

С. М. Абрамов

Исследования в области суперкомпьютерных технологий ИПС РАН: ретроспектива и перспективы

Аннотация. Данная работа посвящена обзору исследований в области суперкомпьютерных технологий, выполненных и запланированных Институтом программных систем имени А. К. Айламазяна Российской академии наук. Рассмотрены работы и их результаты за период, начиная с 1984 года.

1. Введение

В 1984 году в СССР шла подготовка эффективного асимметричного ответа на американские планы «Звездных войн». С этой целью необходимо было выполнить ряд фундаментальных исследований в различных областях науки. Для этого решением директивных органов СССР в различных регионах страны было создано несколько исследовательских институтов, одним из которых был и наш институт¹. При создании руководство страны в качестве основной деятельности определила нашему институту фундаментальные исследования в следующих областях:

- искусственный интеллект;
- высокопроизводительные вычисления — то, что сегодня принято называть суперкомпьютерными технологиями;
- операционные системы, языки и системы программирования, базы данных — то есть, системное программное обеспечение (ПО), информационные технологии.

¹ Создан в 1984 году как филиал Института проблем кибернетики АН СССР. В 1986 году получил самостоятельный статус с наименованием: Институт программных систем АН СССР.

За прошедшие годы институт не только сохранил эту первоначальную направленность своих исследований, но и добился значительных результатов в этих направлениях. В данной статье рассмотрены выполненные в Институте программных систем Российской академии наук (ИПС РАН) исследования и разработки в области суперкомпьютерных технологий, с 1984 по настоящее время и перспективы их развития.

Эти работы охватывают фундаментальные исследования и инженерные разработки по созданию и применению аппаратных и программных средств мультипроцессорных вычислительных систем, суперЭВМ и grid-сетей. Данные работы в Институте в основном сосредоточены в Исследовательском центре мультипроцессорных систем (ИЦМС ИПС РАН), ряд прикладных работ выполнен в Исследовательском центре искусственного интеллекта. В статье также будут рассмотрены работы и результаты, полученные и в инициативных разработках института, и в рамках крупных (в том числе — международных) научно-технических программ, в которых ИПС РАН играл роль головного исполнителя от России. Некоторые из рассмотренных здесь результатов принадлежат институту, а некоторые — получены широкой научной кооперацией (см. Раздел «Благодарности»), возглавляемой институтом. Мы постараемся по мере изложения корректно освещать данное обстоятельство, хотя в полной мере это сделать будет невозможно из-за ограничений на размер статьи.

2. О сущности суперкомпьютерных технологий

Прежде чем начнем анализировать выполненные в ИПС РАН исследования в области суперкомпьютерных технологий, попытаемся дать короткое описание сущности суперкомпьютерных технологий и их роли.

Сегодня критические (прорывные) технологии в государствах, строящих экономику, основанную на знаниях, исследуются и разрабатываются 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.).

Сегодня суперкомпьютерные технологии считаются важнейшим фактором обеспечения конкурентоспособности экономики страны², а единственным способом победить конкурентов объявляют возможность обогнать их в расчетах. Здесь характерны слова Президента Совета по конкурентоспособности США:

«Технологии, таланты и деньги доступны многим странам. Поэтому США стоит перед лицом непредсказуемых экономических конкурентов из-за рубежа. Страна, которая желает победить в конкуренции, должна победить в вычислениях»³.

Не важно, 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»⁴. 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.

² Например, см. доклад Президенту США «Вычислительные науки: обеспечение превосходства (конкурентоспособности) Америки»: “Computational Science: Ensuring America’s Competitiveness”, РИТАС (President’s Information Technology Advisory Committee), 2005.

³ “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 “US Competitive Council Meets; HPC TOPS Agenda” HPC Wire, 16.07.2004, <http://www.taborcommunications.com/archives/108016.html>.

⁴ В данной работе оба термина — «национальная научно-исследовательская информационно-вычислительная сеть» и «киберинфраструктура» — используются как синонимы.

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

3. Этапы развития работ в ИПС РАН в области суперкомпьютерных технологий

В работах института по суперкомпьютерной тематике можно выделить несколько этапов:

- 1984–1992 гг.: участие ИПС РАН в разработке программного обеспечения (ПО) для мультипроцессора с динамической архитектурой (МДА) ЕС 2704⁵;
- 1990–1995 гг.: работы с транспьютерными системами, участие ИПС РАН в Российской транспьютерной ассоциации; начало исследований и первых экспериментов в том направлении, которое в дальнейшем приведет к созданию Т-системы;
- 1994–1998 гг.: поиск и реализация решений для компонент первых версий Т-системы; в качестве аппаратной базы используются различные сети из ПЭВМ — начиная с оригинальных сетей на базе ускоренных (до 1 Mbps) линий RS-232 и собственных коммутирующих устройств для таких связей; заканчивая кластером на базе FastEthernet (100 Mbps);
- 1998–1999 гг.: развитие первой версии Т-системы, налаживание кооперации с коллегами из Минска, формирование суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства;
- 2000–2004 гг.: период исполнения суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства, в которой ИПС РАН определен как головной исполнитель от России; разработка суперЭВМ семейства «СКИФ» Ряда 1 (2000–2002 гг.) и Ряда 2 (2003–2006 гг.), разработка ПО для них;
- 2005–2007 гг.: инициативные работы в области суперЭВМ и grid-систем; развитие новой версии Т-системы (OpenTS), в том числе и в сотрудничестве с корпорацией Microsoft;

⁵Спецпроцессор ЕС 2704 Единого Семейства ЭВМ, оригинальная отечественная разработка ЛИИ АН СССР и НИЦЭВТ [25].

формирование и согласование суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД» Союзного государства; создание научно-технического задела для суперЭВМ «СКИФ» Ряда 3;

- 2007–2008 гг.: исполнение работ первого этапа суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД» Союзного государства, в которой ИПС РАН определен как головной исполнитель от Российской Федерации; создание Ряда 3 и разработка подходов к реализации Ряда 4 суперЭВМ семейства «СКИФ».

В последующих разделах мы остановимся на основных результатах, полученных в данных работах.

4. 1984–1992 годы: эпоха советских суперкомпьютерных систем

В истории отечественной суперкомпьютерной отрасли весьма существенным периодом являлись последние два десятилетия в истории СССР. В стране в то время одновременно велось несколько серьезных разработок вычислительных систем с высокой производительностью и параллельной архитектурой. То есть, одновременно велось несколько суперкомпьютерных проектов. Упомянем некоторые из них.

- (1) Ереванский матричный спецпроцессор ЕС2700;
- (2) Киевский макроконвейер ЕС2701;
- (3) Ленинградский мультипроцессор с динамической архитектурой ЕС2704;
- (4) Таганрогский мультипроцессор ЕС2706;
- (5) Семейство мультипроцессорных систем ПС-1000 и ПС-2000, ИПУ АН СССР;
- (6) Векторно-конвейерная СуперЭВМ «Электроника СС-БИС», ИПК АН СССР;
- (7) Семейство СуперЭВМ Эльбрус-1 и Эльбрус-2, ИТМиВТ АН СССР;
- (8) Суперкомпьютерные разработки НИИ «Квант»;
- (9) Старшие модели — многомашинные и мультипроцессорные комплексы, ЕС1066 и старше, — НИЦЭВТ.

Десяток одновременных суперкомпьютерных проектов. . . И политическая воля была, и бюджета на собственные суперкомпьютерные проекты хватало.

Сразу после создания, в 1984–1992 годах, наш институт участвовал в разработке программного обеспечения для мультипроцессора с динамической архитектурой (МДА) ЕС 2704. ЕС2704 поддерживала микропрограммный уровень программирования. Нашему институту головные исполнители проекта ЕС2704 (НИЦЭВТ и ЛИИ АН СССР) поручили разработать ассемблер (как язык и систему программирования) и компилятор с языка С. Обе работы успешно выполнены и сданы заказчику.

Это была интересная машина, содержащая 6 интерфейсных, 12 коммутационных и 24 вычислительных процессорных модулей. К сожалению слишком долгий срок реализации проекта привел к тому, что только небольшое количество экземпляров ЕС2704 было установлено у пользователей. Однако в некоторых местах (ЦУП, Подлипки) эти машины использовались десяток лет.

В ЕС2704 были заложены красивые идеи, например, автоматическое динамическое распараллеливание пользовательских программ, устойчивость процесса выполнения программы к отказам части оборудования и т. п.

Опыт нашей работы с ЕС2704 лег в основу наших дальнейших разработок. В том числе, идея автоматического динамического распараллеливания программ была реализована нами, но уже совсем иным образом, в Т-системе.

5. 1993–1995 годы: транспьютерные системы

В 1993–1995 годы в институте выполнялись исследования с транспьютерными системами. Часть работ поддерживалась в рамках нашего участия в Российской транспьютерной ассоциации, часть исследований была поддержана грантом INTAS, полученным нами вместе с итальянским филиалом компании Immos и с Университетом города Катанья.

На основе опыта, ранее полученного в работах по ЕС 2704 [1–5] нами велась разработка алгоритмов динамической маршрутизации (с обходом неисправностей) сообщений в транспьютерных сетях и балансировки загрузки процессоров.

