

АНАЛИЗ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОГРАММ

УДК 004.8

ИНФРАСТРУКТУРА СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2019 г. Вл. В. Воеводин^{а,*}, Н. Н. Попова^{а,**}

^а *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Факультет вычислительной математики и кибернетики (ВМК)
119991 Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, Россия*

** E-mail: voevodin@parallel.ru*

*** E-mail: popova@cs.msu.ru*

Поступила в редакцию 10.01.2019 г.

После доработки 10.01.2019 г.

Принята к публикации 17.01.2019 г.

Суперкомпьютерные технологии исключительно многогранны, и, говоря о серьезном развитии данной области на уровне государства, необходимо создавать и развивать все элементы суперкомпьютерной инфраструктуры, не замыкаясь лишь на отдельных ее составляющих. В данной работе мы обсудим все основные элементы подобной инфраструктуры. Покажем крайнюю востребованность суперкомпьютерной инфраструктуры у нас в стране, где один лишь список Минобрнауки РФ содержит более 700 задач, требующих суперкомпьютерных ресурсов для своего решения. Многие исследователи работали в данной области, но в качестве иллюстраций положений данной работы мы будем использовать результаты, полученные выдающимися российскими учеными Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, которому М.Р. Шура-Бура посвятил значительную часть своей жизни.

DOI: 10.1134/S0132347419030087

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокопроизводительные вычисления и неотрывно связанные с ними суперкомпьютерные технологии приобретают все большее значение для развития науки, промышленности, здравоохранения, безопасности. В данной статье, посвященной 100-летию Михаила Романовича Шуры-Буры, будет рассмотрено современное состояние суперкомпьютерных технологий. М.Р. Шура-Бура, один из основателей отечественного системного программирования, оказал большое влияние на развитие отечественных компьютерных технологий. Докторскую диссертацию на тему “Вопросы решения математических задач с большим числом операций”, которую Михаил Романович защитил в 1954 году, по праву можно отнести к проблематике, которая сегодня называется суперкомпьютингом. На первом советском учебнике “Решение математических задач на автоматических цифровых машинах. Программирование для быстродействующих электронных счетных машин”, одним из авторов которого был М.Р. Шура-Бура, выросло пионерское поколение советских программистов, то поколение ученых, усилиями которых были созданы первые отечественные суперкомпьютеры [1]. М.Р. Шура-Бура принимал активное участие в разработке учебных программ по подготовке специалистов по при-

кладной математике и информатике, реализуемых на факультете ВМК. В следствие эти программы широко использовались при разработке учебных программ во многих вузах. Влияние личности Михаила Романовича Шуры-Буры на становление отечественного программирования можно оценить по совместным с академиком А.П. Ершовым публикациям [2, 3]. Отдельно отметим роль М.Р. Шуры-Буры в подготовке высококвалифицированных специалистов, многие из которых в настоящее время активно работают в области высокопроизводительных вычислений и суперкомпьютерных технологий.

2. РАЗВИТИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАБОТАХ УЧЕНЫХ МГУ

Факультет вычислительной математики и кибернетики (ВМК) МГУ был образован по инициативе выдающегося ученого, академика А.Н. Тихонова в 1970 году. Под руководством А.Н. Тихонова на факультете были определены научные направления и разработаны учебные программы, определившие стратегии развития прикладной математики и информатики, способствующие развитию отечественного математического моделирования и суперкомпьютерных технологий. Важнейшие научные направления, развиваемые

на факультете — это основанная академиками А.Н. Тихоновым и А.А. Самарским теория разностных схем и развитая А.Н. Тихоновым теория некорректных задач. Они являются фундаментом для решения многих важных прикладных задач на высокопроизводительных системах. Современные подходы к решению таких задач на суперкомпьютерных системах реализуются научным коллективом, возглавляемым заведующим кафедрой вычислительных методов академиком Б.Н. Четверушкиным. Новые подходы к построению вычислительных алгоритмов следующего поколения для задач вычислительной гидродинамики на основе суперкомпьютерного моделирования развиваются на факультете под руководством профессора В.М. Головизнина.

