

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 004.272

**ОТВАГИН**  
Алексей Владимирович

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И СРЕДСТВА ОРГАНИЗАЦИИ  
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА БАЗЕ ВИРТУАЛЬНОЙ  
АССОЦИАТИВНОЙ СЕТИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности

05.13.15 – Вычислительные машины и системы

Минск 2007

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель: Садыхов Рауф Хосровович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: Петровский Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронно-вычислительных средств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Чиж Олег Петрович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией высокопроизводительных систем ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация: НИУ «Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» при Белорусском государственном университете

Защита состоится 26 декабря в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.04 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, тел. ученого секретаря 293-89-89, [dissovet@bsuir.by](mailto:dissovet@bsuir.by)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и ра-

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Необходимость решения сложных научно-исследовательских и технических задач стимулирует создание новых поколений высокопроизводительных вычислительных средств и приложений. Параллельные вычисления являются для современных компьютеров ключевой технологией, дающей возможность достичь высокой производительности при низкой стоимости ее реализации. Существует проблема освоения технологии распараллеливания вычислительных процессов за счет введения новых методов и средств организации параллельных вычислений, облегчающих их применение для решения практических задач.

Важнейшей проблемой при использовании параллельных вычислительных систем является планирование параллельных вычислений, то есть составление расписания выполнения задачи с учетом архитектурных и функциональных особенностей компьютера. Решение оптимизационной задачи составления расписания усложняется необходимостью анализа множества вариантов, что совершенно неприемлемо при большой сложности параллельного алгоритма. Поэтому существует необходимость разработки универсальных алгоритмов планирования, основанных на использовании современных технологий оптимизации. Эффективное планирование параллельных вычислений тесно связано с организацией вычислительного процесса в соответствии с разработанным расписанием. Одним из важных вопросов является проектирование архитектуры виртуальной машины, позволяющей реализовать сложные средства и механизмы управления вычислительным процессом, одновременно предоставляя пользователю простой и понятный интерфейс для эксплуатации этих средств.

Таким образом, диссертационная работа посвящается разработке средств организации, планирования и управления параллельными вычислениями, основанных на использовании алгоритмов эволюционной оптимизации. Для решения оптимизационных задач используется оригинальный алгоритм и модели описания структуры параллельного приложения (ПП) и архитектуры параллельной вычислительной системы. Для функционирования параллельных приложений, использующих разработанные средства динамической оптимизации в качестве платформы, предлагается инструментальная система организации вычислений, позволяющая обеспечить эффективное управление приложением во время его исполнения. Для создания ПП обработки информации использована разработанная автором среда визуального проектирования, моделирования и анализа программ.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.**  
Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках научных программ:

1. «Разработка методов, алгоритмов и инструментальных средств для синтеза многоагентных вычислительных систем», договор № Т00-050 с БРФФИ от 1 апреля 2001 г., ГР №20015359, срок выполнения 01.05.2001 г. – 31.03.2003 г.

2. «Разработать методы и инструментальные средства для синтеза многоагентных систем», задание Министерства образования РБ от 29 декабря 2000 г., ГР № 20012364, срок выполнения 01.01.2001 г. – 31.12.2003 г.

3. «Разработать автоматизированную систему послыонного восстановления топологии из цветного цифрового фотоизображения кристалла интегральной схемы», Государственная научно-техническая программа «Информационные технологии», задание 05.06 от 30 октября 2001 г., ГР № 2002360.

4. «Разработать методы и алгоритмы обработки изображений и идентификации объектов в системах технического зрения», Государственная программа ориентированных фундаментальных исследований «Научные основы новых информационных технологий» (ГПОФИ «Инфотех») (ИНФОТЕХ-08), ГР № 2002361.

5. «Разработка алгоритмов и программных модулей обнаружения и компенсации искажений, а также методов и алгоритмов эффективного доступа к многозональным спутниковым растровым изображениям», договор № 1С/04-222 от 18 апреля 2005 г., программа «Космос-СТ», утверждена Постановлением Совета Министров Союзного государства № 31 от 29.12.2003г.

