

С. М. Абрамов, В. Ф. Заднепровский, А. А. Московский

## **Отечественные СуперЭВМ и грид-системы. Проблемы развития национальной киберинфраструктуры в России<sup>\*</sup>)**

Научный руководитель: С. М. Абрамов

Аннотация. Статья посвящена проблемам развития национальной киберинфраструктуры в России. Дается анализ развития зарубежной суперкомпьютерной отрасли и указываются возможные направления развития данной отрасли в России.

### **1. Введение**

#### **1.1. Единственный способ победить в конкуренции — обогнать в вычислениях**

Критические (прорывные) технологии в государствах, строящих экономику, основанную на знаниях, исследуются и разрабатываются (R&D) на базе широкого использования высокопроизводительных вычислений. 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.)

---

<sup>\*</sup>) Представлено по тематике: *Программное обеспечение для суперЭВМ, Аппаратные компоненты и системы суперЭВМ.*

Сегодня суперкомпьютерные технологии по праву считаются важнейшим фактором для обеспечения конкурентоспособности экономики страны<sup>1</sup>, а единственным способом победить конкурентов объявляют возможность обогнать их в расчетах. Здесь характерны слова<sup>2</sup> 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» [2].*

Неважно, о конкуренции в каком секторе экономики идет речь: сказанное верно для добывающих и перерабатывающих секторов экономики, и особенно это верно при разработке новых технологий. Поэтому в развитых странах мира для перехода к экономике знаний создается новая инфраструктура государства — государственная система из мощных суперкомпьютерных центров, объединенных сверхбыстрыми каналами связи в грид-систему. То есть, по сути, речь идет о национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети. Для такой системы часто используют термин «киберинфраструктура»<sup>3</sup>. В этих странах на создание национальной киберинфраструктуры выделяются большие финансы из государственных бюджетов: в 2005–2007 гг. США тратили на эти цели от 2 до 4 млрд. долларов в год.

---

<sup>1</sup>Например, см. доклад Президенту США комитета РИТАС «Вычислительные науки: обеспечение превосходства (конкурентоспособности) Америки» [1].

<sup>2</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.

<sup>3</sup>В данной работе оба термина — «национальная научно-исследовательская информационно-вычислительная сеть» и «киберинфраструктура», — используются как синонимы.

## **2. Природа экономической эффективности национальной киберинфраструктуры**

Таким образом, в развитых странах национальная киберинфраструктура создается в интересах страны в целом, всех отраслей экономики государства. Национальная киберинфраструктура рассматривается как общественное благо, расходы на ее создание и сопровождение покрываются из национального бюджета.

По мере создания фрагментов киберинфраструктуры (суперкомпьютерных центров, сегментов грид-систем) ее ресурсы предоставляются, как правило, бесплатно для использования подразделениям исследований и разработок государственных учреждений (национальных научных центров), ВУЗов и коммерческих фирм — тем, кому сегодня необходимы максимальные достигнутые вычислительные мощности. Например, вычислительные ресурсы (процессорное время для расчетов) суперкомпьютерных центров национальных лабораторий США безвозмездно раздаются в виде грантов по конкурсам на лучшие проекты по научным исследованиям и коммерческим инженерным разработкам (программа INCITE). Тем самым интерес государства и возврат вложенных в киберинфраструктуру бюджетных средств осуществляется не за счет прямой продажи ресурсов национальной киберинфраструктуры, а за счет развития конкурентоспособности экономики, разработки новых технологий, товаров и услуг, расширения присутствия национальной экономики на мировом рынке, и увеличения налоговых поступлений в национальную казну. То есть речь идет не о коммерческой, а о бюджетной эффективности государственных инвестиций в национальную киберинфраструктуру.

## **3. Рекордные суперЭВМ необходимы**

Отметим существенное обстоятельство: для успешной конкуренции в области создания передовых технологий стране необходимо иметь хотя бы одну суперЭВМ рекордного диапазона — близкую к «первой десятке» рейтинга Top500. Без этого некоторые из необходимых расчетов выполнить будет невозможно. И причина этого не только в большом объеме вычислений. Для действительно «больших» задач в типичных случаях окажутся неверными рассуждения вида: «Наша установка в 5–10 раз менее производительная. Ну и ладно, счет займет в 5–10 раз больше времени, мы подождем...». Дело в том, что менее мощная установка имеет и меньшую оперативную

память. И задача может просто «не поместиться» в память такой суперЭВМ. И расчет будет принципиально невозможен на данной суперЭВМ не только из соображений неприемлемо большого времени счета, но из-за высоких требований по памяти.

#### **4. Необходима система различных по мощности суперЭВМ**

Обычно национальная киберинфраструктура состоит из суперкомпьютерных центров нескольких «уровней», объединенных сверхмощными каналами связи и оснащенных грид-решениями, позволяющими использовать распределенную, гетерогенную сеть суперкомпьютеров как единую вычислительную среду.

Например, в США запланировано создание грид-сети, включающей три–четыре сверхмощных суперкомпьютерных центров (производительностью<sup>4</sup> 1 Pфlops и более), 20–30 крупных суперкомпьютерных центров (60–350 Tфlops) и несколько десятков суперкомпьютерных центров (20–60 Tфlops).

Анализируя данные списка Top500 (редакция за ноябрь 2007 года), можно сказать, что сегодня в оснащенности суперкомпьютерными средствами преимущества США перед Россией можно оценить в 50 раз, преимущества Европы перед Россией можно оценить в 25 раз (таблица 1).