Нами развивалась и теория расчета оптимальной конфигурации мультипроцессорной системы по заданному составу вычислительных

модулей. Речь идет о том, чтобы за счет выбора топологии транспьютерной сети минимизировать транзитные передачи в ней, максимизировать устойчивость к отказам и обеспечивать равномерность загрузки каналов сети. Оказывается, что при заданном числе каналов в узле транспьютерной сети⁶ (при заданной «валентности» вычислительных узлов), оптимальной конфигурацией являются *графы с минимальным диаметром*. При этом, традиционные архитектуры (многомерные торы, гиперкубы, деревья и т. п.) сильно уступают графам с минимальным диаметром по устойчивости к отказам, поддержке равномерности загрузки каналов и минимизации транзитных передач. Для исследования графов с минимальными диаметрами в данные годы в ИЦМС ИПС РАН был реализован комплекс программных средств для расчета графов и их параметров.

В 1995 году в рамках работ по транспьютерной тематике в институте была выполнена разработка оригинальной интерфейсной платы для ПЭВМ на основе транспьютера T425. Разработанная плата [6] обеспечивала сопряжение ПЭВМ с вычислительной транспьютерной сетью. При этом интерфейс был выполнен на основе разделяемой памяти. Это решение обеспечило на шине ISA высокую скорость передачи данных — до 5 Мбайт/сек, что *на порядок превосходило параметры* всех существовавших в то время транспьютерных плат, использующих метод программного обмена через интерфейсную микросхему C011.

В этом же году нами был завершен перенос [7] свободного компилятора GNU C Compiler на архитектуру транспьютеров семейств T4, T8 и T9. Заключительная отладка и тестирование компилятора была осуществлена в удаленном режиме на установке GCel фирмы Parsytec в High Performance Computing Laboratory в Афинах (Греция), что для того времени⁷ было очень серьезным результатом. Тестирование показало, что по качеству генерируемого кода наш компилятор не уступает коммерческому компилятору ACE, входящему в состав ОС Parix. Этим результатам более чем десятилетней давности до сих пор посвящен раздел в архиве “Internet Parallel Computing Archive” [8].

⁶ В каждом транспьютере, как правило, поддерживалось 4 канала, однако, существовали транспьютероподобные системы с иным количеством каналов в узле.

⁷ 1995 год, в России развиты только UUCP-сети, Интернет еще не вошел широко в нашу жизнь.

В это же время (1994–1995 годы) в институте велись исследования по возможности высокоскоростной связи между ПЭВМ при помощи RS-232. Было разработано и реализовано коммутационное оборудование для связи между собой ПЭВМ со скоростью передачи данных 1 Mbps. В дальнейшем такие предвестники кластерных систем — сети из ПЭВМ, связанные ускоренными линиями RS-232, — нами использовались как платформы для разработок Т-Системы — системы программирования, обеспечивающей автоматическое распараллеливание программ на этапе выполнения программ в мультипроцессорных вычислительных системах с общей и распределенной памятью [9, 10].

Базовые принципы Т-системы были впервые четко сформулированы в 1995 году. В качестве входного языка системы рассматривались диалекты известных языков программирования (С, Фортран), с небольшим количеством дополненных специальных конструкций и функционально-ориентированных ограничений [11]. Возможность автоматического распараллеливания основывается на представлении вычислений в виде автотрансформации вычислительной сети, состоящей из процессов и обрабатываемых данных. Выполнена первая экспериментальная реализация Т-системы.

В 1995 году было выполнено исследование применимости методов автоматического распараллеливания к основным алгоритмам вычислительной математики, показано, что представление характерных для вычислительной математики структур данных возможно на основе специальных списковых структур, используемых при реализациях Т-системы, что не приводит к существенной потере производительности [12].

Первые прототипные программные реализации для экспериментов с Т-системой создавались в среде MS DOS. И именно в 1995 г. начались работы по использованию ОС Linux и локальных сетей UNIX-станций в качестве платформы для Т-системы; была разработана сетевая компонента Т-системы, обеспечивающая возможность распределенной загрузки задачи и внутрizaдачного обмена управляющими и информационными сообщениями.

6. 1996–1997 годы: первые реализации Т-системы

В 1996–1997 годы в рамках создания первой рабочей версии Т-системы в институте были решены все основные вопросы по реализации ядра системы. Для управления в Т-системе памятью был разработан

алгоритм таблично-страничной компактирующей сборки мусора, являющийся модификацией алгоритма «катящихся таблиц». Новый алгоритм сохранял преимущества метода «катящихся таблиц» — отсутствие необходимости отводить дополнительный указатель для каждого элемента данных, хранимых в звеньевой памяти; но избавлялся от основного недостатка — потенциально невысокой эффективности.

В это же время для поддержки отладки Т-программ пришлось решать проблему отсутствия повторяемости (от запуска к запуску) трассы вычислений, обусловленной асинхронным характером взаимодействия компонент Т-системы. Был разработан метод отладки, основанный на принципе «повторения трассы выполнения».

Версия ядра Т-системы, разработанная с использованием найденных алгоритмов и методов, была опробована и отлажена в процессе реализации первой задачи для Т-системы: построения реалистических изображений виртуальных сцен методом трассировки лучей. Были проведены первые эксперименты по выполнению данной задачи в однопроцессорном режиме, а также на локальной сети (Ethernet 10Base-2) из четырех одинаковых однопроцессорных ПЭВМ, работающих под управлением ОС Linux. Результаты счета на одном, двух, трех и четырех процессорах показали, что Т-система обеспечивает для данной задачи:

- низкий (1.5–3%) уровень накладных расходов (по сравнению с традиционной непараллельной реализацией);
- практически линейный рост производительности в зависимости от числа процессоров [12–16].

Эта первая рабочая реализация Т-системы, первый простейший кластер (четыре ПЭВМ в сети Ethernet 10Base-2) и первая Т-программа стали началом современного этапа суперкомпьютерных исследований в нашем институте.

7. 1998 год: завершение разработки первой стабильной прототипной версии Т-системы

В начале 1998 года в институте был реализован новый крупный (для того времени) кластер — программно-аппаратный мультипроцессорный комплекс, в котором использовались различные по конфигурации вычислительные узлы: всего 24 процессора Intel PPro-200 и P-

П-266, пиковая производительность 5,6 GFlops⁸, RAM 1.4 GB, HDD 70.4 GB. Заметим, что вычислительные узлы данной установки были первыми компьютерами в ИПС РАН с архитектурой SMP. Данная вычислительная техника позволила разработать и поддержать в Т-системе различные платформы класса «IP-сеть из Intel-совместимых компьютеров с ОС Linux, в том числе с SMP-архитектурой».

Весной того же года на языке Рефал Плюс был реализован первый компилятор для Т-языка — это было негладкое синтаксическое расширение языка С. Так была завершена разработка первой стабильной прототипной версии Т-системы.

За первые полгода опытной эксплуатации в ИПС РАН кластера с Т-системой были реализованы 10 задач из различных прикладных областей, имеющих различную алгоритмическую природу [13, 14, 16]. На данных задачах были исследованы свойства Т-системы и практически продемонстрированы важнейшие свойства данного подхода к организации параллельных вычислений:

- Т-система автоматически распараллеливает выполнение Т-программ, при этом для многих алгоритмов достигается почти линейный рост производительности при росте числа процессоров (от 1 до 24);
- разработанные на Т-языке задачи могут выполняться (без переписывания, перекомпиляции или иных других модификаций) на мультипроцессоре с произвольной аппаратной конфигурацией.

Тем самым Т-система позволяет снизить затраты на разработку параллельных программ (автоматизация распараллеливания), увеличить глубину параллелизма и более полно использовать возможности аппаратной части мультипроцессора (за счет распараллеливания в динамике).

⁸Единицы производительности суперЭВМ: 1 GFlops — миллиард операций с плавающей точкой в секунду, 1 TFlops = 1 000 GFlops — триллион операций с плавающей точкой в секунду, 1 Pflops = 1 000 TFlops — тысяча триллионов операций с плавающей точкой в секунду.

8. 1998–1999 годы: формирование суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства

В мае 1998 года состоялись первый визит в Минск в НПО «Кибернетика» НАН Беларуси и первые контакты с белорусскими коллегами по тематике высокопроизводительных вычислений. В российской делегации были представители московской компании «Суперкомпьютерные системы» (СКС) и сотрудники ИПС РАН. Компания СКС демонстрировала макетный образец однородной вычислительной среды (ОВС), изготовленный на базе микросхем, выпущенных на предприятии «Интеграл» (Минск). Представители ИПС РАН демонстрировали Т-систему и прикладные Т-программы. Обе демонстрации получили положительную оценку у Президента НАН Беларуси Войтовича А. П.

Для более подробного изучения возможной кооперации был назначен ответный визит, который состоялся 5–12 июня 1998 года. В конце визита 12 июня 1998 года Президент НАН Беларуси Войтович А. П., директор ИПС РАН Айламазян А. К. и директор компании СКС Татур В. Ю. подписали трехстороннее соглашение о кооперации в области высокопроизводительных вычислений. Это был первый шаг к формированию суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства.

После возвращения в Минск, Войтович А. П. доложил Президенту Республики Беларусь Лукашенко А. Г. о результатах первых контактов и о возможном сотрудничестве между Россией и Беларусью в суперкомпьютерной отрасли. Эти идеи нашли горячую поддержку на высшем государственном уровне Беларуси. Было выделено целевое финансирование, создан временный научный коллектив, целью которого было исследование всех аспектов возможного сотрудничества и формирование (подготовка) совместной программы «СКИФ» Союзного государства.

К концу 1998 года временный научный коллектив завершил свою работу, текст совместной программы «СКИФ» был сформирован. После этого весь 1999 год ушел на согласование программы в российских министерствах и ведомствах. И только с осени 2000 года началась реальная работа по выполнению Программы «СКИФ».