М.Р. Шура-Бура возглавил кафедру системного программирования (СП) факультета ВМК МГУ с момента основания в 1970 году и проработал на кафедре 38 лет. Руководство кафедрой с 1994 года было продолжено академиком В.П. Иванниковым, принимавшем участие в разработке многих отечественных высокопроизводительных вычислительных систем. Различные аспекты теории и практики разработки параллельных программ, реализованные сотрудниками кафедры под руководством В.П. Иванникова, получили применение в области системного программного обеспечения высокопроизводительных вычислительных систем. Широко известны специалистам в области суперкомпьютерных технологий работы, выполняемые на кафедре СП, под руководством профессора В.А. Крюкова по разработке системы программирования DVM, которая позволяет создавать переносимые параллельные программы для параллельных ЭВМ разной архитектуры, вычислительных кластеров и сетей. Во время руководства кафедрой СП М.Р. Шурой-Бурой на кафедре работал И.Б. Задыхайло, который занимался разработкой системного и прикладного программного обеспечения для параллельных систем. В частности, он является автором системы параллельного программирования Норма. Язык однократного присваивания Норма формализует математическую запись (расчетные формулы), которая получается в результате решения задачи вычислительного характера прикладным специалистом.

Возрастающая сложность архитектурных решений суперкомпьютерных систем и, как следствие, сложность разработки эффективных параллельных программ для таких систем, диктуют необходимость систематического изучения информационной структуры алгоритмов и ее влияния на разработку эффективно реализованных программ. Основоположником этого направления исследований стал академик, директор НИВЦ и профессор факультета ВМК Воеводин Валентин Васильевич. Идеи, заложенные В.В. Воеводиным, продолжают его учениками. Научным ру-

ководителем кандидатской диссертации В.В. Воеводина был М.Р. Шура-Бура. Таким образом, эстафета поколений, являющаяся залогом успешного развития науки, продолжается.

Огромное влияние на развитие всей отечественной науки оказал академик Г.И. Марчук, с 2004 года возглавивший кафедру вычислительных технологий и моделирования. В настоящее время кафедрой руководит академик Е.Е. Тынтышников, являющийся учеником академика В.В. Воеводина, активно работающий в области вычислительных технологий и имеющий блестящие результаты, позволяющие эффективно бороться с таким понятием, как “проклятие размерности данных”.

Развитию суперкомпьютерного моделирования придавал большое значение академик Д.П. Костомаров, руководивший факультетом с 1991 по 1999 годы. Одними из первых работ, выполненных учеными факультета ВМК с использованием суперкомпьютеров, стали работы в области математического моделирования плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, выполненные сотрудниками кафедры автоматизации научных исследований, которой заведовал Д.П. Костомаров. Руководителем этого направления работ является нынешний заведующий кафедрой автоматизации научных исследований профессор А.М. Попов.

Программистскую составляющую научных исследований и образования на факультете ВМК обеспечивают кафедры, выделенные в отдельный, программистский поток. Кафедры автоматизации систем вычислительных комплексов (АСВК), алгоритмических языков (АЯ) и системного программирования вошли в состав этого потока при образовании факультета. Долгое время возглавляли эти кафедры патриархи отечественной компьютерной научной школы М.Р. Шура-Бура (кафедра СП), Л.Н. Королев (кафедра АСВК) и Н.П. Трифонов (кафедра АЯ). В настоящее время число кафедр программистского направления увеличилось. На базе кафедры АСВК созданы 2 новые кафедры — кафедра суперкомпьютеров и квантовой информатики и кафедра интеллектуальных информационных систем.

Чл.-корр. РАН, профессор Лев Николаевич Королев сыграл особую роль в развитии отечественных высокопроизводительных систем, науки программирования и становлении компьютерного и суперкомпьютерного образования у нас в стране. Из выдающихся заслуг Льва Николаевича отметим его работы по созданию программного обеспечения центральной вычислительного комплекса противоракетной обороны, разработке архитектуры и программного обеспечения ЭВМ БЭСМ-6, разработке методов отображения параллельных программ на архитектуру вычисли-

