



С.М. Абрамов,
член-корреспондент
Российской Академии наук,
директор Института программных систем РАН

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ОБЛАСТИ (На примере грид- и суперкомпьютерных технологий)

О роли суперкомпьютерных технологий

Сегодня в государствах, строящих экономику, основанную на знаниях, критические (прорывные) технологии разрабатываются на базе широкого использования высокопроизводительных вычислений на суперЭВМ. И это единственно правильный путь. Без серьезной суперкомпьютерной инфраструктуры:

- невозможно создать современные изделия высокой и даже средней сложности (аэрокосмическая техника, суда, энергетические блоки электростанций различных типов, автомобили, конкурентоспособная бытовая техника и т. п.);
- невозможно быстрее конкурентов разрабатывать новые лекарства и материалы с заданными свойствами;
- невозможно развивать перспективные технологии (биотехнологии, нанотехнологии, решения для энергетики будущего и т. п.).

Сегодня суперкомпьютерные технологии по праву считаются важнейшим фактором обеспечения конкурентоспособности экономики страны, а единственным способом победить конкурентов объявляют возможность обогнать их в расчетах. Здесь характерны слова президента Совета по конкурентоспособности США: «Технологии, таланты и деньги доступны многим странам. Поэтому США стоит перед лицом беспрецедентных зарубежных экономических конкурентов. Страна, желающая победить в конкуренции, должна победить в вычислениях»¹.

В данном высказывании: 1) речь идет об экономике в целом – сказанное верно для добывающих и перерабатывающих секторов экономики, и особенно это верно при разработке новых технологий; 2) для победы в конкуренции требуется победа в вычислениях – мало быть способным проводить вычисления, надо иметь самые мощные суперЭВМ, самые мощные прикладные пакеты и уметь использовать эти ресурсы в интересах экономики.

¹ «*With technology, talent and capital now available globally, the U.S. is facing unprecedented economic competition from abroad. The country that wants to out compete must out-compute*», – Deborah Wince-Smith, President of the Council on Competitiveness.



Тем самым краткое определение сегодняшней роли суперкомпьютерных технологий сводится к следующему: это ключевая критическая технология, единственный инструмент, дающий возможность победить в конкурентной борьбе.

Для молодых, бурно развивающихся государств евразийского региона, учитывая все указанные обстоятельства, особенно важно развивать суперкомпьютерные и грид-технологии, но в силу жесткой борьбы и ограничительных мер со стороны государств, давно развивающих эти отрасли, а также для сокращения сроков разработки и получения максимальных результатов в сжатые сроки большое значение имеет кооперация. Примером такой успешной кооперации являются суперкомпьютерные программы «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» Союзного государства. В настоящее время эти программы затрагивают только два государства – Россию и Беларусь. Однако, как мы увидим далее, результаты, полученные в ходе выполнения этих программ, нашли успешное применение и в других государствах региона (например, в Казахстане и Украине).

Краткие сведения о программах Союзного государства «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД»

Суперкомпьютерные программы «СКИФ» (2000–2004 гг.) и «СКИФ-ГРИД» (2007–2010 гг.) являются научно-техническими программами Союзного государства. Заказчики-координаторы и головные исполнители:

– от России: государственный заказчик-координатор – Роснаука, головной исполнитель – ИПС имени А.К. Айламазяна РАН;

– от Беларуси: государственный заказчик-координатор – НАН Беларуси, головной исполнитель – ОИПИ НАН Беларуси.