#### **5. В чем заграница нам никогда не поможет**

Суперкомпьютерные технологии являются (см. выше) инструментом обеспечения конкурентного и технологического превосходства одного государства над другим. Поэтому Россия никогда не сможет приобрести у другой страны такую суперкомпьютерную технику, которая эффективно обеспечила бы конкурентное и технологическое превосходство России над этой страной. И здесь даже не нужны

---

<sup>4</sup>Производительность суперкомпьютера определяют количеством операций с плавающей точкой, которые могут быть исполнены за одну секунду. Для современных суперкомпьютеров используют единицы: 1 Tфlops — один триллион ( $10^{12}$ ) операций в секунду, 1 Pфlops — один квадриллион ( $10^{15}$ ) операций в секунду. Различают пиковую производительность (предельная, недостижимая производительность) и реальную производительность на некоторой задаче. В мировом рейтинге пятисот самых мощных компьютеров мира ([www.top500.org](http://www.top500.org), пересматривается каждый июнь и ноябрь) суперкомпьютеры ранжируются по производительности на задаче Linpack-тесте, связанном с решением огромной системы линейных уравнений. Очень часто суперкомпьютерами называют только те ЭВМ, которые попадали в рейтинг Top500.

| Класс суперкомпьютеров                         | Диапазоны Linpack-производительности и количество суперкомпьютеров данного диапазона (ноябрь 2007 г.) |                           |                     |                         |
|--|---|---------------------------|---------------------|-------------------------|
|  | США   | Европа                    | Россия              | Доля России             |
| Сверхпроизводительные суперкомпьютерные центры | от 85 до 478 Tflops<br>6 шт.  | 102 и 167 Tflops<br>2 шт. | —                   | 0% от США, 0% от Европы |
| Крупные суперкомпьютерные центры               | 21–82 Tflops<br>20 шт.  | 22–64 Tflops<br>12 шт.    | 33 Tflops<br>1 шт.  | 5% от США, 8% от Европы |
| Суперкомпьютерные центры                       | 9–21 Tflops<br>60 шт.   | 9–20 Tflops<br>55 шт.     | —                   | 0% от США, 0% от Европы |
| Суперкомпьютеры широкого использования         | 5–9 Tflops<br>197 шт.   | 5–9 Tflops<br>80 шт.      | 6–9 Tflops<br>6 шт. | 3% от США, 7% от Европы |
| ВСЕГО  | 4164 Tflops,<br>283 шт.   | 2038 Tflops,<br>149 шт.   | 2 Tflops,<br>7 шт.  | 2% от США, 4% от Европы |

ТАБЛИЦА 1. Оснащенность США, Европы и России суперкомпьютерами (по данным рейтинга Top500, редакция за ноябрь 2007 года)

никакие государственные запреты: у компаний-поставщиков отлично срабатывают здравый смысл и соображения сохранения своего технологического превосходства над Россией.

Это не значит, что совсем невозможно купить суперЭВМ за рубежом. Однако анализ поставок суперЭВМ из-за рубежа в Россию показывает (см. [4], слайды 59–62), что поставляется нам то, что не представляет угрозы; например, то, что заведомо устареет через полгода–год после поставки.

Другие обстоятельства, которые надо также здесь учесть: зависимость от зарубежной компании по дальнейшим поставкам и сервисам: модернизация оборудования, новые версии программного обеспечения, консультации, обслуживание и т. п.

## **б. Магистральные каналы передачи данных для национальной киберинфраструктуры**

Как было сказано выше, киберинфраструктура государства — это система мощных суперкомпьютерных центров, объединенных между собой сверхбыстрыми каналами связи в грид-систему. Поэтому анализ проблемы будет не полным, если не рассмотреть состояние дел в части магистральных каналов передачи данных для национальной киберинфраструктуры.

Связывание национальных суперкомпьютерных центров в единую систему — принципиальный шаг на пути к построению киберинфраструктуры, поскольку это позволяет (перечисление неполное):

- обеспечивать возможность решения вычислительно сложных задач, недоступных для решения при помощи отдельных суперкомпьютерных установок.
- повышать эффективность использования суперкомпьютерных установок за счет выравнивания нагрузки (обмена вычислительными заданиями).
- развивать новые технологии высокопроизводительных вычислений и обработки данных при помощи географически распределенных вычислительных ресурсов.
- обеспечивать («плавно») развитие национальной киберинфраструктуры, защищать вложенные в нее инвестиции.

Поэтому в ведущих странах уделяется серьезное внимание проблеме создания национальных систем магистральных каналов передачи данных для киберинфраструктуры. Так, например, в США на решение этой задачи идет существенная доля из всех средств, выделяемых в целом на создание национальной киберинфраструктуры. Аналогичные программы развития суперкомпьютерных центров, компьютерных сетей и грид-систем имеются в Европе, Японии, Китае и других развитых странах.

В части обеспечения сети каналов передачи данных для национальной киберинфраструктуры мировой опыт показывает, что такие сети организуются вне пространства обычных коммерческих интересов операторов связи и за рамками их обычной ценовой политики. Здесь в мире в основном применяются следующие решения:

- создание сети передачи данных, которая находится в собственности государства (научно-образовательного сообщества, государственной эксплуатационной компании) — данный

путь требует огромных временных и финансовых затрат (на этапах создания и эксплуатации);

- понуждение операторов связи (на уровне политических решений) к предоставлению услуг вне рамок обычных коммерческих условий: как правило, речь идет о предоставлении операторами связи государству в льготную аренду так называемых «темных волокон» для создания магистрали национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети.

К сожалению, в России сегодня практически все магистральные каналы национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети образованы за счет покупки канальной емкости у коммерческих операторов связи, а не за счет прокладки собственных линий и не за счет аренды «темных волокон».

Сравнение технических характеристик сегодняшних национальных научно-исследовательских информационно-вычислительных сетей США, Объединенной Европы и России (таблица 1, таблица 2, рис. 1, рис. 2 и рис. 3) показывает драматическое отставание России в данной области:

- в области оснащенности суперкомпьютерными ресурсами, как уже отмечено выше, Россия отстает от США в 50 раз, от Европы — в 25 раз;
- в технической оснащенности в части передачи данных в магистральных национальных научно-исследовательских информационно-вычислительных сетях Россия отстает по характеристике скорости передачи данных от США и Европы в 100–50–25 раз, при крайне слабом охвате сетью национальной территории (по сравнению с охватом территорий США и Европы).