6. «Методы обработки, анализа и классификации многомерных данных и изображений», Государственная комплексная программа научных исследований «Научные основы новых информационных технологий» (ИНФОТЕХ-11), ГР №20062478.

7. «Разработка новых алгоритмов, принципов создания систем обработки изображений и другой информации от средств наблюдения, ориентированных на применение многопроцессорных вычислительных кластеров повышенной вычислительной мощности», договор № ЗСТ/05-222 от 08 ноября 2005 г., научно-техническая программа Союзного государства «Развитие и внедрение в государствах-участниках Союзного государства наукоёмких компьютерных технологий на базе мультипроцессорных вычислительных систем» (шифр «Триада»), утвержденная Постановлением Совета Министров Союзного государства от 29.10.2005г. № 29.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка моделей, алгоритмов и инструментальных средств планирования и организации параллельных вычислений для разработки, анализа и выполнения параллельных приложений, предназначенных для обработки информационных объектов различных предметных областей. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Разработка модели представления параллельного приложения обработки потоков информационных объектов в виде схемы вычислений на основе ориентированных ациклических графов.

2. Разработка модели представления знаний об оптимальной структуре параллельного приложения, накопленных в процессе его функционирования, на базе виртуальной ассоциативной сети.

3. Разработка гибридного эволюционного алгоритма статической оптимизации и планирования параллельных вычислений на базе технологии генетических алгоритмов и модели виртуальной ассоциативной сети.

4. Создание многоагентной архитектуры программной платформы на базе интерфейса передачи сообщений MPI(Message Passing Interface) для организации параллельных вычислений, основанных на предложенной модели представления параллельного приложения.

5. Разработка на базе модели виртуальной ассоциативной сети алгоритма динамической оптимизации параллельных приложений, реализуемого средствами многоагентной программной платформы.

6. Создание инструментальных средств проектирования и моделирования параллельных приложений на базе предложенных моделей и алгоритмов.

Объектом исследования являются параллельные приложения для обработки информационных потоков. Предметом исследования являются модели, алгоритмы и средства проектирования, анализа, оптимизации и выполнения параллельных приложений.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие положения:

1. Модель представления параллельного приложения для обработки информационных потоков, основанная на графе сценариев обработки и позволяющая адекватно представить приложения для параллельной обработки неоднородных потоков информационных объектов.

2. Модель представления знаний об оптимальной структуре параллельного приложения, накопленных в процессе его функционирования, на базе виртуальной ассоциативной сети с применением нейросетевых методов обучения и накопления информации для ускорения оптимизационных процедур.

3. Гибридный эволюционный алгоритм статической оптимизации параллельного приложения на базе модели виртуальной ассоциативной сети, обеспечивающий высокую скорость оптимизации и лучшее качество результатов по сравнению с классическим генетическим алгоритмом (ГА) эволюционной оптимизации.

4. Алгоритм динамической оптимизации параллельного приложения, основанный на использовании архитектуры программных агентов и виртуальной ассоциативной сети для динамического изменения и адаптации структуры параллельного приложения.

5. Программные средства реализации многоагентной платформы, использующие алгоритм эволюционной динамической оптимизации параллельных приложений на базе виртуальной ассоциативной сети.

6. Система визуального проектирования, моделирования и анализа параллельных приложений для обработки информационных потоков, использующая предложенные алгоритмы и многоагентную платформу для проектирования и анализа параллельных приложений.

**Личный вклад соискателя.** Все предложенные модели, алгоритмы и программные средства на их основе разработаны и программно реализованы лично автором. Выбор направлений исследования и определение возможных путей решения проведены при поддержке научного руководителя.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований, включенные в диссертацию, были представлены на следующих мероприятиях:

- Международная научная конференция «Сетевые компьютерные технологии» (25-29 октября 2000 г., Минск), БГУ, 2000;
- International Workshop on Discrete-Event System Design DESDes'01, June 27-29, 2001, Poland;
- I Международная конференция «Информационные системы и технологии (IST'2002)», (Минск, 5-8 ноября 2002г.), БГУ, 2002;
- Международная конференция "Modeling and Simulation" (27-29 April, 2004, Minsk, Belarus);
- Международная конференция "Суперкомпьютерные системы и приложения SSA'2004" (26-28 октября 2004 г., Минск);
- Международная конференция "Информационные системы и технологии (IST'2004)" (Минск, 8-10 ноября 2004 г.);
- II Международная конференция «Информационные системы и технологии (IST'2005)», (Минск, 21-23 сентября 2005г.).
- Международная конференция «International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI'2006)», (Брест, 31 мая – 2 июня 2006 г.).