В кооперацию исполнителей программ «СКИФ» входили около двух десятков учреждений и предприятий, примерно поровну от Беларуси и от России. Программа «СКИФ-ГРИД» примерно в два-три раза крупнее программы «СКИФ»: по количеству

привлеченных предприятий, по объемам запланированных работ и объемам ресурсов, привлекаемым для выполнения данных работ. В программе «СКИФ-ГРИД» сегодня участвуют уже более 35 организаций России и Беларуси, в том числе, российских исполнителей программы – более 20, среди них: ГЦ РАН, ИКИ РАН, ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, ИППИ РАН, ИПХФ РАН, ИХФ РАН, НИВЦ МГУ, НИИ КС, НИИФХБ МГУ, НИИЯФ МГУ, ННГУ, НПЦ «Элвис», ОИЯИ, ООО «ЮникАйСиз», ПензГУ, СПБАЭП, СПбГПУ, ТГУ, химический факультет МГУ, ЧелГУ, ЮУрГУ.

Такие масштабные проекты не могут быть организованы и выполнены без преодоления существенных сложностей. Можно было ожидать, что серьезные трудности будут в деле установления кооперационных связей между исполнителями, особенно принадлежащим разным странам. Однако в программах «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» этот этап был пройден достаточно гладко. Позитивно сказалось то обстоятельство, что в СССР отрасли, занимающиеся вычислительной техникой и ее элементной базой – Министерство радиопромышленности и Министерство электронной промышленности, были представлены организациями в самых различных республиках², причем эти организации имели богатый опыт самой тесной кооперации во времена СССР. Такие же кооперационные связи были в СССР и между академическими организациями. Практически в большинстве случаев в программах «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» не создавались новые кооперационные связи, а восстанавливались ранее разрушенные.

Таким образом, ни вопросы организации сотрудничества, ни технические проблемы не были критическими в программах

² Про Россию и Беларусь можно сказать, что потенциал (научный и производственный) Министерств радиопромышленности и электронной промышленности СССР в них был представлен в практически равных долях. Здесь не было ничего похожего на модель «большого брата и маленькой сестры».



«СКИФ» и «СКИФ-ГРИД». И есть предпосылки предполагать, что то же самое будет в случае формирования международных программ с более широким участием различных стран СНГ.

Если говорить про трудности, то наибольшей из них являлся процесс утверждения программ в согласующих и профильных органах исполнительной власти стран – участниц. Это связано с тем, что роль суперкомпьютерных технологий и их особенности, обсужденные в предыдущем разделе, все еще не вполне осознаны в органах власти и приходилось непросто убеждать их в необходимости суперкомпьютерных программ.

Работа по формированию и утверждению программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» не была бы завершена в разумные сроки, если бы не политическая поддержка и активная государственная позиция со стороны высшего руководства Республики Беларусь и Союзного государства, руководства и сотрудников Постоянного комитета Союзного государства, Роснауки, НАН Беларуси, Совета Федерации и Государственной Думы Федеральному Собранию Российской Федерации. Все организации – участники программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» с благодарностью помнят об этой поддержке и рассчитывают на нее в процессе формирования и утверждения будущих программ, связанных с суперкомпьютерными технологиями.

Основные результаты программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД»

Суперкомпьютерные программы «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» внесли серьезный вклад в развитие суперкомпьютерной отрасли и суперкомпьютерного рынка России и СНГ в целом:

– в последние годы 75–80% суперкомпьютеров, разработанных в странах СНГ, обеспечиваются суперЭВМ семейства СКИФ и установками с использованием технологических решений семейства СКИФ³;

³ Не только в России и Беларуси, но и в Украине (Киев, Харьков), и в Казахстане (Алматы).

– среди 50 самых высокопроизводительных в СНГ вычислительных систем 16 установок (32%) – это суперЭВМ семейства СКИФ и системы, использующие технологические решения семейства СКИФ;

– за время выполнения программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» шесть систем⁴ семейства «СКИФ» 14 раз вошли в престижный всемирный рейтинг суперЭВМ Top500 (с максимально высокой позицией № 36 в июне 2008):