## 7. Выводы

Без экстренной ликвидации данного отставания не могут быть решены задачи получения конкурентных преимуществ результатов исследований и разработок в «прорывных технологиях», не может быть обеспечено ускоренное развитие России и завоевание ею достойного места в мировой экономике.

|            |   |
|------------|---|
| США        | <p><b>National Lambda Rail:</b> Магистральная сеть на основе каналов с емкостью <math>3 \times 10</math>–<math>10</math> Гбит/с., охватывает все штаты, принадлежит исследовательским организациям и используется для проведения исследований в области телекоммуникационных технологий нового поколения и базисом грид-проектов (TeraGrid, Open Science Grid) в США — рис. 1.</p> <p>Есть и другие информационно-вычислительные национальные сети — DOE, DOD, NSA, NSF, NASA и прочие.</p>   |
| Европа     | <p><b>GEANT2:</b> Европейская магистральная сеть на основе темных волокон и каналов с емкостью <math>2 \times 10</math>–<math>2.5</math> Гбит/с. связывает все научные центры в центральноевропейских странах. Присоединенные к магистрали периферийные сегменты на основе каналов с емкостью <b>622–155 Мбит/с</b> — рис. 2. Есть и другие Европейские информационно-вычислительные сети, обладающие схожими характеристиками, например сеть стран северной Европы NORDUnet.</p>   |
| Белоруссия | <p>Осенью 2007 года Белоруссия выполнила требования (входной ценз) на вхождение национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети страны в BalticGRID: национальная магистраль в основной части <b>на основе собственных каналов</b> с емкостью не хуже <b>1–2 Гбит/с</b> (к 2010 году: <b>10 Гбит/с</b>), емкость подключения национальной магистрали к узлу BalticGRID не хуже <b>1–2 Гбит/с</b></p>  |
| Россия     | <p><b>Национальная научно-исследовательская информационно-вычислительная сеть</b> — рис. 3, — основана, в основном, на аренде канальных емкостей у коммерческих операторов связи:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>2.5 Гбит/с — 1 канал:</b> Москва–Санкт–Петербург, расширен недавно до 10 Гбит/с;</li> <li>● <b>155 Мбит/с — 1 канал:</b> Москва–Самара–Новосибирск–Хабаровск;</li> <li>● <b>100–10 Мбит/с — 11 каналов:</b> от города Москвы до Екатеринбурга (71 Мбит/с), Самары (34 Мбит/с), Новосибирска (72 Мбит/с), Нижнего Новгорода (55 Мбит/с), Ростова на Дону (96 Мбит/с), Твери (40 Мбит/с), Перми (34 Мбит/с), Ставрополя (16 Мбит/с), Новгорода (10 Мбит/с), Краснодара (10 Мбит/с), Казани (26 Мбит/с).</li> <li>● <b>8–4 Мбит/с — 4 канала:</b> от Москвы до Ярославля, от Новосибирска до Хабаровска (6 Мбит/с), от Новосибирска до Томска (8 Мбит/с), от Новосибирска до Барнаула (4 Мбит/с).</li> <li>● Остальные каналы — <b>менее 4 Мбит/с.</b></li> </ul> <p><b>Характеристика полноты покрытия территории:</b> неудовлетворительное и фрагментарное</p> |

ТАБЛИЦА 2. Сравнение характеристик каналов связи национальных научно-исследовательских информационно-вычислительных сетей



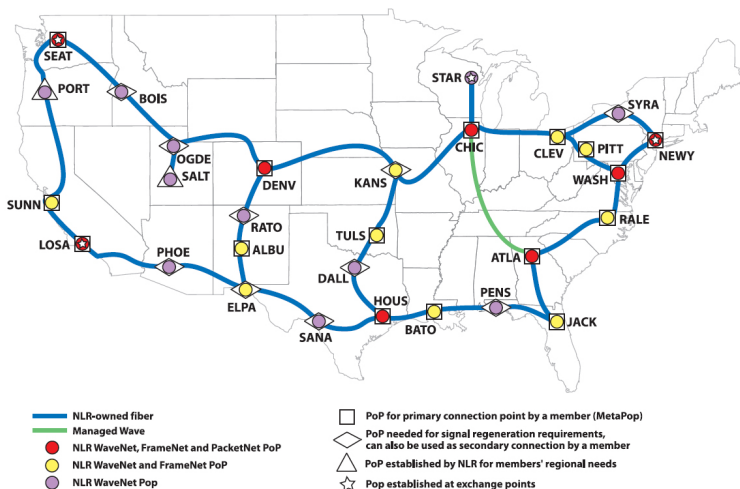


Рис. 1. Магистральная сеть National Lambda Rail (США) основана на собственных волоконно-оптических линиях (NLR-owned fibers)

## 8. Отечественные суперкомпьютерные системы. Суперкомпьютеры семейства «СКИФ»

В силу сказанного выше, если ставить целью обеспечение конкурентоспособности страны, то невозможно ориентироваться на закупки импортных суперЭВМ, и следует обратить внимание на поставщиков отечественных суперЭВМ.

Суперкомпьютерами обычно принято называть установки высшей производительности. Например, вошедшие в выпускной рейтинг Top500. До ноября 2007 года только следующие четыре отечественные<sup>5</sup> суперЭВМ вошли в Top500 (рис. 4):

- МВС1000М, 0.534 Tflops, затем расширен до 0.734 Tflops — июнь 2002 года, НИИ «Квант», МСЦ, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН;

<sup>5</sup>Вошедшие в Top500 не как закупки в Россию компьютеров у IBM, Hewlett-Packard или Sun Microsystems, а как отечественные разработки — например, с пометкой «self made».