- Международная научно-техническая конференция «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2006» (п. Кацивели, Украина, 25-30 сентября 2006 г.)

- Международная конференция «Информационные системы и технологии (IST'2006)», (Минск, 1-3 ноября 2006г.).

- Международная конференция «Pattern Recognition and Information Processing»(PRIP'2007), (Минск, 24-27 мая 2007 г.), ОИП И НАН Беларуси.

**Опубликованность результатов.** По теме диссертационной работы опубликованы:

- 7 статей в научных журналах;
- 10 докладов в сборниках международных конференций;
- 1 препринт Института технической кибернетики НАН Беларуси.

Общее количество страниц в публикациях по теме диссертаций – 155 с.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложения. В первой главе рассмотрены задачи планирования и организации параллельных вычислений, вторая глава посвящена разработке алгоритмов статического и динамического планирования параллельных вычислений на базе виртуальной ассоциативной сети. В третьей главе рассмотрено построение системы организации параллельных вычислений на основе многоагентной архитектуры. В четвертой главе рассмотрены средства проектирования параллельных приложений и их практическое применение. Приложения содержат текст исходного кода многоагентной системы организации параллельных вычислений, пример реализации вычислительной гранулы, а также акты внедрения результатов диссертации. Объем диссертации составляет 188 страниц, 42 иллюстрации (22 страницы), 23 таблицы (8 страниц), 3 приложения (49 страниц), библиография 184 источника на 15 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведена краткая характеристика работы.

В **первой главе** рассматривается проблема обработки информационных потоков, сущность которой состоит в реализации обработки множества информационных объектов (информационных описаний сущностей реального мира) за минимальное время. В качестве примера рассмотрена задача обработки изображений слоев интегральных микросхем (ИМС) в системе технического зрения.

Основными характеристиками оптимизации обработки потока являются латентность (latency) и пропускная способность (throughput) системы. Для каждого  $k$ -го объекта потока момент завершения его обработки определяется выражением  $F_k = \max_i \{C_{ik}\}$ . В этом случае целевой функцией оптимизации является минимизация латентности для  $k$  объектов

$$Lat_k = \min \{F_k\}, \quad (1)$$

Для  $N$  объектов потока, обработанных ПП, оптимальная пропускная способность оценивается соотношением

$$Thr_N = \frac{N}{Lat_N} \quad (2)$$

Показано, что наиболее эффективным способом обработки информационного потока является использование параллелизма. В качестве целевой вычислительной системы выбрана система с децентрализованным или комбинированным управлением и с возможной специализацией функций отдельных процессоров (вычислительный кластер). Показана необходимость разработки пользовательских интерфейсов и средств, инкапсулирующих в себе сложные задачи организации и управления вычислениями [18-А].

Для решения задач статического планирования для обработки детерминированных потоков выполнен обзор и анализ алгоритмов статического планирования параллельных вычислений. Установлено, что наиболее перспективной технологией оптимизации является разновидность ГА, обладающая гибридным механизмом формирования решений, основанным на эвристических методах. В качестве гибридного механизма предложено использование нейросетевой эвристической модели виртуальной ассоциативной сети (ВАС), позволяющей осуществлять направленное изменение процедуры поиска, основанное на накоплении опыта в процессе решения оптимизационной задачи.

Для решения задач динамического планирования параллельных вычислений выбрана технология виртуальной машины с возможностью реконфигурации структуры параллельного приложения с учетом характеристик аппаратной платформы. Для реализации средств поддержки и управления параллельными вычислениями выбрана многоагентная архитектура, использующая механизмы обучения и накопления знаний ВАС.

Для решения задач разработки и оптимизации программного обеспечения обработки информационных потоков рассмотрены вопросы создания систем проектирования, моделирования и анализа ПП. Определены основные элементы интегрированной среды разработки, анализа и



оптимизации, а также организации параллельных вычислений на параллельных вычислительных системах (ПВС). [1-А].

