

# Суперкомпьютерные технологии России: объективные потребности и реальные возможности

С.М. Абрамов, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук

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 страны 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.);
- быстрее конкурентов разрабатывать новые лекарства и материалы с заданными свойствами;
- 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 объявляется возможность *обогнать* их в расчетах. Здесь характерны слова *Deborah Wince-Smith*, президента Совета по конкурентоспособности США (*President of the Council on Competitiveness*): *“Технологии, таланты и деньги доступны многим странам. Поэтому*



**Сергей Михайлович Абрамов** (род. в 1957 году) – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, специалист в области системного программирования и информационных технологий: суперкомпьютерные системы, телекоммуникационные технологии, теория конструктивных метасистем и метавычислений. Автор и соавтор более 100 научных работ и двух монографий, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

Закончил МГУ им. М.В. Ломоносова. С 1983 года после окончания аспирантуры МГУ работал в Научно-исследовательском центре электронно-вычислительной техники (НИЦЭВТ), курировал разработки спецпроцессоров ЕС ЭВМ (серии ЕС 27xx). С 1986 года работает в Институте программных систем (ИПС) АН СССР, с 1991 года является директором Исследовательского центра мультипроцессорных систем ИПС РАН, а с 2003 года – директором ИПС РАН. В 2003 году становится также ректором Университета города Переславля им. А.К. Айламазяна, где, помимо этого, заведует и кафедрой вычислительной техники и сетевых технологий.

Научный руководитель Программ Союзного государства России и Белоруссии “СКИФ” и “СКИФ-ГРИД” со стороны России.

*США стоит перед лицом непредсказуемых зарубежных экономических конкурентов. Страна, желающая победить в конкуренции, должна победить в вычислениях* (“*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*”).

Отметим два обстоятельства в данном высказывании:

1) речь идет об экономике в целом, обо всех её секторах – сказанное верно и для добывающих, и для 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.

## 1.2. Киберинфраструктура – 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, 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 странах (в первую очередь речь пойдет о США и объединенной Европе) государство вкладывает бюджетные деньги в создание национальных суперкомпьютерных

центров, в их объединение в грид-систему, в её 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, *IBM, General Electric, Pratt & Whitney*. Причем, ресурсы предоставляются бесплатно, но на конкурсной основе: тем, 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 (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 региональные суперкомпьютерные центры, созданные и содержащиеся за счет местных бюджетов, работающие на принципе бюджетной эффективности: суперкомпьютерные центры штатов Техас и Нью-Мексико (места 8 и 17 в рейтинге *Top500* за июнь 2009 года. Компьютер в каждом из этих региональных СКЦ мощнее, чем самая мощная суперЭВМ в России).

России, где за последние годы привыкли увеличивать 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 её 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 готовности к этому).

Иначе бюджетные средства, вложенные в киберинфраструктуру России, окажутся “закопан-ными 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 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 ПО 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 ПО** (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, выбор расчетной схемы, её программную параллельную реализацию, отладку, вплоть до 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: разработчиков (аппаратных средств и различных классов ПО), специалистов по производству, монтажу и запуску суперЭВМ; персонала поддержки эксплуатации (операторы, инженеры по эксплуатации, системные администраторы); сотрудников для поддержки сервисов СКЦ – от консультантов до специалистов, способных на основе начальной постановки задачи построить математическую модель, осуществить её 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, можно выделить два слоя:

**1 Технологии уровня  $N$**  – суперкомпьютерные технологии будущего, которые еще не вполне освоены, а только-только разрабатываются, недоступные на рынке инновационные, совершенно новые технические решения. На их базе создают суперкомпьютеры, которые сильно вырываются вперед. Как правило, это машины, соответствующие первым 5÷10 местам списка *Top500* [2] и обладающие мощностью, которая радикально отличает их от всех других машин. На платформе таких суперЭВМ можно выполнить расчеты, которые невозможно повторить (ни за какое разумное время) на суперкомпьютерах более низкого класса. На базе таких расчетов можно создавать 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.