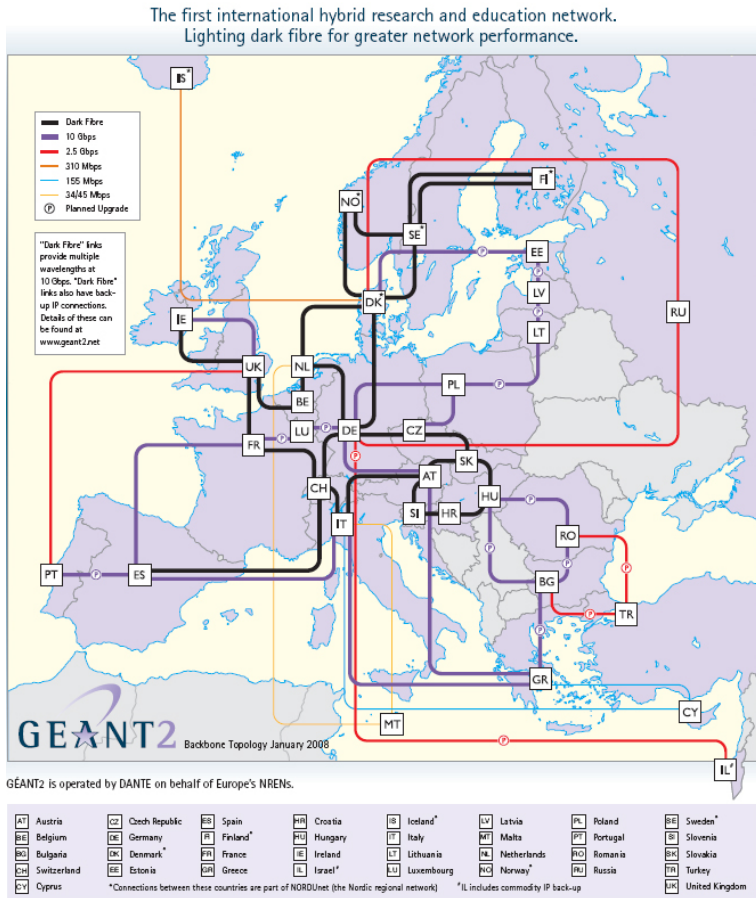


Рис. 2. GEANT2: Европейская магистральная сеть на основе «темных волокон» и каналов (с емкостью от  $2 \times 10$  до 2.5 Гбит/с)

- СКИФ К-500, 0.472 Tflops — ноябрь 2003 года, ОИПИ НАН Беларуси, НИИ ЭВМ, Т-Платформы, ИПС РАН;
- СКИФ К-1000, 2.032 Tflops — ноябрь 2004 года, ОИПИ НАН Беларуси, НИИ ЭВМ, Т-Платформы, ИПС РАН;

## Национальная компьютерная сеть науки и высшей школы



Рис. 3. Российская национальная сеть науки и высшей школы (состояние на февраль 2008 года)

- СКИФ Cyberia, 9.019 Тflops — июнь 2007, Т-Платформы, с участием ИПС РАН.

В июне 2008 года к этому списку, несомненно, добавится:

- СКИФ Урал, 11 Тflops — июнь 2008, Т-Платформы, с участием Института программных систем РАН;
- СКИФ МГУ, 43 Тflops — июнь 2008, Институт программных систем РАН, Т-Платформы, МГУ имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, фактически:

- подавляющее большинство из известных<sup>6</sup> отечественных суперЭВМ являются суперкомпьютерами семейства СКИФ;
- с 2003 года все известные отечественные суперЭВМ являются суперкомпьютерами семейства СКИФ;
- сегодня проверенная временем команда исполнителей программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» — единственная результативная российская команда, реально создающая отечественные суперкомпьютерные системы.

<sup>6</sup>Информация о которых опубликована в открытой печати.

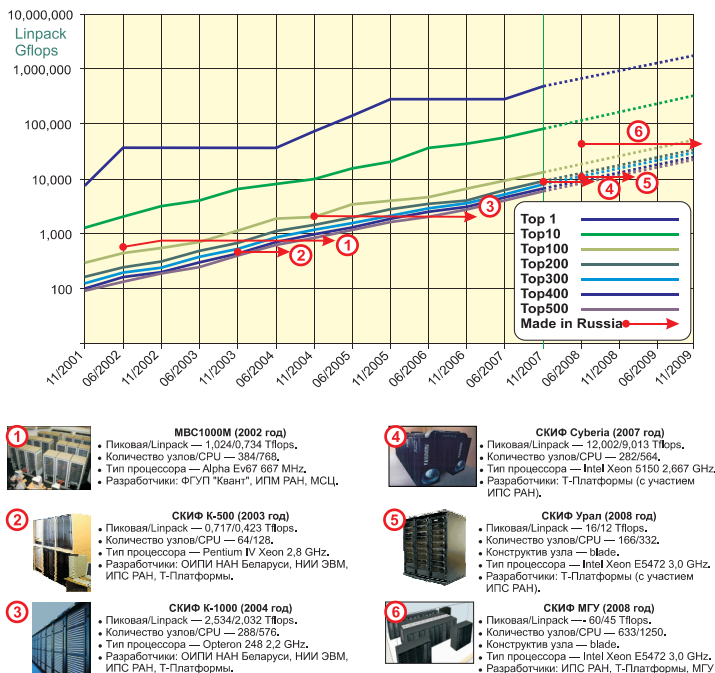


Рис. 4. Отечественные СуперЭВМ в мировом рейтинге Top500 (за всю историю рейтинга и в перспективе до июня 2008 года)

## 9. Суперкомпьютерные программы «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД»

Суперкомпьютерные программы «СКИФ»<sup>7</sup> и «СКИФ-ГРИД»<sup>8</sup> Союзного государства (таблица 3) являются научно-производственными программами Союзного государства. Данные программы обеспечивают присутствие России среди разработчиков (а не только покупателей) суперкомпьютерных технологий мирового класса, о чем будет сказано далее. И этого бы сегодня не было, если бы в деле

<sup>7</sup>(2000–2004 гг.)

<sup>8</sup>(2007–2010 гг.)

|   | <b>СКИФ</b>                          | <b>СКИФ-ГРИД</b>   | <b>Отношение</b> |
|---|--------------------------------------|--|------------------|
| Бюджет Российской Федерации (млн. руб., на весь срок) | 157                                  | 446.5  | 284%             |
| Бюджет Республики Беларусь (млн. руб., на весь срок)  | 162                                  | 234.5  | 145%             |
| <b>Бюджет всего</b><br>(млн. руб., на весь срок)      | <b>319</b>                           | <b>681</b>   | <b>213%</b>      |
| Вид   | НИОКР,<br>только<br>бюджет           | НИР,<br>1/3 — привлеченные<br>средства   |                  |
| Соисполнителей РФ                                     | 10                                   | >20 (20–30)  | > 200%           |
| Объем работ   | СуперЭВМ и<br>пилотные<br>приложения | Грид-технологии.<br>СуперЭВМ,<br>информационная<br>безопасность и<br>пилотные приложения | > 200%           |

ТАБЛИЦА 3. Суперкомпьютерные программы Союзного государства «СКИФ» (2000–2004 гг.) и «СКИФ-ГРИД» (2007–2010 гг.)

формирования суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» огромную роль не сыграла бы принципиальная позиция и поддержка программ со стороны:

- Постоянного комитета Союзного государства, а также государственного секретаря П. П. Бородина;
- ряда депутатов Парламентского собрания Союзного государства и Государственной Думы Российской Федерации, особенно: Б. В. Грызлова и А. А. Кокошина.

