

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ: ТЕКУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Вл.В. Воеводин, В.П. Гергель, Л.Б. Соколинский, В.П. Демкин, Н.Н. Попова, А.В. Бухановский

1. Введение

Суперкомпьютерные технологии (СКТ) активно проникают во многие области научных исследований и промышленных разработок, обеспечивая решение важных научно-технических проблем. Возрастающая производительность суперкомпьютеров дает основания к решению все более сложных проблем, что приводит к существенному усложнению математических моделей решаемых задач, необходимости разработки новых подходов к их реализации на суперкомпьютерах. Все это обуславливает повышенные требования к специалистам в области СКТ.

Собственно суперкомпьютерные технологии – это исключительно емкое понятие, под которым будем понимать целую совокупность взаимодополняющих технологий: суперкомпьютерные системы и среды, их архитектура и элементная база, соответствующие стеки программного обеспечения системного и промежуточного уровня, технологии разработки параллельных приложений (модели, языки, инструментальные средства и системы программирования), алгоритмы и методы решения вычислительно сложных задач, технологии инфраструктурной интеграции распределенных ресурсов на основе суперкомпьютерных центров и системы магистральных каналов связи, технологии обеспечения информационной безопасности, предметно-ориентированные пакеты и сервисы, нацеленные на полноценное использование возможностей современных и перспективных суперкомпьютерных систем и сред, а также ряд смежных направлений.

На формирование системы подготовки специалистов в области суперкомпьютерных технологий направлен проект «Создание системы подготовки высококвалифицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения» Комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России (<http://i-russia.ru>). Стратегической целью проекта (<http://hpc-education.ru>) является создание национальной системы подготовки высококвалифицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения. Эта цель определяет масштабность данного проекта, объединившего усилия ведущих российских университетов. Исполнители этапа проекта в 2010 году: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И.Лобачевского, национальный исследовательский Томский государственный университет, национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет, национальный исследовательский Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, члены Суперкомпьютерного консорциума университетов России. Руководитель проекта – ректор Московского университета, академик В.А.Садовничий. Проект комплексно рассматривает проблемы суперкомпьютерного образования, включая методические, организационные и другие задачи.

Образованию в области суперкомпьютерных технологий уделяется значительное внимание за рубежом. В Дорожной карте международного проекта по развитию программного обеспечения экзафлопсных компьютеров (<http://exascale.org>) суперкомпьютерное образование рассматривается как одно из основных направлений. В рамках самой крупной ежегодной международной конференции по суперкомпьютерингу, которая проводится в США, создана специальная образовательная секция. В работе секции участвуют преподаватели школ, колледжей и университетов. В рамках секции обсуждаются проблемы преподавания высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий. Активно развиваются все формы образования в области суперкомпьютерных технологий и в европейском сообществе. Необходимость интеграции европейского образования по суперкомпьютерным технологиям обосновывается в европейском экзафлопсном проекте (<http://eesi-project.eu>).

2. Задачи проекта «Создание системы подготовки высококвалифицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения»

Формирование системы суперкомпьютерного образования, предложенное в проекте Комиссии при Президенте РФ, включает в себя следующие основные задачи:

- создание системы научно-образовательных центров суперкомпьютерных технологий (НОЦ СКТ);
- разработку учебно-методического обеспечения системы СКТ-образования;
- реализацию разработанных подходов и учебно-методического обеспечения в рамках основных образовательных программ и программ подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров, программ специальной подготовки междисциплинарных групп и

- молодежных школ;
- развитие интеграции фундаментальных и прикладных исследований и образования в области суперкомпьютерных технологий, взаимодействие с РАН, промышленностью и бизнесом;
- расширение международного сотрудничества в создании системы суперкомпьютерного образования, привлечение ведущих зарубежных специалистов в области СКТ для участия в подготовке специалистов;
- популяризацию научных знаний в области суперкомпьютерных средств и технологий, привлечение талантливой молодежи в науку и развитие стратегического направления экономики.