тельных систем. Научная интуиция Л.Н. Королева предвосхитила понимание роли популярных в настоящее время новых подходов к решению задач, основанных на нейронных сетях, эволюционных вычислениях и их реализации на высокопроизводительных системах. Дело Льва Николаевича по популяризации идей развития отечественных компьютерных технологий продолжает профессор Александр Николаевич Томилин, ученик выдающегося отечественного конструктора вычислительной техники академика С.А. Лебедева. На кафедре АСВК долгие годы работал чл.-корр. РАН Г.Г. Рябов — основатель научного направления по созданию комплексных систем автоматизации проектирования высокопроизводительных вычислительных ЭВМ. С 1995 по 2004 год Г.Г. Рябов возглавлял институт точной механики и вычислительной техники. Под его руководством были созданы отечественные супер-ЭВМ “Эльбрус”. Большой вклад в отечественную науку внес Н.П. Брусенцов, главный конструктор единственного в мире трюпного компьютера “Сетунь”. Лаборатория, которой руководил Николай Петрович, входила в состав кафедры АСВК. Л.Н. Королева и Н.П. Брусенцова можно было часто застать при обсуждении философских проблем аристотелевой силлогистики, формальной логики, творческого интеллекта и многих других, нетривиальных проблем.

В приведенном выше исключительно кратком обзоре, безусловно, названы не все работы, проводимые учеными факультета МГУ с применением суперкомпьютерных технологий. Рамки статьи не позволяют перечислить всех, кто преодолел трудности, связанные с освоением не всегда простых суперкомпьютерных технологий, и превратил суперкомпьютер в эффективный инструмент для проведения своих исследований.

В последующей части данной работы мы изложим свою точку зрения, насколько сложной и многогранной является сегодня область, которую традиционно ассоциируют с суперкомпьютерными технологиями. Вычислительные технологии прочно вошли в жизнь общества, поэтому для формирования полной картины нужно рассматривать не только понятия науки и технологий, но и сопутствующие им вопросы, связанные с образованием, экономикой, обществом, что в совокупности и определяет суперкомпьютерную инфраструктуру государства.

3. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Центральное место в обсуждаемой инфраструктуре, безусловно, занимают суперкомпьютеры, высокопроизводительные вычислительные системы и среды. Они показывают текущий уро-

вень технологий, определяют сложность потенциально решаемых задач, особенности используемых технологий программирования и многое другое, что характерно для суперкомпьютерных технологий. Лучший способ понять особенности современных суперкомпьютерных систем — это проанализировать список Top500 самых мощных суперкомпьютеров мира [4], публикуемый два раза в год. По состоянию на ноябрь 2018 года лидером рейтинга Top500 является суперкомпьютер IBM Summit с производительностью 200 Pflops (200×10^{15} операций в секунду). По общему количеству эксплуатируемых суперкомпьютерных систем лидируют Китай (227 систем), США (109 систем), Япония — 31, Великобритания — 20, Германия — 17. Согласно данной редакции списка сейчас в мире 429 суперкомпьютеров с производительностью выше 1 Pflops, а для попадания в список Top500 на последнее 500-е место нужна производительность 875 Tflops на тесте Linpack.

Среднее число ядер в суперкомпьютерах списка равно 118 тысяч. Это огромная степень параллельности, которая, как следствие, должна поддерживаться на всех этапах решения задач от выбора модели и метода, до систем времени исполнения. Все суперкомпьютеры списка являются системами с распределенной памятью, содержащими элементы SMP-систем. В текущей редакции списка 137 вычислительных систем используют разного рода ускорители. Наличие ускорителей является важным трендом, что определяет и особенности технологий программирования, и свойства используемых методов и алгоритмов, а также накладывает жесткие требования на использование технологий суперкомпьютерного кодизайна.

Текущий вариант списка Top500 содержит еще два критерия, важных для сравнения возможностей и свойств суперкомпьютеров: данные методик Green500 и HPCG. Первый критерий оценивает энергоэффективность систем, показывая производительность в пересчете на ватт затраченной энергии. Лидером по этому показателю являются системы, построенные на базе процессоров NVIDIA P100/V100, достигающие величин порядка 15 Gflops/watt. Второй критерий показывает производительность систем на тесте HPCG, что является альтернативной оценкой возможностей суперкомпьютеров по сравнению с тестом Linpack. И если данные на тесте Linpack говорят о возможности приблизиться к пиковым показателям производительности, то результаты теста HPCG показывают колоссальную разницу между пиковой и реальной производительностью вычислительных систем. Оба критерия подчеркивают две исключительно важные особенности современных суперкомпьютеров: высокое энергопотребление и большую зависимость реальной производительности компьютеров от классов решаемых задач.