Конечно, хождение по министерствам мы в 1999 году совмещали и с продолжением исследований. В этом же году для поддержки эффективной работы Т-системы на SMP-узлах была разработана и

реализована система управления разделяемой памятью, обладающая следующими особенностями:

- процессы операционной системы, реализующие единое приложение, разделяют виртуальные адресные пространства не полностью, а только частично — в отличие от стандартных POSIX-совместимых реализаций систем поддержки легких процессов;
- когерентное размещение сегментов разделяемой памяти в виртуальное адресное пространство процессов может осуществляться динамически.

Данное свойство позволяет экономно использовать ресурс сегментов разделяемой памяти ОС, общее количество которых ограничено.

В этом же году продолжались развитие Т-языка, программирование в Т-системе демонстрационных и реальных прикладных задач, опытная эксплуатация кластера ИПС РАН. В таком инициативном порядке работы по Т-системе развивались до конца лета 2000 года — до начала финансирования суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства.

9. 2000–2004 годы, период исполнения суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства

Первые пять лет нового века работы ИЦМС ИПС РАН в области суперкомпьютерных технологий проходили в рамках исполнения суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства. Полное название 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», — точно определяло и содержание работ. Это была серьезная совместная научно-техническая программа двух стран — России и Беларуси.

Институт программных систем Российской академии наук был определен головным исполнителем по программе «СКИФ» от России. Работы по созданию аппаратных и программных средств для семейства суперкомпьютеров «СКИФ» ИПС РАН велись в тесном сотрудничестве с исполнителями от Республики Беларусь и с основными исполнителями Программы со стороны России, среди которых были:

- ОАО «Научно-исследовательский центр электронно-вычислительной техники» (НИЦЭВТ, Москва);
- Центр научных телекоммуникаций и информационных технологий (ЦНТК РАН, Москва);
- НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова (Москва);
- Институт высокопроизводительных вычислений и информационных систем (ИВВиИС, СПб.);
- Российский НИИ региональных проблем (РосНИИ РП, Переславль-Залесский);
- Компания «Суперкомпьютерные системы» (СКС, Москва).

Мероприятия программы «СКИФ» охватывали все области суперкомпьютерной отрасли:

- разработка и производство микроэлементной базы, супер-ЭВМ, системного ПО для них, инструментального ПО и прикладных систем;
- вспомогательные мероприятия — подготовка и переподготовка кадров, создание единого информационного пространства проекта.

Суперкомпьютерной программе «СКИФ» посвящено достаточно много публикаций. Поэтому в данной работе будет дан весьма краткий обзор основных результатов и приведены ссылки на соответствующие публикации.

9.1. Основные результаты суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства

В рамках суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства в 2000–2003 годах были получены следующие результаты [17–20]:

- Разработана конструкторская документация (КД) и образцы высокопроизводительных систем «СКИФ» Ряда 1, которые прошли приемочные (государственные) испытания. По результатам государственных испытаний конструкторской документации присвоена литера O_1 .
- Разработано базовое программное обеспечение кластерного уровня (ПО КУ) и ряд прикладных систем суперкомпьютеров «СКИФ» Ряда 1 и Ряда 2. Данное ПО прошло приемочные (государственные) испытания и по результатам испытаний данному ПО присвоена литера O_1 .

Среди прочего, на испытания выносилось более двадцати программных систем, среди них:

- модифицированное ядро операционной системы Linux-SKIF (ИПС РАН и МГУ);
 - модифицированные пакеты параллельной файловой системы PVFS-SKIF и системы пакетной обработки задач OpenPBS-SKIF (ИПС РАН и МГУ);
 - мониторинговая система FLAME-SKIF кластерных установок семейства «СКИФ» (ИПС РАН и МГУ);
 - стандартные средства (MPI, PVM) поддержки параллельных вычислений, 12 адаптированных пакетов, библиотек и приложений (ИПС РАН и МГУ);
 - Т-система и сопутствующие пакеты: Т-ядро, компилятор tgcc, пакет tcmode для редактора Xemacs, демонстрационные и тестовые Т-задачи (ИПС РАН и МГУ);
 - отладчик TDB для MPI-программ (ИПС РАН);
 - две прикладные системы, разрабатываемые по программе «СКИФ»: система автоматизации проектирования химических реакторов (ИБВиИС, СПб.), система классификации большого потока текстов при помощи технологий искусственного интеллекта (ИЦИИ ИПС РАН).
- В ОАО «НИЦЭВТ» подготовлена производственная база, проведена разработка КД и освоены в производстве адаптеры (N330, N335, N337,) системной сети SCI, которые являются полными функциональными аналогами адаптеров SCI компании Dolphin (D330, D335, D337).
 - В 2000–2003 гг. построено шестнадцать опытных образцов и вычислительных установок Ряда 1 и Ряда 2 семейства «СКИФ»⁹.
 - Начаты работы по инженерным расчетам на системах семейства «СКИФ» и по созданию единого информационного пространства программы «СКИФ». В рамках приемочных (государственных) испытаний сверх программы и методики испытаний были показаны первые результаты в этом направлении:

⁹В том числе предприятием «Суперкомпьютерные системы» (Москва) совместно с НИИ ЭВМ (Минск) изготовлен экспериментальный гибридный макет, в котором кластерный уровень сочетается с вычислительными модулями ОВС.

- Была создана метакластерная распределенная вычислительная структура на базе сети Интернет и трех кластерных систем «СКИФ» ИПС РАН (Переславль-Залесский), НИИ механики МГУ (Москва) и ОИПИ НАН Беларуси (Минск). Подтверждена функциональность и перспективность использования Т-системы в качестве базы для создания высокоуровневой среды поддержки подобных конфигураций.
- Проверен режим удаленного доступа из Минска к ресурсам пакета STAR-CD¹⁰, установленного на суперкомпьютере «СКИФ» в ИПС РАН (Переславль-Залесский).
- Проверен режим удаленного доступа из Минска с помощью Web-интерфейса к ресурсам установленного на суперкомпьютере «СКИФ» в ИПС РАН (Переславль-Залесский) программного комплекса для расчета процессов в PECVD-реакторах.
- Показаны результаты использования ведущего в области механики деформируемого твердого тела инженерного пакета LS-DYNA, установленного на суперкомпьютере «СКИФ» в г. Минске (УП «НИИ ЭВМ»).

В Программе «СКИФ» было предусмотрено и мероприятие, связанное с подготовкой и переподготовкой кадров для работы с высокопроизводительными установками семейства «СКИФ». В рамках данного мероприятия в летний период, каждый год, начиная с 2002 года и до сих пор в Переславле-Залесском проводятся студенческие школы-семинары по Программе «СКИФ», с участием студентов и аспирантов из России, Белоруссии, Украины. На различных секциях школы студенты занимаются инженерными расчетами и программированием на Т-системе, освоением технологий, использованных в семействе суперкомпьютеров «СКИФ». В последние дни работы школ проводятся конференции, где каждый участник докладывает о результатах, полученных в рамках школы.

В подразделах, перечисленных ниже, мы остановимся несколько подробнее на некоторых результатах программы «СКИФ»:

- GRACE и OpenTS: развитие реализаций Т-системы;

¹⁰STAR-CD — один из ведущих инженерных пакетов в области механики жидкости и газа.

- собственное программное обеспечение для семейства суперкомпьютеров «СКИФ»;
- разработка сервисной сети ServNet (версии 1 и 2) для супер-ЭВМ семейства «СКИФ»;
- вхождение в мировой рейтинг Top500 суперкомпьютеров семейства «СКИФ» Ряда 2;
- общая оценка результатов суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства.

9.2. GRACE и OpenTS: развитие реализаций Т-системы

В рамках выполнения Программы «СКИФ» продолжались исследования, связанные с Т-системой. Были разработаны две новые версии Т-системы (в сотрудничестве с МГУ имени М. В. Ломоносова):

- GRACE (1999–2002 гг.) — версия [21–23], поддерживающая в качестве базового Т-языка синтаксически-гладкое расширение языка С. Система GRACE в 2002 году прошла приемочные (государственные) испытания с присвоением литеры О₁.
- OpenTS (2003–2004 гг.) — Т-система с открытой архитектурой, реализованная в виде надстройки (суперструктуры) над языком С++. Завершение разработки первой версии и прохождение приемочных испытаний OpenTS было выполнено в 2004 году, по результатам испытаний системе OpenTS была присвоена литера О₁.

В новой версии Т-системы с открытой архитектурой (OpenTS) были поддержаны новые возможности: эффективная поддержка архитектуры SMP, асинхронный режим обменов внутри Т-системы, механизм обеспечения отказоустойчивости, новая система сбора статистики, механизм трассировки Т-программ. Была проведена модификация языковых средств Т-системы (компилятора TG++, конвертора с языка Т++ и транслятора с языка Т-Fortran) в соответствии с новыми возможностями Т-системы.