Проект рассчитан на 3 года: с 2010 по 2012 год. Рассмотрим основные результаты, полученные за время, прошедшее с начала выполнения проекта.

3. Выполнение основных задач проекта

3.1 **Создание Системы НОЦ СКТ.** Задача создания Системы НОЦ СКТ, сформулированная в проекте, предполагает создание инфраструктуры, разработку нормативно-правового и методического обеспечения, формирование вычислительной базы. Реализация данной задачи направлена на концентрацию научно-образовательного потенциала на базе вузов, имеющих ресурсы и значительный опыт в развитии суперкомпьютерных технологий. Основу разработанной Системы составили пять НОЦ СКТ, по одному в Центральном, Приволжском, Уральском, Сибирском и Северо-Западном федеральных округах России. Роль координатора Системы НОЦ СКТ возложена на НОЦ “СКТ-Центр”, созданный в МГУ имени М.В.Ломоносова. К концу 2011 года планируется завершить формирование Системы НОЦ СКТ за счет образования НОЦ СКТ в Южном и Дальневосточном федеральных округах. К деятельности НОЦ СКТ привлечены ведущие ученые, профессора и преподаватели. Созданная система обеспечит доступ к передовой вычислительной технике учебным заведениям России, заинтересованным в подготовке специалистов по СКТ.

3.2 **Разработка учебно-методического обеспечения системы СКТ-образования.** Данная задача проекта направлена на формирование содержания образовательных стандартов и учебных программ в области СКТ. В рамках реализации данной задачи проекта подготовлена первая редакция Свода знаний и умений (профессиональных компетенций) в области СКТ. Описание текущей редакции разработанного Свода представлено на сайте проекта <http://hpc-education.ru>.

Содержание образовательных программ по суперкомпьютерным технологиям базируется на фундаментальных математических основах и охватывает многие области вычислительных наук (Computer Science) и информационных технологий [1-7]. Разработка основной концепции Свода знаний, выполненная в проекте, проводилась с учетом существующих образовательных стандартов и учебных программ, опыта их реализации, международных рекомендаций Computing Curricula международных сообществ ACM и IEEE. В разработанной первой версии Свода знаний и умений проведена систематизация конкретных тем, изучение которых связано с суперкомпьютерными технологиями. В соответствии с предложенной концепцией определена структура Свода знаний в виде выделения основных **областей** знаний, представляющих собой отдельные части изучаемой проблематики СКТ. **Области** делятся на меньшие структуры, называемые **единицами**, которые представляют собой отдельные тематические модули.

В результате проведенного анализа выделены следующие основные **области** Свода знаний.

- Математические основы параллельных вычислений.
- Параллельные вычислительные системы (компьютерные основы).
- Технологии параллельного программирования (основы программной инженерии).
- Параллельные алгоритмы решения задач.
- Параллельные вычисления, большие задачи и конкретные предметные области.

Разработанный Свод знаний охватывает широкий круг тем, связанных с классическим пониманием проблематики параллелизма (parallelism and concurrency). Суперкомпьютерные технологии можно рассматривать как вершину пирамиды знаний и умений, охватывающих все уровни параллелизма.

Предложенная в Своде знаний систематизация позволяет формировать учебные планы и программы, образовательные траектории по конкретным направлениям подготовки специалистов по СКТ. Отметим несколько важных моментов, касающихся формирования содержания учебных программ и курсов, связанных с изучением СКТ.

Задачи, на решение которых направлены суперкомпьютеры, на порядки превосходят по сложности традиционные для компьютерного моделирования задачи. Возрастает сложность математических моделей, увеличивается число исследуемых параметров, существенно возрастают объемы обрабатываемых данных. Обсуждение особенностей постановок таких задач, методов их решения на суперкомпьютерах должно включаться отдельными модулями в основные образовательные курсы. Предложенный Свод знаний может быть ориентиром для обновления основных курсов.