Важнейшее направление данной части суперкомпьютерной инфраструктуры — это разработка суперкомпьютерных систем максимальной производительности, что происходит в совокупности с исследованием новых методов организации вычислений: реконфигурируемые, квантовые, нейроморфные и другие. К этой же части инфраструктуры можно отнести и технологии интеграции распределенных ресурсов на основе суперкомпьютерных центров и системы каналов связи, облачные технологии, технологии обеспечения информационной безопасности в суперкомпьютерных системах и средах, технологии веб-сервисов масштабируемого доступа, и все эти направления в совокупности определяют будущее суперкомпьютерной отрасли.

4. ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Данная часть суперкомпьютерной инфраструктуры исключительно обширна. В широком смысле сюда входят математические модели, масштабируемые алгоритмы, языки, инструментальные средства и системы программирования, обеспечивающие высокую эффективность и продуктивность прикладного программирования для суперкомпьютерных систем и сред. Все особенности архитектур находят немедленное отражение во всех составляющих этой части. Характерная черта современных компьютеров — это высокая степень параллельности, что, в частности, вызвало всплеск исследований, ориентированных на разработку масштабируемых алгоритмов и новых технологий параллельного программирования. С этим же связан высокий интерес к методам определения и описания параллельной структуры алгоритмов. В этой связи стоит отметить новый интересный и перспективный проект — AlgoWiki [5]. Целью проекта является создание Интернет-энциклопедии свойств и особенностей алгоритмов с акцентом на описание их параллельных свойств. Меняются поколения суперкомпьютеров, но свойства алгоритмов остаются неизменными, что и нужно отразить в энциклопедии, упростив разработку параллельных приложений в будущем. Работа по наполнению энциклопедии масштабна, поэтому AlgoWiki работает по принципу Википедии, когда каждый участник может не только воспользоваться уже внесенной кем-то информацией, но и добавить в AlgoWiki свои экспертные знания, сделав их доступными всему сообществу.

Тонких вопросов, затрагивающих разработку параллельных приложений, очень много. Здесь и портирование программ с платформы на платформу с сохранением должного уровня эффективности, недерминированность работы суперкомпьютерных приложений на системах с массовым параллелизмом, динамическое изменение

точности вычислений как дополнительный способ повышения производительности и многие другие, и все они определяют эффективность функционирования и использования суперкомпьютерной инфраструктуры.

5. ТЕХНОЛОГИИ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО КОДИЗАЙНА

Постоянное усложнение архитектуры вычислительных систем привело как к низкой эффективности работы приложений, так и к низкой реальной производительности самих систем. Именно поэтому давно возникло понимание, что для действительно эффективного решения конкретных задач свойства всех элементов цепочки: от формирования моделей до выполнения результирующих программ на компьютерах, должны быть согласованы. Не содержит выбранный метод достаточного ресурса параллелизма, соответствующего степени параллелизма вычислительной системы, не будет эффективного решения задачи. Если система времени исполнения плохо поддерживает конструкции языка параллельного программирования, то не будет и эффективного решения задачи. Порождает параллельная программа тяжелый коммуникационный профиль с большим объемом накладных расходов, не будет эффективного решения задачи. И есть лишь единственный вариант, при котором задача будет решаться эффективно: если ни на одном из этапов решения задачи не возникнет ни одного узкого места. А это значит, что все этапы должны проектироваться согласованно, откуда и возникает понятие суперкомпьютерного кодизайна: набора технологий и методов, обеспечивающих согласование всех элементов цепочки решения задач.

Направление не простое, но необходимое, так как без отработки и развития технологий суперкомпьютерного кодизайна не добиться эффективного решения задач. Устоявшихся методов в данной области пока нет, но идет активный поиск, а во многих случаях и реальная работа. В США созданы и поддерживаются 7 центров суперкомпьютерного кодизайна, направленных на решение конкретных задач (исследование проблем горения, безопасности атомных станций и других задач). Частная компания D.E. Shaw Research на основе принципов суперкомпьютерного кодизайна создала уже два поколения собственных суперкомпьютеров ANTON, и сейчас в разработке находится третье поколение. В этих суперкомпьютерах вся цепочка от выбора методов до собственной операционной системы и собственных процессоров ориентирована на поддержку молекулярно-динамических расчетов и проектирование лекарственных препаратов.

