



GLOBAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY: H  
INFORMATION & TECHNOLOGY

Volume 17 Issue 2 Version 1.0 Year 2017

Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal

Publisher: Global Journals Inc. (USA)

Online ISSN: 0975-4172 & Print ISSN: 0975-4350

# Technological Methods Analysis in the Field of Exaflops Supercomputers Development Approaching

By Molyakov Andrey Sergeevich & Eisymont Leonid Konstantinovich

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

**Abstract-** In this article authors describe new supercomputing developing roadmaps, illustrate how to solve Moore's Law problem. Authors show two different ways of creating new high-productive clusters: evaluative and revolutionary. There are new era so-called "Post Moore". It means specialists all over the World should together in collaboration create new electronic components, architecture principles, design criteria and etc.

**GJCST-H Classification:** B.7.1



*Strictly as per the compliance and regulations of:*



© 2017. Molyakov Andrey Sergeevich & Eisymont Leonid Konstantinovich. This is a research/review paper, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 Unported License <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>, permitting all non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# Technological Methods Analysis in the Field of Exaflops Supercomputers Development Approaching

Molyakov Andrey Sergeevich <sup>α</sup> & Eismont Leonid Konstantinovich <sup>ο</sup>

**Abstract-** In this article authors describe new supercomputing developing roadmaps, illustrate how to solve Moore's Law problem. Authors show two different ways of creating new high-productive clusters: evaluative and revolutionary. There are new era so-called "Post Moore". It means specialists all over the World should together in collaboration create new electronic components, architecture principles, design criteria and etc.

## 1. INNOVATIVE PROJECTS OF NEW SUPERCOMPUTERS DEVELOPING

Наиболее заметным явлением в начале работ по экзамасштабной и экзафлопсной тематике было проведение рабочих групп по инициативе DARPA. Далее, в 2010 году, была запущена новая программа DARPA UHPC развития экзамасштабных технологий. В этой программе участвуют четыре группы, каждая из которых, состоит из коммерческих компаний, национальных лабораторий и университетов: проект Runnemed (Intel), проект Echelon (NVIDIA/Cray), проект X-calibr (Лаборатория Sandia), проект Angstrom (MIT).

В соответствии с исторически сложившимися традициями, DARPA в своих работах заняла нишу инновационных проектов, а DOE (Министерство энергетики США) проводило большей частью эволюционную линию по созданию рекордно крупных суперкомпьютеров, прежде всего в двух ультракомпьютерных центрах в Окриджской и Аргонской лабораториях.

Тезис 1. DARPA (представляет военных и разведывательные службы США) не справилась в полной мере с задачами создания перспективных систем петафлопсного уровня реальной производительности (программа DARPA HPCS) и настолько неудачно начала работы по экзамасштабным технологиям (программы DARPA UHPC и OHPC), что можно говорить об их тупиковости и близком преждевременном закрытии. В связи с этим, ответственность за выполнение работ по экзамасштабной тематике теперь возлагается на DOE.

Тезис 2. Неудачи начала работ по экзамасштабным системам объясняются низким уровнем инновационности проектов DARPA UHPC и слабым вовлечением талантливых разработчиков в эти проекты.

Тезис 3. Инновационный стиль в виде работ инновационного характера, от алгоритмов и прикладного программного обеспечения до элементно-конструкторской базы, противопоставляется стратегии эволюционного развития за счет постепенного введения улучшений, "инкрементному" развитию, которое считается тупиковым в долгосрочной перспективе, но выгодно экономически основным промышленным вендорам (Intel, IBM, Cray, NVIDIA и др.).

Тезис 4. В качестве ключевой темы продвижения к экзамасштабным системам ставится вопрос создания новых моделей организации и выполнения параллельных программ. Выделяются два подхода, эволюционный и инновационный.

Тезис 5. Переход инициативы по работам экзамасштабной тематики к DOI и необходимость преобладания в этих работах инновационного подхода объясняется тем, что США могут потерять мировое лидерство в данной области, а это место будет немедленно занято другими странами, вероятнее всего из Азиатско-Тихоокеанского региона. Эти страны пойдут на любые риски в выборе наиболее оптимальных стратегий, поскольку находятся в роли догоняющих. В связи с этим, подключение самой мощной в США научно-технической инфраструктуры DOE в виде не только научных национальных лабораторий, но и национальных лабораторий ядерного оружейного комплекса к решению этой ставшей важнейшей проблемы современности, которые также и скоординируют работу ведущих университетов и промышленных вендоров, – принципиально необходимо.