Изучение суперкомпьютерных технологий не может рассматриваться в отрыве от изучения фундаментальных основ параллельных вычислений. Суперкомпьютерные технологии должны изучаться в

диалектическом развитии от базовых основ параллельных вычислений и технологий к более сложным моделям, методам и технологиям. Предлагаемые в разработанном Своде знаний темы представляют основу для формирования конкретных базовых курсов по фундаментальным основам высокопроизводительных параллельных вычислений.

Суперкомпьютерные технологии являются активно развивающейся областью разработок и исследований. Изучение текущего состояния, тенденций и перспектив развития должно обязательно включаться в содержание учебных программ по СКТ. Предложенная реализация Свода знаний предполагает дальнейшее уточнение тематик и наполнения конкретного содержания с учетом этих требований.

Образование в области СКТ невозможно без освоения изучаемых технологий на практике. Существенное место в образовательных программах должны занять практические курсы и лабораторные работы, выполнение конкретных проектов по СКТ. Студентам должна быть предоставлена возможность работы на суперкомпьютерных системах. Ситуация в этом отношении существенно отличается от обычной практики использования в учебном процессе персональных компьютеров и рабочих станций. Суперкомпьютерные системы требуют значительного вложения средств на приобретение и поддержание функционирования. Число установок суперкомпьютерных систем всегда будет ограниченным. Вследствие этого, предложенная в проекте структура Системы НОЦ СКТ, обеспечивающих доступ к ресурсам суперкомпьютерных центров, позволяет решить проблему с практическим обучением студентов, предоставляет возможность реализации образовательных программ во всех учебных заведениях, заинтересованных в подготовке специалистов по СКТ независимо от наличия у них дорогостоящей аппаратуры.

Важным аспектом, который обязательно должен учитываться при разработке конкретных образовательных программ по СКТ, является их междисциплинарный характер. Наряду с отмеченными выше требованиями к базовому фундаментальному образованию, суперкомпьютерные технологии предполагают необходимость изучения смежных дисциплин. Суперкомпьютерное моделирование выполняется коллективами, как правило, включающими в свой состав специалистов-предметников, математиков, разрабатывающих методы решения поставленных задач, и программистов, реализующих параллельные алгоритмы и поддерживающих проведение вычислительного эксперимента на суперкомпьютерных системах. Суперкомпьютерное образование должно обеспечить основу для того, чтобы эти специалисты понимали друг друга. В проекте предлагаются различные формы дополнительного суперкомпьютерного образования, направленные на междисциплинарную подготовку специалистов. Опыт реализации таких программ продемонстрировал исключительную эффективность и важность этой формы деятельности предлагаемой в проекте системы суперкомпьютерного образования.

На основе подготовленного Свода разработаны предложения по расширению федеральных государственных образовательных стандартов третьего поколения по направлению 010300 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» для углубленного изучения СКТ, выполнена разработка новых учебных курсов, проведена модификация существующих учебных программ и курсов, подготовлены и изданы учебные пособия. В число учебных курсов, разработка и модификация которых уже выполнена в рамках проекта, вошли следующие основные курсы: «Параллельная обработка данных», «Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем», «Параллельное программирование для высокопроизводительных вычислительных систем», «Инструменты параллельного программирования в системах с общей памятью», «Параллельные системы баз данных», «Распределенные объектные технологии», «Вычислительная физика и нанотехнологии». В разработке курсов приняли участие представители всех НОЦ СКТ. Учебно-методические материалы разработанных курсов представлены на сайте проекта и доступны для использования в учебном процессе высших учебных заведений России. Разработанные курсы уже включены в базовые учебные программы университетов – участников проекта. Дальнейшая работа в этой части проекта направлена на расширение тематики курсов, включая такие актуальные направления как, высокопроизводительные вычисления с использованием графических процессоров, методы параллельных вычислений, практикум по суперкомпьютерным технологиям.

