

удк 519.68

С. М. Абрамов, Н. Н. Парамонов

## Дальнейшее развитие суперкомпьютерного направления «СКИФ»

Аннотация. В статье дается анализ результатов суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства, обозначивается необходимость создания условий, в которых команда исполнителей могла бы продолжить работу, направленную на удержание достигнутых позиций в части суперкомпьютерных технологий. Далее в работе анализируется суперкомпьютерное научно-техническое направление (НТН) «СКИФ» Союзного государства, базовые программы данного направления, перспективы и методика формирования новых программ в рамках НТН «СКИФ».

*Ключевые слова и фразы:* Суперкомпьютерная Программа «СКИФ» Союзного государства, суперкомпьютеры, кластеры, Grid-технологии.

### 1. Введение

В 2004 году завершается комплексное выполнение мероприятий программы Союзного государства «Разработка и освоение в серийном производстве семейства высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой (суперкомпьютеров) и создание прикладных программно-аппаратных комплексов на их основе» (шифр программы — «СКИФ»). Результаты реализации программы «СКИФ» [3] являются существенным научно-техническим и организационным заделом для дальнейшего развития суперкомпьютерного направления, в том числе, для формирования *новых программ Союзного государства по развитию суперкомпьютерного направления «СКИФ».*

**1.1. О программе «СКИФ».** Суперкомпьютерная программа Союзного государства «СКИФ» с учетом продления на один год рассчитана на 5 лет — 2000–2004 гг. Государственные заказчики программы — *Национальная академия наук Беларуси и Министерство промышленности, науки и технологий РФ*. Главные исполнители программы — *«Объединенный институт проблем информатики» (ОИПИ) НАН Беларуси и Институт программных систем РАН*.

В реализации программных мероприятий предусмотрено участие около 20 предприятий от РБ и РФ. Система программных мероприятий включает 21 задание, которые предусматривают работы по созданию базовых конструктивных модулей, элементной базы, системного программного обеспечения и законченных прикладных систем.

*Главной целью Программы* является возрождение компьютерной отрасли двух стран, промышленное производство ряда программно-совместных модулей суперкомпьютеров с широким спектром производительности — до триллионов операций в секунду. Особое внимание при реализации программы уделяется реальному освоению высоких суперкомпьютерных технологий в нашей стране — подготовке и переподготовке кадров для работы с суперкомпьютерными технологиями, созданию пилотных прикладных комплексов и организации промышленного выпуска суперкомпьютеров «СКИФ».

**1.2. Основные результаты и эффект от реализации Программы.** В рамках программы «СКИФ» накоплен существенный научно-технический задел, позволяющий создавать суперкомпьютерные конфигурации [1, 2] в широком диапазоне производительность, вплоть до терафлопового (триллионы операций в секунду). В 2003 году создан кластер «СКИФ К-500» с пиковой производительностью более 700 миллиардов операций в секунду (см. сайты, отражающие ход выполнения и реализации программы «СКИФ» — <http://www.skif.bas-net.by> и <http://skif.pereslavl.ru>).

Включение кластера «СКИФ К-500» в список пятисот наиболее мощных вычислительных установок в мире означает достижение уже в 2003 году важного прямого политического эффекта — Республика Беларусь и Россия наравне с США, Японией и еще несколькими странами стали обладателями критической суперкомпьютерной технологии, повысив престиж Союзного государства, как разработчика этой технологии.

Интегральный экономический и политический эффект от комплексной реализации Программы «СКИФ» обеспечивается тем, что ее результаты будут способствовать форсированному технологическому перевооружению ключевых отраслей промышленности стран-участниц Союзного государства, их реформированию с целью достижения мирового уровня качества продукции на базе новейших наукоемких информационных технологий и суперкомпьютерных конфигураций «СКИФ» [2, 3].