Во второй главе предложены алгоритмы статического и динамического планирования параллельных вычислений на основе модели ВАС.

Сформулирована задача обработки информационного потока, представленного множеством информационных объектов  $J = \{j_1, \dots, j_n\}$  на множестве устройств обработки (процессоров)  $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ . Обработка объекта  $j$  включает выполнение множества операций, образующих сценарий обработки. Операции выполняются на процессоре без прерывания, порядок следования операций задается отношениями предшествования.

Предложена модель представления схемы ПП, реализующей сценарий обработки информационного потока объектов [2-А, 3-А, 16-А]. Модель основана на взвешенном ориентированном ациклическом графе (ОАГ). Целью оптимизации ПП является отображение графа сценариев на граф ПВС и составление расписания выполнения операций, обеспечивающее обработку всех элементов информационного потока за кратчайшее время. Отображение графа сценариев на структуру ПВС определяет кластеризацию множества операций на группы, назначаемые на процессоры ПВС.

Основным отличием от известных моделей является возможность определить единый граф для объединения сценариев обработки различных типов объектов, составляющих поток. Операции обработки применяются к каждому типу объектов с собственными параметрами и отличаются разными затратами вычислительных ресурсов. Рисунок 1 представляет аннотацию элементов и пример графа сценариев обработки для трех типов данных.

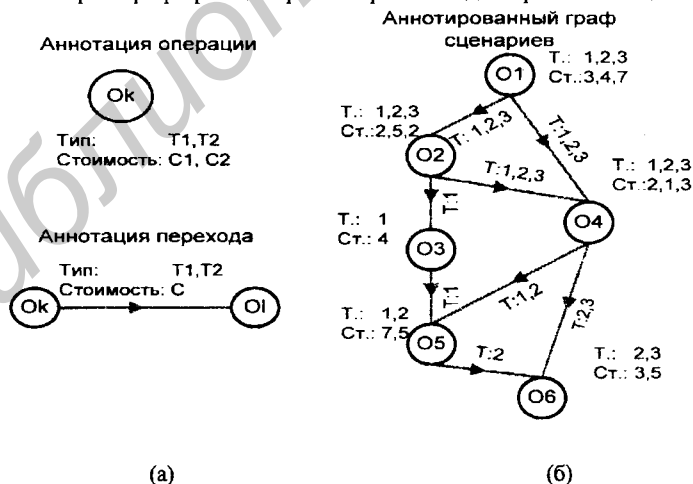
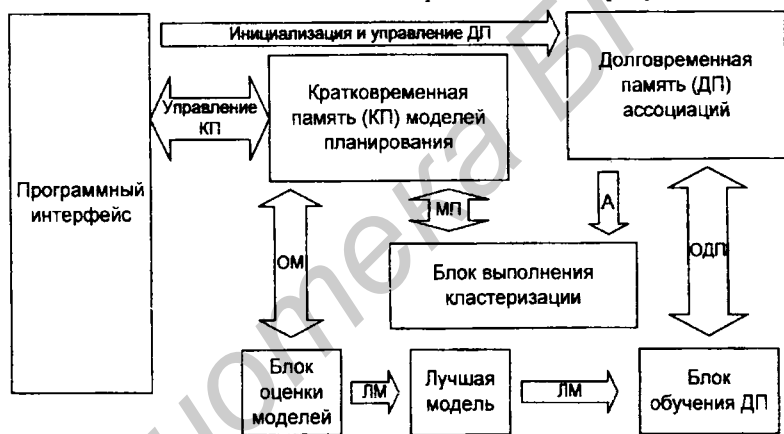


Рисунок 1 – Аннотация вершин и дуг графа (а); пример графа сценариев (б)

Операции обозначены кругами, в которых указан номер операции (например О1 – операция 1). Возле каждой операции указаны типы объектов, в сценарий обработки которых она входит ( $T_1, T_2, \dots, T_n$ ), а также длительность в условных единицах времени ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) выполнения операции для соответствующего типа. Нулевая стоимость означает отсутствие данной операции в сценарии обработки соответствующего типа объектов.