**2 Технологии уровня  $N-1$**  – технологии более низкого уровня, уже проработанные решения, широко представленные на рынке. СуперЭВМ на их базе доступны (и даже могут быть воспроизведены) во многих странах. Соответственно, расчеты, выполняемые на таких машинах, тоже могут быть воспроизведены многими. На базе таких расчетов можно создать в разных отраслях конкурентоспособные материалы, технологические решения, изделия – то есть достичь нормального качества, заурядной конкурентоспособности. С такими изделиями можно выходить на мировой рынок, но придется вести изнурительную конкурентную борьбу с десятком подобных товаров, созданных на базе подобных расчетов.

Надо отметить, что все разработанные в предыдущие годы российские суперЭВМ и суперкомпьютерные технологии относились к технологическому уровню  $N-1$ . Для того чтобы побеждать в вычислениях, стране предстоит создать

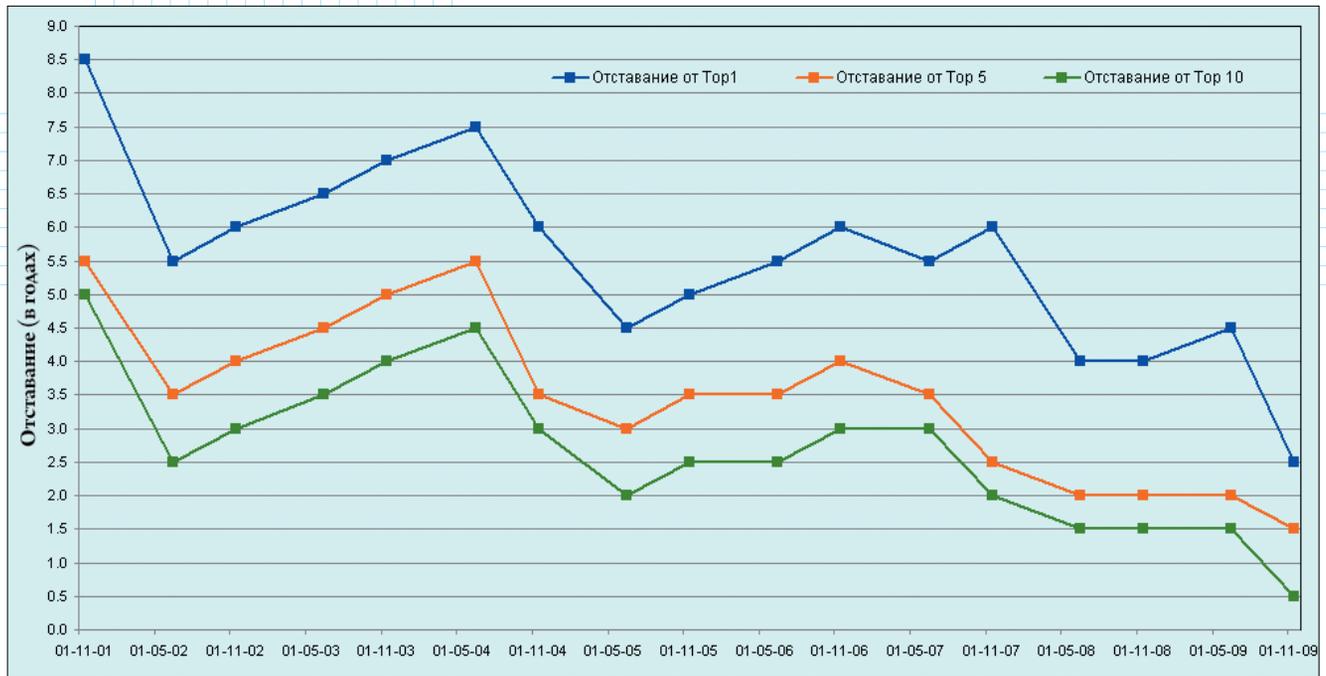


Рис. 1. Отставание уровня самых мощных суперЭВМ в России от передового мирового технологического уровня

свои собственные технологии уровня  $N$ . График отставания России от технологического уровня  $N$  приведен на рис. 1 (построен на основе анализа данных мирового рейтинга *Top500*).

### 1.6. Иерархия киберинфраструктуры

В каждый момент времени в развитых странах (в первую очередь, в США и объединенной Европе) прослеживается наличие “пирамиды” в отношении оснащения суперкомпьютерами – для обеспечения сбалансированной киберинфраструктуры 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, соответствующих местам 21÷100 в рейтинге *Top500*;
- суперЭВМ в крупных региональных и корпоративных центрах – от четырех десятков до сотни установок, соответствующих местам 101÷250 в *Top500*;
- суперЭВМ предприятий и научных учреждений – одна-три сотни установок, 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 выпавших из него в силу быстрого развития отрасли).