Тезис 6. Стремление к мировому лидерству США в области экзамасштабных систем и их приложений должно быть совмещено с международным сотрудничеством по этой линии с целью эффективного использования мировых интеллектуальных ресурсов и достижений.

Тезис 7. Разработка экзамасштабных систем и технологий их применения для решения важнейших задач к концу 2020 года рассматривается как качественный переход в области основ и технологий, организации соответствующей инфраструктуры исследований и разработок для создания систем зеттафлопса и йотафлопса, в которых будут применены новейшие достижения нанотехнологий.

Author α: e-mail: andrei\_molyakov@mail.ru

Таким образом, для формирования мнения о проектах экзафлопсной тематики можно теперь рассматривать, в основном, работы DoE. Формирование крупного проекта DoE по созданию экзафлопсной машины на эволюционных или инновационных принципах задерживается. Сейчас выполняется множество небольших проектов по разным направлениям большим количеством групп.

В целом, в настоящее время в DoE имеются следующие направления работ по тематике экзамасштабных систем (это сейчас называют "exascale ecosystem", экзамасштабная экосистема, которые в 2013 году должны дополниться направлением OS/R или «Экзамасштабные операционные системы и системы поддержки выполнения программ» (Exascale Operating and Runtime Systems).

Далее приведем краткие сведения об этих программах. Эта информация специально структурирована так, чтобы в будущем вносить дальнейшие уточнения.

В части технологии создания процессора этот проект связан с работами по линии архитектуры Intel MIC (Many Integrated Core), которая в настоящее время стала называться Xeon Phi. Это микропроцессор со множеством облегченных 4-х тредовых ядер с системой команд X86 и векторными расширениями. В 2012 году вышел образец сопроцессорной платы Knight Corner с таким микропроцессором, изготовленным по технологии 22 нм, имеющим более 50 процессорных ядер. Эта плата содержит 8 Гбайт памяти GDDR5 и подключается через шину PCI Express. Производительность такого сопроцессора около 1 Тфлопс. Этот сопроцессор виден приложению как

вычислительный узел, работающий под управлением ОС Linux, так что его использование ожидается более простым, чем современных графических процессоров.

В части технологии памяти Intel в этом проекте будет работать с Micron Technologies над созданием гибридного куба памяти (HMC, Hybrid Memory Cube). Это вариант технологии 3D сборки кристаллов процессоров и памяти, что должно значительно повысить пропускную способность интерфейса процессора с памятью и снизить задержки обращений к памяти.

Например, экзамасштабные приложения разрабатываются уже в настоящее время в центрах разработки, как и специальное оборудование для этих приложений. Так что вероятен и вариант появления не одного (например, в Окриджской лаборатории), а нескольких образцов экзамасштабных систем, причем в этих центрах со-разработки, т.е. в Лос-Аламосской и Аргонской лаборатории, лаборатории Сандиа.

Кстати, Лос-Аламосская лаборатория и лаборатория Сандиа образовали недавно совместный центр ASEC, причем лаборатория Сандиа также сотрудничает с Окриджской лабораторией в рамках работ образованного в DoE Института перспективных архитектур и алгоритмов. Лаборатория Сандиа и Лос-Аламосская лаборатория имеют мощный производственный комплекс, выполняющий все виды работ, включая и работы по нанотехнологиям.

В таблицах 1 и 2 приведены "дорожные карты" реализации суперкомпьютеров эволюционного направления в Окриджской и Аргонской лабораториях. Рубеж в 30 PFlops взят в 2012 году.