Для оптимизации ПП предложена модель представления знаний об оптимальной структуре ПП, накопленных в процессе функционирования ПП [З-А, 9-А]. Модель основана на адаптации ВАС, основой функционирования которой являются процессы обучения и накопления знаний. Знания, накопленные в процессе функционирования модели, способствуют формированию оптимальных расписаний выполнения ПП.

Основные элементы модели ВАС и алгоритма планирования параллельных вычислений на ее основе представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2 - Структура модели ВАС**

Модель ВАС состоит из двух основных частей: кратковременной (КП) и долговременной (ДП) памяти. КП является системой ограниченной емкости для хранения текущих решений и оценки их с точки зрения поставленных целей. ДП представляет собой ассоциативную самоорганизующуюся сеть, в которой выделяются:

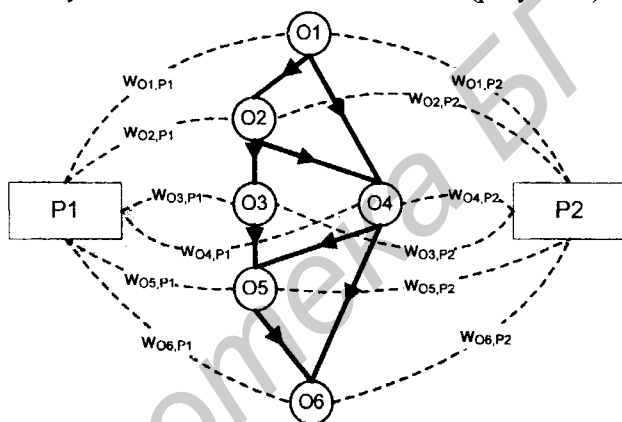
1. Узлы, представляющие собой определенные действия или ресурсы.
2. Терминальные узлы, определяющие цели, преследуемые системой.
3. Ассоциативные связи, определяющие «силу притяжения» узла к терминальным узлам сети.

КП содержит совокупность решений (моделей планирования - МП), описывающих варианты декомпозиции графа сценариев и расписание выполнения соответствующего ПП. В процессе оптимизации расписания

производится оценка решений и выбор одного из них, считающегося наиболее подходящим (лучшей модели). Оцениваемые модели (ОМ) передаются в блок оценки, осуществляющий вычисление целевой функции оптимизации, на основе которой формируется пригодность (fitness) каждой модели КП. Вычисление целевой функции и оценка характеристик модели происходит в процессе имитационного моделирования выполнения ПП. Лучшая модель запоминается для последующего обучения ДП.

Эволюция КП происходит посредством изменения моделей с использованием специального оператора кластеризации, основанного на информации об ассоциациях (А), накопленной в ДП. Блок выполнения кластеризации осуществляет изменение всех моделей КП.

Для представления структуры ассоциаций ДП используется модификация ОАГ сценариев обработки, состоящая в расширении его терминальными узлами и ассоциативными связями (рисунок 3).



**Рисунок 3 - Расширенный ОАГ параллельной программы для двух процессоров**

На рисунке 3 процессоры (терминальные узлы) изображены в виде блоков с обозначениями P1 и P2. Граф сценариев расширен дополнительными ассоциативными ребрами, вес каждого указывает силу ассоциации операции с конкретным процессором. Начальные значения весов ассоциативных связей могут быть либо эквивалентными между собой, либо определяться случайно. Сумма связей для каждой отдельной операции

$$W_i = \sum_{p=1}^N w_{p,i} = 1. \text{ Нулевое значение или отсутствие связи означает}$$

невозможность ассоциации узла и терминального узла (невозможность назначения операции на процессор).

