западным технологиям, основанным на опыте создания встроенных решений, и позволило серьезно улучшить такие показатели проекта как стоимость, сроки и качество разработки.

Все интересы и права России при этом учтены и защищены надлежащим образом. Российская сторона имеет право:

- изготавливать все печатные платы, все узлы и модули, суперЭВМ в целом;
- поставлять без всяких ограничений и согласований созданные суперЭВМ заказчикам;
- вносить модификации в конструкторскую документацию, создавать на ее базе новые суперЭВМ, в том числе и постепенно заменять импортные микросхемы на отечественную элементную базу — по мере ее появления.

В контексте данного международного сотрудничества российской стороной были приобретены и освоены многие технологические решения, ранее отсутствовавшие в российской индустрии.

стрии. При этом не только все ключевые программные, но и многие инфраструктурные решения, относящиеся к системам электропитания и охлаждения суперкомпьютера, были целиком разработаны в России с учетом требований российских технологических нормативов и ГОСТов.

Тем самым, обеспечена применимость использования технологий «СКИФ» ряда 4 (СКИФ-Аврора) для создания суперЭВМ в интересах всех отраслей использования, включая стратегические.

Планы развития суперкомпьютеров ряда 4 семейства «СКИФ» тщательно проработаны сегодня до 2012 года. Каждый год в период до 2012 года обеспечивается существенное улучшение ключевых показателей: энергоэффективность системы — отношение производительности к потребляемой электрической мощности,— и производительность модуля (полушасси) и шкафа системы — конечно, при сохранении их физических размеров.

Таблица 4. Линейки моделей суперЭВМ ряда 4 семейства «СКИФ»

Линейка моделей	СКИФ 4/Н 2009	СКИФ 4/В 2010	СКИФ 4/С 2011	СКИФ 4/П 2012
Общие сведения о модельной линейке				
Начало — конец НИОКР	2 кв. 2008 — 4 кв. 2009	2 кв. 2009 — 4 кв. 2010	2 кв. 2010 — 2 кв. 2012	2 кв. 2010 — 4 кв. 2012
Поставка суперЭВМ	с 2 кв. 2009	с 3 кв. 2010	3 кв. 2011 — 1 кв. 2012	3–4 кв. 2012
Эффективность вычислителя	0,25 Tflops/КВатт	0,36 Tflops/КВатт	1,0 Tflops/КВатт	1,37 Tflops/КВатт
Производи- тель- ность 1 шкафа	24 Tflops	40 Tflops	100 Tflops	200 Tflops
Показатели суперЭВМ с производительностью 1 Pflops				
Размер вычислителя	42 шкафа	25 шкафов	10 шкафов	5 шкафов
Потребление вычислителя	4,03 МВатт	2,84 МВатт	1,0 МВатт	0,73 МВатт
Полное потреб- ление СКЦ	6,05 МВатт	4,15 МВатт	1,5 МВатт	1,09 МВатт
Рекомендуемый предел расширения суперЭВМ (50 шкафов)				
Производи- тельность	1,2 Pflops	2 Pflops	5 Pflops	10 Pflops
Компактные суперЭВМ (возимые, герметичные, бесшумные)				
Мини «0,5» 28×50×80 см	1,5 Tflops 6 КВатт	2,55 Tflops 7 КВатт	6,25 Tflops 7 КВатт	12,5 Tflops 17 КВатт
Мини «1,0» 56×50×80 см	3 Tflops 12 КВатт	5,1 Tflops 14 КВатт	12,5 Tflops 14 КВатт	25 Tflops 35 КВатт

По сути, каждый год предполагается разработка новой модельной линейки СКИФ-Аврора (таблица 4). При этом предусмотрено глубокое повторное использование всей предыдущей конструкторской документации и, конечно, совместимость всего ранее разработанного программного обеспечения. Каждый год в период до 2012 года в рамках указанных модельных линеек суперкомпьютеров СКИФ-Аврора обеспечивается выпуск совместимых по программному обеспечению современных суперкомпьютеров в широком спектре производительности:

- для небольших суперкомпьютерных центров и для специального применения — компактные суперЭВМ (возимые, герметичные, бесшумные) от 1,5 до 25 Tflops;
- для региональных и отраслевых суперкомпьютерных центров — суперкомпьютеров с производительностью в десятки и сотни Tflops — установки из одного или несколько шкафов;

- для национальных суперкомпьютерных центров — суперкомпьютеров с высшей производительностью — от 1 Pflops (и выше), и с разумными характеристиками (стоимость, размер помещения, электропотребление и т.п.). На данном слайде показаны оценки показателей суперкомпьютера с производительностью 1 Pflops и оценки производительности системы с вычислителем в 50 шкафов — это рекомендуемый предел расширения систем СКИФ-Аврора.

Заметим, что во всех случаях производительность указывалась только с учетом стандартных процессоров — без учета возможностей FPGA-ускорителей. А их использование в некоторых приложениях может обеспечить двух-трехкратный прирост производительности.

4.3. СКИФ ряда 4 как начало реального пути России к экзафлопсному рубежу

Дальнейшее развитие суперкомпьютерных технологий уже в среднесрочной перспективе (до 2020 г.) ставит проблемы создания и эффективного использования суперкомпьютеров экзафлопсного класса (10^{18} операций в секунду). Общие темпы движения к экзафлопсному рубежу во всем мире представлены в таблице 5.