Задача по формированию методической базы предусматривает также разработку и издание серии учебников и учебных пособий «Суперкомпьютерное образование». За первый год выполнения проекта уже издано 6 учебников и учебных пособий этой серии. Всего за три года проекта предполагается включить в серию «Суперкомпьютерное образование» более 25 книг.

Для координации учебно-методической деятельности, организации взаимодействия НОЦ СКТ по другим направлениям созданы несколько экспертных групп. Основная задача экспертов заключается в выработке предложений по выполнению конкретных задач проекта и проведении экспертизы разрабатываемых учебных программ с учетом опыта конкретного учебного заведения. Примером эффективности взаимодействия созданных НОЦ СКТ является разработка экспертной группой Свода знаний и умений.

3.3 Реализация образовательных программ

В проекте предлагается несколько форм реализации разрабатываемых образовательных программ в области СКТ. Прежде всего, рассматривается реализация учебных программ и курсов по СКТ для подготовки специалистов в рамках основных образовательных программ. С этой целью в 2010 году были разработаны

предложения по обновлению образовательных стандартов по ряду специальностей. В течение первого года выполнения проекта было подготовлено более 100 высококвалифицированных специалистов в области СКТ и их приложений. В июне 2011 года состоялись первые выпуски специалистов, которые в течение завершающего года обучения изучали суперкомпьютерные технологии с использованием разрабатываемых в проекте учебных материалов. Так, например, около 250 выпускников факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ в феврале – апреле 2011 года прошли обучение по курсу «Актуальные проблемы прикладной математики. Суперкомпьютерные технологии». Важным элементом обучения явилось то, что все студенты получили доступ и выполняли практические задания на суперкомпьютерных системах, входящих в НОЦ МГУ «Суперкомпьютерные технологии».

Одной из важных форм реализации разрабатываемых в проекте образовательных программ является формирование специальных групп обучаемых. Эта форма предполагает работу с различными целевыми группами: студентами, магистрами, аспирантами, преподавателями, специалистами, и проведение обучения по различным специализациям. Данная форма подготовки специалистов учитывает междисциплинарный характер СКТ и позволяет в сжатые сроки осуществить выпуск высококвалифицированных специалистов, способных развивать и эффективно применять СКТ при проведении фундаментальных и прикладных исследований, внедрять их в промышленность и экономику. Программа формирования и проведения обучения спецгрупп в рамках системы НОЦ СКТ опиралась на решение текущих задач организаций науки и образования России с обязательным учетом мировых тенденций развития компьютерных технологий. Пробразом такой формы обучения явилось создание по инициативе ректора МГУ академика В.А.Садовниченко в октябре 2009 года спецгруппы «Суперкомпьютерные технологии» в МГУ. Идея создания спецгрупп как эффективная форма обучения оказалась успешной и была использована в проекте. В 2010 г. в рамках выполнения проекта было сформировано 6 специальных групп во всех НОЦ СКТ. В декабре 2010 года студенты спецгруппы МГУ в рамках обучения по программе «Разработка сверхмасштабируемых программ» получили доступ к самой мощной вычислительной системе России – суперкомпьютеру «Ломоносов». Полученный опыт обучения спецгрупп подтвердил высокую эффективность этой формы реализации образовательных программ по СКТ. Успешность создания спецгрупп во многом обусловлена высокой мотивацией обучаемых, наличием профессиональной подготовки обучаемых в конкретных научных областях. Совместное обучение представителей разных специальностей способствует взаимному обогащению знаниями, обеспечивает возможность подготовки будущих специалистов по СКТ к работе в одной команде.

Важной формой реализации образовательных программ проекта являются программы повышения квалификации преподавательского состава. Во всех созданных НОЦ СКТ разработаны учебные программы для подготовки и переподготовки профессорско-преподавательского состава. По разработанным учебным программам только в 2011 году прошли обучение преподаватели из 13 ВУЗов России. Большой опыт реализации таких программ в Нижегородском государственном университете способствовал разработке и успешной реализации программ повышения квалификации в созданных НОЦ СКТ.

