

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор  
Южного федерального университета

  
« 16 » сентября 2024 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Южный федеральный университет»

Диссертационная работа «Автоматизация распараллеливания программ со сложными информационными зависимостями» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (физико-математические науки) выполнена на кафедре алгебры и дискретной математики Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича Южного федерального университета.

В период подготовки диссертации соискатель Метелица Елена Анатольевна обучалась в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

В 2017 г. окончила бакалавриат Южного федерального университета по направлению подготовки «Прикладная математика и информатика».

В 2019 году окончила магистратуру Южного федерального университета по направлению подготовки «Прикладная математика и информатика».

С 2019 г. по 2023 г. обучалась в аспирантуре Южного федерального университета по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника.

Справка об обучении (о периоде обучения) выдана в 2024 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель — Штейнберг Борис Яковлевич, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, кафедра алгебры и дискретной математики, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение.**

Диссертационная работа Метелицы Елены Анатольевны «Автоматизация распараллеливания программ со сложными информационными зависимостями» является законченным научным исследованием.

Диссертация посвящена разработке методов создания инструментов автоматизированной оптимизации программ, в частности, включающих гнёзда циклов итерационного типа.

**Во введении** приводится обзор работ по теме исследования. Описываются известные системы автоматизированной оптимизации и распараллеливания программ. Для гнёзд циклов итерационного типа наиболее эффективной является система PLUTO, основанная на полиэдральном внутреннем представлении. Обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, описываются методы исследования, излагаются основные положения научной новизны и значение работы для теории и практики. Приведён список положений, выносимых на защиту. Изложена структура диссертации и краткое содержание работы по главам.

**Первая глава** носит вспомогательный характер. В ней описываются алгоритмы итерационного типа, приводятся элементы теории преобразования программ: граф информационных зависимостей, решетчатый граф, анализ информационных зависимостей с помощью векторов расстояний (distance vector). Приводится описание и анализ блочных и вспомогательных преобразований гнёзд циклов с использованием унимодулярных матриц преобразований: скашивание, тайлинг, метод гиперплоскостей (волновой фронт). Сложность информационных зависимостей состоит в том, что в гнездах циклов итерационного типа ни один цикл непосредственно не распараллеливается.

**Во второй главе** приводится разработанный алгоритм оптимизации и распараллеливания итерационных гнёзд циклов. На вход алгоритму подается программа на языке C, содержащая тесное гнездо циклов итерационного типа. Алгоритм выполняет цепочку преобразований входной программы. Результатом применения алгоритма является преобразованная программа на языке C. Полученная программа может компилироваться любым из компиляторов (GCC, ICC, LLVM, MS-Compiler и другие), включая компиляторы с закрытым кодом. Выходная программа работает быстрее исходной во многих случаях более, чем на порядок. Ускорение достигается за счет распараллеливания, за счет тайлинга (локализации данных при использовании кэш-памяти), за счет вычисления оптимальных размеров тайла, за счет оптимизации обхода точек тайла. Доказана корректность цепочки преобразований,

**В третьей главе** приводится метод выбора оптимальных размеров тайлов и численные эксперименты выполнения программ, преобразованных при помощи разработанного алгоритма оптимизации итерационных гнёзд циклов. Численные эксперименты демонстрируют ускорение относительно исходных программ. Приводится сравнение с известной распараллеливающей системой PLUTO – представленная в диссертации программа работает в 1.4 раза быстрее.

**В четвёртой главе** представлен метод диалогового анализа текстов программ. Суть данного подхода состоит в символьном анализе программы и формировании уточняющих вопросов пользователю. Высокоуровневое внутреннее представление ОРС позволяет анализировать код и формировать вопросы в доступном программисту виде. Актуальность этого метода демонстрируется примерами.

**В заключении** подводятся итоги диссертационного исследования, в частности, приводятся ускорения относительно исходных программ для: алгоритма решения задачи теплопроводности (в 3,95 раза); алгоритма Гаусса – Зейделя для решения задачи Дирихле уравнений Лапласа (в 20,26 раза) и Пуассона (в 17,08 раз). Для алгоритма Гаусса – Зейделя для решения обобщённой задачи Дирихле достигнуто ускорение в 16,33 раза, что на 40% эффективнее, чем при использовании известной системы PLUTO. Тем самым, подтверждается правильность полученных теоретических моделей и практическая значимость выполненной работы.

**Личный вклад автора.** Автором на основе теории оптимизирующих преобразований программ разработан и реализован алгоритм автоматической оптимизации (и, в частности, распараллеливания) гнёзд циклов итерационного типа. Проведены численные эксперименты преобразованных программ. В статьях с соавторами результаты, относящиеся к оптимизации алгоритмов итерационного типа, принадлежат автору. Сформулированы и доказаны условия эквивалентности цепочек преобразований.

Задача поставлена научным руководителем. В диссертации использована оптимизирующая распараллеливающая система, которая разрабатывалась многими студентами и аспирантами мехмата ЮФУ.

Все заимствованные материалы сопровождаются ссылками на источники. Соответствие критерию 14 Положения о присуждении ученых степеней выполняется.