9.3. Собственное программное обеспечение для семейства суперкомпьютеров «СКИФ»

Огромные усилия, большая доля времени, сил и средств были потрачены в Программе «СКИФ» на разработку программного обеспечения (ПО) и литерной программной документации (ПД). Отметим,

что вся ПД была разработана в соответствии с требованиями ЕСПД, проведена через нормоконтроль, успешно прошла приемочные (государственные) испытания с присвоением литеры «О₁». Общий объем комплекта ПО для семейства суперкомпьютеров «СКИФ» составляет 10 дисков CD-ROM. Перечислим основные компоненты данного комплекта:

- стандартное ядро ОС Linux и модифицированное ядро ОС Linux-SKIF (с большим уровнем информационной безопасности);
- параллельная файловая система PVFS-SKIF, модифицирована под специфику семейства «СКИФ»;
- система очередей OpenPBS-SKIF (модифицирована);
- оригинальная система мониторинга и управления установками семейства «СКИФ» Flame-SKIF, среди прочего включающая и поддержку сервисной сети СКИФ-ServNet;
- TDB — распределенный интерактивный отладчик MPI-программ, с поддержкой отладки T-программ (отечественная замена дорогостоящей системы TotalView);
- 12 адаптированных к особенностям семейства «СКИФ» свободных пакетов, библиотек и параллельных приложений;
- 7 прикладных программных систем, разработанных в среде OpenTS:
 - MultiGen (ЧелГУ) — система расчета биологической активности молекул с учетом их конформационного многообразия, прогнозирование и проектирование в химии (лекарства и другие соединения);
 - пакет расчета аэромеханики подвижных плохообтекаемых тел (НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова);
 - обработка и поиск XML-данных (НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова);
 - программная система формирования фокусированных радиолокационных изображений (НИИ КС);
 - программная система моделирования широкополосных пространственно-временных радиолокационных сигналов (НИИ КС);
 - программная система поточечной обработки цветных и полутоновых видеоданных космических систем дистанционного зондирования (НИИ КС);

- программная система классификации гиперспектральных изображений со спутника LANDSAT (ИПС РАН);
- 14 параллельных приложений собственной разработки, среди которых:
 - ИПС РАН, Росгидромет: модель проф. В. М. Лосева и другие метеорологические модели;
 - ОИПИ НАН Беларуси, Республиканский Гидрометеорологический центр: численные методы прогнозирования погоды, модели регионального прогноза погоды на 48 часов;
 - ИЦИИ ИПС РАН: три прикладные системы искусственного интеллекта: АКТИС — классификация текстов по заданным в процессе обучения классам (глубокий анализ текста, высокая релевантность); INEX — извлечение знаний из неструктурированных текстов на естественном языке, заполнение заданной реляционной БД; MIRACLE (система разработана на OpenTS) — инструментальная система для проектирования интеллектуальных систем;
 - ОИПИ НАН Беларуси, РНПЦ «Кардиология» и УП «НИИЭВМ»: кардиологический комплекс на базе кластера «СКИФ»;
 - ИВВиИС: кардиологическая экспертная система реального времени «ADEPT-C».

9.4. Сервисная сеть ServNet (версии 1 и 2) для суперЭВМ семейства «СКИФ»

Разработка сервисной сети [24] (ServNet версии 1 и 2) для суперЭВМ интересна тем, что удалось небольшим и простым аппаратным изделием поддержать достаточно богатый набор возможностей. С помощью управляющей сети ServNet можно было:

- селективно включать и отключать питание на любом узле суперЭВМ;
- селективно выполнить аппаратный сброс любого вычислительного узла;
- селективно осуществлять подключение к порту RS232 узла, а это, в свою очередь, обеспечивает взаимодействие с узлом кластера в консольном режиме Linux serial console, а также возможность удаленной работы в режиме BIOS Setup, если

BIOS узла поддерживает взаимодействие через последовательный интерфейс.

Возможность удаленного доступа с управляющей станции на сериальную консоль узла позволяет реализовывать различные функции управления узлом:

Упомянутые выше возможность работы с *Linux serial console* вычислительного узла и удаленной работы в режиме BIOS Setup.

- Возможность управления загрузчиком (LILO) операционных систем вычислительного узла. На сериальную консоль может быть сконфигурировано управление LILO и, если на узлах установлено несколько различных операционных систем, то можно с управляющей станции выбрать тип ОС, загружаемой на каждом узле и таким образом на всем кластере (или на части узлов) может быть загружена та или иная ОС (из предустановленных на узле).
- Возможность изменять параметры загрузки ядра Linux на каждом узле.
- Возможность «посмертного» просмотра некоторого количества последних строк (до 4 Кбайтов), выведенных на сериальную консоль. При «зависании» вычислительной системы, когда уже не работают ни системная, ни вспомогательная сети кластера, в независимой памяти адаптера ServNet сохраняется информация о состоянии системы перед «зависанием». Таким образом, с управляющей станции можно восстановить картину последних «мгновений жизни» вычислительной системы и понять причину сбоя. Данная возможность поддержана только в ServNet, ее нет в аналогичных западных разработках.

9.5. Вхождение в мировой рейтинг Top500 суперкомпьютеров семейства «СКИФ» Ряда 2

Из шестнадцати опытных образцов и вычислительных установок семейства «СКИФ», созданных в 2000–2003 гг., две суперкомпьютерные установки вошли в мировой рейтинг пятисот самых мощных ЭВМ Top500¹¹.

¹¹<http://www.top500.org/>



Рис. 1. СуперЭВМ «СКИФ К-1000»

- В ноябре 2003 года суперЭВМ «СКИФ К-500» заняла 405 место в рейтинге Top500, показав пиковую производительность 716.8 Gflops, реальную производительность на задаче Linpack — 471.6 Gflops (65.79% от пиковой).
- В ноябре 2004 года суперЭВМ «СКИФ К-1000» (Рис. 1) заняла 98 место в рейтинге Top500, показав пиковую производительность 2534 Gflops, реальную производительность на задаче Linpack — 2032 Gflops (80.19% от пиковой).

Добавим, что суперкомпьютер «СКИФ К-1000» на момент создания (октябрь 2004 года) являлся самой мощной из всех вычислительных систем, установленных на территориях России, СНГ и Восточной Европы. В рейтинге Top Cranch (поддержан агентством перспективных оборонных исследований — DARPA) суперкомпьютер «СКИФ К-1000» занял тогда первое место в мире на задаче расчета столкновения трех автомобилей.

В ноябре 2004 г. суперкомпьютеры «СКИФ К-1000» и «СКИФ К-500», конструкторская и программная документация суперкомпьютеров Ряда 2 семейства «СКИФ» успешно прошли государственные испытания с присвоением литеры «О₁». Государственная комиссия отметила готовность промышленного выпуска суперкомпьютеров семейства «СКИФ» Ряда 2 с производительностью до 15 триллионов операций в секунду (15 Tflops), соответствующих международным стандартам по техническим показателям, составу, комплектности и программному обеспечению. Очень важным результатом программы «СКИФ» являлась подготовленная производственная база, возможности участников программы «СКИФ» позволяющие серийно выпускать:

- суперкомпьютеры с производительностью до 15 Тфлопс — по технологиям, ранее проверенным на суперЭВМ Ряда 2 семействе «СКИФ»;
- отечественные адаптеры высокоскоростных сетей SCI для кластеров — полных аналогов адаптеров фирмы Dolphin (SCI PCI64/66 Dolphin ICS, 1D- и 2D-тор, D330, D337, D335);
- адаптеры сервисной сети СКИФ-ServNet.

9.6. Общая оценка результатов суперкомпьютерной программы «СКИФ» Союзного государства

Программа «СКИФ» была признана одной из самых успешных программ Союзного государства. Так, в Постановлении Совета Министров Союзного государства от 21 апреля 2005 г. № 17 «Об итогах выполнения 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» вместо дежурного «принять представленный отчет» было сказано:

Совет Министров Союзного государства постановляет:

1. Считать завершенной программу 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» и одобрить представленный Национальной академией наук Беларуси и Федеральным агентством по

науке и инновациям (Министерство образования и науки Российской Федерации) отчет об итогах ее реализации в 2000–2004 годах (прилагается).

2. Федеральному агентству по науке и инновациям и Национальной академии наук Беларуси подготовить и внести установленным порядком в Совет Министров Союзного государства предложение о дальнейшем развитии работ в области создания и разработки высокопроизводительных вычислительных систем в рамках Союзного государства.

3. Настоящее постановление вступает в силу со дня его подписания.

Немного позже эти результаты получили и высокую правительственную оценку. За работу «Разработка конструкторской и программной документации, подготовка промышленного производства и выпуск образцов высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров) семейства «СКИФ» Ряда I и Ряда II» была присуждена премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2006 год группе исполнителей Программы «СКИФ». Лауреатами стали:

- От ИПС РАН, Переславль-Залесский: Айламазян Альфред Карлович (посмертно), Абрамов Сергей Михайлович, Адамович Алексей Игоревич, Коваленко Максим Русланович, Пономарев Александр Юрьевич, Шевчук Юрий Владимирович;
- От НИЦЭВТ, Москва: Слущкин Анатолий Ильич;
- От компании «Т-Платформы», Москва: Опанасенко Всеволод Юрьевич;
- От ОИПИ НАН Беларуси, Минск: Анищенко Владимир Викторович, Парамонов Николай Николаевич.

Пожалуй, самым важным результатом программы «СКИФ» можно назвать восстановление и создание кооперационных связей, организацию такой команды исполнителей, которой по плечу самые сложные задачи в области суперкомпьютерных технологий.

Это особенно ярко проиллюстрировал опыт создания «СКИФ К-1000». Как отмечалось, в ноябре 2004 г. суперкомпьютер «СКИФ К-1000» занял 98-е место в рейтинге Top500. При этом суперкомпьютеры из «первой сотни», кроме участников программы «СКИФ», выпускали в это время только США, Япония и Китай. Многие другие

страны Западной Европы и Азии обладали развитой суперкомпьютерной отраслью и создавали суперкомпьютеры, входящие в Топ500, но не в «первую сотню»!

Этот факт доказывал тезис, что на этот момент команда исполнителей программы «СКИФ» действительно достигла мирового уровня в освоении суперкомпьютерных технологий. И не использовать такой ресурс в интересах России и Беларуси было бы ошибкой.

