

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Федерального государственного  
учреждения «Федеральный исследовательский  
центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук»  
(ФИЦ ИУ РАН),  
академик

---

«25» 04 2018 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Сударевой Ольги Юрьевны «Встречная оптимизация класса задач трехмерного моделирования для архитектур многоядерных процессоров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Задачи трехмерного компьютерного моделирования решались промышленностью и наукой в течении многих десятков лет. К концу 20 века за счет развития вычислительных методов, микроэлектроники и архитектуры микропроцессоров и вычислительных систем был достигнут впечатляющий прогресс, однако для решения многих практических задач производительности вычислительных систем по-прежнему не хватало. В начале 21 века в технологиях высокопроизводительных вычислений произошли большие изменения: драйвером роста производительности вычислительной техники стали не только успехи технологий микроэлектронного производства, но и скачок в развитии архитектуры микропроцессоров — появились многоядерные микропроцессоры с нетрадиционной гибридной архитектурой, позволившие радикально увеличить число арифметических устройств на одном кристалле. В авторитетном обновляемом дважды в год списке ТОП-500 самых мощных

суперкомпьютеров неуклонно растет доля установок, использующих процессоры с гибридной архитектурой. Наиболее массовой из новых архитектур оказалась архитектура графических процессоров общего назначения — GPGPU. В последнем списке ТОП500 (ноябрь 2017) 70% среди первых 50 позиций занимают системы, использующие графические процессоры.

Графические процессоры общего назначения широко используются в России и в составе суперкомпьютеров-рекордсменов, и в составе массовых высокопроизводительных комплексов масштаба отдела или предприятия, ориентированных на решение инженерных задач, в частности, задач трехмерного моделирования.

Несмотря на поставленные в последние годы перед промышленностью и наукой Российской Федерации задачи импортозамещения, графические процессоры общего назначения в России не разрабатываются и не производятся. Однако, в близкой области вычислений специального назначения в России имеется ряд отечественных разработок, уже нашедших практические применения. К таким разработкам относятся, в частности, линейка микропроцессоров архитектуры Эльбрус, а также линейки микропроцессоров цифровой обработки сигналов КОМДИВ (системы на кристалле ВМ7 и ВМ9) и коммуникационных СБИС для высокопроизводительных комплексов общего и специального назначения, разрабатываемых при участии ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

Поэтому одним из возможных путей решения проблемы импортозамещения в области высокопроизводительных вычислений представляется развитие уже имеющихся отечественных аппаратных решений.

Таким образом, выбор направления развития отечественных многоядерных архитектур для поддержки высокопроизводительных вычислений общего назначения, в частности, для решения задач трехмерного моделирования, является **актуальной** научной проблемой.

Эта проблема не может быть решена в отрыве от номенклатуры решаемых задач и методов их решения. Для выбора направления развития отечественных гибридных архитектур в целях повышения производительности процедур общего назначения необходим анализ классов решаемых задач и методика оценки влияния ключевых характеристик гибридной вычислительной системы на производительность на данном классе задач.

Диссертация О.Ю Сударевой «Встречная оптимизация класса задач трехмерного моделирования для архитектур многоядерных процессоров» и посвящена решению этой проблемы для класса задач трехмерного моделирования.

В диссертации О.Ю Сударевой предлагается начать решение этой задачи с выработки общего подхода, метода, позволяющего получить теоретические оценки ожидаемой производительности вычислительной процедуры (класса процедур) на многоядерной вычислительной системе. Этот общий метод должен быть применим к вычислительным процедурам, часто используемым в трехмерном моделировании. Разработанный метод предлагается верифицировать путем проведения вычислительных экспериментов на гибридных системах различных классов с использованием как имеющихся в открытом доступе, так и специально разработанных в процессе исследования программных кодов. На основе полученных данных предлагается разработать проект доработки отечественных многоядерных микропроцессоров и оценить ожидаемую производительность доработанного микропроцессора на выбранных вычислительных процедурах.

В ходе диссертационного исследования О.Ю. Сударевой описанная выше программа была полностью выполнена, в результате чего были получены научные и практические результаты, **значимые** для исследований моделей и методов создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных и применений этих методов в производственных приложениях.

К **основным результатам** диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Разработана модель гибридной вычислительной системы, охватывающая ряд зарубежных и отечественных вычислительных систем.

2. Разработан метод предсказания (оценки сверху) производительности вычислительной процедуры данного класса на данной многоядерной гибридной вычислительной системе.

3. Применимость метода обоснована путем проведения вычислительных экспериментов с имеющимися в открытом доступе и вновь созданными для целей данного исследования кодами выбранных вычислительных процедур.

4. Выведен критерий сбалансированности вычислительной системы для данного класса вычислительных процедур.