### 9.1. Общие сведения о Программе «СКИФ»

Полное официальное наименование Программы «СКИФ» — Разработка и освоение в серийном производстве семейства моделей высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой (суперкомпьютеров) и создание прикладных программно-аппаратных комплексов на их основе, — очень хорошо показывает специфику данного проекта:

- мы говорим не о «чисто академическом исследовании», а о доведении дела до серийного производства. Значит, помимо исследовательских, необходимо выполнение и конструкторских работ. Необходимы: разработка в соответствии со стандартами программной и конструкторской документации (ПД и КД), прохождение в установленном порядке нормоконтроля, подготовка производства, выпуск опытных образцов, проведение предварительных и приемочных (государственных) испытаний, выпуск литерной документации (с литерами «О» и «О<sub>1</sub>») и т.п. Серийное производство означает учет требований потенциального рынка. Значит, кроме обеспечения высоких технических показателей нам предстояло учитывать реальную покупательную способность отечественных предприятий и учреждений, бороться за приемлемые значения цены и отношения «производительность к цене»;
- целью программы являлся не одиночный уникальный образец, а семейство моделей (Ряд 1 и Ряд 2) высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров), совместимых по программному обеспечению (ПО), имеющих широкий выбор возможных конфигураций, широкий спектр производительности: от единиц и десятков миллиардов операций в секунду (1–10–100 Gflops), до триллионов операций в секунду (до 15 Tflops);
- недостаточно было разработать только семейство машин и базовое ПО для них. Для того чтобы обеспечить широкое внедрение суперкомпьютеров семейства «СКИФ», предстояло разработать прикладные системы и даже законченные прикладные комплексы.

Программа «СКИФ» выполнялась пять лет, с 2000 по 2004 годы. В программе были определены государственными заказчиками-координаторами:

- от Республики Беларусь — Национальная академия наук Республики Беларусь;
- от Российской Федерации — Федеральное агентство по науке и инновациям.

Институт программных систем Российской академии наук (ИПС РАН) являлся головным исполнителем программы «СКИФ» от Российской Федерации, головным исполнителем от Республики Беларусь являлся Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Республики Беларусь (ОИПИ НАН Беларуси). Всего в Программе участвовали около двух десятков учреждений и предприятий, примерно поровну — по десятку предприятий от каждой страны.

За пять лет исполнения программы «СКИФ» было выпущено шестнадцать опытных образцов [5, 6] суперкомпьютеров семейства «СКИФ», шесть из них было размещено в Беларуси, десять — в России. Каждый год создавались установки в широком спектре производительности. И среди них всегда была установка с наибольшей (на текущий год) для семейства «СКИФ» Linpack-производительностью — так называемое «подсемейство Тор-СКИФ» (таблица 4). Видно, что Linpack-производительность моделей Тор-СКИФ росла из года в год почти по экспоненциальному закону и за пять лет выросла в 185 раз (с 11 Gflops до 2032 Gflops).

## 9.2. Общие сведения о Программе «СКИФ-ГРИД»

Реализация Программы Союзного государства России и Беларуси «СКИФ-ГРИД» началась в 2007-м году, после подписания соответствующего постановления Председателем Правительства Союзного государства. В Программе «СКИФ-ГРИД» выделены четыре основных направления:

- **Грид-технологии:** исследование, развитие, внедрение высокопроизводительных вычислений на основе грид-технологий; развитие, исследование и внедрение средств поддержки гетерогенных, территориально-распределенных вычислительных комплексов.

| Год  | Наименование,<br>Расположение         | Количество и вид<br>процессоров     | Производительность,<br>Gflops пиковая/Lin-<br>pack |
|------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 2000 | Первенец 2 экз.:<br>Россия и Беларусь | 32×Intel Pentium III<br>(600 MHz)   | 20/11  |
| 2001 | <b>ВМ-5100</b> Беларусь               | 32×Intel Pentium<br>III(1400 MHz)   | 45/31  |
| 2002 | <b>Первенец-М</b> Россия              | 32×AMD AthlonMP<br>1800+(1533 MHz)  | 90/57  |
| 2003 | <b>СКИФ К-500</b><br>Беларусь         | 128×Intel Pentium<br>Xeon (2.8 GHz) | 717/474  |
| 2004 | <b>СКИФ К-1000</b><br>Беларусь        | 576×AMD Opteron<br>248 (2.2 GHz)    | 2534/2032  |

ТАБЛИЦА 4. Основные показатели вычислительных установок с наибольшей для семейства «СКИФ» Lin-pack-производительностью на текущий год

- **Суперкомпьютеры семейства «СКИФ» (Ряд 3 и 4):** создание суперкомпьютеров «СКИФ» нового поколения на базе новых перспективных процессоров и вычислительных узлов, новых технических средств системной сети, управления системой, спецвычислителей и гибридных узлов, разработка соответствующего программного обеспечения.
- **Защита информации:** реализация средств защиты информации (аппаратных и программных) в создаваемых вычислительных комплексах.
- **Пилотные системы:** реализация различных прикладных систем в перспективных областях применения создаваемых вычислительных установок, решение актуальных задач на суперкомпьютерах и грид-системах.

### 9.3. Команда исполнителей Программы «СКИФ-ГРИД»

Главным исполнителем от Российской Федерации по программам «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» является Институт программных систем РАН. Структура исполнения программы «СКИФ-ГРИД» (Российская Федерация, мероприятия 2007–2008 гг.) представлена ниже



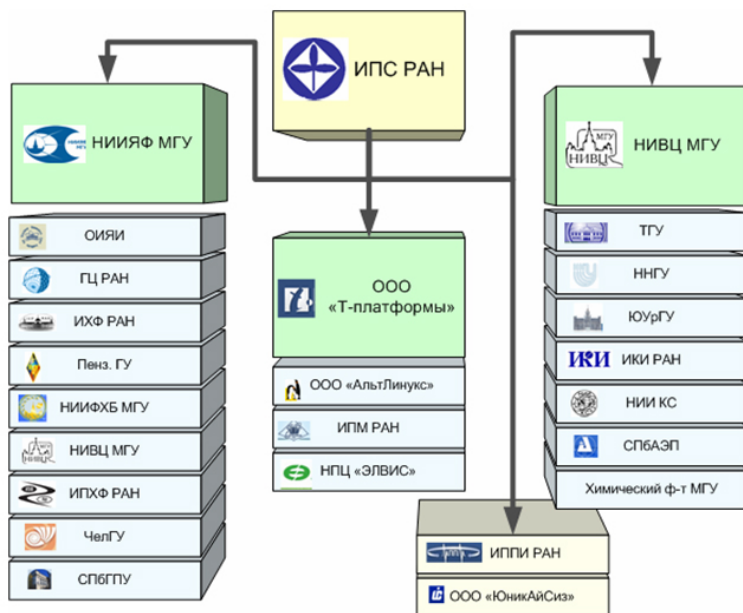


Рис. 5. Соисполнители программы «СКИФ-ГРИД», Российская Федерация, мероприятия 2007–2008 гг.