10. 2005–2007 годы: бюрократические проволочки и потеря темпа

Еще в середине 2004 г. в сотрудничестве ИПС РАН с белорусскими и российскими организациями были подготовлены предложения по формированию новой суперкомпьютерной программы Союзного государства: «Разработка и использование программно-аппаратных средств ГРИД-технологий и перспективных высокопроизводительных (суперкомпьютерных) вычислительных систем семейства «СКИФ» (шифр «СКИФ-ГРИД»)».

К сожалению, предложения по формированию новой суперкомпьютерной программы Союзного государства «СКИФ-ГРИД» рассматривались, согласовывались, утверждались в российских ведомствах¹² долгих три с лишним года: с 2004 по март 2007 года. А без государственной поддержки продолжения научного направления программы «СКИФ» научный задел и потенциал команды исполнителей программы «СКИФ» безнадежно терялся.

Общеизвестно, что мировые суперкомпьютерные технологии развиваются по закону Мура — приблизительно «удвоение за год», — по всем основным показателям. Это обстоятельство означает, что 1 год простоя приводит к потере 1/2 части задела и потенциала; 2 года простоя — от задела и потенциала остается 1/4 часть и т. д. Это позволяет оценить тот ущерб, который был нанесен бюрократическими проволочками научному заделу и потенциалу, ранее огромным трудом созданному исполнителями программы «СКИФ».

В силу указанных обстоятельств, в 2005–2007 годах исследования в области суперкомпьютерных и grid-технологий институтом выполнялись в инициативном порядке и в рамках фундаментальных исследований Российской академии наук.

¹²В Беларуси согласования были завершены весной 2005 года.

В 2005 году была реализована распределенная вычислительная сеть T-Grid в г. Переславле-Залесском, объединяющая в единую сеть часть вычислительных ресурсов ИПС РАН и Университета города Переславля. Вычисления в сети T-Grid производились с использованием среды динамического автоматического распараллеливания программ — T-Системы. Проведены эксперименты по запуску T-приложений на гетерогенных кластерах и системе T-Grid, а также по использованию стенда T-Grid в метакластерной установке (120 процессоров).

В это же время была начата разработка основных принципов и аппаратных компонент сервисной сети (ServNet версии 3) для суперЭВМ семейства «СКИФ» Ряда 3 с большим числом узлов — десятки тысяч и более. Отличия данной версии ServNet от предыдущих были в следующем:

- ServNet версии 3 был ориентирован на суперЭВМ, созданные на базе blade-решений — вычислитель суперЭВМ собирался из шасси, внутри шасси устанавливались вычислительные модули;
- соответственно, в сети ServNet версии 3 использовались две печатные платы: ServNet CNB — плата управления шасси и подключенные к ней платы ServNet T-60 — по одной плате на каждый вычислительный узел;
- для связи в единую сеть платы ServNet T-60 снабжались интерфейсами RS 485, а плата ServNet CNB — интерфейсами RS 485 и Ethernet 10Base-T;
- в рамках монтажного шкафа все платы ServNet CNB объединяются сетью RS 485. И все платы ServNet T-60 каждого шасси подключаются при помощи RS 485 к соответствующей плате ServNet CNB;
- в каждом шкафу одна из плат ServNet CNB (или несколько для надежности) подключаются к Ethernet-сегменту, охватывающему все шкафы, и управляющие станции суперЭВМ.

Таким образом, была обеспечена практически безграничная масштабируемость сервисной сети для суперЭВМ любого диапазона производительности.

ServNet версии 3 была востребована при построении суперкомпьютеров «СКИФ МГУ» и «СКИФ Урал» в 2008 году. К этому времени разработка была полностью завершена, и был развернут выпуск аппаратуры ServNet версии 3 на базе опытного производства ИПС

РАН. Всего в короткий срок нами было выпущено необходимое (для суперЭВМ «СКИФ МГУ» и «СКИФ Урал») количество изделий: более 800 плат ServNet T-60 и 80 плат ServNet CNB.

Выполнялись в эти же годы и работы по развитию OpenTS — современной реализации T-системы. В 2004 году на Open TS обратила внимание корпорация Microsoft. В результате нескольких рабочих обсуждений был оформлен контракт на сравнительный анализ эффективности использования системы OpenTS и библиотеки MPI для написания прикладных программ. Задача исследования была поставлена следующим образом. Корпорация Microsoft выбрала два приложения¹³, которые разрабатывались многие годы на базе библиотеки MPI усилиями сотен программистов — сторонников движения Open Source. Таким образом, выбранные приложения были максимально оптимизированы (отшлифованы) — насколько это позволяет MPI-подход. Сотрудники ИПС РАН в сжатые сроки, не более 3-х месяцев, должны были переписать две отобранные системы с MPI на OpenTS. Результат считался бы положительным, если в T-системе код получился бы более ясным и компактным. При этом допускалась потеря производительности до 30%.

Тем самым корпорация Microsoft явно выражала свои предпочтения: допуская даже небольшую потерю производительности программ важно повысить производительность труда программистов, обеспечить более ясный и компактный код (а, значит, и более надежный код: меньше строчек — меньше места для ошибок, большая ясность — меньше причин для ошибок).

Результаты данной работы были неожиданными даже для нас:

- огромные программные комплексы были в двухмесячный срок 2–3 программистами переписаны на OpenTS, отлажены и запущены;
- было достигнуто радикальное улучшение компактности кода — T-программы были значительно меньше, чем MPI-программы: для Powray — в 7–15 раз, а для ALCMD — в 7 раз;
- при этом T-программы и MPI-программы показывали примерно одинаковую производительность.

¹³Powray — пакет построения реалистичных трехмерных сцен методом трассировки лучей; ALCMD — программа для расчетов в области молекулярной динамики.

Данный сравнительный анализ выполнялся в операционной системе Linux — для которой и была изначально разработана система OpenTS. Результаты анализа показали корпорации Microsoft интересными, и в 2006 году наше сотрудничество было продолжено в рамках нового контракта, целью которого был перенос OpenTS из операционной системы Linux в операционную систему Windows Compute Cluster Server. Контракт был успешно выполнен в 2006 году: ядро T-системы было перенесено в WinCCS, транслятор с языка T++ был интегрирован в Visual Studio, был разработан интерактивный инсталлятор, справочная подсистема и все остальные компоненты, традиционные для систем программирования под Windows. Результаты представлялись на международной конференции и выставке «Supercomputing'2006», Тампа, США, ноябрь, 2006. В последующие годы (2007–2008) новые версии OpenTS нами создавались в кросс-платформенном варианте: один и тот же код OpenTS можно было собрать в дистрибутив для операционной системы Linux и для Windows Compute Cluster Server.

В 2005–2007 годах в ИПС РАН была разработана система сбора данных о показаниях сенсоров узлов вычислительных кластеров, в которой осуществляется постоянный сбор данных и накопление информации об отказах оборудования. Система предназначена не только для сбора информации, но и для упреждающего предсказания на базе собранных данных вероятного отказа оборудования, а также нетипичного поведения аппаратных и программных средств супер-ЭВМ. Система установлена на разных суперкомпьютерах семейства «СКИФ»: Переславль, Москва, Минск, Челябинск, Томск и др.

В 2006–2007 году в дополнение к T-системе была создана и развивалась библиотека T-Sim параллельного программирования на основе шаблонных классов C++. В ее состав включен набор шаблонов — функций высшего порядка, применяющих операции, переданные пользователем (программистом), к множеству входных данных — модель map-reduce. Поведение шаблонов определяется как классами-стратегиями, переданными программистом, так и типами элементов, составляющих входное и результирующее множества. При создании параллельных программ на основе T-Sim разработчик может использовать как высокоуровневые функции-шаблоны (в наиболее простых случаях), так и реализуя нестандартные решения с использованием механизмов T-системы или механизмов активных сообщений. Это

позволяет пользователю выбирать инструменты, наиболее адекватные задаче.

В 2006 году нами был предложен новый подход к созданию вычислительных Web-сервисов на основе системы автоматического динамического распараллеливания программ, основанный на автоматической генерации вычислительных grid-сервисов по описанию T-программ. Были разработаны программные средства генерации grid-сервисов, поддерживающие метакластерные и гетерогенные конфигурации за счет механизма сериализации объектов в XML-форму. Была реализована возможность использования протокола MPI для обмена данными и другие дополнительные возможности. Разработанные программные средства предназначены для организации инструментальной среды создания grid-приложений с использованием системы автоматического динамического распараллеливания программ T-Sim.

Нами были выполнены исследования среды на основе интеграции разнородных источников данных Open Grid Software Architecture — Data Access Integration (OGSA-DAI) (данный пакет является программным обеспечением с открытыми исходными кодами, что позволяет дополнять его необходимыми модулями). Создан набор дополнений к пакету OGSA-DAI, позволяющий осуществлять подключение источников данных XML СУБД Sedna. В рамках проекта «Виртуальная обсерватория» — веб-средства предоставления доступа к данным grid-сред для конечных пользователей, — создана система самоописания структур разделов Виртуальной обсерватории и поисковый сервис, включающий в себя ряд улучшенных пользовательских функций.

10.1. Июнь 2007–2008 год: Первый этап исполнения суперкомпьютерной программы «СКИФ-ГРИД» Союзного государства

К весне 2007 года было закончено формирование и согласование, и в июне 2007 года началось исполнение суперкомпьютерной Программы¹⁴ Союзного государства «СКИФ-ГРИД», в которой ИПС

¹⁴Исполнение: 2007–2010 годы, полное наименование программы: «Разработка и использование программно-аппаратных средств ГРИД-технологий и перспективных высокопроизводительных (суперкомпьютерных) вычислительных систем семейства «СКИФ»».