1. **СКИФ-Аврора ЮУрГУ**, 21.8/24⁵ Tflops⁶ – 11/2009 № 450;
2. **СКИФ МГУ «Чебышев»**, 47.17/60 Tflops – 06/2008 № 36, 11/2008 № 54, 06/2009 № 82, 11/2009 № 103;
3. **СКИФ Урал**, 12.2/15.94 Tflops – 06/2008 № 283;
4. **СКИФ Cyberia**, 9.01/12 Tflops – 06/2007 № 105, 11/2007 № 200, 06/2008 № 485;
5. **СКИФ К-1000**, 2.032/2.534 Tflops – 11/2003 № 98, 06/2005 № 182, 11/2005 № 331, 06/2006 № 489;
6. **СКИФ К-500**, 0.424/0.717 Tflops – 11/2003 № 406.

К настоящему времени в рамках программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» создано три поколения (ряды 1, 2 и 3) семейства отечественных суперкомпьютеров СКИФ, выпущено 18 опытных образцов данных суперкомпьютеров, подготовлена их конструкторская и программная документация (включая более двадцати отечественных прикладных пакетов) с литерой О₁, проведены приемочные (государственные) испытания. В настоящее время завершается создание первых моделей ряда 4.

Создано базовое, системное, инструментальное и прикладное программное обеспе-

⁴ Отметим: за всю историю только восемь машин, разработанных в странах СНГ, входили в мировой рейтинг Top500, шесть из них – СКИФы.

⁵ Указана производительность на тесте Linpack и через дробь, пиковая производительность.

⁶ 1 Gflops – миллиард (10⁹) операций с плавающей точкой в секунду. 1 Tflops – триллион (10¹²) операций с плавающей точкой в секунду; 1 Pflops – квинтиллион (10¹⁵) операций с плавающей точкой в секунду.

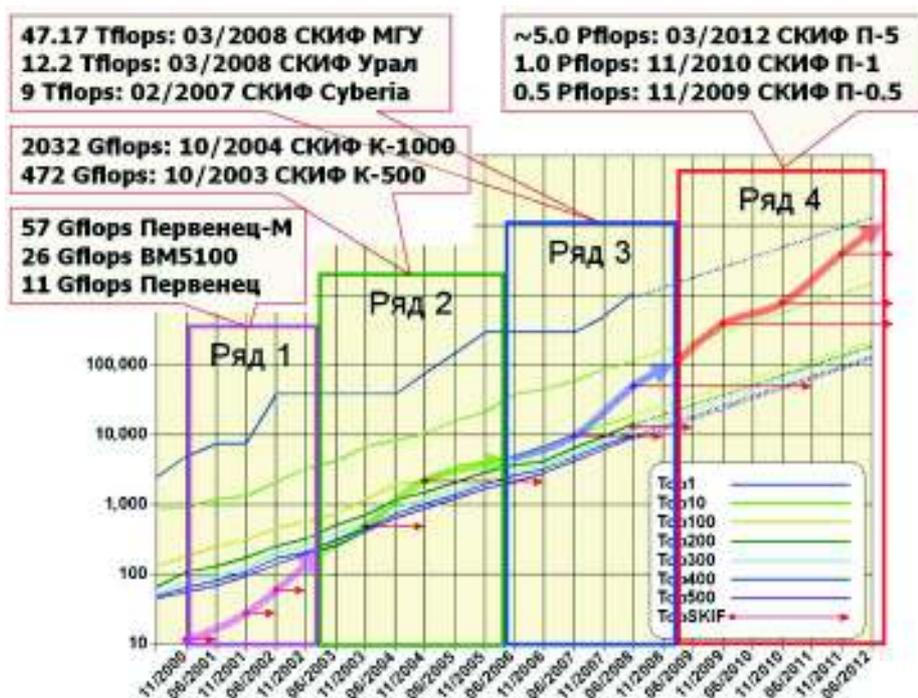


Рис. 1. Динамика развития семейства суперЭВМ SKIF (ряды 1, 2, 3 и 4) по сравнению с динамикой развития мировой суперкомпьютерной отрасли

чение (ПО) в самых разных областях применения суперЭВМ SKIF. Разработанные технологии используются в науке, образовании и реальных отраслях экономики России.