Таблица 5. Планы зарубежных разработок экзафлопсных суперкомпьютеров

Интервал лет	Разработка необходимых технологий и создание суперкомпьютеров с производительностью:
2008–2012	1–10 Pflops
2012–2016	10–100 Pflops
2016–2019 (± 1)	100–1000 Pflops

Первый этап по году завершения (2012) и по планируемому результату — разработка технологий, необходимых для создания суперкомпьютеров с производительностью до 10 Pflops и соответствующего программного обеспечения (системного, инструментального и прикладного) — хорошо согласуется с точно просчитанными планами работ (таблица 4) по созданию суперкомпьютеров СКИФ-Аврора. Последующие два этапа (2012–2016 — 10–100 Pflops и 2016–2019 — 100–1000 Pflops) связаны с качественным решением следующих основных проблем:

- достижение высокой плотности компоновки вычислителя суперкомпьютера, сокращение физической длины соединений — сокращение задержки передачи сигнала;
- снижение удельного потребления электроэнергии (КВтатт/Tflops);
- разработка новых подходов к охлаждению вычислителя, обеспечение эффективного и надежного отвода тепла;
- разработка новых подходов к системной сети передачи данных (система обменов между вычислительными узлами), для обеспечения низкой задержки передачи данных, высокой пропускной способности и возможности интеграции большого числа ($\sim 10^6$) вычислительных узлов — то есть, без видимых пределов масштабирования.
- разработка системы мониторинга и управления всех технических средств вычислителя с большим числом ($\sim 10^6$) вычислительных узлов, реализация средств компенсации в реальном режиме времени отказа части оборудования с обеспечением свойств устойчивости установки в целом к отказам части оборудования;
- разработка новых архитектурных решений для суперкомпьютеров с многими миллионами процессорных ядер, в том числе с поддержкой использования неоднородных ядер и специализированных ускорителей в составе вычислительных узлов таких суперкомпьютеров;
- разработка новых подходов к организации параллельного выполнения программ для суперкомпьютеров с многими миллионами процессорных ядер; в том числе, разработка системных программных средств обеспечения автоматизации распределения вычислительной нагрузки по ядрам суперЭВМ, устойчивости прикладных программ к отказу части аппаратных средств суперЭВМ.

Начальные удачные шаги по решению данных проблем частично сделаны в рамках суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД», в том числе и в рамках создания суперкомпьютеров СКИФ-Аврора.

Заключение

Россия, стремящаяся стать развитой страной с инновационной экономикой, основанной на знаниях, нуждается в серьезном развитии собственной суперкомпьютерной отрасли. Объективно необходимо обеспечить страну суперкомпьютерной киберинфраструктурой, которая по количественным показателям в 10–20 раз больше всех сегодняшних суперкомпьютерных ресурсов России. Объективно необходимо, развив собственную суперкомпьютерную отрасль, достичь уровня, позволяющего самостоятельно выполнять разработку и производство суперкомпьютерных решений на базе собственных технологий уровня N.

У России есть команды разработчиков и необходимый задел для решения этих серьезных задач. Одной из таких команд является кооперация исполнителей суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства. В рамках исполнения данных программ ранее был внесен серьезный вклад в создание отечественных суперкомпьютерных технологий и ресурсов, создан задел, позволяющий смело браться за создание суперкомпьютерных технологий транспетафлопсного, а затем и эксафлопсного уровня. Поэтому, в целях технологической модернизации и повышения конкурентоспособности высокотехнологичных отраслей промышленности России представляется важным широко использовать кооперацию исполнителей программы «СКИФ-ГРИД» (головной исполнитель — ИПС имени А.К. Айламазяна РАН), как готовую команду для выполнения работ по развитию суперкомпьютерной отрасли России, и развивать перспективную суперкомпьютерную платформу ряда 4 суперкомпьютеров семейства «СКИФ», технологии ее создания и другие результаты программы «СКИФ-ГРИД».

Автор благодарен своим коллегам, помогавшим в подготовке различных материалов, использованных в данной статье: А.А. Московскому, В.Ф. Заднепровскому, А.В. Сувориннову и многим другим. Данная работа выполнялась в рамках суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД» Союзного государства и проектов по программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Проблемы создания национальной научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе развития GRID-технологий и современных телекоммуникационных сетей» и программе фундаментальных научных исследований ОНИТ РАН «Архитектура, системные решения, программное обеспечение, стандартизация и информационная безопасность информационно-вычислительных комплексов новых поколений».

Литература

1. Абрамов С.М., Заднепровский В.Ф., Московский А.А.. Отечественные СуперЭВМ и грид-системы. Проблемы развития национальной киберинфраструктуры в России // XII научно-практическая конференция Университета города Переславля. Программные системы: теория и приложения. Переславль-Залесский: Изд-во «Университет города Переславля», 2008, Том 1, с. 9–35. ISBN 978-5-901795-11-8.
2. Мировой рейтинг пятисот самых мощных суперкомпьютеров // Электронный ресурс — <http://www.top500.org/>
3. Абрамов С.М. Итоги суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства и перспективы ее развития // В книге «Пути ученого. Е.П. Велихов». Под общей редакцией академика РАН В.П. Смирнова. М.: РНЦ «Курчатовский институт» — стр. 325–333 ISBN 978-5-9900996-1-6.
4. Абламейко С.В., Абрамов С.М., Анищенко В.В., Парамонов Н.Н., Чиж О.П. Суперкомпьютерные конфигурации СКИФ. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005, цв. ил. — 170 с. — ISBN 985-6744-19-9.
5. Национальный рейтинг пятидесяти самых мощных суперкомпьютеров СНГ // Электронный ресурс — <http://www.supercomputers.ru/>
6. С.М. Абрамов, В.Ф. Заднепровский, А.Б. Шмелев, А.А. Московский. 2009. Супер ЭВМ ряда 4 семейства СКИФ: штурм вершины суперкомпьютерных технологий. // Труды Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009)», Нижний Новгород, 30 марта–3 апреля 2009 г., изд. Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского, с. 5–16. ISBN 978-5-696-03854-4.