РАН является головным исполнителем от России. Программа включает четыре направления работ:

- *GRID-технологии*: исследование, создание, развитие и внедрение средств высокопроизводительных вычислений на основе GRID-технологий; поддержка гетерогенных, территориально-распределенных вычислительных комплексов.
- *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 (аппаратных и программных) средств защиты информации в создаваемых вычислительных комплексах.
- *Пилотные системы*: реализация прикладных систем в перспективных областях применения создаваемых высокопроизводительных вычислительных систем, решение актуальных задач на суперкомпьютерах и GRID-системах, усилия по подготовке и переподготовке кадров в области суперкомпьютерных и GRID-технологий.

К исполнению Программы привлечено большое количество организаций. В том числе, российских исполнителей программы — более 20, среди них: ГЦ РАН, ИКИ РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ИППИ РАН, ИПХФ РАН, ИХФ РАН, НИВЦ МГУ, НИИ КС, НИИФХБ МГУ, НИИЯФ МГУ, ННГУ, НПЦ «Элвис», ОИЯИ, ООО «Т-Платформы», ООО «ЮникАйСиз», ПензГУ, СПБАЭП, СПбГПУ, ТГУ, Химический факультет МГУ, ЧелГУ, ЮУрГУ. В последующих разделах обсуждаются только основные результаты первого этапа выполнения программы «СКИФ-ГРИД».

10.2. Разработка решений для Grid-технологий

Среди разработок для совершенствования системы доступа к научным данным скажем о «Виртуальной обсерватории». В этой области выполнены: развитие механизмов работы с источниками данных и метаданных, разработка дополнительных средств внешнего поиска, включая поддержку нечетких запросов, и обмена данными между логически взаимосвязанными виртуальными обсерваториями, а также улучшение пользовательского и административного интерфейсов.

Была выполнена еще одна интересная разработка — программное обеспечение SKIF@Home, которое позволяет развертывать вычислительные сети, использующие для высокопроизводительных, распределенных вычислений мощности неполностью загруженных персональных компьютеров (так называемых «компьютеров-доноров»). От аналогов (таких как, например, пакет BOINC — основы известных проектов SETI@Home и Folding@Home) ПО SKIF@Home отличает использование технологии виртуальных машин для обеспечения «контракта» между донором и организаторами сети: разграничение программного окружения вычислительных приложений и компьютера, на котором устанавливается ПО SKIF@Home, ограничения объемов памяти, используемой сетью. Разработана оригинальная методика ограничения доли процессорного времени: при помощи графического интерфейса администратор компьютера-донора способен задать ограничения с точностью до нескольких процентов. В состав разработанного ПО входит веб-сервис, проводящий точный учет ресурсов (процессорного времени, памяти), предоставленного для проведения расчетов отдельными донорами. Нами была показана работоспособность в прототипе среды SKIF@Home распределенных приложений, разработанных с использованием библиотеки X-Com, что открывает широкие возможности по использованию среды SKIF@Home.

В эти же годы сотрудниками института:

- была усовершенствована система предсказания отказов кластерных установок (СПОКУ);
- разработан ряд алгоритмов статистического анализа данных показаний сенсоров кластерных установок;
- разработана и реализована схема предсказания отказов оборудования на основе экстраполяции показаний сенсоров в ближайшее будущее (при этом вероятным отказом считается выход прогнозного значения за пределы расчетного интервала);
- разработана и реализована схема оценки качества предсказаний, а также сопоставления вновь получаемых данных со статистической моделью данной кластерной установки;
- разработана система оповещения администраторов установок о возможных отказах оборудования, усовершенствован веб-сайт, позволяющий администраторам просматривать и анализировать данные, накопленные в хранилище.

10.3. Дальнейшее развитие OpenTS

Система параллельного программирования OpenTS доработана до поддержки гетерогенных распределенных вычислительных архитектур (grid-систем, территориально-распределенных неоднородных вычислительных систем). В том числе, в OpenTS поддержана отказоустойчивость исполнения T-приложений в версии системы OpenTS для платформы Windows:

- доработанная в части отказоустойчивости реализация наиболее употребимого подмножества функций MPI—DMPI;
- доработанная в части отказоустойчивости реализация среды исполнения T++ программ.

Была разработана система генерации Web-сервисов для T-функций в системе OpenTS для платформы Windows Compute Cluster Server (WCCS). ИПС РАН также были разработаны средства визуализации процесса параллельного исполнения T++ программ для платформы WCCS, позволяющие наглядно отображать во время исполнения ключевые характеристики среды исполнения T++.

В системе OpenTS были поддержаны многоядерные вычислительные архитектуры под управлением ОС семейств UNIX и Windows. Осуществлен перенос под Windows модуля OpenTS, который позволяет T-программе эффективно задействовать все вычислительные ядра всех процессоров SMP-системы.

10.4. СКИФ-Полигон и пилотные прикладные системы

Помимо одиночных суперкомпьютерных установок упомянем еще об одном результате, который достигнут в рамках первого этапа исполнения программы «СКИФ-ГРИД»: это создание распределенной вычислительной системы «СКИФ-Полигон» (см. Рис. 2). «СКИФ-Полигон» объединяет суперкомпьютерные центры, в которых расположены суперЭВМ семейства «СКИФ» и научно-исследовательские центры, которым необходим доступ к вычислительным ресурсам. К осени 2008 года были объединены ресурсы суперкомпьютерных центров, расположенных в самых разных городах Беларуси и России: Минск, Москва, Переславль-Залесский, Челябинск, Томск, Ставрополь, Владимир и другие города. Суммарная пиковая производительность системы «СКИФ-Полигон» сегодня превышает 100 Tflops. В дальнейшем предусмотрено расширение состава участников «СКИФ-Полигона» и увеличение его производительности. Система «СКИФ-

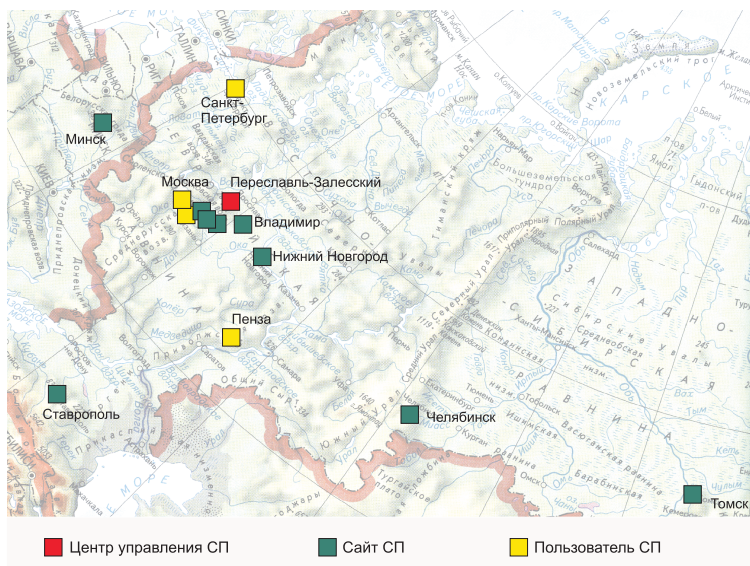


Рис. 2. Схема распределенной вычислительной системы SKIF-Полигон

Полигон» является эффективной платформой, на которой проводятся разработки системного и прикладного программного обеспечения для суперЭВМ семейства «СКИФ». Разрабатываемые программные комплексы предназначены для выполнения научных и инженерных расчетов в таких важнейших областях как:

- исследования в области обработки данных в здравоохранении (например, система для обработки и хранения 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

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики СуперЭВМ «СКИФ МГУ»

Производительность пиковая/Linpack:	60 / 47.17 Тflops (КПД=78.6%)
Вычислительных узлов:	625
Число CPU Intel Xeon E5472, 3,0 GHz / ядер:	1250 / 5000
Суммарная память узлов RAM / HDD:	5.5 ТБ / 15ТБ
Конструктив узла:	blade
Монтажных шкафов вычислителя:	14
Системная сеть:	Infiniband DDR
Задержка при передаче пакетов данных:	< 2.2 мкс
Вспомогательная сеть:	Gigabit Ethernet
Сервисная сеть:	СКИФ ServNet v.3 + IPMI
Занимаемая площадь:	96 кв.м.
Потребляемая мощность установки в целом:	520 кВт

- и другие исследования.

10.5. СуперЭВМ Ряда 3 семейства «СКИФ»

К марту 2008 года было завершено создание еще двух суперкомпьютеров Ряда 3 семейства «СКИФ»:

- «СКИФ МГУ», Linpack-производительность 47.17 Тflops; пиковая производительность 60 Тflops, Таблица 1;
- «СКИФ Урал», Linpack-производительность 12.2 Тflops, пиковая производительность 16 Тflops.

Обе эти суперЭВМ созданы на базе одинаковых технических решений, разработанных в рамках первого этапа программы «СКИФ-ГРИД». В суперЭВМ использованы самые передовые технические решения:

- четырехъядерные процессоры, выполненные по технологии 42 нм — Intel Xeon E5472, 3.0 GHz — использованы впервые в России;
- системная сеть DDR InfiniBand; вспомогательная сеть Gigabit Ethernet, сервисная сеть СКИФ ServNet v.3;
- высокая плотность упаковки в «СКИФ МГУ» и «СКИФ Урал» достигнута за счёт использования отечественных серверов-лезвий, имеющих плотность вычислительной мощности на 20% лучшую, чем у любых других серверов-лезвий.

Суперкомпьютеры Ряда 3 «СКИФ МГУ» и «СКИФ Урал» предназначены для решения задач со сложной логикой и большим количеством вычислений.

