

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Афанасьева Ильи Викторовича
«Исследование и разработка методов эффективной реализации графовых
алгоритмов для современных векторных архитектур»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

Проблематика и актуальность исследований

Диссертационная работа Афанасьева Ильи Викторовича направлена на решение проблемы создания эффективных реализаций графовых алгоритмов на современных суперкомпьютерных платформах. Эта проблема в последнее время стала одной из самых актуальных в связи с резко возросшим прикладным интересом к задачам, требующим обработки данных, структура которых описывается в математических терминах графов. Такие (*графовые*) задачи являются массовыми при анализе сложных систем, имеющих сетевую структуру – в социологии, медицине, биологии и нейронауках, транспорте, энергетике, и во многих других приложениях. Заметим, что графовые задачи, часто, относятся к классу NP сложных – в предельном случае, это задача полного перебора по ребрам полносвязного графа.

В диссертации выполнен анализ этой проблемы в конкретике отношения современного состояния в области суперкомпьютерных технологий и основных свойств графовых алгоритмов. Выделено три важных аспекта в части сложности проблемы, ключевых для диссертационного исследования.

Во-первых, вычислительная сложность рассматриваемых (графовых) задач связана, прежде всего, с таким «примитивным» фактором, как размер графа, описывающего структуру данных. В реальных задачах требуется обработка графов с миллионами вершин и количеством ребер (дуг) порядка миллиарда. В повестке ближайших лет по этому фактору (размер графа) прикладные запросы возрастут, как минимум, на порядок. В диссертации подчеркивается, что решение здесь лежит в использовании архитектур с максимально высокой степенью параллелизма.

Во-вторых, наряду с вычислительной сложностью, в таких задачах все более серьезной проблемой является скорость работы с оперативной памятью при проходе по графу – графовые задачи относятся к классу *data-intensive*. В этой связи в диссертации подчеркивается, что ключевым для повышения эффективности решения графовых задач является использование систем быстрой памяти. Среди таких систем наиболее перспективным сейчас является стандарт HBM, который реализуется, в основном, на архитектурах с использованием векторной обработки данных.

Наконец, нетривиальным для графовых задач является проблема *совмещения* вычислительной локальности (работа с вершинами и/или ребрами) с локальностью данных (размещением их в памяти). Эта проблема, во многом, связана с нерегулярностью структуры графов в прикладных задачах – вершины имеют разную степень (коэффициент связности – число ребер, опирающихся на данную вершину). Причем распределение вершин по этому параметру может быть разным, в том числе и

степенным (в статфизике это системы с дальним порядком). Такие сетевые структуры представляют наибольшие сложности для исследования. А в вычислительном плане такие структуры приводят к квази-случайному характеру обращений при загрузке данных в кэш-память, и, как следствие, к ее неэффективному использованию.

В результате этого анализа в диссертации определены три типа требований к вычислительным архитектурам – векторная обработка данных, высокий внутренний ресурс параллелизма, наличие быстрой памяти стандарта HBM. Для дальнейших исследований в диссертации выбраны пять суперкомпьютерных платформ: *NEC SX-Aurora TSUBASA*, *NVIDIA P100 GPU*, *NVIDIA V100 GPU*, *Intel KNL* и *A64FX* (узел *Fugaku*). Отметим презентативность такой выборки, как в отношении современного статуса суперкомпьютерных технологий, так и по вычислительному потенциалу для решения графовых задач, востребованных в приложениях.

Целью диссертационной работы является разработка эффективных методов реализации графовых алгоритмов на векторных архитектурах с быстрой памятью.

Ключевым, для достижения этой цели, результатом диссертационной работы является выделение 4-х базовых алгоритмических структур (в диссертации предложена специальная терминология - *алгоритмические абстракции*), из которых можно формировать графовые алгоритмы - *advance*, *generate_new_frontier*, *compute* и *reduce*. В диссертации алгоритмические абстракции выделены из набора 17-ти графовых алгоритмов, которые покрывают большую часть прикладного пула графовых задач. На эти алгоритмы далее будем ссылаться, как на референсные. Эти алгоритмические абстракции должны быть достаточно элементарными, чтобы можно было их эффективно реализовать на архитектурах с векторной обработкой данных. Они должны иметь базисный характер – графовые алгоритмы можно переформулировать в их терминах. И.В. Афанасьеву удалось в диссертационной работе решить эту задачу.

Центральным результатом, полученным в диссертации, является эффективная реализация 4-х выделенных алгоритмических абстракций на векторных архитектурах с быстрой памятью. По нашему мнению, именно этот результат позволил решить сложнейшую задачу – как «положить» нерегулярную структуру графовых алгоритмов на парадигму векторных вычислений, которая имеет регулярную (линейную) структуру. Для этого в диссертации разработан метод реализации итерационных графовых алгоритмов на основе их представления в терминах 4-х алгоритмических абстракций. Это не универсальный результат – он зависит от выбора референсных алгоритмов. Однако понятно, как разработанный метод может быть обобщен и для других графовых алгоритмов - достаточно найти дополнительные алгоритмические абстракции, которые допускают эффективную реализацию на векторных архитектурах с быстрой памятью. Отметим, что научная значимость выполненной диссертационной работы определяется именно этим разработанным методом реализации графовых алгоритмов на векторных архитектурах с быстрой памятью.