Для предварительного отбора и ускорения поиска решения предложен алгоритм промежуточной оценки вариантов кластеризации операций по

процессорам, основанный на использовании прочности кластеризации [3-А, 9-А, 10-А]. Для каждого кластера операций С определяются характеристики:

$$W_C^{int} = \sum_{i,p \in C} w_{i,p}, \quad (3)$$

$$W_C^{ext} = \sum_{i \in C, p \in C} w_{i,p} + \sum_{p \in C, i \notin C} w_{i,p}, \quad (4)$$

$$S_C = W_C^{int} / W_C^{ext}, \quad (5)$$

где  $w_{ij}$  - вес связи между операциями  $i$  и  $j$ ,  $W_C^{int}$  - сумма весов связей внутри кластера С;  $W_C^{ext}$  - сумма весов связей между кластером С и другими кластерами;  $S_C$  - прочность кластера С. При оценке прочности кластеризации учитывается не только величина, но и равномерность прочностей кластеров. Для этого в качестве оценки кластеризации виртуальной сети  $S_A$  вычисляется сумма взаимных произведений прочностей кластеров сети:

$$S_A = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N S_i S_j \quad (6)$$

Решение с максимальной оценкой соответствует распределению операций по процессорам с учетом прочности ассоциативных связей. Использование промежуточной оценки, основанной на прочности кластеризации, позволяет существенно сократить время поиска решения за счет предварительной селекции вариантов, оцениваемых в процессе построения расписания (до  $t$  раз, где  $t$  - количество операций в графе ПП).

Предложен механизм обучения ДП по принципу Хебба - изменение весовых коэффициентов связей, способствующих получению лучшего решения [2-А, 3-А, 8-А]. При улучшении характеристик текущего решения связи, являющиеся внутренними для любого кластера, изменяют вес в соответствии с:

$$w_{i,p}(t+1) = w_{i,p}(t) + \alpha \Delta S_M, \quad (7)$$

где  $\alpha$  - параметр обучения,  $\Delta S_M$  - величина улучшения показателей модели между итерациями. Внешние по отношению к кластеру связи изменяются согласно:

$$w_{i,p}(t+1) = w_{i,p}(t) - \frac{\alpha \Delta S_M}{N-1}, N > 1, \quad (8)$$

где  $N$  - общее количество целей (в нашем случае процессоров).

Непрерывный процесс обучения и накопления знаний в долговременной памяти ведет к уменьшению случайности при выборе направления поиска, и, как следствие, к его ускорению и повышению качества решений.

Предложена операция кластеризации, использующая модель ВАС для получения новых вариантов решений и заменяющая генетические операции

мутации и скрещивания [3-А]. При выполнении кластеризации новое значение местоположения операции III определяется по правилу рулетки, примененному к сумме ассоциаций данной операции. Таким образом, ассоциация процессора и операции, имеющая больший вес, имеет большую вероятность реализоваться в новом решении. Наличие нулевых ассоциаций в ДП автоматически запрещает размещение операций на запрещенных для нее процессорах, предотвращая появление неправильных конфигураций. Таким образом решается проблема контроля достоверности хромосомы.

На основе модели ВАС и операций кластеризации и оценки прочности кластеров предложен гибридный генетический алгоритм [2-А, 3-А]. Сущность алгоритма состоит в использовании популяции решений, сходной с классическим ГА и замене этапа селекции на оценку прочности кластеров. Выбранное решение оценивается имитационной моделью, а популяция изменяется с помощью операции кластеризации. Операция кластеризации формирует устойчивые шаблоны на основе ассоциаций ДП, в общих чертах повторяя основные следствия теоремы схем для ГА. Для устранения проблемы предварительной сходимости алгоритм предусматривает механизмы контроля локальных оптимумов и стрессовый механизм.

Для оценки преимуществ модели ВАС и алгоритма на ее основе были проведены сравнительные эксперименты, цель которых - выявить отличия гибридного алгоритма и классического ГА по скорости и качеству полученных решений. Эксперименты проводились для четырех разновидностей ПВС: гомогенных и гетерогенных по производительности процессоров и производительности коммуникационных подсистем. Графы сценариев обработки генерировались случайным образом, при этом варьировалась коммуникационная структура и число операций обработки.

Проведенные эксперименты показали, что разработанный алгоритм ВАС обеспечивает лучшую оптимизацию обработки детерминированного информационного потока на ПВС (улучшение показателей в среднем до 15-20%). Алгоритм ВАС пригоден для оптимизации ОАГ сценариев обработки, выполняющихся как на гомогенных, так и на гетерогенных ПВС.