10.6. Вхождение суперЭВМ семейства «СКИФ» в рейтинг Top500

В рамках исполнения программы «СКИФ» и первого этапа программы «СКИФ-ГРИД» было выпущено девятнадцать опытных образцов суперкомпьютеров Рядов 1, 2 и 3 семейства «СКИФ», вне рамок Программ в различные организации России и Беларуси поставлено более 60 суперкомпьютеров семейства «СКИФ».

Пять суперкомпьютеров семейства «СКИФ» вошли в мировой рейтинг Top500 — пятисот самых мощных суперЭВМ мира. Это очень серьезный результат и для России, и для Беларуси, поскольку за всю историю развития вычислительной техники в СССР и в странах СНГ было всего шесть суперкомпьютеров, которые вошли в мировой рейтинг Top500 с признанием мировым сообществом их отечественного происхождения. Вот эти шесть суперЭВМ (см. Рис. 3):

- суперЭВМ «МВС 1000М» вошла в рейтинг Top500 в июне 2002 года заняв 64 место с производительностью 0.734 Tflops на тесте Linpack, пиковая производительность — 1.024 Tflops. Разработчики: НИИ «Квант», ИПМ имени М. В. Келдыша РАН, МСЦ РАН;
- суперЭВМ «СКИФ К-500» вошла в рейтинг Top500 в ноябре 2003 года заняв 405 место с производительностью 0.423 Tflops на тесте Linpack, пиковая производительность — 0.717 Tflops;
- суперЭВМ «СКИФ К-1000» вошла в рейтинг Top500 в ноябре 2004 года заняв 98 место с производительностью на тесте Linpack 2 Tflops, пиковая производительность — 2.534 Tflops;
- суперЭВМ «СКИФ Cyberia» вошла в рейтинг Top500 в июне 2007 года заняв 105 место с производительностью на тесте Linpack 9.013 Tflops, пиковая производительность — 12.002 Tflops;
- суперЭВМ «СКИФ Урал» вошла в рейтинг Top500 в июне 2008 года заняв 282 место с производительностью на тесте Linpack 12.2 Tflops, пиковая производительность 15.9 Tflops;

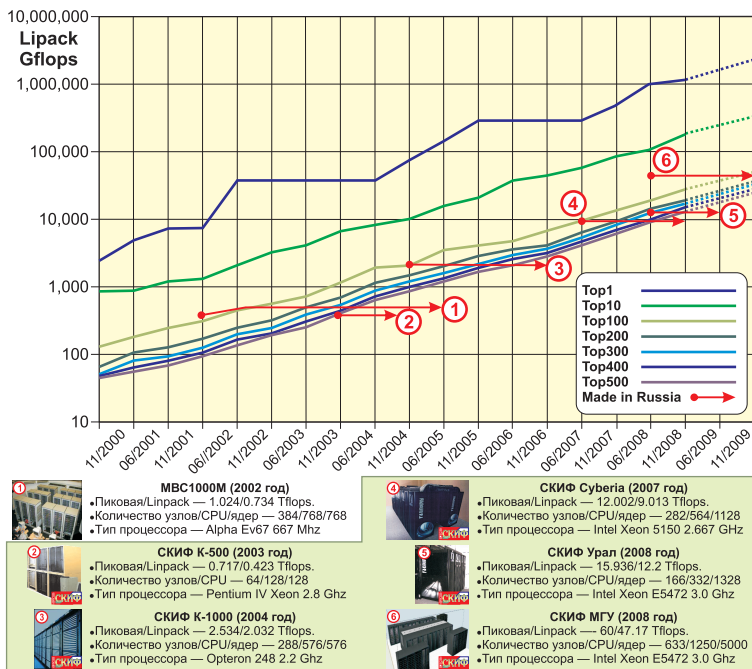


Рис. 3. Все шесть признанные отечественные суперЭВМ в Top500. Пять из шести — суперкомпьютеры семейства «СКИФ»

- суперЭВМ «СКИФ МГУ» вошла с рейтинг Top500 в июне 2008 года, заняв 36 место с производительностью на тесте Linpack 47.1 Tflops, пиковая производительность 60 Tflops.

Кроме этих шести, были и другие суперЭВМ на территории России, которые входили в список Top500, но они все являлись импортными вычислительными системами.

Еще раз подчеркнем: из шести вошедших в рейтинг Top500 отечественных суперЭВМ пять являются суперкомпьютерами семейства «СКИФ». То есть, развитие суперкомпьютерных технологий на территории СНГ сегодня в подавляющей доле обеспечено союзными суперкомпьютерными программами «СКИФ» и «СКИФ-ГРИД». Это иллюстрирует большое значение, которое играют научно-технические



Рис. 4. СуперЭВМ семейства «СКИФ» Ряда 3, одновременно вошедшие в последнюю редакцию (июнь 2008 года) рейтинга Top500

программы Союзного государства в деле развития инновационных и наукоемких технологий в России и Беларуси.

Завершая обсуждение вхождения суперкомпьютеров семейства «СКИФ» в мировой рейтинг Top500 отметим следующее обстоятельство: в последней редакции (июнь 2008 года) рейтинга Top500 Россия впервые получила следующие результаты:

- (1) В рейтинге Top500 одновременно присутствовало три отечественные суперЭВМ семейства «СКИФ» Ряда 3 (см. Рис. 4): «СКИФ МГУ», «СКИФ Урал» и «СКИФ Cyberia». До этого, как правило, в выпусках рейтинга либо находилась одна отечественная суперЭВМ, либо ни одной.
- (2) СуперЭВМ «СКИФ МГУ» заняла в рейтинге 36 место — это самое высокое достижение российских суперЭВМ.
- (3) В аналитическом отчете, которым сопровождается выпуск рейтинга Top500, Россия впервые вышла из категории «и другие страны» и была отмечена отдельно.

В Таблице 2 представлены основные параметры суперкомпьютеров семейства «СКИФ» Ряда 1, 2, 3 и 4. Кроме того в таблице указаны элементы суперЭВМ, являющиеся отечественной интеллектуальной собственностью — в дополнение к общим схемотехническим решениям, конструкторской и программной документации на суперЭВМ семейства «СКИФ», которые всегда разрабатываются нами и принадлежат нам.

ТАБЛИЦА 2. Суперкомпьютеры семейства «СКИФ»
Ряд 1, 2, 3 и 4

Ряд	Годы, пиковая производительность (расчетный диапазон)	Ядер в CPU/разрядность	Сетевые решения вспомогательной/системной сети	Форм-фактор (CPUс/U)	Примечание
1	2000–2003, 0.020–0.5 TFlops	1/32	FastEthernet/ SCI (2D-top), Myrinet	4U–1U (0.5–2)	Отечественный SCI (2D-top). Охлаждение: воздух
2	2003–2007, 0.1–5 TFlops	1/32–64	GbEthernet/ SCI (3D-top), Infiniband	1U, HyperBlade (2)	ServNet v.1, v.2. Ускорители: FPGA, ОВС. Охлаждение: воздух
3	2007–2008, 5–150 TFlops	2–4/64	GbEthernet/ Infiniband DDR	1U, blades 20 CPU в 5U (2–4)	ServNet v.3. Охлаждение: воздух-вода-фреон
4	2009–2011, 500–5 000 TFlops	4–8/64	Infiniband QDR/ отечественная системная сеть (3D-top)	blades 64 CPU в 6U (10.667)	Новые подходы к охлаждению. Ускорители: FPGA, GPU, МЦОС...

11. Перспективы развития суперкомпьютерных работ в ИПС РАН. Суперкомпьютеры Ряда 4 семейства «СКИФ»

Суперкомпьютеры Ряда 1, 2 и 3 — это разработки, которые уже выполнены в рамках программы «СКИФ» и первого этапа программы «СКИФ-ГРИД». На втором этапе запланирована разработка технических решений для суперЭВМ Ряда 4. Эта работа уже во многом сделана: выполнены большая часть исследований и часть конструкторских разработок. При наличии достаточного финансирования команда исполнителей программы «СКИФ-ГРИД» готова завершить

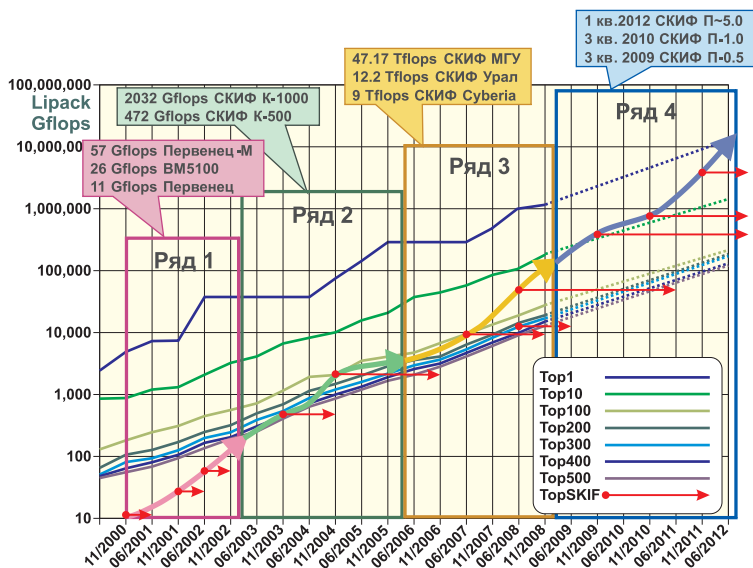


Рис. 5. Семейство суперЭВМ «СКИФ»: Ряд 1, 2, 3 и 4

все исследования, подготовить конструкторскую и программную документацию и выпустить опытные образцы с пиковой производительностью (см. Рис. 5):

- к ноябрю 2009 года — 0.5 Pflops;
- к ноябрю 2010 года — 1.0 Pflops;
- к марту 2012 года — 5.0 Pflops.