(см. рис. 5). Исполнители сгруппированы по направлениям: грид-технологии (головной – НИИЯФ МГУ), далее – суперкомпьютеры семейства «СКИФ» (компания «Т-Платформы»), инициативные работы (ИППИ РАН и ООО «ЮникАйСиз»), пилотные проекты (НИВЦ МГУ).

#### 9.4. Результаты и заделы, полученные по суперкомпьютерным программам «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД»

Основные материальные результаты, полученные по программам «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» – конструкторская документация аппаратных средств суперкомпьютеров семейства «СКИФ» и программная документация программного обеспечения для них.

Разработка в рамках программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» выполняется с соблюдением всех требований и стандартов промышленной разработки (нормоконтроль, выпуск литерной документации, система испытаний).

Разработанные решения позволяют выпускать вычислительные установки широкого диапазона производительности.

Аппаратные разработки основаны на использовании импортной элементной базы: процессоры, модули памяти, диски, компоненты системной и вспомогательной сети суперкомпьютеров. Но на уровне схемотехники (часто на уровне проектирования системной платы), конструктивов, термодизайна, общей архитектуры — все решения оригинальные, отечественные.

Еще одной оригинальной отечественной аппаратной разработкой является сервисная сеть ServNet для суперкомпьютеров семейства «СКИФ», аппаратные и программные средства которой созданы в ИПС РАН.

Разработанный комплект ПО для суперкомпьютеров семейства «СКИФ» включает все необходимые компоненты:

- операционная система (ALT Linux СКИФ);
- средства мониторинга параметров аппаратных и программных средств, система предсказания вероятных отказов;
- средства администрирования и система очередей;
- стандартные (MPI и OpenMP) и оригинальные отечественные (OpenTS, DVM, X-COM, SKIF@HOME) средства написания параллельных программ для суперкомпьютеров и распределенных систем;
- десятки прикладных и инструментальных систем (для разработки различных приложений).

В рамках программы «СКИФ-ГРИД» данный набор ПО расширяется. В том числе, создается ПО промежуточного слоя, для интеграции суперкомпьютеров семейства «СКИФ» в грид-системы. Эти средства поддерживают различные аспекты интеграции и создания распределенных систем:

- объединение вычислительных мощностей;
- унификация доступа к вычислительным ресурсам, к данным, к сервисам системы для пользователей (рабочих групп, пользовательских программ); поддержка гибкого доступа, безопасности и разграничения доступа и прав;

- организация распределенных хранилищ данных и баз данных, интеграция всех источников данных в системе.

### **9.5. Преимущества суперкомпьютеров семейства «СКИФ» и программного обеспечения для них**

Решения семейства «СКИФ» позволяют строить суперкомпьютерные системы высшего уровня производительности — без ограничений, в том числе и такие, на которых можно разрабатывать технологии для достижения превосходства России над другими странами.

Разработчики решений (отечественная команда) способны обеспечить глубокий и качественный уровень поддержки. Здесь имеется в виду и близкое расположение разработчиков к потребителю, и отсутствие для специалистов «темных мест» и «секретов фирмы» в обслуживаемой аппаратуре или программном обеспечении.

Суперкомпьютеры семейства «СКИФ» обладают лучшим показателем «стоимость/производительность», по сравнению с западными брендами. Иногда разница приближается к двум разам.

Суперкомпьютеры «СКИФ» показывают отличное качество использования аппаратных средств, лучшие показатели по КПД (отношение производительности на задаче к пиковой производительности), лучшие абсолютные показатели и масштабируемость на задачах. Вот несколько примеров:

- Ноябрь 2003 года: СКИФ К-500 показывает на 25% лучшее КПД, по сравнению с суперкомпьютером Dell PowerEdge 2650: оба суперкомпьютера показывают практически равную Linpack-производительность, используют одни и те же процессоры, только в СКИФ К-500 установлено 128 процессоров, а в Dell их потребовалось гораздо больше — 160.
- Ноябрь 2004: СКИФ К-1000 занял первое место в мире в рейтинге Top-Crunch. Рейтинг поддержан DARPA, суперЭВМ ранжируются по реальной производительности не на абстрактных тестах, а на реальных задачах. В рассмотренном случае это была задача расчета в системе Linpack результатов столкновения одновременно трех автомобилей.
- Февраль 2007: СКИФ Cyberia по результатам независимых измерений:
  - показывает КПД ( $=\text{Linpack}/\text{Peak}$ ) на +8..13% лучше, чем у IBM Bladecenter Hs21 Cluster.



Рис. 6. Первое российское blade-решение — модуль для суперкомпьютера «СКИФ МГУ» (разработка и производство компании «Т-Платформы»)

— демонстрирует лучшую масштабируемость<sup>9</sup> гидродинамических расчетов на пакете STAR-CD, чем современные системы Cray XD1, HP XC, IBM p5-575 (Power5), SUN X2100.

В области аппаратных разработок удается достичь и других рекордных для отрасли свойств и характеристик. Так, в 2007 году для проектов «СКИФ МГУ» (60 Tflops) и «СКИФ Урал» (15 Tflops) компания «Т-Платформы» разработала и организовала производство первого российского blade-решения (см. рис. 6). При этом удалось достичь самой большой плотности форм-фактора в индустрии: 10 двух-процессорных «лезвий» в корпусе высотой всего 5U (20 CPU, 80 ядер, около 0.7 Tflops). Кроме того, данное решение является единственным blade со стандартными адаптерами PCI-Express, что обеспечивает поддержку любых адаптеров (уникальная гибкость по аппаратным средствам).