5. С помощью разработанного метода обоснована неулучшаемость разработанных с участием О.Ю. Сударевой оптимизированных библиотечных процедур БПФ и свертки для отечественных гибридных многоядерных процессоров VM7 и VM9 разработки НИИСИ РАН.

6. Разработаны предложения по оптимизации архитектуры (программной модели) указанных отечественных микропроцессоров с целью повышения производительности на классах вычислительных задач, существенных для трехмерного моделирования.

**Общая характеристика диссертационной работы.** Диссертация имеет общий объем 175 страниц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списков литературы, рисунков, таблиц, сокращений и двух приложений. Список литературы включает 158 наименований.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель и задачи исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость, а также перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации на основе анализа отечественных и зарубежных публикаций последних лет и опыта работы ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН проведен обзор современных высокопроизводительных вычислительных систем и методологий программирования, применяемых при решении задач трехмерного моделирования. Наиболее подробно рассматриваются широко распространенные импортные графические ускорители и отечественные многоядерные микропроцессоры архитектуры КОМДИВ. В этой главе автором диссертации вводится модель гибридной вычислительной системы, позволяющая рассмотреть эти архитектуры с единой точки зрения. Далее в первой главе выбирается набор целевых вычислительных процедур, которые автор считает представителями важных классов задач трехмерного моделирования. Эти целевые процедуры выбраны из широко распространенного набора тестов NAS Parallel Benchmark (NPB). А именно, выбраны: процедура NPB FT (сводится к трехмерному быстрому преобразованию Фурье), процедура NPB MG (геометрический многосеточный метод) и процедура NPB CG (метод сопряженных градиентов для разреженных матриц, наиболее ресурсоемкой компонентой которого является процедура SpMV). В заключительных разделах главы 1 описывается метод оценки ожидаемой производительности вычислительной процедуры на гибридной системе и формальный критерий сбалансированности вычислительной системы для заданной вычислительной процедуры.

Ключевым этапом применения метода оценки ожидаемой производительности является представление вычисления в виде последовательных элементарных вычислительных операций, выполняемых на сопроцессорах (того или иного вида, в зависимости от архитектуры) и операций загрузок/выгрузок данных из системной памяти. После того, как подобное представление для конкретной процедуры или класса процедур проведено, ожидаемая производительность может быть вычислена путем алгебраических операций с параметрами вычислительной процедуры и параметрами вычислительной системы. Это позволяет до начала реализации

процедуры оценить целесообразность ее реализации на заданной вычислительной системе и наоборот, оценить, какие изменения параметров вычислительной системы необходимы для повышения эффективности выполнения данной процедуры.

Во второй главе диссертации предложенный метод оценки производительности подтверждается путем сравнения результатов вычислительных экспериментов с теоретическими результатами применения метода оценки ожидаемой производительности, описанными в той же главе. Вычислительные эксперименты проводились с реализациями трех выбранных в первой главе процедур (NPB FT, NPB MG и NPB CG, а также процедуры SpMV) на современных GPU. Для процедур MG и CG автором диссертации были разработаны оптимизированные реализации. Выполненная автором реализация процедуры MG для задач достаточно большого размера оказалась более эффективной, чем реализации, описанные в открытых публикациях. В целом, тестирование показало применимость к GPU предложенного метода оценки ожидаемой производительности, то есть хорошее совпадение теоретических предсказаний производительности по предложенной в диссертации методике и результатов прямых вычислительных экспериментов.

В третьей главе диссертации предложенный метод оценки производительности подтверждается путем сравнения результатов вычислительных экспериментов на отечественных микропроцессорах BM7 и BM9, использующих сопроцессор CP2 оригинальной отечественной архитектуры, с теоретическими результатами применения метода оценки ожидаемой производительности, описанными в той же главе. Вычислительные эксперименты проводились с реализациями на BM7 и BM9 трех процедур (множественное быстрое преобразование Фурье, NPB MG и SpMV). Процедуры БПФ для малых размеров векторов были разработаны автором диссертации и сотрудниками НИИСИ РАН и ИСП РАН. Вычислительные ядра остальных процедур были первоначально разработаны автором диссертации. Оптимизация вычислительного ядра процедуры SpMV

была далее проведена сотрудником ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН П.Б. Богдановым. Результаты замеров производительности отечественных микропроцессоров VM7 и VM9 показали применимость предложенного метода оценки ожидаемой производительности к отечественным микропроцессорам VM7 и VM9.

Выполненные автором диссертации реализации процедуры БПФ и свертки длинных комплексных векторов вошли в производственную библиотеку цифровой обработки сигналов НИИСИ РАН. Детальный анализ структуры алгоритмов этих процедур, необходимый для применения метода оценки ожидаемой производительности, позволил автору диссертации провести низкоуровневую оптимизацию этих процедур и добиться производительности, сопоставимой или превосходящей производительность процессоров мировых производителей (в пересчете на одно ядро), несмотря на более низкую тактовую частоту отечественных процессоров.