В рамках проекта предусмотрено дальнейшее развитие форм обучения СКТ. Одной из таких форм является дистанционное обучение. В 2011 году проведена начальная подготовка в области суперкомпьютерных технологий с использованием технологий дистанционного обучения по программе «Высокопроизводительные вычисления». Около 100 человек прошли дистанционное обучение по этой программе, реализованной на базе НОЦ СКТ в ННГУ.

Эффективной формой начального вхождения в область суперкомпьютерных технологий стал Интернет-университет суперкомпьютерных технологий (<http://hpcu.ru>). На его базе в 2010 году более 70 слушателей прошли подготовку в режиме дистанционного обучения.

Одной из популярных и востребованных форм реализации образовательных программ по СКТ являются молодежные научные школы. Участие в школах студентов, аспирантов и молодых ученых из различных учебных заведений позволяет существенно расширить рамки деятельности создаваемой Системы НОЦ СКТ за пределы ВУЗов – участников проекта. На основе НОЦ СКТ к настоящему моменту удалось сформировать систему регулярных молодежных школ в различных регионах России: СПбГУ ИТМО (апрель), МГУ (июнь-июль), ННГУ (октябрь), ТГУ (декабрь). Учебные программы школ существенно опираются на опыт реализации других образовательных программ, подготовленных по проекту. Отличительной особенностью учебных программ школ является широкое участие в проведении лекций, мастер-классов и практических занятий специалистов из ведущих компаний - лидеров компьютерной индустрии и зарубежных ученых. Традиционное участие в школах таких компаний как Intel, IBM, NVIDIA, Т-Платформы позволяет оперативно внедрять в образовательные программы последние достижения в области СКТ. В молодежных научных школах, организованных НОЦ СКТ, приняли участие зарубежные ученые и профессора: Т.Стерлинг (США), К.Соса (США), Б.Мор (Германия), П. Слоот (Голландия). Участникам летней молодежной школы, которая прошла в июне 2011 года в МГУ, была предоставлена возможность выхода на суперкомпьютерные системы вычислительного центра г.Юлих (Германия). Учитывая уникальные возможности, предоставляемые молодежными школами для интеграции российского суперкомпьютерного образования в международные программы, планируется организация системы проведения международных молодежных школ с участием

ведущих европейских суперкомпьютерных центров и университетов.

3.4. Взаимодействие с организациями науки, промышленности и бизнеса.

Международное сотрудничество и информирование общества

Представленные результаты касаются важной части проекта, связанной с разработкой и реализацией образовательных программ созданной системы НОЦ СКТ. Кратко остановимся на некоторых результатах по другим задачам проекта.

Важной задачей проекта является интеграция фундаментальных и прикладных исследований и образования в области суперкомпьютерных технологий, взаимодействие с РАН, промышленностью и бизнесом. Именно за счет тесного взаимодействия с наукой, промышленностью и бизнесом есть возможность вовремя смещать акценты в организации процесса обучения, а также оперативно реагировать на запросы со стороны работодателей. Примером реализации этой задачи является проведение ежегодных координационных совещаний представителей вузов, научных институтов, ИТ-компаний. В декабре 2010 года в совещании, проведенном на базе НОЦ «Суперкомпьютерные технологии» МГУ, приняли участие около 150 человек из более, чем 30 организаций. На совещании обсуждались приоритетные направления развития СКТ в мире и направления развития системы суперкомпьютерного образования в стране.