Интересно, что подобную задачу еще в начале 80-х годов прошлого столетия сформулировал

академик Г.И. Марчук: задача создания методов эффективного отображения программ и алгоритмов на архитектуру параллельных вычислительных систем. Формулировка немного отличается от современной, но смысл абсолютно тот же. Организуя кафедру на факультете ВМК МГУ, Г.И. Марчук сделал этот тезис одним из принципов ее работы.

6. ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ПАКЕТЫ И СЕРВИСЫ

Разработка эффективного программного обеспечения всегда было делом не самым простым, а за последние годы ситуация еще больше усложнилась. Создавая программу, разработчик всегда принимает компромиссное решение между эффективностью, переносимостью и продуктивностью, что определяет и технологию программирования, и стиль программирования, и все остальное. Если нужно быстро получить работающий вариант программы, то акцент делается на продуктивности. Если важна работоспособность программы на многих архитектурах, то переносимость имеет явный приоритет. В реальности, в той или иной степени приходится учитывать все три параметра, что отражается на всем цикле разработки программного обеспечения.

Высокопроизводительные вычисления ориентированы на минимизацию времени решения задач, а значит все то, что определяет эффективность программ, должно рассматриваться особенно аккуратно. И в первую очередь — особенности архитектуры компьютеров: если они учтены, то программа использует весь потенциал архитектуры, в противном случае эффективность снижается и, как следствие, падает производительность. В этой ситуации на первый план выходят технологии суперкомпьютерного кодизайна, диктующие необходимость аккуратного согласования свойств алгоритмов и особенностей архитектуры компьютеров.

Учесть нюансы конкретной архитектуры сложно, но реально. Проблема в том, что за последние 40 лет сменилось, по крайней мере, шесть поколений архитектур параллельных вычислительных систем, и каждая из них требовала как специальных свойств от алгоритмов, так и своего стиля написания программ. По существу, каждое новое поколение архитектуры компьютеров приводило к необходимости полного пересмотра программного обеспечения. Сделав эффективный пакет под одну архитектуру, уже через несколько лет в код нужно вносить серьезные изменения, иначе конкурентоспособность пакета будет потеряна.

Несмотря на высокую трудоемкость разработки прикладных пакетов и сервисов, вкладываться в это направление необходимо: это единственное средство для снижения сложности использова-

ния суперкомпьютерных систем и расширения круга пользователей. Заметим, что, несмотря на высокую сложность разработки суперкомпьютерных пакетов, в некоторых областях в России накоплен значительный потенциал, который, при должном внимании и желании, вполне может привести к появлению отечественных конкурентов зарубежным коммерческим пакетам. Например, для решения различных CFD-задач разработаны и используются пакеты и системы: CABARET-STAGES, CSPH & VD3, EWT ЦАГИ, FlowVision, GIDR-3M, HSFlow/HSFlow Stability, INMOST, Ani3D, Jet3D, Lglite, NOISEtte, QGDFoam / OpenFoam, SigmaFlow, SINF/Flag-S, VP2/3, ZOOM, ЛОГОС-АЭРОГИДРОМЕХАНИКА, Несветай-3D, ТИС. И это лишь одна область.

7. НРС И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, AI/ML/DL, BigData

Суперкомпьютерные технологии обладают уникальным свойством. Всегда находясь на передовом рубеже и предлагая высочайший уровень производительности, высокопроизводительные вычисления являются драйвером других технологий, порождая и обеспечивая не просто устойчивое, а революционное развитие целого множества областей. Это в полной мере относится к предсказательному математическому моделированию, что появилось много лет назад, а на сегодня является хорошо отработанным инструментом, используемым в науке и промышленности. Вспомним пионерские работы академиков А.Н. Тихонова, А.А. Самарского, других сотрудников МГУ, заложивших фундаментальные основы компьютерных методов решения задач.

Чуть позже высокопроизводительные системы позволили эффективно внедрять технологии многовариантной оптимизации в проектировании, что требовало огромных вычислительных ресурсов. А сегодня в этой же роли находятся искусственный интеллект, машинное обучение, глубинное обучение, технологии работы с Большими Данными. Области, безусловно, перспективные. По прогнозам экспертов, к 2030 году внедрение технологий искусственного интеллекта принесет мировой экономике триллионы долларов, что побуждает многие компании и страны создавать суперкомпьютеры, работающие в интересах конкретных исследований, например, в области искусственного интеллекта (многочисленные примеры есть в США, Японии, Китае и других странах).