**Таблица 1:** Оценки характеристик систем, создаваемых на этапах экзафлопсного проекта с применением тяжелых" процессорных ядер

| Системная характеристика                                 | Годы внедрения системы |           |            |              |
|--|------------------------|-----------|------------|--------------|
|  | 2009                   | 2011      | 2015       | 2018         |
| Общая пиковая производительность                         | 2 PF                   | 20 PF     | 100-200 PF | 1 EF         |
| Общий объем оперативной памяти                           | 0.3 PB                 | 1 PB      | 5 PB       | 10 PB        |
| Пиковая производительность узла                          | 125 GF                 | 200 GF    | 400 GF     | 1-10 TF      |
| Пропускная способность памяти узла                       | 25 GB/s                | 40 GB/s   | 100 GB/s   | 200-400 GB/s |
| Количество ядер в узле (параллелизм узла)                | 12                     | 32        | 0(100)     | 0(1000)      |
| Пропускная способность сетевого интерфейса узла          | 1.5 GB/s               | 10 GB/s   | 25 GB/s    | 50 GB/s      |
| Количество узлов в системе                               | 18,700                 | 100,000   | 500,000    | 0(Million)   |
| Количество ядер в системе (общий параллелизм)            | 225,000                | 3 Million | 50 Million | 0(Billion)   |
| Общая мощность потребления                               | 6 MW                   | ~10 MW    | ~10 MW     | ~ 20 MW      |
| Объем внешней памяти                                     | 15 PB                  | 30 PB     | 150 PB     | 300 PB       |
| Пропускная способность ввода-вывода                      | 0.2 TB/s               | 2 TB/s    | 10 TB/s    | 20 TB/s      |
| МТП, время между прерываниями по сбою или отказу системы | Days                   | Days      | Days       | 0(1Day)      |

В Окриджской лаборатории потенциал модернизации суперкомпьютера XC30 до 100 Pflops, а для Аргонской лаборатории разрабатывается новый суперкомпьютер IBM BlueGene/R с производительностью до 100 Pflor/s, он будет введен в эксплуатацию в 2015 году. Кроме того, фирма IBM

готовит новый вариант суперкомпьютера на базе нового микропроцессора Power 8. По информации из экспертной среды, это 256 ядер, ядра трех типов – суперскалярные, легкие и легкие с векторными ускорителями, все ядра 6-тредовые.

Таблица 2: Оценки характеристик систем, создаваемых на этапах экзафлопсного проекта “легкого” направления

| Системная характеристика                        | Годы внедрения системы              |                                  |                                    |           |                    |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------|--------------------|
|   | 2004                                | 2007                             | 2012                               | 2015      | 2019               |
| Наименование системы/этапа                      | BG/L                                | BG/P                             | BG/Q (ONE)                         | TWO       | THREE              |
| Общая пиковая производительность                | 0.37 PF                             | 1 PF                             | 27 PF                              | 309 PF    | 1127 PF (1.127 EF) |
| Общий объем оперативной памяти                  | 0.034 PB                            | 0.151 PB                         | 2.147 PB                           | 8.590 PB  | 25.770 PB          |
| Пиковая производительность узла                 | 5.6 GF                              | 14 GF                            | 205 GF                             | 1.178 TF  | 4.301 TF           |
| Пропускная способность памяти узла              | 5.6 GB/s                            | 13.6 GB/s                        | 42.6 GB/s                          | ?         | ?                  |
| Объем памяти узла                               | 0.5 GB                              | 2-4 GB                           | 16 GB                              | ?         | ?                  |
| Количество ядер в узле (параллелизм узла)       | 2                                   | 4                                | 16                                 | 32        | 96                 |
| Тактовая частота (GHz)                          | 0.7                                 | 0.85                             | 1.6                                | 2.3       | 2.8                |
| Количество запускаемых операций за такт в ядре  | 4                                   | 4                                | 8                                  | 16        | 16                 |
| Пропускная способность сетевого интерфейса узла | 2.1GB/s –3D torus<br>0.7GB/s – tree | 5.1GB/s-3D torus<br>1.7GB/s-tree | 40 GB/s-5D torus<br>4 GB/s extlinc | ?         | ?                  |
| Количество узлов в системе                      | 65536                               | 73728                            | 131072                             | 262144    | 262144             |
| Количество ядер в системе (общий параллелизм)   | 0.13 Million                        | 0.3 Million                      | 2 Million                          | 8 Million | 25 Million         |
| Общая мощность потребления                      | 2.5MW                               | 4.8MW                            | 8MW                                | 30MW      | 40MW               |
| Количество узлов в стойке                       | 1024                                | 1024                             | 512                                | 1024      | 1024               |
| Количество стоек                                | 64                                  | 72                               | 256                                | 256       | 256                |
| Пиковая производительность стойки               | 5.7 TF                              | 14 TF                            | 105 TF                             | 1.206 PF  | 4.404 PF           |

За 2011–2014 годы NUDT разработал новую суперкомпьютерную систему Tianhe-2 – шифр «Полет Дракона», с производительностью 30 Petaflops. Ожидается использование микропроцессоров Godson-3C или Godson-4A, мультитредовых микропроцессоров FT-1500, новой версии коммуникационной сети Arch. Эта разработка противопоставляется американскому суперкомпьютеру IBM Sequoia на 18-ядерных (4 треда в ядре) микропроцессорах PowerPC и 5-мерной сети типа тор. Ставится цель превзойти американский суперкомпьютер в 1.5 раза. Есть сведения, что этот суперкомпьютер уже практически готов, но это скрывается.