Кроме того, в третьей главе проделано (с использованием данных открытых публикаций) сравнение производительности отечественных микропроцессоров VM7 и VM9 с отечественными гибридными процессорами семейства Эльбрус, а также с универсальными и гибридными процессорами компании Intel. Это сравнение показывает, что при условии доработки процессоров VM7 и VM9 в направлениях, перечисленных в главе 4 диссертации, на классах вычислительных задач, рассмотренных в диссертации, доработанные отечественные микропроцессоры смогут достичь производительности, соизмеримой с производительностью зарубежных процессоров, изготовленных по аналогичным проектным нормам.

В четвертой главе диссертации критерий сбалансированности гибридной вычислительной системы на выбранном классе задач конкретизируется для отечественных микропроцессоров VM7 и VM9 семейства КОМДИВ и целевых процедур БПФ, NPV MG и SpMV. Для различных процедур анализируются причины и степень разбалансированности и предлагаются изменения программной модели

микропроцессора, позволяющие улучшить степень сбалансированности. Метод оценки ожидаемой производительности позволяет предположить, что проведенные изменения позволят обеспечить повышение производительности в диапазоне от 3 до 6 раз. Автором делается вывод, что при условии проведения указанных доработок, гибридные многоядерные системы на кристалле семейства КОМДИВ со встроенной системой межпроцессорной коммуникации могут лечь в основу отечественной элементной базы для использования в высокопроизводительных вычислениях.

В заключении приводятся основные результаты работы и предлагаются дальнейшие направления исследований.

**Достоверность** научных результатов обеспечивается результатами вычислительных экспериментов. Математическую основу исследования составляет теория алгоритмов.

Результаты диссертации могут быть внедрены в следующих организациях:

- 1) Акционерное общество Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы»;
- 2) ЗАО «Московский Центр SPARC технологий»;
- 3) ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука»;
- 4) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем проектирования в микроэлектронике» Российской академии наук (ИППМ РАН);
- 5) ООО «НПП “Цифровые решения”»;
- 6) ЗАО НТЦ «Модуль»;
- 7) НИЯФ «МИФИ»;
- 8) НИУ «МИЭТ»;
- 9) Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН (Москва);
- 10) Московский физико-технический институт.



Диссертация написана хорошим языком, содержит богатую библиографию и ясное изложение основных результатов автора. В период с 2013 по 2017 гг. основные результаты диссертационной работы докладывались на трех международных конференциях, Международном Междисциплинарном Семинаре и на конференции «Ломоносовские чтения 2017» в МГУ.

В 2014 г. выпущена монография Сударевой О.А. под названием «Эффективная реализация алгоритмов быстрого преобразования Фурье и свертки на микропроцессоре» КОМДИВ128-РИО (изд-во НИИСИ РАН). Это уникальный пример для кандидатской диссертации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати: 2 статьи в изданиях, включенных в список ВАК, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, оформленное в установленном порядке, 1 монография, 4 публикации в научных журналах, 2 публикации в тезисах докладов на конференциях.

В диссертации могут быть отмечены следующие недостатки.

1. При обосновании выбора целевых вычислительных процедур БПФ рассматривается только как инструмент цифровой обработки сигналов. Не упомянуты и не анализируются вычислительные схемы, в которых БПФ существенно используется именно для трехмерного моделирования.

2. При проведении вычислительных экспериментов для целевой вычислительной процедуры SpMV для разных аппаратных платформ используются разные форматы упаковки разреженной матрицы. В то время, как обоснование выбора формата для GPU проведено достаточно подробно, выбор формата для отечественных гибридных процессоров детально не обоснован.

Перечисленные замечания не влияют на положительную оценку диссертации и не ставят под сомнение полученные в ней результаты, которые представляют несомненный интерес в научном, а также и в практическом

плане. Результаты диссертации своевременно опубликованы. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

Диссертация Сударевой Ольги Юрьевны «Встречная оптимизация класса задач трехмерного моделирования для архитектур многоядерных процессоров» является законченной научно-исследовательской работой и соответствует требованиям «Постановления Правительства Российской Федерации о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, соответствует п. 8 паспорта специальности «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования», а ее автор, Сударева Ольга Юрьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании секции Ученого совета ИПИ РАН Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, протокол № 2 от 25 апреля 2018 г.

Председатель секции Ученого совета,  
главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

И.Н. Синицин  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Зав. отделом «Архитектур и  
Схемотехника инновационных  
вычислительных систем» ФИЦ ИУ РАН,  
кандидат технических наук

Ю.А. Степченков  
04 2018 г.