Новые производственные технологии, технологии цифровых двойников и цифровых теней, реальная отдача от идей цифровой экономики в целом немислимы без технологий искусственного интеллекта, технологий обработки и анализа больших данных, опирающихся на суперкомпьютерные технологии.

Очень важно и то, что суперкомпьютерные технологии по своей природе являются сквозными технологиями, активно используемыми, в частности, как для решения задач всех приоритетов, так и для формирования ответов на большие вызовы, определенные Стратегией научно-технологического развития России.

8. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, БИЗНЕСЕ, ГОСУДАРСТВЕ

Суперкомпьютерные технологии сегодня — это неотъемлемая часть цифровой экономики, о которой сейчас везде говорится много. Передовые страны вкладывают миллиарды долларов в развитие суперкомпьютерных технологий, формируя программы для интенсивного развития данной области. Девизом комитета по конкурентоспособности США (Council on Competitiveness) является: “To out-compete is to out-compute”, который можно перевести так: “В конкурентной борьбе победит тот, кто победит в вычислениях”.

Компании-лидеры многих отраслей экономики уже давно сделали суперкомпьютерные технологии частью своей технологической цепочки. Во многих случаях это не афишируется, чтобы сохранить конкурентное преимущество, но это так. Персонализированная медицина, проектирование новых материалов, биотехнологии, автомобилестроение, судостроение, станкостроение, авиационная и космическая отрасли, разведка, добыча и транспортировка полезных ископаемых, энергетика, анимация и киноиндустрия, микроэлектроника и многие другие используют суперкомпьютер как инструмент обеспечения своей конкурентоспособности. Уменьшить издержки производства, быстрее вывести товар на рынок, решить поставленную задачу не только быстрее, но и точнее, перейти к новым задачам большей размерности — именно эти аргументы важны для предприятий, внедряющих суперкомпьютерные технологии, и именно эти аргументы помогают им становиться лидерами.

Обратимся к данным списка Top500, описывающим текущее состояние мировой суперкомпьютерной отрасли. Если проанализировать место установки систем списка, то окажется, что 54.6% суперкомпьютеров установлены в промышленности. Более половины самых мощных суперкомпьютеров мира приобретены предприятиями реальных секторов экономики, что является самым убедительным аргументом в целесообразности использования суперкомпьютерных технологий.

И подтверждения востребованности суперкомпьютерных технологий можно найти повсюду. Итальянская энергетическая компания Eni

установила у себя суперкомпьютер с производительностью 18.6 Pflops, занимающий 15-е место в Top500 [6]. Киностудия Disney в 2016 году выпустила ленту “Книга джунглей” с бюджетом 175 млн долларов. Для производства картины потребовалось 30 млн процессорочасов, что является весьма значительным суперкомпьютерным ресурсом. Несмотря на столь большие вложения, картина стала исключительно успешным коммерческим проектом с кассовыми сборами около 1 млрд долларов. Для сравнения: по данным исследования Фонда кино “Российская киноиндустрия — 2017” [7] сборы от всех российских фильмов в 2017 году составили 222.4 млн долларов.

9. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Суперкомпьютерное образование является важнейшей частью суперкомпьютерной инфраструктуры, поскольку успешная работа в данной области требует высокой квалификации и знаний из целого множества областей. Высокопроизводительные вычисления — это сложная, наукоемкая и междисциплинарная область, заниматься подготовкой специалистов для которой могут только сильные университеты, обладающие необходимой экспертизой и сильным кадровым составом. Руководство Московского университета всегда уделяло особое внимание вопросам суперкомпьютерного образования. Московский университет является координатором суперкомпьютерного консорциума университетов России, созданного в 2008 году на базе ведущих университетов России. Консорциум был инициатором и основным организатором успешной реализации в 2010–2012 годах проекта “Суперкомпьютерное образование” комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России. При активной поддержке ректора МГУ академика В.А. Садовниченко и декана факультета ВМК МГУ академика Е.И. Моисеева на факультете сформирована суперкомпьютерная база для реализации образовательных программ в области высокопроизводительных вычислений. Целевая подготовка специалистов в области суперкомпьютерных технологий проводится на кафедре Суперкомпьютеров и квантовой информатики факультета ВМК.