До 2016 года четырем ведущим исследовательским центрам Китая Министерства Обороны, Министерства энергетики и Министерства образования и промышленных технологий Китая (это National Air and Space Intelligence Center (NASIC), NUDT, ICT и National Applied Research Laboratories (NARL)) поставлена задача разработать и ввести в эксплуатацию вычислительный комплекс под кодовым названием «Тайваньский ястреб» производительностью

100 Petaflops. При этом важнейшую роль должна сыграть тайваньская фабрика TSMC; она на 60% принадлежит Китаю, на 20% принадлежит Японии, на 20% – иностранному капиталу США и Западной Европы (по данным конца 2011 года). По данным на сентябрь 2012 года доля Китая в TSMC составляет уже 75–80%.

Гетерогенный суперкомпьютер, включающий три типа массово-мультитредовых микропроцессоров, классические суперскалярные микропроцессоры, графические микропроцессоры и сетевые микропроцессоры. Базовый микропроцессор – ST-2, возможны его модификации. Конструктив 4D с жидкостной системой охлаждения. Здесь будут использоваться новые микропроцессоры линейки Godson-3 и Godson-4 с тяжелыми суперскалярными ядрами, а также линейка Godson-T с легкими ядрами (типа микропроцессора Tileria).

Начиная с 2007 года Япония не имела систем, входящих в первую десятку списка Top500, т.е. систем петафлопсного класса производительности. Новые

планы развития имели цель изменить эту ситуацию, что и произошло сначала осенью 2010 года (Tsunami 2.0), а потом летом 2011 года (K-компьютер).

Tsunami 2.0 был о запущен осенью 2010 года и попал на 4-е место ноябрьского списка Top500 с пиковой производительностью 2,39 PFLOPS и производительностью на тесте Linpack около 1.2 PFLOPS. С 2013 по 2015 планируется разработать обновленную версию Tsubame 3.0 производительностью 30 PFlops, потребляемая мощность оценивается на уровне 1 MW, а стоимость – около 65 млн. долларов. Суперкомпьютеры Tsubame можно отнести к суперкомпьютерам традиционного кластерного типа. Это направление не считается как основное, определяющее будущее области суперкомпьютерных вычислений Японии. Работы ведутся в Токийском технологическом институте.

K-компьютер – самый мощный и статусный суперкомпьютер Японии, разработанный по программе создания перспективных стратегических суперкомпьютеров. Головная организация этого проекта - Институт физических и химических исследований (RIKEN). Этот институт наиболее приближен к Министерству образования, культуры, спорта, науки и технологии (MEXT), отвечающего за суперкомпьютерную тематику, является его исследовательским центром. Этот проект можно считать японским ответом на американский проект DARPA HPCS.

В общей сложности, этот проект создания K-компьютера обошелся в 1 млрд. евро (около 1.5 млрд. долларов). Пиковая производительность K-компьютера ~ 10 PFLOPS, производительность на тесте Linpack – 8-9 PFLOPS, но самая важная характеристика – возможность достижения на реальных приложениях производительности около 1 PFLOPS. В качестве таких приложений разработчики ориентировались на 8 прикладных областей, при этом в качестве главных областей были выделены нанотехнологии и область живых систем.

Имеются также партнерские проекты государственного и частного сектора, ориентированные на разработку программного обеспечения систем экзауровня. Один из таких проектов – EADI (Exascale Application and Data Initiative), возглавляемый фирмой Fujitsu и представляющий собой заключительный этап разработки 10 PFLOPS-ой системы (RIKEN NGS, K-компьютер) для японского правительства. EADI – это комплексный проект, который включает все направления работ Fujitsu по линии экзафлопсных вычислений.