В табл. 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) для США, Единой Европы, Китая и России. В табл. 2 отражен уровень сегодняшнего отставания России по оснащенности суперкомпьютерами от США, Единой Европы и Китая.

## 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. В рамках короткой статьи это сделать невозможно. Ограничимся оценкой объективной потребности в парке суперЭВМ, рассчитывая на то, что на основе этого может быть оценен хотя бы порядок необходимого 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 с отставанием не более, чем в два-три раза), получаем оценку объективной потребности России, указанную в табл. 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

**Табл. 1. Оснащенность суперкомпьютерами в разных странах (состояние на июнь 2009 г.) и оценка потребностей России на ближайший период (до 2012 г.)**

	США	Единая Европа	Китай	Россия	Потребности России
<i>Top1÷20</i> : суперЭВМ в крупнейших национальных центрах	12 шт. 7 062 <i>TFLOPS</i>	3 шт. 1 274 <i>TFLOPS</i>	2 шт. 743 <i>TFLOPS</i>	1 шт. 350 <i>TFLOPS</i>	2 шт.
<i>Top21÷100</i> : суперЭВМ в крупнейших региональных и отраслевых центрах	34 шт. 2 911 <i>TFLOPS</i>	29 шт. 2 458 <i>TFLOPS</i>	1 шт. 102 <i>TFLOPS</i>	1 шт. 107 <i>TFLOPS</i>	15 шт.
<i>Top101÷250</i> : суперЭВМ в крупных региональных и корпоративных центрах	83 шт. 2 856 <i>TFLOPS</i>	37 шт. 1 313 <i>TFLOPS</i>	11 шт. 366 <i>TFLOPS</i>	3 шт. 117 <i>TFLOPS</i>	30 шт.
<i>Top251÷500</i> : суперЭВМ предприятий и научных учреждений	148 шт. 3 586 <i>TFLOPS</i>	75 шт. 1 777 <i>TFLOPS</i>	7 шт. 167 <i>TFLOPS</i>	3 шт. 71 <i>TFLOPS</i>	60 шт.
<b><i>Top1÷500</i>: ВСЕГО</b>	277 шт. 16 416 <i>TFLOPS</i>	144 шт. 6 822 <i>TFLOPS</i>	21 шт. 1 379 <i>TFLOPS</i>	8 шт. 646 <i>TFLOPS</i>	107 шт.

Примечание: 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

**Табл. 2. Уровень отставания России в оснащении суперкомпьютерами на июнь 2009 г. (разы)**

	От США	От Единой Европы	От Китая
По числу суперЭВМ <i>Top1÷500</i>	34.6	18.0	2.6
По суммарной производительности суперЭВМ <i>Top1÷500</i>	25.4	10.6	2.1

тенденции и прогноз развития мирового состояния отрасли: какие (по производительности) появятся к тому времени суперЭВМ 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 табл. 3.

Тем самым, объективно необходимый уровень обеспеченности России суперкомпьютерами, 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 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 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 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 расширением до 350÷450 *TFLOPS* в 2012 году) – **за счет отраслевых и внебюджетных средств;**

- создание в 2010–2012 годах фундамента “отечественной пирамиды” суперЭВМ путем 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*).

**Табл. 3. Оценка потребностей России в оснащении суперЭВМ на ближайший период с учетом изменения уровня их производительности в различных частях рейтинга *Top500***

	Количество	2010 г.	2011 г.	2012 г.
<i>Top1÷20</i> : суперЭВМ в крупнейших национальных центрах	2 шт.	до 4 <i>PFLOPS</i>	до 7 <i>PFLOPS</i>	до 15 <i>PFLOPS</i>
<i>Top21÷100</i> : суперЭВМ в крупнейших региональных и отраслевых центрах	15 шт.	до 430 <i>TFLOPS</i>	до 850 <i>TFLOPS</i>	до 1600 <i>TFLOPS</i>
<i>Top101÷250</i> : суперЭВМ в крупных и региональных и корпоративных центрах	30 шт.	до 130 <i>TFLOPS</i>	до 250 <i>TFLOPS</i>	до 490 <i>TFLOPS</i>
<i>Top251÷500</i> : суперЭВМ предприятий и научных учреждений	60 шт.	90÷120 <i>TFLOPS</i>	180÷240 <i>TFLOPS</i>	350÷470 <i>TFLOPS</i>