В диссертации представлен фреймворк *VGL* - программная среда, адаптированная для решения графовых задач. В основе этого фреймворка заложен разработанный метод эффективной реализации графовых алгоритмов на векторных архитектурах с быстрой памятью.

Необходимо отметить, что проблема локальности данных решается на уровне разбиения множества вершин, смежных данной вершине, на вектора (множества

фиксированной длины) по адресной близости соответствующих данных в памяти. В диссертации соответствующий формат хранения графа, обозначенный как VectCSR, является векторным расширением формата CSR. Показано, что использование этого формата позволяет эффективно использовать кэш-память при выполнении косвенных обращений к памяти. Значимый потенциал формата VectCSR для решения проблемы локальности данных подтвержден в тестовых испытаниях фреймворка VGL.

Практическая значимость результатов диссертационной работы И.В., Афанасьева определяется ускорением *в разы* выполнения графовых задач в фреймворке VGL. Это означает, что впервые удалось значимо оптимизировать выполнение графовых задач на векторных архитектурах с быстрой памятью.

Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из Введения, 5-ти Глав и Заключения. Объем текста диссертации составляет 135 страниц, В тексте 30 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 83 наименования.

Во Введении формулируется проблема и цель работы, обосновывается актуальность, научная новизна проведенного исследования, его практическая ценность. Формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая Глава посвящена обзору существующих методов реализации графовых алгоритмов на векторных архитектурах. Анализируются особенности реализации графовых алгоритмов на современных архитектурах типа NEC TSUBASA, NVIDIA GPU, Intel KNL и многоядерных систем. Акцент делается на системах с быстрой памятью. Выделяются основные свойства графовых алгоритмов.

Вторая Глава посвящена анализу архитектуры вычислительных систем, использующих элементы векторной обработки данных. Выделены три направления, представленных архитектурами NEC SX-Aurora TSUBASA, графическими процессорами NVIDIA P100/V100 и Intel KNL. Выделены три важных для диссертационных исследований свойства этих архитектур: массивный параллелизм, наличие элементов векторной обработки данных, необходимость поддержки высокой степени локальности данных для обеспечения эффективности работы с памятью.

В третьей Главе анализируется информационная структура графовых алгоритмов и разрабатывается метод проектирования эффективных реализаций графовых алгоритмов в основе выделенных 4-х алгоритмических абстракций.

В четвертой Главе описываются принципы построения графового фреймворка VGL, поддерживающего эффективную программную реализацию графовых алгоритмов через векторную реализацию алгебраических абстракций.

В пятой Главе анализируется эффективность разработанного графового фреймворка VGL - делаются оценки производительности, эффективности и энергоэффективности. Проводится сравнительный анализ с популярными существующими библиотеками.

В Заключении приводятся основные полученные результаты.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы в полном соответствии с выполненной работой и полученными в диссертации результатами. Обоснованность сформулированных положений подтверждается показательной серией вычислительных экспериментов на различных платформах с реализациями графовых

алгоритмов в разработанном фреймворке VGL. А также ускорением *в разы* этих вычислений по сравнению с известными в литературе решениями в рамках графовых фреймворков, не адаптированных для векторных архитектур с быстрой памятью.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11-ти научных работах, в том числе в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, определенных Положением МГУ о присуждении научных степеней. 6 публикаций вышли в научных изданиях, индексируемых Scopus. Полученные результаты обсуждены на 11-ти международных и российских научных конференциях в 2016-2020 годах, а также на семинаре ЛИТ ОИЯИ, семинарах кафедр ИИТ и СКИ ВМК МГУ, а также на семинаре НИВЦ МГУ.

Замечания по представленной диссертационной работе

1) На Рисунке 10.3 (стр. 66 в тексте диссертации) допущено несколько недоразумений – несоответствие числа вершин (первая колонка в формате CSR на левой половине рисунка) с числом строк справа от этой колонки. То же недоразумение присутствует и на правой части рисунка. Кроме того, на правой половине рисунка (формат VectCSR) в третьей слева колонке есть вектор длины 5, в то время как объявленная длина векторов в правой части рисунка равна 4.

2) В заключительной главе нет четких разъяснений с чем связано улучшение энергоэффективности – с использованием разработанного метода реализации графовых алгоритмов на векторных архитектурах с быстрой памятью, или с лучшей энергоэффективностью самой вычислительной платформы, например NEC SX.

Заметим, что эти замечания не влияют на высокую оценку полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа И.В. Афанасьева «Исследование и разработка методов эффективной реализации графовых алгоритмов для современных векторных архитектур» представляет собой завершенное научное исследование.

Диссертация и автореферат написаны ясным языком, имеют четкую структуру, внутреннее единство содержания, смысла и терминологии. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям Положения МГУ к кандидатским диссертациям, а ее содержание соответствует паспорту специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей», а ее автор, Илья Викторович Афанасьев, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по вышеуказанной специальности.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
КК НБИКС-природоподобных технологий
НИИД «Курчатовский институт»

Ильин Вячеслав Анатольевич
16 декабря 2020

Контактные данные:

тел: +7 (915) 016-00-48

Email: ilyin0048@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.02 «Теоретическая физика»

Адрес места работы: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

тел: +7 (499) 196-95-39

Email: ilyin_va@nrcki.ru

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Ильина В.А. заверяю
Заместитель директора-главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»
д.ф.-м.н.



Forsh

П.А. Форш