**1.3. Необходимость продолжения суперкомпьютерного направления «СКИФ».** Одним из важнейших (если не самым важным) результатом программы «СКИФ» является формирование команды исполнителей с налаженным взаимопониманием и тесными кооперационными связями, команды, которой по плечу решение технических задач в суперкомпьютерной отрасли любой сложности. Создание установки «СКИФ К-500» позволяет утверждать, что сегодняшний научный и технологический уровень созданной команды исполнителей заведомо соответствует мировому уровню и имевшееся отставание в этой части, фактически, ликвидировано.

Естественно, «вещественные» результаты программы «СКИФ» (КД, ПД, образцы семейства «СКИФ») будут подвержены моральному старению. И если не будет обеспечено дальнейшее использование главного результата (сформированной команды исполнителей), через год-другой отставание в суперкомпьютерных технологиях, с таким трудом ликвидированное сегодня, будет снова иметь место.

Поэтому, крайне необходимо, создать условия для сохранения основного результата программы «СКИФ», условия, в которых команда исполнителей могла бы продолжить работу, направленную на удержание достигнутых позиций в части суперкомпьютерных технологий. *Любое иное развитие событий сведет на нет усилия и средства, вложенные в программу «СКИФ».*

Это обстоятельство (наряду с созданным научно-техническим заделом) является важнейшим и неоспоримым обоснованием необходимости формирования новых программ Союзного государства по развитию суперкомпьютерного научно-технического направления (НТН) «СКИФ» (см. рис. 1).

Программы Союзного государства суперкомпьютерного научно-технического направления «СКИФ»

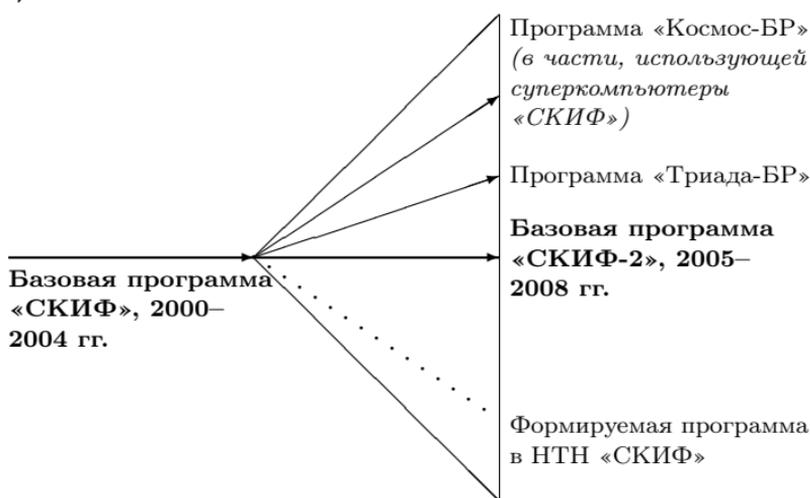


Рис. 1. Развитие научно-технического направления «СКИФ» Союзного государства

## 2. Методика формирования НТН «СКИФ»

Методика формирования НТН «СКИФ» должна базироваться на трех концептуальных уровнях (этапах) проектирования — технологическом, системном и прикладном (техническая реализация проекта). Отмеченные концептуальные уровни являются естественными компонентами процесса проектирования любой системы, тем более, сложнейшей научно-технической программы.

На технологическом (концептуальном) уровне анализируются существующие организационные и научно-технические предпосылки формирования новой программы (сложившиеся коллективы предприятий и связи между ними, научно-технический задел и перспективы его развития и т. д.), адекватность соответствия предпосылок стратегическим целям и задачам формируемой программы, выявляются узкие места и намечаются перспективы по их устранению.

Отправной точкой анализа организационных и научно-технических предпосылок формирования различных новых программ в рамках НТН «СКИФ» является совокупность следующих реперных моментов:

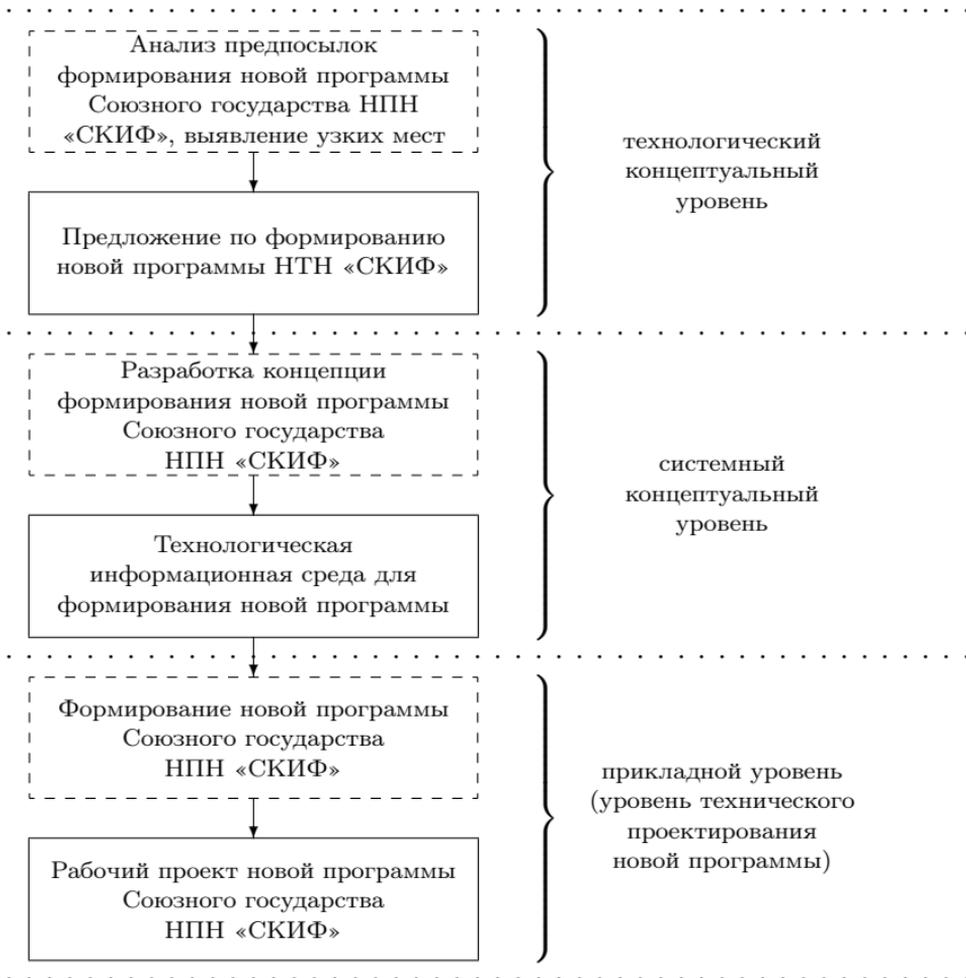


Рис. 2. Методика формирования программы Союзного государства НТН «СКИФ»

- программа Союзного государства «СКИФ» (2000–2004 гг.) — базовая программа для всех программ НТН «СКИФ»;
- ход реализации базовой программы «СКИФ»;
- пилотные демонстрационные и прикладные пакеты программ для суперкомпьютеров семейства «СКИФ», созданные в рамках базовой программы;
- перспективные области применения суперкомпьютеров семейства «СКИФ»;

- перспективы внедрения и развития суперкомпьютеров семейства «СКИФ»;
- перспективы формирования и реализации программ Союзного государства, связанных с использованием суперкомпьютерных технологий («Триада», «Космос»);
- главная цель НТН «СКИФ»;
- основные цели и задачи формируемой программы НТН «СКИФ»;
- перспективные области применения формируемой программы;
- стратегическая область применения формируемой программы;
- состав участников базовой программы «СКИФ»;
- предложения по участию в новой (формируемой) программе НТН «СКИФ»;
- коллектив предприятий-исполнителей в новой программе научно-технического направления «СКИФ»;
- предложения головных исполнителей по срокам формирования и реализации формируемой программы НТН «СКИФ».