Международное сотрудничество рассматривается в проекте как важная задача, позволяющая интегрироваться в международный образовательный процесс. В рамках выполнения проекта достигнуты соглашения со многими зарубежными университетами по реализации совместных образовательных программ по СКТ. Примером такого сотрудничества являются совместные образовательные программы, осуществляемые НОЦ СКТ Северо-западного федерального округа: магистерская программа по направлению «Computational Science for Multidisciplinary Research» (совместно с университетом г. Амстердам) и программа двойной аспирантуры в области суперкомпьютерных технологий. Для их реализации в составе НОЦ «СКТ-Северо-Запад» открыта Международная лаборатория перспективных вычислительных технологий (Advanced Computing Lab) под руководством профессора П. Слоота – лауреата конкурса грантов на привлечение ведущих мировых ученых в российские учебные заведения. С целью продвижения этих инициатив в июне 2011 г. в Санкт-Петербурге проведена Международная школа-семинар «Advanced Technologies of Supercomputing and Software Engineering» с участием ведущих иностранных ученых: Б. Мейер, Т. Каски, Д. Ландау, П. Слоот, А. Заславский, Ю. Тиммонен.

В рамках выполнения проекта организовано участие зарубежных ученых в чтении лекций по тематике высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерным технологиям. В октябре-ноябре 2010 года в МГУ, ННГУ и СПбГУ ИТМО прошли выступления одного из самых известных специалистов в области суперкомпьютерных технологий в мире Томаса Стерлинга (США). В июне 2011 года в проведении молодежной научной школы в МГУ по разработке сверхмасштабируемых программ принял участие известный специалист из крупнейшего в Европе суперкомпьютерного центра в г.Юлих (Германия) Бернд Мор.

Для информирования общества о достижениях в развитии СКТ и привлечения талантливой молодежи разработана и реализована система мероприятий по популяризации достижений и перспектив использования суперкомпьютерных технологий с привлечением средств массовой информации. Это и традиционные СМИ такие, как газета «ПОИСК» и журнал «Суперкомпьютеры», это и электронные издания, например, сайт Комиссии Президента РФ (<http://i-russia.ru>), информационно-аналитический центр (<http://parallel.ru>) и многие другие. Это и выпуск специализированных телевизионных и радио передач, особенно успешно подготовленных в ТГУ и ЮУрГУ. Проект активно представлялся на весомых и значимых суперкомпьютерных мероприятиях.

Проект по формированию системы суперкомпьютерного образования в России был отмечен как одно из значимых достижений года в заключительном докладе Т.Стерлинга на основной европейской международной конференции в области суперкомпьютерных технологий International Supercomputing Conference – 2011 (Гамбург, Германия).

4. Заключение

Представленные результаты достигнуты благодаря большой и слаженной работе всех участников проекта. Идея построения национальной системы образования в области суперкомпьютерных технологий объединила многие коллективы, привлекла к ее реализации много молодых и активных людей. Это можно считать одним из успешных результатов проекта.

Выполнение проекта направлено как на обеспечение подготовки высококвалифицированных специалистов, так и на создание устойчивой системы подготовки высококвалифицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения. Обе составляющие важны, и обе эти составляющие закладывают необходимую основу для успешного развития суперкомпьютерных технологий в России.

Проект «Создание системы подготовки высококвалифицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения» является важной вехой на пути к освоению будущих суперкомпьютерных систем экзафлопсной производительности.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный

ЛИТЕРАТУРА:

1. Computing Curricula 2005 (CC2005). Association for Computing Machinery and Computer Society of IEEE.- <http://www.acm.org/education/curricula-recommendations>.
2. Barry M. Lunt (Chair), J. Ekstrom, Sandra Gorka, Gregory Hislop, Reza Kamali, Eydie Lawson, Richard LeBlanc, Jacob Miller, Han Reichgelt. Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Information Technology Association for Computing Machinery (ACM), IEEE Computer Society, Nov. 2008.
3. S.Lathrop, T.Murphy High-Performance Computing Education// Computing in Science and Engineering, Volume 10 Issue 5, September 2008 P.9-11.
4. D.Joiner, C.Peck, T.Murphy, P.Gray Education, Outreach, and Training for High-Performance Computing// Computing in Science and Engineering, Volume 10 Issue 5, September 2008 P.40-45.
5. Рекомендации по преподаванию программной инженерии и информатики в университетах. Пер. с англ. – М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-Университет Информационных Технологий», 2007. 462 с.
6. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.
7. Гегель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. – БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 424 с.