Особняком стоит проект создания военного суперкомпьютера экзамасштабного уровня «Стрела времени», который рассматривается далее в этом разделе. Ведутся работы по био- и квантовым компьютерам, но информации о создании суперкомпьютеров на этих технологиях пока нет.

До недавнего времени в Западной Европе большая часть работ в области суперкомпьютеров и суперкомпьютерных вычислений была связана с разработкой того или иного программного обеспечения, множества приложений, а также новыми направлениями в области элементно-конструкторских технологий. Значительная часть специалистов работала и работает в филиалах американских фирм, причем их привлечение к такой работе со стороны американцев – сознательная и широко проводимая политика использования зарубежных высококвалифицированных ресурсов в интересах США.

Оригинальных инновационных суперкомпьютерных проектов, тем более связанных с разработкой собственной элементной базы, не было, хотя возможности для таких работ явно были и есть, но проводилась политика полностью ориентироваться в этих вопросах на американские разработки. Исключением была только разработка коммуникационной сети EXTOLL.

В последние два года ситуация стала меняться, появилась политическая воля иметь в Европе большую самостоятельность в такой важнейшей отрасли, как суперкомпьютерные технологии и их приложения. В связи с этим, появились инновационные проекты создания аппаратных средств мультипетафлопсных и экзафлопсных систем, например DEEP (с применением Xeon Phi, сети EXTOLL, правда при значительном участии Intel), Mont Blanc (ядра ARM и графические ускорители Nvidia). Запущен крупнейший проект разработки программного обеспечения экзамасштабных систем CREST.

При этом ряд проектов был запущен с сильным участием российской компании T-платформы, которая кроме кластерных суперкомпьютеров при этом выходила и на инновационные возможности создания собственной элементно-компонентной базы. Есть мнение, что именно это и было главной причиной занесения компании T-платформы в марте 2013 года в США в черный список.

Знаковых успехов по линии создания мультипетафлопсных суперкомпьютеров и продвижения к экзафлопсным системам пока нет, хотя несколько крупных кластеров собственной разработки уже попали в верхнюю часть списка Top500 и организовано несколько вычислительных центров, ориентированных в будущем на вычисления экзафлопсного уровня.

Самый мощный суперкомпьютер петафлопсного уровня был недавно разработан в ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров). Эта организация является реальным лидером в сегменте суперкомпьютеров высшего диапазона производительности. Очевидно, что именно на эту организацию сделана ставка Правительством в вопросе создания суперкомпьютеров уровня 10, 100 и 1000 Пфлопс. Это предприятие ядерного оружейного комплекса и атомной

промышленности, что все объясняет. ГК «Росатом» подготовила в мае 2011 года Концепцию по экзафлопсным технологиям, в ее подготовке участвовали несколько организаций (Департамент развития научно-производственного блока ядерного оружейного комплекса, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ, Департамент развития Минобрнауки России, ФГУП «НИИ «Квант», ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, НИИСИ РАН, МСЦ РАН, НИИММ им. Н.Г. Чеботарева при КГУ, ННГУ им.Н.И.Лобачевского, МГУ им. М.В.Ломоносова, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана), а ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ была головной.

T-платформы и МГУ им. М.В.Ломоносова – это другая группа разработчиков, они недавно подписали Меморандум о намерениях по сотрудничеству в области создания суперкомпьютеров нового поколения экзафлопсного уровня. Это конкуренты группы, возглавляемой ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Основу еще одной группы составляют ИПМ им. М.В.Келдыша РАН и ФГУП НИИ «Квант» – две организации с большой историей в несколько десятилетий совместных работ. Кроме сотрудничества с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» они ведут ряд проектов самостоятельно, поскольку работают главным образом в других прикладных областях. В последнее время к этой группе присоединились ЗАО «ВТ-Консалтинг», ООО «Е-троник», СПбГПУ, ФГУП ВО «Внештехника», Центр инженерных разработок физического факультета МГУ. Всегда было сотрудничество с ИПС им. А.К. Айламазяна РАН и ОАО «НИЦЭВТ», МСЦ.

По инновационной линии пока созданы три центра соразработки специальных экзафлопсных суперкомпьютеров для следующих областей: материаловедение (LANL – головной исполнитель), перспективные реакторы (ANL – головной исполнитель) и процессы горения (SNL – головной исполнитель). Это направление можно охарактеризовать как оптимизацию применения КМОП-технологий. Ведется множество небольших проектов фундаментальных исследований, причем одно из основных направлений – новые модели организации параллельных программ для экзафлопсных суперкомпьютеров, новые run-time системы и операционные системы, новые средства параллельного программирования.