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 “НИЦЭВТ”);
- 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);
- Институт программных систем РАН (ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, чл.-корр. С.М. Абрамов) – головной исполнитель от России суперкомпьютерных программ “СКИФ” и “СКИФ-ГРИД”;
- 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 шесть-восемь лет потребности рынка серверов и высокопроизводительных систем выдвинули в этот сектор информационных технологий ряд новых игроков. Это системные интеграторы, специализирующиеся на поставках в Россию готовых решений крупных зарубежных компаний (таких, как *IBM*, *HP*, *Sun* и др.), а также на организации 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, Гонконг), а решения заимствованы или же 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 два подхода:

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

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

В последние годы государством принимался ряд мер, направленных на ускоренное развитие в области высокопроизводительных систем. Сюда стоит отнести научно-технические программы “СКИФ” (2000–2004 гг.) [3] и “СКИФ-ГРИД” (2007–2010 гг.). Со стороны России государственным заказчиком-координатором этих программ является Роснаука, а головным исполнителем – ИПС имени А.К. Айламазяна РАН.

В следующем разделе более подробно рассмотрены результаты данных программ и возможности их использования в сегодняшних планах развития российских суперкомпьютерных технологий.

### 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 О. Выпущено 18 опытных образцов.

Следует отметить, что эти программы внесли серьезный вклад в развитие суперкомпьютерной отрасли и суперкомпьютерного рынка России.

По данным национального рейтинга 50-ти самых мощных суперкомпьютеров в СНГ [5], в последние годы 75÷80% парка суперкомпьютеров отечественной разработки обеспечиваются системами семейства СКИФ и установками с использованием технологических решений семейства СКИФ. За время действия программ “СКИФ” и “СКИФ-ГРИД” шесть систем семейства 14 раз вошли в престижный всемирный рейтинг *Top500* (с максимальной высокой позицией № 36 в июне 2008 г.):

- СКИФ-Аврора ЮУрГУ, 21.8/24 *TFLOPS* (указана производительность на тесте *Linpack* и, через дробь, пиковая производительность) – № 450 в 11'2009;
- СКИФ МГУ “Чебышёв”, 47.17/60 *TFLOPS* (№ 36 в 06'2008, № 54 в 11'2008, № 82 в 06'2009, № 103 в 11'2009);
- СКИФ Урал, 12.2/15.94 *TFLOPS* (№ 283 в 06'2008);
- СКИФ *Cyberia*, 9.01/12 *TFLOPS* (№ 105 в 06'2007, № 200 в 11'2007, № 485 в 06'2008);
- СКИФ К-1000, 2.032/2.534 *TFLOPS* (№ 98 в 11'2003, № 182 в 06'2005, № 331 в 11'2005, № 489 в 06'2006);
- СКИФ К-500, 0.424/0.717 *TFLOPS* (№ 406 в 11'2003).

Отметим: за всю историю только восемь машин, разработанных в России, входили в мировой рейтинг *Top500*, и шесть из них – семейства СКИФ.

Создано базовое, системное, инструментальное и прикладное ПО в самых разных областях применения суперкомпьютеров 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, причем трижды – на самой известной международной суперкомпьютерной конференции и выставке *ISC* (ноябрь 2006 г. – Тампа, США; июнь 2009 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 – отечественного 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 др.

#### 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 также используются названия 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 (рис. 2). Демонстрировались разобранный вычислительный узел и работающее полушасси с водяным охлаждением, на котором считались реальные задачи (например, расчет прогноза погоды), функционировала



Рис. 2. СКИФ-4/Н на конференции *ISC'09* в Гамбурге 23–25 июня 2009 г.: а – общий вид экспозиции; б – работающее полушасси с водяным охлаждением; в – расчет прогноза погоды и панель подсистемы мониторинга

подсистема мониторинга и управления установкой. 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 был получен сертификат совместимости *Intel Cluster Ready*, что свидетельствует о гарантированной работоспособности на данной платформе большинства пакетов прикладных программ.