В рамках программы «СКИФ-ГРИД» традиционные направления разработки (суперЭВМ семейства SKIF и ПО для них; прикладные системы; информационная безопасность) дополнены разработками ГРИД-технологий – отечественное ПО промежуточного уровня для территориально-распределенных грид-систем, с поддержкой:

- интеграции вычислительных ресурсов (вычислительный грид);
- метакомпьютинга;
- распределенного хранения данных и их распределенной обработки;
- управления пользователями и ресурсами грид-сети;
- других грид-технологий.

Результаты программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» многократно докладывались и демонстрировались на ведущих суперкомпью-

терных конференциях и выставках: более двадцати раз на конференциях и выставках в России и Беларуси; трижды на самых известных международных суперкомпьютерных конференциях и выставках – SC'06, ноябрь 2006 г. в г. Тампа, США; ISC'09, июнь 2009 г. в г. Гамбурге, Германия; SC'09, ноябрь 2009 г. в г. Портленд, США.

По результатам выполнения программы «СКИФ» группа разработчиков удостоена премии Правительства Российской Федерации за 2006 год в области науки и техники.

СуперЭВМ ряда 4 семейства SKIF: отечественные суперкомпьютеры до транспетафлопсной производительности

В настоящее время самой важной текущей работой по программе «СКИФ-ГРИД» являются разработки суперЭВМ ряда 4 семейства SKIF – суперкомпьютеров SKIF-Аврора. Работы ведутся в точности по плану-графику суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД». В 2009 г. практически завершено соз-



Рис. 2. Установки СКИФ-Аврора.

Слева: установка на 1.5 Tflops (полушасси), г. Гамбург, июнь 2009 г.; в центре: установка на 24 Tflops (шкаф), г. Портленд, США, ноябрь 2009 г., 450 место в Top500; справа: проект системы на 500 Tflops (3D-модель, 21 шкаф).

дание аппаратных решений первой модельной линейки суперкомпьютеров СКИФ-Аврора, в настоящее время завершается разработка и тестирование микрокодов (firmware) и базового программного обеспечения для них.

Состояние разработки позволило 23–25 июня 2009 г. на международной суперкомпьютерной конференции ISC'09 в г. Гамбурге представить работоспособные модули (так называемые «полушасси») суперкомпьютера СКИФ-Аврора. Демонстрировалось работающее полушасси с водяным охлаждением, на котором считались реальные задачи (например, расчет прогноза погоды), функционировала подсистема мониторинга и управления установкой. На данную установку был получен сертификат совместимости Intel Cluster Ready, что гарантирует работоспособность на данной платформе большинства прикладных пакетов программ. Экспозиция привлекла внимание ведущих специалистов, получила их высокую оценку.

В ноябре на конференции SC'09 (г. Портленд, США) демонстрировалась установка СКИФ-Аврора уже в конфигурации шкафа; 17 ноября 2009 г. СКИФ-Аврора была включена в рейтинг 500 самых мощных машин мира – 450-е место с показателями производительности 21.8 Tflops на тесте Linpack, 24 Tflops пиковой производительности, КПД = $21,8/24 = 90,8\%$.

В 1-м квартале 2010 г. намечен ввод в эксплуатацию первых суперкомпьютеров

СКИФ-Аврора. Данные суперкомпьютеры обладают целым рядом конкурентных и технических преимуществ по отношению ко всем известным сегодня разработкам:

- лучшая эффективность использования электроэнергии – в 1,5 раза;
- повышенная плотность упаковки вычислительной мощности – в 2 раза;
- повышенная пропускная способность системной сети – в 1,5 раза;
- улучшенная масштабируемость системной сети;
- повышенная эффективность реализации синхронизации;
- повышенная эффективность реализации массовых операций;
- возможность поддержки не только MPI, но и новых перспективных подходов к реализации параллельных вычислений;
- высокая совместимость с существующим программным обеспечением в комбинации с возможностью использования FPGA-ускорителей;
- повышенная надежность суперЭВМ;
- улучшенная система электропитания;
- улучшенные эргономические и эстетические показатели.