Крупная инновационная программа разработки в DoE инновационного экзафлопсного суперкомпьютера ожидается после 2013 года. В настоящее время для поддержки основных промышленных вендоров запущена предапрительная программа FastForward по разработке процессоров и модулей памяти, а также системы хранения данных. По мнению авторов, наибольший интерес представляет проект фирм Cray/NVIDIA Echelon.

Китай традиционно виртуозно воспринимает, копирует и развивает чужие проекты, применяя при этом новейшие технологии, которые также часто имеют

иностранное происхождение, часто из Японии, Сингапура и Тайваня. Ведутся эволюционные и инновационные направления. Главный разработчик – Министерство обороны Китая в виде NUDT, университета оборонных технологий Китая.

По эволюционной линии авторы оценивают отставание Китая от США не более 2-3 лет. В настоящее время собран суперкомпьютер Tianhe-2 (проект «Полет дракона») с производительностью 30 Пфлопс. Эта разработка пока не афишируется, применяется американская и собственная элементная база, как микропроцессоры, так и сетевые СБИС. В 2016 году должен быть построен 100 Пфлопсный суперкомпьютер (проект «Тайваньский ястреб»).

По инновационной линии пока известно лишь о проекте СТ-2 создания военного суперкомпьютера (проект «Удар грома») экзафлопсного уровня производительности для решения информационных задач, на базе которого посредством изменения баланса в используемых микропроцессорах разного типа можно построить экзафлопсный суперкомпьютер и для научно-технических расчетов. По имеющимся сведениям, в основу этого проекта были положены российский проект СКСН Ангара и американский ParalleX.

Япония более самостоятельна и креативна в своих проектах, отличается сильной закрытостью. Имеются эволюционные и инновационные направления. По эволюционному направлению был разработан суперкомпьютер Tsubame и K-компьютер (10 петафлопс), причем если в Tsubame используется американская элементная база, то в K-компьютере – собственная. Намечено создание Tsubame-3 производительностью 30 петафлопс.

По инновационной линии известен пока лишь проект военного суперкомпьютера «Стрела времени», который разрабатывается Силами самообороны Японии, но за счет изменения состава микропроцессоров в вычислительных узлах может быть переориентирован на решение научно-технических задач.

По линии работ по элементной базе пост-Муровской эры достигнуты заметные результаты в области сверхпроводниковой электроники, которые можно расценивать как не хуже американских, по квантовым клеточным автоматам и квантовым компьютерам. Традиционно сильны позиции по коммуникационным сетям, где их можно считать мировым лидером.

Западная Европа ведет проекты экзафлопсных суперкомпьютеров эволюционного типа DEEP и Mont Blanc, это новое явление, раньше разработкой собственных аппаратных средств так активно не занимались, использовалась американская техника. Есть потенциал организации и самостоятельных инновационных проектов, но слишком много специалистов работают на США и Китай. Обсуждается вопрос создания европейского микроэлектронного гиганта типа фирмы Intel. Организовано несколько

центров выполнения экзафлопсных вычислений, много работ ведется по программному обеспечению для экзафлопсных систем.

В России пока только сформулирована Концепция экзафлопсных технологий, крупное целевое финансирование пока не открыто, но финансирование отдельных небольших исследовательских проектов уже началось.

Количество публикаций по этой тематике в России невелико. Судя по открытым данным, отставание России от США в классе задач с хорошей пространственно-временной локализацией обращений к памяти составляет около 10 раз (тест Linpack, рейтинг Top500), а в классе задач с плохой пространственно-временной локализацией – не менее 100 раз (тест BFS, рейтинг Graph500, тест RandomAccess, рейтинг HPCChallenge).

## II. SUPERCOMPUTERS OF POST MOORE'S ERA

Считается, что предел развития кремниевых технологий – около 5 нм. Имеются оценки, что этот предел будет достигнут в 2020-2024 году, а проблемы начнутся уже после 2014 года, когда будет достигнут уровень 14-15 нм. Это пессимистические прогнозы.