Предложена модифицированная версия гибридного алгоритма ВАС для динамической оптимизации обработки информационных потоков [13-А, 14-А]. Алгоритм предусматривает контроль скорости обработки потока во время выполнения и адаптацию структуры ПП под структуру потока. Адаптация заключается в изменении распределения операций обработки по процессорам. Перестройка схемы обработки производится при ухудшении характеристик производительности ПП.

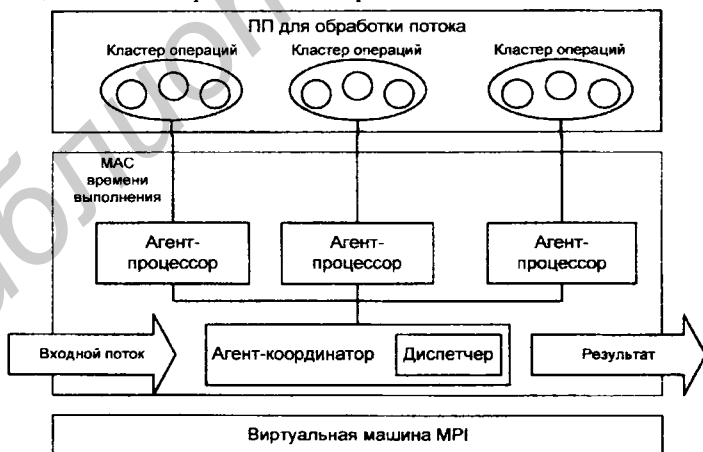
Алгоритм динамической оптимизации ПП сравнивался со статической конфигурацией, оптимизированной для части информационного потока.

Эксперименты показали, что алгоритм динамической оптимизации ПП на базе ВАС более эффективен при обработке потока, чем статическая схема, причем его эффективность возрастает с ростом количества доступных процессоров (ускорение обработки в среднем до 15%).

В **третьей главе** рассмотрены средства поддержки выполнения ПП, представленных в форме сценария ОАГ обработки потока данных.

На основе анализа проблемы динамического управления выполнением ПП обработки стохастического потока в гетерогенной ПВС предложена **архитектура многоагентной системы** для поддержки ПП обработки информационных потоков [11-А, 12-А, 13-А, 14-А]. В качестве целевой архитектуры выбрана многоагентная система (МАС), расширяемая средствами реализации интеллектуального управления ПП. Основным отличием реализованной архитектуры является использование предложенных во второй главе алгоритмов динамической оптимизации вычислений, а также интерфейса передачи сообщений MPI.

Общая архитектура многоагентной платформы для поддержки ПП обработки информационных потоков приведена на рисунке 4. ПП обработки информационного потока представляется совокупностью вычислительных операций (гранул), каждая из которых является отдельным объектом диспетчеризации. Согласно алгоритму оптимизации вычислительные гранулы разделяются на кластеры, каждый из которых назначается для исполнения отдельным процессором. В процессе работы ПП каждая операция выполняется определенным расписанием агентом-процессором, реализующим также сбор статистики времени выполнения.



**Рисунок 4 - Структура МАС для обработки информационных потоков**

Агент-координатор обеспечивает управление обработкой информационных потоков, реализуя вычислительную схему, заданную ОАГ сценариев обработки. Он содержит средства оптимизации вычислительного процесса и реализует алгоритм оптимизации, основываясь на показаниях агентов-процессоров.

Предложен механизм самостабилизации ИП, основанный на алгоритме динамической оптимизации на базе ВАС, использующий средства многоагентной платформы [11-А, 12-А, 13-А]. Алгоритм позволяет осуществлять адаптацию структуры ИП к характеристикам поступающего информационного потока, в частности, к типу объектов и порядку их следования.

Описаны основные классы реализации многоагентной платформы. Платформа для организации параллельных вычислений реализована в виде объектно-ориентированной системы, обеспечивающей поддержку вычислительного процесса. Система рассчитана на применение в ПВС, поддерживающих MPI, и строится по модульному принципу, позволяя легко расширять и изменять функциональность. Система разработана на основе открытых стандартов и библиотек и не имеет строгих лицензионных ограничений.