С 2008 года на факультете для учебных целей активно используется суперкомпьютер IBM Blue Gene/P. В 2018 году установлен новый высокопроизводительный кластер на базе процессоров Power8, оснащенный современными графическими ускорителями NVIDIA P100. Суперкомпьютеры Ломоносов-2, Blue Gene/P и новый высокопроизводительный кластер активно используются в учебном процессе. В учебные программы, реализуемые на факультете по подготовке бакалавров и магистров, включены

базовые общие курсы “Суперкомпьютеры и параллельная обработка данных” (бакалавры) и “Суперкомпьютерное моделирование и технологии” (магистры). Углубленное изучение параллельных вычислений и суперкомпьютерных технологий проводится в рамках различных вариативных учебных дисциплин с учетом специфики научных направлений, поддерживаемых конкретными кафедрами.

Обучение суперкомпьютерным технологиям не ограничивается пределами факультета. Лекционные курсы по основам параллельной обработки данных и параллельным вычислениям читаются сотрудниками факультета в филиалах МГУ в Астане и Ереване. С 2018 года стартовала программа подготовки специалистов по прикладной математике в совместном российско-китайском университете МГУ и Пекинского политехнического института (МГУ-ППИ) в г. Шеньчжень [8]. В программе обучения предусмотрено углубленное изучение суперкомпьютерных технологий. Широкий охват обучающихся различным аспектам математического моделирования и суперкомпьютерных технологий обеспечивается проведением в МГУ ежегодной Суперкомпьютерной академии [9]. Слушателями академии становятся студенты старших курсов, аспиранты, преподаватели и сотрудники российских и зарубежных высших учебных заведений, молодые ученые и уже опытные специалисты российских организаций, учителя школ. Более 1000 человек прошли обучение за 9 лет проведения академий.

10. СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГОСУДАРСТВО

Применение суперкомпьютерных технологий оказывает сейчас и будет оказывать еще большее влияние в будущем на развитие науки, промышленного производства, общества и государства в целом. Фактически, суперкомпьютерные технологии являются интегрирующей компонентой и инструментом обеспечения устойчивого развития государств, национальной безопасности, обеспечения конкурентных преимуществ наиболее крупных и динамично развивающихся экономик мира.

Но суперкомпьютерные технологии исключительно зависимы от государства. Многие страны сформировали и планомерно выполняют национальные программы развития суперкомпьютерных технологий, где основным приоритетом является создание целостных инфраструктур экзафлопсных вычислений, являющихся сегодня мощнейшим катализатором и драйвером развития суперкомпьютерной области в целом. По этому пути идут Китай, Япония, Европа, США, Индия, Южная Корея, ряд других стран. Масштабность работ в этой области хорошо иллюстрируется, на-

пример, вот такими фактами. Две верхние позиции списка Top500 сегодня занимают прототипы экзафлопсных систем США (1 Eflops – это производительность, равная 10^{18} операций в секунду). В Китае одновременно финансируются три проекта создания экзафлопсных систем, создаваемых на различной технологической основе. Страны Европы объединились в рамках Европейской процессорной инициативы, направленной на разработку собственных процессоров, что должно обеспечить технологическую независимость и безопасность. На рис. 1 показан уровень инвестиций в указанные программы [10], которые данные страны выделяют в рамках национальных инициатив. В частности, для поддержки создания экзафлопсных систем правительство США одобрило выделение 1.8 миллиарда долларов на разработку аппаратной части и еще примерно столько же на создание алгоритмов и программного обеспечения в рамках проекта Exascale Project [11].

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Российской Федерации нет суперкомпьютерной инфраструктуры, но делаются попытки формирования суперкомпьютерных центров в области образования и науки. На сегодня (январь, 2019 г.) общая производительность 50 самых мощных суперкомпьютерных систем составляет около 17.4 Pflops (по данным [12]). Возникла очевидная парадоксальная ситуация. Масштабность задач, решаемых российскими суперкомпьютерными центрами по всем приоритетам Стратегии НТР, абсолютно не соответствует их реальным крайне низким возможностям. При этом востребованность суперкомпьютерных ресурсов в нашей стране огромна: рабочей группой Минобрнауки РФ проведен анализ потребности в СКТ в рамках ФОИВ, госкорпораций и организаций, в результате чего выделено более 700 задач, для решения которых требуются суперкомпьютерные ресурсы. Ясно, что создание указанных центров у нас в стране носит эпизодический и “догоняющий” характер, что осуществляется в полном отсутствии единой государственной политики развития суперкомпьютерной отрасли.