Оптимистичные прогнозы по развитию КМОП-технологий обычно исходят от фирмы Intel. В настоящее время Intel и еще три фирмы в мире (TSMC, STMicroelectronics и Samsung) промышленно освоили технологию 22 нм, это произошло в 2012 году, в то время, как по прогнозам это должно было произойти в 2016 году.

Важны также планы по усовершенствованию модулей памяти, поскольку от них сильно зависит сейчас быстродействие и энергопотребление систем. Фирма Intel ведет работы совместно с фирмой Micron Technologies над созданием гибридного куба памяти (HMC, Hybrid Memory Cube).

Оптимистические прогнозы развития кремниевых технологий в настоящее время несколько успокаивают, но уже не позволяют снять напряженность в исследованиях и разработках по новым вариантам элементной базы для логических схем и памяти, вариантов соединения компонентов кристаллов и собственно кристаллов. Срок достижения предела развития кремниевых технологий (окончания действия закона Мура) близок и темпы приближения к нему опережают предсказания, что видно на примере технологий 22 нм. Работы по созданию новых технологий элементной базы ведутся уже несколько десятилетий, но в настоящее время ни одна из них не готова для практического использования вместо кремниевых технологий и пока речь может идти о выборе тех, которые можно было бы использовать хотя бы через 10 лет.

Вместе с тем, для отдельных вычислительных устройств и даже блоков готовые решения есть, есть и явно приоритетные направления исследований по

элементной базе будущих суперкомпьютеров с уровнем производительности зетта ( $10^{21}$ ) и более уровня.

Тем не менее, круг занятых в этих работах российских специалистов стал обозначаться, началась работа с ними как с экспертами данной области. В дальнейшем это поможет дать более точные и объективные оценки, но уже первый опыт изучения этих направлений показал, что эту работу уже пора вести непрерывно, содействовать координации.

Достижение физических ограничений КМОП-технологий и проводимые работы по новым технологиям, которые напрямую связаны с наномиром и квантовыми эффектами, сделали вновь актуальными несколько забытые в разработчиках суперкомпьютеров в период успешного действия закона Мура вопросы по физическим ограничениям производительности вычислительных систем. При оценке и систематизации работ по разным вариантам перспективной элементной базы и оценке пределов повышения производительности суперкомпьютеров (это было одной из задач данного прогноза) оказалось удобным использовать базовые положения этих работ, а именно: оценку минимальных энергетических затрат (ограничение Лэндауэра); утверждение о зависимости вычислений и выделяемого тепла, т.е. связи между информацией и термодинамикой (принцип Неймана-Лэндауэра).

По представленному в разделе материалу можно акцентировать внимание на следующих аспектах:

1. В настоящее время промышленно освоена кремниевая (КМОП) технология 22 нм, но всего четырьмя фирмами в мире – Intel, TSMC, Samsung и STMicroelectronics. По прогнозу Intel, уровень 5 нм будет достигнут уже в 2020 году. Считается, что дальнейшая миниатюризация невозможна, а закон Мура перестанет работать не позже 2024 года.
2. Эффективное использование КМОП-технологий в ближайшее время и вплоть до окончания действия закона Мура связано с различными приемами оптимизации: архитектуры (специализированные процессоры и ускорители), микроархитектуры; соединений на кристалле и между кристаллами; конструктивов в виде 3D сборки модулей и 3D СБИС. Работы такого типа ведутся и рассматриваются как основные при создании экзафлопсных суперкомпьютеров, но они связаны с преодолением слишком многих проблем.
3. Новые решения в области элементно-конструкторской базы (технологий пост-Муровской эры) могут облегчить создание экзафлопсных суперкомпьютеров и стать основой для создания суперкомпьютеров следующих уровней производительности. Основные задачи при разработке новых вариантов элементной базы: повысить частоту работы, снизить

энергопотребление, добиться высокого уровня интеграции.