В этой разработке поддержано резервирование (N+1) и горячая замена вентиляторов и блоков питания шасси, что обеспечивает высокую надежность изделия и является достоинством, отсутствующим

---

<sup>9</sup>В 1.5–2 раза лучше.

во всех иных аналогичных изделиях. Blade-решение компании «Т-Платформы» было номинировано компанией Intel как одна из лучших разработок года в области высокопроизводительных вычислений. Версия сервисной сети для данного blade-решения (ServNet T-60) разработана в ИПС РАН и изготавливается на производственной базе ИПС РАН.

В области программного обеспечения для суперкомпьютеров семейства «СКИФ» также немало достижений, получивших признание в мире.

Упомянем разработанную в ИПС РАН систему параллельного программирования OpenTS, реализующую концепцию автоматического динамического распараллеливания программ. OpenTS берет на себя большую часть сложной работы по организации параллельного счета. За счет этого серьезно упрощается процесс написания параллельных программ, сокращаются сроки разработки и объем программного кода — от 7 до 15 раз на ряде задач. В результате у параллельных программ получается лучше читаемость, код яснее и меньше места для ошибок. Данная разработка заинтересовала корпорацию Microsoft, которая третий год поддерживает работы по переносу OpenTS из ОС Linux-СКИФ в ОС Microsoft Windows Compute Cluster Server — ОС, созданную корпорацией Microsoft для вычислительных кластеров.

Кроме OpenTS в программах «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» ведется развитие других перспективных отечественных средств для разработки параллельных программ, например, таких как DVM (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), X-COM (НИВЦ МГУ имени М. В. Ломоносова), SKIF@HOME (ИПС РАН).

За полученные в рамках программы «СКИФ» (2000–2004 гг.) высокие результаты группа разработчиков была награждена премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2006 год.

## **10. Заключение. Возможные пути решения проблем развития национальной киберинфраструктуры России**

Отставание России в высокопроизводительных вычислениях велико, но не безнадежно. Российские научно-исследовательские организации способны создавать суперкомпьютерные установки мирового уровня, оперативно осваивать вновь появляющиеся в мировой

практике и на мировом рынке технологии создания высокопроизводительных систем.

В то же время, знание тех или иных технологий (или способность воспринять их) не означает использование их на практике. Этого мало, и создание национальной киберинфраструктуры требует в первую очередь наличия политической воли, реализованной в политических решениях.

Общая проблема разбивается на две части:

- создание отечественной суперкомпьютерной отрасли и создание системы суперкомпьютерных центров в России<sup>10</sup> — «пирамида» из 1–3 центров сверхвысокой производительности (150–300 Тфлорс в 2008 году с расширением до 1 Рфлорс к 2010 году), 10–20 мощных суперкомпьютерных центров (30–100 Тфлорс в 2008 году); 40–60 крупных суперкомпьютерных центров в регионах (10–20 Тфлорс в 2008 году);
- создание мощной магистральной сети передачи данных (с емкостью каналов 1–10 Гбит/с и выше), объединяющей указанные суперкомпьютерные центры.

Как обсуждалось выше, **в части решения проблемы формирования суперкомпьютерной отрасли и обеспечения оснащенности суперкомпьютерными ресурсами России** можно рассчитывать в основном на развитие собственной суперкомпьютерной отрасли, поскольку представляется невероятным получение из других стран суперЭВМ таких характеристик, которые обеспечат конкурентное превосходство России над этими странами. Представляется обоснованным и эффективным использование для этого:

---

<sup>10</sup>Считаем, что указанные параметры достижимы. Имеются достаточно проработанные предложения, учитывающие технические возможности, освоенный уровень технологий, наличие готовой команды исполнителей и, даже, возможность использования «давних инвестиций». Например, один из сверхмощных суперкомпьютерных центров можно создавать в здании ИПС РАН, которое в 1980-тых годах проектировалось и строилось как суперкомпьютерный центр: имеется до сих пор неиспользованный машинный зал (700 кв.м.), инфраструктура электропитания (8 МВт) и т. п. Здесь можно создать суперкомпьютерный центр коллективного пользования (СЦКП) мощностью 150 Тфлорс в 2008 году с расширением до 1 Рфлорс в 2010 году. Размещения суперкомпьютерных и data-центров вне мегаполисов соответствует мировой практике: такие предприятия не требуют большого количества персонала и их неразумно размещать на территориях с высокой стоимостью земли, электроснабжения, квалифицированной рабочей силы и т. п.

- отечественных решений и существенных заделов, полученных в последние годы российскими разработчиками суперкомпьютерных технологий в ходе реализации суперкомпьютерных программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» и сложившуюся команду исполнителей этих программ — более 20 российских организаций, головной исполнитель от России — ИПС РАН;
- результатов, заделов и опыта других организаций, ведущих работы в суперкомпьютерной области, например: НИИСИ РАН, РИЦ «Курчатовский институт», НИИ «Квант», МСЦ РАН, ОАО «НИЦЭВТ» и др.

В части решения проблемы **обеспечения каналов передачи данных национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети в России** следует учесть мировой опыт, который показывает, что такие сети организуются вне пространства обычных коммерческих интересов операторов связи и за рамками их обычной ценовой политики. Здесь в мире применяются следующие решения:

- создание сети передачи данных, которая находится в собственности государства — научно-образовательного сообщества — данный путь требует огромных временных и финансовых затрат (на этапах создания и эксплуатации);
- понуждение (на уровне политических решений) операторов связи к предоставлению услуг вне рамок обычных коммерческих условий: как правило, речь идет о предоставлении операторами связи государству (научно-образовательному сообществу) в льготную аренду так называемых «темных волокон» для создания магистралей национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети. При этом необходимо:
  - базироваться на сложившихся командах исполнителей проектов создания национальных сетей для науки и образования (RUNNet, RNet и др.): ФГУ ГНИИ «Информика», РосНИИ РОС, МСЦ РАН, РИЦ «Курчатовский институт»;
  - разработать комплекс политических решений и мероприятий, направленных на предоставление ведущими

российскими операторами связи<sup>11</sup> на условиях льготной аренды «темных волокон» для создания магистрали национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети или же создания на основе «темных волокон»<sup>12</sup> национальной государственной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети.