Вместе с этим, за последние годы в России создан значительный научно-технологический задел, который может стать основой для ускоренного развития данной области. У ряда организаций есть опыт создания и сопровождения больших суперкомпьютерных систем: АО “Т-Платформы”, МГУ имени М.В. Ломоносова, ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, ЗАО “РСК-Технологии”, РФЯЦ ВНИИЭФ, НИИСИ РАН, ФГУП “Квант”, НИЦ “СуперЭВМ и нейрокомпьютеров”, НИЦ КИ, АО “МЦСТ”, ННГУ, ЮУрГУ, СПбПУ и другие. Развиваются семейства отечественных процессо-

U.S.  ▪ \$1 to \$2 billion a year in R&D (including NRE) ▪ Investments by both governments & vendors ▪ Plans are to purchase multiple exascale systems	EU  ▪ About 5 billion euros in total ▪ Investments in multiple <u>exascale</u> and <u>pre-exascale</u> systems ▪ Investments mostly by country governments with a little from the EU
China  ▪ Over \$1 billion a year in R&D ▪ Investments by both governments & vendors ▪ Plans are to purchase multiple <u>exascale</u> systems each year ▪ Already investing in 3 <u>pre-exascale</u> systems by 2017/18	Japan  ▪ Planned investment of just over \$1 billion* (over 5 years) for both the R&D and purchase of 1 <u>exascale</u> system ▪ To be followed by a number of smaller systems ~\$100M to \$150M each ▪ Creating a new processor and a new software environment

Рис. 1. Инвестиции США, Европы, Китая и Японии в создание национальных инфраструктур эксафлопсных вычислений (данные IDC [10]).

ров Эльбрус и Байкал, в АО “НИЦЭВТ” отработана технология производства высокоскоростного интерконнекта, ведутся работы по созданию компьютеров с реконфигурируемой архитектурой. Значительный задел есть в области разработки наукоемких прикладных программных пакетов, которые в перспективе могут составить конкуренцию лучшим зарубежным аналогам (ЛОГОС, FlowVision, Fidesys и другие). Не только значительный задел, но зачастую и лидерство есть у российских специалистов в области математического моделирования и алгоритмических технологий. В целом же, в России есть значительный задел в области суперкомпьютерных технологий, и это является важным конкурентным преимуществом нашей страны, которое необходимо использовать. Недооценка значения суперкомпьютерных технологий приводит к тому, что мы не только пропускаем мировой тренд, но и упускаем уникальный шанс использования огромного потенциала российских специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Люстерник Л.А., Абрамов А.А., Шестаков В.И., Шура-Бура М.Р. Решение математических задач на автоматических цифровых машинах. Программирование для быстродействующих электронных счетных машин. Издательство Академии наук СССР, 1952, 327 стр.
2. Ершов А.П., Шура-Бура М.П. Становление программирования в СССР: Начальное развитие. Новосибирск, 1976, 49 с. (Препр. /АН СССР, Сиб. Отделение: ВЦ; № 12).
3. Ershov A.P. The Early Development of Programming in the USSR. A History of Computing in the Twentieth Century: A Collection of Essays. New York a.o., 1980. P. 137–196. (Jt. auth. M.R. Shura-Bura).
4. Список 500 самых мощных суперкомпьютеров мира. www.Top500.org.
5. Antonov A., Dongarra J., Voevodin V. Algowiki Project As an Extension of the Top500 Methodology. Supercomputing Frontiers and Innovations. 2018. V. 5. № 1. P. 4–10.
6. Eni Takes the Lead in Industrial Supercomputing. <https://www.hpcwire.com/2018/01/23/eni-takes-lead-industrial-supercomputing>
7. Исследования Фонда кино “Российская киноиндустрия — 2017”. www.fond-kino.ru/documents/download/740
8. Совместный университет МГУ-ППИ. <http://szm-subit.ru>
9. Суперкомпьютерная академия МГУ. academy.hpc-russia.ru
10. Данные отчета аналитического агентства Hyperion: “Hyperion (IDC) Paints a Bullish Picture of HPC Future”, 2017.
11. <https://www.exascaleproject.org>
12. Список 50 самых мощных суперкомпьютеров России. <http://top50.supercomputers.ru>