Полушасси – основные модули СКИФ-Авроры с производительностью 1.5 *TFLOPS* – могут устанавливаться в монтажный шкаф по 8 штук с двух сторон (рис. 3). Таким образом, в монтажном шкафу может быть собран суперкомпьютер с производительностью 24 *TFLOPS*. Сегодня это высшая в мире производительность на один шкаф.

В ноябре 2009 года на конференции *SC’09* (Портленд, США) демонстрировалась установка СКИФ-Аврора в конфигурации одного шкафа (рис. 3); 17 ноября 2009 года система СКИФ-Аврора была включена в рейтинг 500 самых мощных машин мира – 450-е место с показателями производительности 21.8 *TFLOPS* на тесте *Linpack*; пиковая производительность – 24 *TFLOPS*, КПД =  $21.8/24 = 90.8\%$ . Посетители отмечали высокое эстетическое качество исполнения установки и её уникальную эргономичность:

- шкаф охлаждается водой, не содержит подвижных частей, является абсолютно бесшумным;
- 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 бы таким образом построить вычислитель в 500 *TFLOPS*, который бы занимал объем всего 21 монтажного шкафа, не содержал подвижных частей, был бы надежным и бесшумным. Подчеркнем, что водяное охлаждение позволяет экономить место и деньги на внутрирядные кондиционеры и на организацию “горячих коридоров”.

По нескольким параметрам суперкомпьютеры СКИФ-Аврора обладают преимуществом перед всеми известными на сегодня разработками (во многом речь идет о существенном превышении мирового уровня – не на несколько процентов, а в полтора-два раза):

- в 1.5 раза выше эффективность использования системой электроэнергии;

- в 2 раза плотнее упаковка вычислительной мощности;
- в 1.5 раза выше пропускная способность системной сети (русская 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 (русская разработка);
- улучшенная система электропитания;
- улучшенные эргономические и эстетические показатели: сенсорный мультиэкран для управления, система работает бесшумно.

По четырем технологиям удается преодолеть ограничения экспортного контроля (поправка Джексона-Вэника). Мы сами разработали технологические решения уровня *N* – то, что запрещено ввозить в Россию, да и не только в Россию. Реализовано следующее:

- тесно связанный гибридный вычислительный узел: высокая совместимость с существующим ПО в комбинации с возможностью использования *FPGA*-ускорителей (как в суперкомпьютерах линии *Cray XD-x*, которые недоступны в России);
- достигнута 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 (Message Passing Interface)*, но и новых перспективных подходов к реализации параллельных вычислений.

Разработка суперЭВМ ряда 4 (СКИФ-Аврора) семейства СКИФ ведется при широкой кооперации организаций – разработчиков суперкомпьютерных технологий. Непосредственно в разработке участвуют группы из семи организаций:

- ИПС имени А.К. Айламазяна РАН (головной институт);
- ИПМ имени М.В. Келдыша РАН;
- ОАО “НИЦЭВТ”;
- ЮУрГУ;
- ООО “Альт Линукс Технолоджи”;
- ЗАО “РСК СКИФ”;
- ОИПИ НАН Беларуси.

В создании, адаптации и оптимизации системного и прикладного программного обеспечения для суперЭВМ ряда 4 семейства СКИФ участвуют двадцать российских организаций. Так разрабатывается большинство ключевых решений, в том числе:

- отечественная системная сеть с топологией *3D-тор* и соответствующее ПО для нее;
- средства оптимизации синхронизации и массовых операций при помощи аппаратуры системной сети и сети синхронизации;
- поддержка совместного использования в счете стандартных процессоров и *FPGA*-ускорителей;

- средства мониторинга и управления системой;
- перспективные подходы к реализации параллельных вычислений.

При разработке СКИФ-Аврора используется равноправное сотрудничество с западными партнерами – речь идет об альянсе с итальянской компанией “Евротех” (*Eurotech SPA*, [www.eurotech.com](http://www.eurotech.com)). 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 созданные суперЭВМ заказчикам без всяких ограничений и согласований;
- вносить модификации в конструкторскую документацию, создавать на её базе новые суперЭВМ (в том числе и постепенно заменять импортные микросхемы на отечественные по мере появления собственной элементной базы).