Кроме сказанного, потребуется разработать комплекс мер для обеспечения координации работ:

- по созданию суперкомпьютерной отрасли России;
- по оснащению отечественной суперкомпьютерной техникой ведущих научно-исследовательских центров;
- по развитию магистральных каналов связи национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети в России;
- по работам в смежных государственных научно-технических программах.

Например:

- планы развертывания суперкомпьютерных центров должны быть согласованы с планами развертывания магистральных линий связи, и с планами создания научных центров по различным государственным научно-техническим программам (нанотехнологии, перспективная энергетика, био-технологии, нацтехбаза и т. п.);
- планы по разработке элементной базы должны учитывать потребности создаваемой отечественной суперкомпьютерной отрасли и систем высокоскоростной передачи данных.

Такой комплекс усилий в полной мере бы соответствовал поручению Президента Российской Федерации по итогам заседания Совета

---

<sup>11</sup>Транстелеком, Ростелеком и других.

<sup>12</sup>Оптические волокна, которые остаются в резерве, то есть не используются, называются «темными» волокнами. Они, как правило, имеются в каждом оптическом кабеле крупного оператора связи.



при Президенте Российской Федерации по науке, технологиям и образованию 30.11.07 Пр-146 в части: «... *принять меры по обеспечению деятельности национальной научно-исследовательской информационно-вычислительной сети, представляющей научным и образовательным центрам доступ к распределенным вычислительным средам высокой производительности...*».

## Благодарности

Данная работа была частично поддержана и выполнялась в рамках следующих проектов:

- Проект 07–07–12038 офи Российского Фонда Фундаментальных Исследований «Метапрограммирование на основе шаблонных классов C++ как средство создания высокопроизводительных распределённых приложений».
- Программа Союзного государства «Разработка и использование программно-аппаратных средств Грид-технологий перспективных высокопроизводительных (суперкомпьютерных) вычислительных систем семейства «СКИФ», шифр «СКИФ-ГРИД».
- Программа фундаментальных научных исследований ОНИТ РАН «Оптимизация вычислительных архитектур под конкретные классы задач, информационная безопасность сетевых технологий», проекты:  
1.3 «Разработка и реализация языков T# и T++ и соответствующих им средств для эффективной поддержки высокопроизводительного параллельного счета»;  
2.3 «Сравнительное исследование параметров и характеристик перспективных аппаратно-программных архитектур кластерных мультипроцессорных систем»;
- Программа фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID». Проект 4.2 «Функционально-ориентированные суперструктуры как эффективное средство для построения высокопроизводительных распределенных приложений и сервисов». Проект 4.5 «Разработка технологий интеграции разнородных, географически распределенных данных в GRID-системах».
- Программа Президиума РАН «Поддержка инноваций и разработок», проект ИПС РАН «Технология и система параллельного программирования OpenTS»;
- Государственный контракт № 02.514.11.4034 с Федеральным агентством по науке и инновациям по теме: «Эффективные методы создания высокопроизводительных параллельных программ на языке C++ и его диалекте T++ для многоядерных ЭВМ, SMP, кластерных и распределенных систем»;

- Программа Союзного государства (шифр «ТРИАДА») «Развитие и внедрение в государствах-участниках Союзного государства наукоемких компьютерных технологий на базе мультипроцессорных вычислительных систем», проекты:
  - «Разработка средств параллельной обработки изображений дистанционного зондирования Земли с динамическим распределением нагрузки. Разработка прототипа распределенного архива изображений с единым каталогом информации», проекты;
  - «Создание прототипа системы эффективного сервера приложений для ВМВС»;
  - «Разработка принципов эффективного отказоустойчивого счета T++ приложений на априорно неустойчивых (мета-)кластерных конфигурациях и их программная реализация».

Особая благодарность — М. Г. Химшиашвили за ее самоотверженный труд по корректуре и верстке статьи в программе  $\LaTeX$ .

### Список литературы

- [1] Computational Science: Ensuring America's Competitiveness: President's Information Technology Advisory Committee, June, 2005 (доступно как: [http://www.nitrd.gov/pitac/reports/20050609\\_computational/computational.pdf](http://www.nitrd.gov/pitac/reports/20050609_computational/computational.pdf)).
- [2] *US Competitive Council Meets; HPC TOPS Agenda* // The Global Publication of Record for High Performance Computing: HPC Wire. — Т. 13, № 28, July 16, 2004 (доступно как: <http://www.taborcommunications.com/hpcwire/hpcwireWWW/04/0716/108016.html>).
- [3] Smogunov A., Dal Corso A., Delin A., Weht R., Tosatti E. «*Colossal magnetic anisotropy of monatomic free and deposited platinum nanowires*» // Nature Nanotechnology. — Т. 3, № 1, January, 2008 (доступно как: <http://www.nature.com/nnano/journal/v3/n1/pdf/nnano.2007.419.pdf>), с. 22–25.
- [4] Абрамов С. М. *Суперкомпьютерная отрасль России и Программы «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства* // Сопровождение «Развитие высокопроизводительных вычислений (суперЭВМ) в России» под руководством Б. В. Грызлова, Переславль-Залесский: Слайды к докладу на совещании., 09.11.2007 (доступно как: <http://skif.pereslavl.ru/psi-info/hpc911/>).
- [5] ИПС РАН. Сайт Суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства, Образцы СКИФ — Кластерные системы СКИФ (доступно как: <http://skif.pereslavl.ru/>).
- [6] Абламейко С. В., Абрамов С. М., Анищенко В. В., Парамонов Н. Н., Чиж О. П. *Суперкомпьютерные конфигурации «СКИФ»*. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. — ISBN 985-6744-19-9. — 170 с.

S. M. Abramov, W. F. Zadneprovsky, A. A. Moskovsky. *Russian supercomputers and grid-systems. Problems of the national cyberinfrastructure in Russia // Proceedings of Program Systems institute scientific-practical conference "Program systems: Theory and applications"*, devoted to the 15<sup>th</sup> anniversary of Pereslavl University named A. K. Ailamazyan. — Pereslavl-Zalesskij, 2008. — p. 9—35. — ISBN 978-5-901795-13-2 (*in Russian*).

ABSTRACT. The paper is devoted to the national cyberinfrastructure development in Russia. Trends in high-performance computing field are analysed and possible future development path for Russia is outlined.

*Перевод проверен:* А. А. Московский