4. Современные микропроцессоры работают на частоте 3-6 GHz. Устройства на базе сверхпроводниковых технологий (RSFQ) могут работать на частоте нескольких сотен GHz, по публикациям известны образцы, работавшие на частотах 20GHz и 80 GHz. Устройства на базе квантовых клеточных автоматов (QCA) могут работать на частоте порядка THz.
5. Теоретический предел затрат на обработку одного бита информации в обычных компьютерах неререверсивного типа составляет  $kT \ln 2$  (ограничение Лэндауэра, далее для простоты  $kT$ ). Для устройств на современных КМОП-технологиях характерна оценка затрат на бит обрабатываемой информации около 1000000  $kT$ . Из публикаций известно о получении на экспериментальном сумматоре на базе RQL-технологии (оптимизированного варианта RSFQ-технологий) затрат на один бит в 1000  $kT$ . Было также опубликовано, что при использовании nSQUID технологии (еще один оптимизированный вариант RSFQ) было получено, что на устройстве типа сдвиговый регистр затраты на один бит составляют несколько  $kT$ . Это обнадеживающие результаты, но следует признать, что такие технологии пока пригодны для создания реконфигурируемых решающих полей арифметических устройств для реализации потоковых вычислений. Работ по продвижению этих технологий еще много, эти технологии будут наверняка применяться в сочетании с КМОП-технологиями.
6. Ограничение Лэндауэра и требование обеспечения работы без сбоев на протяжении длительных отрезков времени для обычных суперкомпьютеров неререверсивного типа (без специальных мер по сохранению энергии при обработке информации) обуславливают верхнюю границу физически достижимой производительности суперкомпьютеров в несколько десятков эксафлопс, это ограничение получило название «точка Стерлинга».
7. Дальнейший рост производительности возможен после принципиального пересмотра суперкомпьютеров и перехода к их реверсивной организации, а также применению хотя бы в виде ускорительных блоков квантовых компьютеров и аналоговых компьютеров, возможно также построенных на квантовых принципах.
8. Важнейшим первым в истории вычислительных систем примером компьютера последнего типа является 128-кубитовый квантовый компьютер канадской фирмы D-Wave. Процессор этого компьютера быстрее двух процессоров Xeon (2.6 GHz) на переборном алгоритме глобальной

минимизации на четыре порядка, но требует для работы температуры, близкой к абсолютному нулю.

9. Работы по вариантам перспективной элементной базы пост-Муровской эры отлично организованы на федеральном уровне в США, активно ведутся в Японии. Эти две страны – явные мировые лидеры в этом плане.

### III. SUMMARY

1. Есть значительные проблемы при создании эксафлопсных суперкомпьютеров по производительности и энергопотреблению (сеть, память и процессор), отказоустойчивости и продуктивности программирования.
2. Элементно-конструкторская база позволяет использовать мультиядерность (1000-кратно), повышенную пропускную способность кристаллов по вводу-выводу (3D-компоновка, TSV), оптические соединения между платами («Holley», WDM-технологии) и внутри кристаллов (нанотрубки), новая технология памяти (HMC, NVRAM).
3. Есть архитектурно-программные решения – массовая мультитредовость и модель разделения вычислений/доступа к данным (MT и DAE), потоковость (MD/DF), локализация данных и вычислений (RPC), гибридность/функциональная специализация (10x10), глобально-адресуемая память (PGAS/APGAS/HPGAS), интеллектуальная отказоустойчивость (Resilience).
4. Подходы к решению – эволюционный (DoE NNSA/ASCR), умеренно-инновационный (DoE ASCR), агрессивно инновационный (DARPA), инновационно-эволюционный&эмуляционный (DoE ASCR, NSF).
5. Сложность проблем и неочевидность решений за рубежом потребовала привлечения ресурсов не только на федеральном уровне, но и на региональном и мировом. Цели работ по эксамаштабной тематике (DARPA) и эксафлопсной (DoE) имеют отличия, но методы их достижения во многом совпадают. Зарубежный опыт показывает, что в организационном плане важным является централизованная формулировка целей работ и управления ими (формирование и поддержка «силового поля»). Работы по эксафлопсным суперкомпьютерам находятся на переходном этапе от применения только кремниевых технологий к переходу на применение пост-Муровских перспективных технологий.

### REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

1. Моляков, А.С. Тихоокеанско-азиатские петафлопсы / А.С. Моляков, В.С. Горбунов, П.В. Забеднов // Открытые системы. СУБД. – 2011. – №7. – С. 26 – 29.

2. Олифер, В.Г.. Компьютерные сети / В.Г. Олифер. – СПб.: Изд – во Питер, 2004. – 199 с.
3. Моляков, А.С. Исследование скрытых механизмов управления ОС на различных платформах /А.С. Моляков // Известия Южного Федерального Университета..Технические науки. – Таганрог: Изд – во ТТИ ЮФУ, 2007. – №1. – С. 137 – 138.