В любом случае, в рамках программы «СКИФ-ГРИД» мы подготовим технические решения, всю необходимую конструкторскую документацию, изготовим модули, из которых возможно собрать такие суперЭВМ. Будут ли суперЭВМ семейства «СКИФ» Ряда 4 с производительностью 0.5–5 Pflops изготовлены в указанные сроки — это вопрос наличия политической воли и вопрос расширения финансирования данных работ. Потому что данные суперЭВМ — 0.5, 1 и 5 Pflops, — требуют соответствующего дополнительного финансирования работ. Мы надеемся, что и в дальнейшем Союзное государство

и Россия будет оказывать необходимую поддержку отечественных суперкомпьютерных разработок.

Благодарности

За то, что посчастливилось работать в Институте программных систем Российской академии наук, автор благодарен судьбе и тем людям, которые способствовали такому повороту в судьбе, в первую очередь: Айламазяну А. К. и Кондратьеву Н. В.

Автор благодарен всем сотрудникам ИПС РАН, с которыми выпала честь работать вместе в 1986–2008 гг., и всем коллегам из организаций-партнеров по суперкомпьютерным исследованиям нашего института: БГУ, БГУИР, ГЦ РАН, ИВВиИС, ИКИ РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ИППИ РАН, ИПХФ РАН, ИХФ РАН, Компания СКС, НИВЦ МГУ, НИИ КС, НИИ механики МГУ, НИИФХБ МГУ, НИИЭВМ, НИИЯФ МГУ, ННГУ, НПЦ «Элвис», ОИПИ НАН Беларуси, ОАО «НИЦЭВТ», ОИЯИ, ООО «ЮникАйСиз», ПензГУ, РосНИИ РП, СПБАЭП, СПбГПУ, ТГУ, Химический факультет МГУ, ЦНТК РАН, ЧелГУ, ЮУрГУ и др.

Список литературы

- [1] Абрамов С. М. Программа ДАРОС. Единая система электронных вычислительных машин. СПО ЕС2704. Руководство программиста. Ц5.00079-01 33 02. — М.: НИЦЭВТ, 1987. ↑5
- [2] Абрамов С. М., Барбан А П, Сибиркова Л А. *Средства взаимодействия с машиной динамической архитектуры в ОС 7 ЕС // 1-я Всесоюзная конференция «Проблемы создания суперЭВМ, суперсистем и эффект их применения», 15–17 сентября 1987 г. Т. 1.* — Минск: ИМ АН БССР, 1987, с. 97–98. ↑
- [3] Абрамов С. М., Барбан А П, Михнушев Д П, Сибиркова Л А. *Программное обеспечение комплекса ЕС ЭВМ: машина динамической архитектуры // Тематический сборник, серия ВТ. Вопросы РЭ, № 7, 1988, с. 1–25.* ↑
- [4] Абрамов С. М., Абакумов А А, Адамович А. И., Несеров И А, Пименов С. П., Рядченко А В, Хаткевич М. И., Шевчук Ю. В. *Концепция разработки ПО МДА // Тезисы докладов. Всесоюзная конференция молодых ученых и специалистов по проблемам кибернетики и вычислительной техники.* — Москва–Переславль-Залесский, 1989. ↑
- [5] Abramov S. M., Adamowitch A. I., Nesterov I. A., Pimenov S. P., Shevchuck Yu. V. *Principles of software tools implementation for multiprocessor with automatic dynamic parallelizing // The 16th International School Programming'91.* — Sofia, Bulgaria, 1991. ↑5
- [6] Пономарев А. Ю. Интерфейсная плата DAD005. Техническое описание. — М.: НИЦЭВТ, 1994. ↑5

- [7] Шевчук Ю. В. TTOLS. Электронный ресурс. — <http://www.botik.ru/~sizif/ttools/>, 1996. ↑5
- [8] IPCA: Transputer: Software: Compilers: Gcc: Электронный ресурс. Раздел «Internet Parallel Computing Archive». — <http://wotug.kent.ac.uk/parallel/transputer/software/compilers/gcc/pereslav1/>, 1996. ↑5
- [9] Abramov S.M., Adamowitch A.I., Nesterov I.A., Pimenov S.P., Shevchuck Yu.V. *Autotransformation of evaluation network as a basis for automatic dynamic parallelizing* // The 6th NATUG Meeting, NATUG'1993. Spring Meeting «Transputer: Research and Application». — Vancouver, Canada: IOS Press, May 10. ↑5
- [10] Абрамов С. М., Адамович А. И., Нестеров И. А., Пименов С. П., Шевчук Ю. В. *Автотрансформация вычислительной сети — основа для автоматического и динамического распараллеливания* // Теоретические и прикладные основы программных систем. — Переславль-Залесский: Институт программных систем РАН, 1994, с. 103–124. ↑5
- [11] Adamowitch A.I., Nesterov I.A., Pimenov S.P., Shevchuck Yu.V. *cT: an Imperative Language with Parallelizing Features Supporting the Computation Model “Autotransformation of the Evaluation Network”* // Parallel Computing Technologies: Third International Conference, 1995, с. 127–141. ↑5
- [12] Nesterov I.A., Suslov I.V. *Towards programming of numerical problems within the system providing automatic parallelizing* // The 7th SIAM Conference on Parallel Proc-Essing for Scientific Computing. — San-Francisco, CA, 1995, с. 716. ↑5, 6
- [13] Абрамов С. М., Адамович А. И. *T-система — среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ* // Программные системы. Теоретические основы и приложения ред. А. К. Айламазян. — М.: Наука-Физматлит, 1999, с. 201–214. ↑7
- [14] Адамович А. И., Коваленко М. Р., Коньшев А. П. *Реализация в T-системе программы построения качественных изображений трехмерных сцен методом трассировки лучей* // Программные системы. Теоретические основы и приложения ред. А. К. Айламазян. — М.: Наука-Физматлит, 1999, с. 224–233. ↑7
- [15] Абрамов С. М., Адамович А. И., Коньшев А. П. *T-система — среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ. Тезисы докладов* // Десятая юбилейная международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным средствам, Переславль-Залесский, 7–12 июня 1999 г. — М.: МГИУ, 1999, с. 14–15. ↑
- [16] Абрамов С. М., Адамович А. И., Коваленко М. Р. *T-система — среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ. Пример реализации алгоритма построения изображений методом трассировки лучей* // Программирование. — 25 (2), 1999, с. 100–107. ↑6, 7
- [17] Абрамов С. М., Анищенко В. В., Парамонов Н. Н., Чиж О. П. *Разработка и опыт эксплуатации суперкомпьютеров семейства «СКИФ»* // Материалы конференции. I международная конференция «Информационные системы и технологии» (IST'2002), 5–8 ноября 2002 г. — Минск, 2002, с. 115–117. ↑9.1

- [18] 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. — М.: Физматлит, 2003. — ISBN 5-940-52-065-9, с. 135–140. ↑
- [19] 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, 22–27 сентября 2003 г., Новороссийск. — М.: Изд-во МГУ, 2003, с. 147–151. ↑
- [20] Абрамов С. М., Адамович А. И., Коваленко М. Р., Роганов В. А. *Биатлон для СКИФов: быстро и точно. Математика, информатика: теория и практика* // Сборник трудов, посвященный 10-летию Университета города Переславля ред. А. К. Айламазян. — Переславль-Залесский: Изд-во «Университет города Переславля», 2003. — ISBN 5-901795-02-4, с. 91–96. ↑9.1
- [21] Абрамов С. М., Васенин В. А., Мамчиц Е. Е., Роганов В. А., Слепухин А. Ф. *Динамическое распараллеливание программ на базе параллельной редукции графов. Архитектура программного обеспечения новой версии Т-системы* // Труды конференции. Всероссийская научная конференция «Высокопроизводительные вычисления и их приложения», 30 октября–2 ноября 2000 г., г. Черноголовка. — М.: Изд-во МГУ, 2000, с. 261–264. ↑9.2
- [22] Абрамов С. М., Васенин В. А., Мамчиц Е. Е., Роганов В. А., Слепухин А. Ф. *Архитектура программного обеспечения новой версии Т-системы* // Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ–2001, 22–26 января 2001 г. Т. 2, 2001, с. 234. ↑
- [23] Абрамов С. М., Кондратьева А. В., Роганов В. А., Чеповский А. М. *Проектирование высокопроизводительного процессора обработки графов* // Информационные технологии. — 3, 2001. ↑9.2
- [24] Суперкомпьютерная программа «СКИФ». Электронный ресурс. Раздел «Результаты :: 2003 :: Управляющая сеть кластеров «СКИФ»». — <http://skif.pereslavl.ru/>, 2003. ↑9.4
- [25] Плюснин В. У., Кушнеров Ф. Р. Вычислительные системы с динамической архитектурой. Статья на Веб-сайте «Виртуальный компьютерный музей». — <http://compmus9.valuehost.ru/histussr/dynaarc.htm>, 04.03.2003. ↑5

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ИПС ИМЕНИ А. К. АЙЛАМАЗЯНА РАН

S. M. Abramov. *HPC Researches in the Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences: Retrospectives and Perspectives* // Proceedings of Program Systems institute scientific conference “Program systems: Theory and applications”. — Pereslavl-Zalesskij, v. 1, 2009. — p. 153–192. — ISBN 978-5-901795-16-3 (*in Russian*).

АБСТРАКТ. This article describes supercomputers technologies researches and developments conducted or planed in the Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences. The corresponding projects and its results since 1984 are discussed.