#### **Достоверность и научная новизна.**

Достоверность подтверждается строгими математическими определениями, формулировками и доказательствами; корректным использованием теории преобразования программ, линейной алгебры, теории графов; тестированием производительности и корректности разработанных методов; успешным применением разработанных методов в научной деятельности; полученными и опубликованными результатами численных экспериментов по ускорению целевых алгоритмов.

В работе получены следующие новые результаты теории преобразования программ:

1) Разработана цепочка оптимизирующих преобразований гнёзд циклов итерационного типа, основанная на универсальном высокоуровневом древовидном внутреннем представлении (в отличие от известного полиэдрального), что позволяет использовать дополнительные оптимизирующие преобразования для ускорения программ.

2) Разработан и теоретически обоснован новый метод обхода точек тайла, который повышает временную локальность данных и даёт ускорение.

3) Предложен метод определения оптимальных размеров тайлов для получения наилучшего ускорения.

4) Предложен метод диалогового уточнения информационных зависимостей, позволяющий распараллеливать более широкий класс циклов, чем позволяли прежние методы.

**Практическая значимость** состоит в том, что полученные результаты могут существенно ускорить решение таких прикладных задач математического моделирования, как прогноз изменений климата, поиск новых материалов и др.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях:

- 1) Всероссийской XXVII научной конференции «Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития» в 2020 году, доклад «Использование тайлинга для оптимизации итерационных алгоритмов»; (доклад без соавторов).
- 2) Национальном суперкомпьютерном форуме (НСКФ 2020) с докладом «Использование блочных алгоритмов для оптимизации гнёзд циклов»; (доклад без соавторов).
- 3) Конференции 16th International Conference on Parallel Computing Technologies (PaCT-21) с докладом «Precompiler for the ACELAN-COMPOS package solvers»; (вклад соискателя «методы оптимизации гнезд циклов итерационного типа и результаты численных экспериментов»).
- 4) Национальном суперкомпьютерном форуме (НСКФ 2021) с докладами: «О сочетании распараллеливания и скошенного тайлинга» (вклад соискателя «Методы оптимизации гнезд циклов итерационного типа, новый метод обхода точек тайла и результаты численных экспериментов для алгоритма Гаусса-Зейделя решения двумерной задачи Дирихле»), «О высокоуровневом автоматическом оптимизаторе программ» (вклад соискателя «Методы оптимизации гнезд циклов итерационного типа, новый метод обхода точек тайла и результаты численных экспериментов для алгоритма Гаусса-Зейделя решения двумерной задачи Дирихле и обобщённой задачи Дирихле»).
- 5) Национальном суперкомпьютерном форуме (НСКФ 2022) с докладом «Автоматизация распараллеливания программ с оптимизацией размещения и пересылок данных»; (вклад соискателя «Анализ возможности распараллеливания алгоритма Гаусса-Зейделя для задачи Дирихле на вычислительной системе с распределенной памятью»).
- 6) Конференции International scientific workshop OTHA Spring 2023 с докладом «Multidimensional convolution»; (вклад соискателя «методы ускорения алгоритма Гаусса-Зейделя для двумерной задачи Дирихле»).
- 7) Конференции International Conference on Parallel Computing Technologies (PaCT-23) с докладом «Automatic Parallelization of Iterative Loops Nests on Distributed Memory Computing Systems»; (вклад соискателя «Методы ускорения алгоритмов итерационного типа»).
- 8) Конференции 12th International Young Scientists Conference in Computational Science с докладом «Combination of parallelization and skewed tiling» (вклад соискателя «Методы ускорения алгоритмов итерационного типа»).

**Изложение материалов диссертации в работах.** Результаты диссертационной работы полно отражены в 2 статьях в изданиях перечня ВАК:

1. Метелица Е.А. Обоснование методов ускорения гнёзд циклов итерационного типа // Программные системы: теория и приложения. 2024. Т. 15. № 1. С. 63–94.

2. Метелица Е.А., Штейнберг Б.Я. Об ускоряющих преобразованиях программ для решения обобщенной задачи Дирихле // Вычислительные методы и программирование. 2024.25, № 3. С. 292–301.

Также по теме диссертации есть свидетельство о государственной регистрации программ «Программа, реализующая алгоритм Гаусса – Зейделя для задачи Дирихле» №2021681898 и опубликовано 8 работ в сборниках трудов конференций, включая 3 в издательстве Springer Q2.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется.** По своему научному содержанию диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», пунктам: № 1 «Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем»; № 2 «Языки программирования и системы программирования, семантика программ»; № 8 «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования».

Диссертация «Автоматизация распараллеливания программ со сложными информационными зависимостями» Метелицы Елены Анатольевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (физико-математические науки).

Заключение принято на заседании кафедры алгебры и дискретной математики Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета. Присутствовало на заседании 20 чел.

Результаты голосования: «за» - 20, «против» - 0, «воздержавшихся» - 0, (протокол № 10 от «09» сентября 2024 г.).

10.09.2024



Скороходов Владимир Александрович  
Председатель заседания кафедры,  
профессор кафедры алгебры и дискретной  
математики Института математики, меха-  
ники и компьютерных наук им. И.И. Воро-  
вича, Южного федерального университета,  
доктор физико-математических наук, до-  
цент