На технологическом уровне становится актуальной проблема анализа и оптимизации взаимодействия потенциальных предприятий-исполнителей новой программы, а также анализа многообразия конкретных форм проявления деятельности этих предприятий. Следует учитывать также, что специфику факторов, влияющих на успешное формирование новой программы, невозможно оценить на основании анализа только ее элементов (предприятия-исполнители, программные мероприятия, их содержание и сроки реализации, объемы затрат и т. п.) и связей между ними. Возникает противоречие частного и общего. С одной стороны, сложную систему (программу) необходимо декомпозировать (разделить на функциональные компоненты, например, проекты), с другой стороны, найти критерии выделения параметров системы, характеризующие ее (программу) как единое целое.

Такие проблемы преодолеваются на системном уровне формирования программы. На базе представления формируемой программы на технологическом уровне на системном уровне (этап подготовки предложений по формированию новой программы) фактически определяется концепция формирования новой программы, позволяющая перейти к техническому проектированию (то есть, к формированию)

новой программы с учетом предъявляемых требований и конкретных ограничений (например, требований «Порядка разработки и реализации программ Союзного государства» и др.).

В общем виде на технологическом концептуальном уровне информационную среду для формирования новой программы можно представить в виде некоторой технологической структуры (модели), состоящей из множества информационных узлов и связей между ними. Каждый из таких информационных узлов отображает на модели определенный информационный аспект (или совокупность аспектов) в соответствии с той или иной спецификой отображаемого конкретным узлом реперного момента, используемого для анализа предпосылок формирования новой программы.

Укрупненная методика формирования новой программы Союзного государства НТН «СКИФ» приведена на рис. 2.

Для форсирования начала работ по формированию новой программы НТН «СКИФ» ключевое значение приобретают работы на технологическом и системном концептуальных уровнях, на которых, по сути, используется метод декомпозиции стратегических целей. Этапность реализации этого метода может быть представлена следующим образом:

*1 этап.* Анализ и формулировка тенденций и перспективных направлений развития суперкомпьютерной отрасли.

*2 этап.* Формулировка стратегических целей формируемой программы НТН «СКИФ» в рамках перспективных направлений развития суперкомпьютерной отрасли (каждому направлению может соответствовать несколько стратегических целей).

*3 этап.* Формулировка задач перспективных разделов формируемой программы НТН «СКИФ» в соответствии с ее стратегическими целями.

*4 этап.* Составление предварительного укрупненного перечня проектов по разделам формируемой программы, формулировка целей для каждого проекта (группы проектов).

*5 этап.* Отработка концепции формирования программы и предварительного перечня проектов по разделам программы, уточнение целей для каждого проекта.

Последний этап позволяет перейти на уровень конкретных проектов (программных мероприятий), определить показатели для оценки их эффективности и, следуя в обратном направлении по указанным

шагам, прийти к формированию (композиции) новой программы Союзного государства на основе конкурентоспособных и экономически эффективных проектов.

### 3. Главная цель НТН «СКИФ»

С учетом созданного в рамках программы «СКИФ» научно-технического задела главной целью формирования новых программ Союзного государства по развитию суперкомпьютерного НТН «СКИФ» может быть освоение и адаптация передовых зарубежных и отечественных наукоемких технологий на отечественных суперкомпьютерных конфигурациях семейства «СКИФ», внедрение этих технологий в основных отраслях гражданской и военной промышленности и социально-экономической сфере Союзного государства, оптимизация отечественных суперкомпьютерных конфигураций семейства «СКИФ» с учетом требований современных наукоемких технологий и специфики их приложений. Например, суперкомпьютеры семейства «СКИФ» являются базой для реализации формируемой Министерством промышленности, науки и технологий Российской Федерации и Национальной академии наук Беларуси научно-технической программы Союзного государства «Развитие и внедрение в государствах-участниках Союзного государства наукоемких компьютерных технологий на базе мультипроцессорных вычислительных систем» (*шифр «Триада-БР»*).

На базе результатов программы «СКИФ» могут быть сформированы и другие (наряду с программой «Триада») направления — защита информации, специальные условия эксплуатации и т.п. Однако, все эти направления перспективны лишь при развитии стратегического (базового) направления — оптимизации *отечественных суперкомпьютерных конфигураций семейства «СКИФ»* с учетом специфики требований современных наукоемких технологий и других суперкомпьютерных приложений. Развитие этого стратегического направления предполагается в рамках новой программы Союзного государства (*базовой для развития суперкомпьютерного направления «СКИФ»*) с условным шифром «СКИФ-2».