Разработка суперЭВМ СКИФ-Аврора семейства СКИФ ведется широкой кооперацией организаций, ведущих разработчиков суперкомпьютерных технологий. Непосредственно в разработке участвуют группы из следующих семи организаций: ИПС



им. А.К. Айламазяна РАН (головной), ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ОИПИ НАН Беларуси, ЮУрГУ, ЗАО «РСК СКИФ», ОАО «НИЦЭВТ», ООО «Альт Линукс Технолоджи». В создании, адаптации и оптимизации системного и прикладного программного обеспечения для суперкомпьютеров СКИФ-Аврора участвуют двадцать организаций: ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ИСА РАН, ИММ РАН, ГЦ РАН, ИКИ РАН, ИПХФ РАН, ИХФ РАН, ЮУрГУ, СПбГПУ, НИИ КС, ННГУ, ТГУ, УГАТУ, МТУСИ, ЧелГУ, ЗАО «РСК СКИФ», ООО «Альт Линукс Технолоджи», ЗАО «Каледин и Партнеры», ЗАО «Сигма технологии».

Эта кооперация разрабатывает большинство ключевых решений СКИФ-Авроры, в том числе:

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

В разработке суперкомпьютеров СКИФ-Аврора используется равноправное сотрудничество с западными партнерами – речь идет об альянсе с компанией «Евротех» (Италия) и о технической поддержке корпорации Intel. При соблюдении всех интересов всех участников альянса, это позволяет обеспечить серьезные улучшения таких показателей проекта, как стоимость, сроки и качество разработки. В соответствии с условиями альянса Россия получает возможность (юридическое право и техническую способность):

- изготавливать (приобретая за рубежом только некоторые, не имеющие отечественных аналогов, микросхемы) все печатные

платы, все узлы и модули, суперЭВМ в целом;

- поставлять без всяких ограничений и согласований созданные суперЭВМ заказчикам;

- вносить модификации в конструкторскую документацию, создавать на ее базе новые суперЭВМ, в том числе и постепенно заменять импортные микросхемы на отечественную элементную базу – по мере ее появления.

В контексте данного международного сотрудничества российской стороной были приобретены и освоены многие технологические решения, ранее отсутствовавшие в российской индустрии. При этом не только все ключевые технологии, 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, подход проекта СКИФ-Аврора применим для создания суперЭВМ в интересах всех отраслей использования, включая стратегические. Создаваемые технические решения позволяют уже сегодня эффективно создавать суперЭВМ мощностью 1 Pфlops и выше.

Использование суперкомпьютерных и ГРИД-технологий

В рамках программ «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД» создавались не только опытные образцы суперкомпьютеров, конструкторская и программная документация системного уровня, но и прикладные (пилотные) программные системы.

В рамках программы «СКИФ-ГРИД» в качестве платформы для таких прикладных систем создан и развивается так называемый СКИФ-Полигон. Распределенная вычислительная система СКИФ-Полигон объединяет суперкомпьютерные центры, в которых расположены суперЭВМ семейства СКИФ и научно-исследовательские центры, которым необходим доступ к вычислительным



Рис. 3. Распределенная вычислительная система СКИФ-Полигон.

ресурсам. К осени 2008 г. были объединены ресурсы суперкомпьютерных центров, расположенных в самых разных городах Беларуси и России: Минск, Москва, Переславль-Залесский, Челябинск, Томск, Ставрополь и др. Суммарная пиковая производительность системы СКИФ-Полигон сегодня превышает 100 Tflops. В дальнейшем предусмотрено расширение состава участников СКИФ-Полигона и увеличение его производительности. Система СКИФ-Полигон является эффективной платформой, на которой проводятся разработки системного и прикладного программного обеспечения для суперкомпьютеров семейства СКИФ.