В контексте данного международного сотрудничества российской стороной были приобретены и освоены многие технологические решения, ранее отсутствовавшие в российской индустрии. 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-Аврора для создания суперЭВМ в интересах всех отраслей, включая стратегические.

Планы развития суперкомпьютеров ряда 4 семейства СКИФ тщательно проработаны сегодня до 2012 года. Каждый год предусматривается существенное улучшение ключевых показателей, таких как:

- энергоэффективность системы (отношение производительности к потребляемой электрической мощности);
- производительность модуля (полушасси) и шкафа системы – конечно, при сохранении их физических размеров.

По сути, каждый год предполагается разработка новой модельной линейки СКИФ-Аврора (табл. 4). При этом

предусмотрено глубокое повторное использование всей предыдущей конструкторской документации и, конечно, совместимость всего ранее разработанного ПО. Каждый год, в период до 2012 года, в рамках указанных модельных линеек 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) с производительностью от 1.5 до 25 *TFLOPS*;

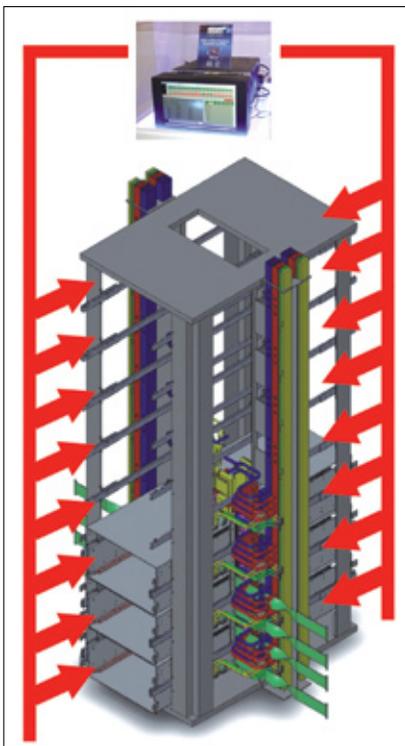


Рис. 3. Схема размещения 16 полушасси в монтажном шкафу (слева), установка СКИФ-Аврора на конференции SC'09 (Портленд, США) в конфигурации одного шкафа

Табл. 4. Линейки моделей суперЭВМ ряда 4 семейства СКИФ

Линейка моделей	СКИФ 4/Н 2009 г.	СКИФ 4/В 2010 г.	СКИФ 4/С 2011 г.	СКИФ 4/П 2012 г.
<b>Общие сведения о модельной линейке</b>				
Начало – конец НИОКР	II кв. 2008 – IV кв. 2009	II кв. 2009 – I кв. 2010	II кв. 2010 – II кв. 2012	II кв. 2010 – IV кв. 2012
Поставка суперЭВМ	с II кв. 2009	с III кв. 2010	III кв. 2011 – I кв. 2012	III – IV кв. 2012
Эффективность вычислителя	0.25 <i>TFLOPS/kW</i>	0.36 <i>TFLOPS/kW</i>	1.0 <i>TFLOPS/kW</i>	1.37 <i>TFLOPS/kW</i>
Производительность 1 шкафа	24 <i>TFLOPS</i>	40 <i>TFLOPS</i>	100 <i>TFLOPS</i>	200 <i>TFLOPS</i>
<b>Показатели суперЭВМ с производительностью 1 PFLOPS</b>				
Размер вычислителя	42 шкафа	25 шкафов	10 шкафов	5 шкафов
Потребление вычислителя	4.03 <i>MW</i>	2.84 <i>MW</i>	1.0 <i>MW</i>	0.73 <i>MW</i>
Полное потребление СКЦ	6.05 <i>MW</i>	4.15 <i>MW</i>	1.5 <i>MW</i>	1.09 <i>MW</i>
<b>Рекомендуемый предел расширения суперЭВМ (50 шкафов)</b>				
Производительность	1.2 <i>PFLOPS</i>	2 <i>PFLOPS</i>	5 <i>PFLOPS</i>	10 <i>PFLOPS</i>
<b>Компактные суперЭВМ (возимые, герметичные, бесшумные)</b>				
Мини “0,5” 28×50×80 см	1.5 <i>TFLOPS</i> 6 <i>kW</i>	2.55 <i>TFLOPS</i> 7 <i>kW</i>	6.25 <i>TFLOPS</i> 7 <i>kW</i>	12.5 <i>TFLOPS</i> 17 <i>kW</i>
Мини “1,0” 56×50×80 см	3 <i>TFLOPS</i> 12 <i>kW</i>	5.1 <i>TFLOPS</i> 14 <i>kW</i>	12.5 <i>TFLOPS</i> 14 <i>kW</i>	25 <i>TFLOPS</i> 35 <i>kW</i>