**3.1. Grid как стратегическое направление в формируемой Программе «СКИФ-2».** Магистральным путем развития современных суперкомпьютерных технологий является построение распределенных вычислительных систем с массовым параллелизмом. Как в научной среде, так и для нужд промышленности существует необходимость создания высокопроизводительной высоконадёжной среды для создания мобильных и масштабируемых приложений. Поэтому *в качестве стратегической линии формирования программы «СКИФ-2»* планируется развитие суперкомпьютерного направления «СКИФ» на базе *Grid-технологий*.

В настоящее время практически в каждой развитой стране возвращены национальные Grid-проекты, имеющие целью создание инфраструктуры, обеспечивающей удаленный доступ к разнообразным вычислительным ресурсам независимо от места расположения потребителя. Ключевым моментом для понимания Grid является термин *«ресурсы»*, то есть все, что участвует в компьютерной обработке данных — коммуникации, хранилища данных, информационные системы, программные фонды и т. д. География проектов показывает, насколько высоко оценивается стратегический потенциал технологии Grid. В близкой перспективе средства Grid претендуют на роль вычислительного инструментария в различных сферах человеческой деятельности, аналогично тому, как подобным инструментарием стали персональные компьютеры и Internet.

Средства разработки приложений являются необходимым компонентом всей Grid-среды. Без удобных и развитых средств разработки приложений, инвестиции в инфраструктуру Grid — вычислительные системы и каналы связи между ними — в значительной степени обесцениваются: создание приложений для Grid, а, следовательно, и полезное использование Grid, будет происходить медленно.

В настоящее время развивается несколько проектов по созданию эффективных инструментальных средств создания Grid-приложений. К ним следует отнести продукты, реализованные в рамках метакомпьютерных проектов США, таких как Legion (университет штата Вирджиния), Condor (университет штата Висконсин) и Globus (Аргонская национальная лаборатория). Безусловным лидером и наиболее широко используемым из них является Globus Toolkit.

На сегодняшний день практически отсутствуют отечественные высокоуровневые средства для разработки распределенных приложений на основе технологий Grid. Как аппаратные, так и программные

средства, обеспечивающие создание высокопроизводительных систем традиционно являются предметом экспортных ограничений в странах-производителях таких средств. В связи с этим, использование импортных программных средств разработки Grid-приложений (Globus, Legion, Condor) может оказаться либо существенно затруднено, либо невозможно.

В рамках работ по программе «СКИФ» была разработана отечественная среда программирования — система, — реализующая концепцию автоматического динамического распараллеливания программ. Уникальность Т-системы состоит в том, что она позволяет с небольшими усилиями перенести приложения на неоднородную распределённую вычислительную среду в том случае, если приложение написано в функциональном стиле на языках C/C++ или FORTRAN. Т-система была протестирована на работоспособность на гетерогенных кластерах. К настоящему моменту сформирована общая концепция для построения открытой модульной версии Т-системы (OpenTS), построенной по суперструктурному принципу (т. е. в виде высокопроизводительной надстройки над стандартными средствами).

Полученные результаты являются предпосылками для создания высокоэффективного средства разработки Grid-приложений на основе системы автоматического динамического распараллеливания для гетерогенных вычислительных сред, включающего в себя библиотеку обобщённых параллельных алгоритмов. Для реализации этих предпосылок необходимо, естественно, адаптировать среду исполнения Т-системы для эффективной работы с Grid-приложениями.

Учитывая сказанное выше, можно предложить следующее предварительное название программы «СКИФ-2»: «Разработка и использование программно-аппаратных средств GRID-технологий и перспективных высокопроизводительных (суперкомпьютерных) вычислительных систем семейства «СКИФ»».