На платформе опытных образцов суперЭВМ семейства СКИФ, а также на платформе СКИФ-Полигона выполняются различные проекты в интересах наукоемких технологий Беларуси и России. Разрабатываемые программные комплексы предназначены для

выполнения научных и инженерных расчетов в таких важнейших областях, как:

- исследования в области обработки здравоохранения (например, обработка и хранение цифровых маммограмм);
- исследования в области проектирования лекарств с заданными свойствами;
- расчеты в интересах разработки новых материалов, в том числе – наноматериалов;
- исследования в области биоинформатики;
- расчеты, связанные с обеспечением безопасности атомных электростанций;
- расчеты в интересах различных разделов наук о Земле;
- другие исследования.

Ниже приведен небольшой список задач и областей реального использования суперкомпьютеров СКИФ:

- химические приложения, прогнозирование свойств материалов и веществ, проектирование новых материалов и веществ: ле-



карства, нанотехнологии, материаловедение и т. п.;

– проектирование химических реакторов;
– аэрогидродинамические расчеты, включая расчеты для случая плохообтекаемых тел;

– газодинамика, в том числе: моделирование процессов радиационной газодинамики;

– обработка результатов дистанционного зондирования земли, обработка видео- и радиолокационных изображений с искусственных спутников Земли;

– гидрометеорология: численные методы прогнозирования погоды, перспективные метеорологические модели;

– прикладные системы искусственного интеллекта: классификации текстов по заданным в процессе обучения, извлечение знаний из текстов на естественном языке, инструментальные системы для проектирования интеллектуальных систем и др.;

– медицина и телемедицина: кардиологическая экспертная система реального времени, система хранения и обработки результатов маммографии и т. п.;

– расчеты явлений с большой долей энергии излучения: расчет лазерного факела, моделирование процессов лазерного спекания порошковых материалов, гиперзвуковое движение космического тела в плотных слоях атмосферы и т.п.;

– геомеханические задачи: моделирование деформационных процессов на земной поверхности, устойчивости подземных сооружений, состояния подработанной толщи;

– экологическое моделирование и прогнозирование, в том числе в чрезвычайных ситуациях;

– государственная безопасность: решение задач перебора большой размерности, система идентификации личности по голосу;

– радиосвязь, оптимизация планов размещения радиоэлектронных средств;

– банковские информационные системы;

– инженерные расчеты: автомобильная промышленность, сельскохозяйственные машины, аэрокосмическая техника, легкая промышленность и другие отрасли.

Полученные на сегодня результаты позволяют утверждать, что суперкомпьютеры семейства СКИФ являются удачной платформой для проведения расчетов в интересах развития различных наукоемких отраслей стран евразийского региона.

Суперкомпьютерные и грид-технологии – очень выгодная область сотрудничества для евразийских стран. Механизм развития такого сотрудничества могли бы служить адекватно финансируемые широкие межгосударственные программы, которые, несомненно, могут принести огромную пользу всем государствам – участникам подобных проектов. Естественно, что при формировании подобных проектов следует серьезно проработать вопросы закрепления прав на интеллектуальную собственность и механизмы обеспечения высокой и справедливой доступности суперкомпьютерных ресурсов и технологий всем государствам – участникам подобных программ.

Ключевые слова: «СКИФ-ГРИД»; «СКИФ-Аврора»; «суперЭВМ семейства «СКИФ»; водяное охлаждение; суперкомпьютерные и грид-технологии; Gflops; Tflops; Pflops; СКИФ-Полигон.

Keywords: “Skif-GRID”; “Skif-AURORA”; “Super PC of the family” Skif”; water cooling; supercomputer and grid-technologies; Gflops; Tflops; Pflops; the Skif-RANGE.