• для региональных и отраслевых суперкомпьютерных центров – суперЭВМ с производительностью в десятки и сотни *TFLOPS* (установки состоят из одного или несколько шкафов);

• для национальных суперкомпьютерных центров – суперЭВМ с высшей производительностью (от 1 *PFLOPS* и выше) и с разумными характеристиками (стоимость, размер помещения, электропотребление и т.п.).

В табл. 4 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 ведь их использование в некоторых приложениях может обеспечить двух-трехкратный прирост производительности.

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

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

Первый по году завершения (2012) и по планируемому результату этап – 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 (табл. 4) по созданию суперкомпьютеров СКИФ-Аврора. Последующие два этапа (2012–2016 гг. –  $10 \div 100$  *PFLOPS* и 2016–2019 гг. –  $100 \div 1000$  *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 (*kW/TFLOPS*);

• обеспечение эффективного и надежного отвода тепла, разработка новых подходов к охлаждению вычислителя;

• разработка новых подходов к системной сети передачи данных (система обменов между вычислительными узлами) для обеспечения низкой задержки при передаче данных, высокой пропускной способности и возможности интеграции большого числа ( $\sim 10^6$ ) вычислительных узлов – то есть, без видимых пределов масштабирования.

Табл. 5. Планы зарубежных разработок эксафлопсных суперкомпьютеров

Интервал	Производительность
2008–2012 гг.	$1 \div 10$ <i>PFLOPS</i>
2012–2016 гг.	$10 \div 100$ <i>PFLOPS</i>
2016–2019 ( $\pm 1$ )	$100 \div 1000$ <i>PFLOPS</i>

- разработка системы мониторинга и управления всех технических средств вычислителя с большим числом ( $\sim 10^6$ ) вычислительных узлов, реализация в режиме реального времени средств компенсации отказа части оборудования с обеспечением свойств устойчивости установки в целом к отказам части оборудования;

- разработка новых архитектурных решений для суперкомпьютеров со многими миллионами процессорных ядер, в том числе с поддержкой использования неоднородных ядер и специализированных ускорителей в составе вычислительных узлов;

- 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 суперкомпьютера.

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. Один из примеров – кооперация исполнителей суперкомпьютерных программ “СКИФ” и “СКИФ-ГРИД” Союзного государства (головной исполнитель – ИПС имени А.К. Айламазяна РАН). В рамках реализации данных программ уже 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 высокотехнологических отраслей промышленности России, представляется важным широко использовать исполнителей программы “СКИФ-ГРИД”, как готовую команду для выполнения работ по развитию суперкомпьютерной отрасли России, а также

развивать перспективную суперкомпьютерную платформу ряда 4 семейства СКИФ, технологии её создания и опираться на 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 Отделения нанотехнологий и информационных технологий (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, т. 1, с. 9–35 (*ISBN 978-5-901795-11-8*)
2. Мировой рейтинг пятиста самых мощных суперкомпьютеров // [www.top500.org](http://www.top500.org)
3. Абрамов С.М. Итоги суперкомпьютерной программы “СКИФ” Союзного государства и перспективы ее развития // В кн. “Пути ученого. Е.П. Велихов”. Под общ. ред. акад. РАН В.П.Смирнова. – Москва: РНЦ “Курчатовский институт”, с. 325–333 (*ISBN 978-5-9900996-1-6*)
4. Абрамеев С.В., Абрамов С.М., Анищенко В.В., Парамонов Н.Н., Чиж О.П. Суперкомпьютерные конфигурации СКИФ. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005, 170 с. (*ISBN 985-6744-19-9*)
5. Национальный рейтинг пятидесяти самых мощных суперкомпьютеров СНГ // [www.supercomputers.ru](http://www.supercomputers.ru)
6. Абрамов С.М., Заднепровский В.Ф., Шмелев А.Б., Московский А.А. СуперЭВМ 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. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, с. 5–16 (*ISBN 978-5-696-03854-4*)