**3.2. «СКИФ-2»: возможные направления работ.** Проведенный предварительный анализ позволяет выделить следующие возможные направления работ в рамках программы «СКИФ-2»:

- Grid-конфигурации на базе суперкомпьютеров «СКИФ»;
- Т-Grid: развитие направления «Т-система»;
- объединенная система управления и мониторинга кластерными структурами (развитие работ по сервисной сети и системе FLAME);

- разделение, управление и распределение ресурсов системы;
- самоконфигурирование, самодиагностика и т. п. (прототип: направление Lisa у IBM);
- отказоустойчивость, живучесть и надежность (конструктивно-технологические и программные методы, горячий резерв и т. д.);
- эффективные механизмы обмена данными (новый транспортный уровень, например, альтернатива MPI);
- гетерогенные кластерные и метакластерные системы;
- гибридные узлы и архитектуры (оригинальные СБИС, ускорители, нейроструктуры, FPGA);
- перспективные методы комплексирования (например, Infini-band, Hyper-Transport и т. п.), тесная интеграция внутренней шины и интерконнекта;
- перспективные конструктивные решения («лезвие бритвы» и др.);
- мобильные (возимые) системы и системы для особых условий эксплуатации;
- защита данных (с учетом ПЭМИ).

#### 4. Заключение

Серьезные практические результаты, достигнутые по суперкомпьютерной программе «СКИФ» в 2000–2003 годах, подтверждают высокую квалификацию российских и белорусских специалистов и (с учетом фактических объемов финансирования работ) высокую эффективность использования средств по программе. Формирование программы «СКИФ-2» на 2005–2008 годы является важнейшим условием эффективного использования результатов программы «СКИФ» и дальнейшего развития (силами созданной белорусско-российской команды исполнителей) суперкомпьютерных технологий в интересах стран-участниц Союзного государства. Формирование и последующая реализация программы «СКИФ-2» позволит укрепить коллектив исполнителей и сохранить достигнутые позиции в мировой «табели о рангах» в суперкомпьютерной области.

**Благодарности.** Авторы благодарны всем участникам обсуждений материалов раздела 3.2, особенно: Абламейко С. В., Анищенко В. В., Адамовичу А. И., Галушкину А. И., Конову И. В., Кузьминскому М. Б., Московскому А. А., Пушкарскому С. В., Потемкину В. А., Слепухину А. Ф., Татуру В. Ю., Чижу О. П.. Особые благодарности Химшиашвили М. Г. за подготовку окончательной версии статьи в системе  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ .

### Список литературы

- [1] Абрамов С. М., Анищенко В. В., Парамонов Н. Н., Чиж О. П. Разработка и опыт эксплуатации суперкомпьютеров семейства «СКИФ»: Материалы I международной конференции «Информационные системы и технологии» (IST'2002). — Минск, 2002, с. 115–117, 5–8 ноября 2002. (Russian) ↑1.2
- [2] Абрамов С. М., Адамович А. И., Коваленко М. Р., Слепухин А. Ф., Парамонов Н. Н. Кластерные системы семейства суперкомпьютеров «СКИФ»: Научный сервис в сети Интернет: Труды Всероссийской научной конференции. — М.: Изд-во МГУ, 2003, с. 147–151, Новороссийск, 22–27 сентября 2003 г. (Russian) ↑1.2
- [3] Абламейко С. В., Абрамов С. М. Основные результаты суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства: АКИИ'03: Третий расширенный семинар «Использование методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислениях и в аэрокосмических исследованиях», Труды семинара ИПС РАН, Переславль-Залесский, ноябрь 2003 г. — М.: Физматлит, 2003, с. 135–140. (Russian) ↑1, 1.2

ИНСТИТУТ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

S. M. Abramov, N. N. Paramonov. *Further Development of the Supercomputer Direction "SKIF"*. (in russian.)

ABSTRACT. The article gives analysis of the joint Russian-Belarussian supercomputer program "SKIF" and motivates the need to create conditions for development team to prolong work for retainment of achieving positions in supercomputer technologies. Later on the paper contains description of supercomputer scientific-technical direction (STD) "SKIF" of the Joint State and basic programs of direction, perspectives and methods for creation of new programs in STD "SKIF".