Предложен механизм эмуляции распределенной разделяемой памяти [7-А, 16-А] на основе общей файловой системы и локального кэша, используемый для повышения эффективности операций обмена данными в МАС организации параллельных вычислений. Многоагентная платформа может быть адаптирована к использованию внешней разделяемой памяти, реализуемой сторонним ПО. Использование собственной системы разделяемой памяти, встроенной в платформу, повышает ее мобильность.

Рассмотрены принципы построения проблемно-ориентированных библиотек алгоритмов обработки на основе подхода вычислительных гранул, разработаны и реализованы механизмы взаимодействия гранул с МАС организации параллельных вычислений. Модули, оформленные в соответствии с интерфейсом интеграции в платформу, могут разрабатываться конечными пользователями.

Предложен способ объединения вычислительных гранул в проблемно-ориентированные библиотеки, которые динамически подключаются при выполнении ИП. Реализация различных классов алгоритмов обработки информации в виде библиотек вычислительных гранул позволяет расширить сферу применения системы организации параллельных вычислений и дает возможность создавать новые классы ИП.

В четвертой главе рассмотрено построение средств визуального проектирования ИП обработки информационных потоков [4-А, 10-А].

Архитектура среды визуального проектирования и анализа параллельных программ для обработки информационных потоков представлена на рисунке 5.

Входящие в состав архитектуры подсистемы позволяют: создавать описание ПП обработки информационного потока и архитектуры параллельной ВС в специализированном графическом редакторе; оптимизировать описанную программу для достижения максимальной производительности с учетом особенностей и ограничений, налагаемых архитектурой и составом аппаратных средств ВС; транслировать полученную программу в представление для ее исполнения средствами MAC организации параллельных вычислений.

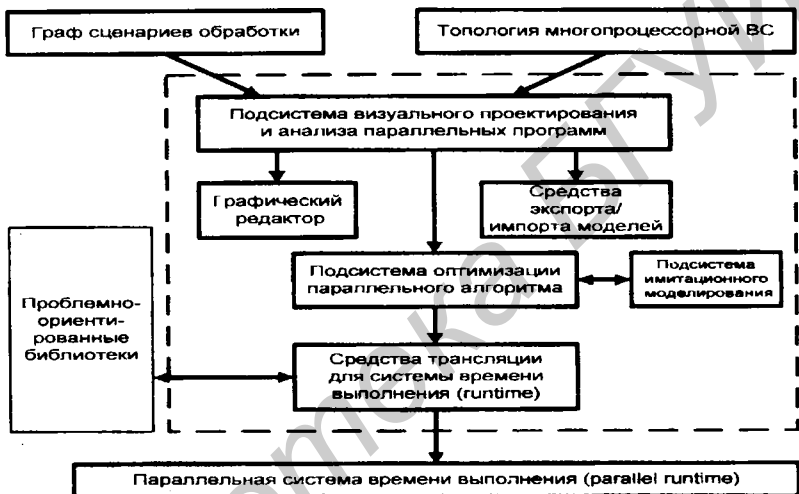


Рисунок 5 - Архитектура системы визуального проектирования и анализа параллельных программ

Для реализации среды визуального проектирования ПП в качестве средства программирования выбран язык Java, обеспечивающий кросс-платформенное представление пользовательского интерфейса.

Для оценки расписания в процессе оптимизации ПП создана подсистема имитационного моделирования, реализующая процедуру событийного моделирования, в ходе которой накапливается различная информация о выполнении ПП при фиксированном распределении операций по процессорам (моменты старта и окончания операций, задержки, простои процессоров и др.). Окно вывода графических диаграмм позволяет сравнить две модели распределения задач по процессорам, а также интерактивно изменять параметры расписания для его перерасчета (распределение операций и порядок их следования). Имитационная модель, используемая в подсистеме моделирования, полностью соответствует реальной ПП,



выполняемой на вычислительном кластере и имеет погрешность характеристик не более 3%.

Разработано промежуточное представление ПП обработки информационного потока на языке XML, используемое для организации параллельных вычислений. Описаны основные атрибуты, определяющие структуру ПП и различные режимы работы системы организации вычислений на базе MAC. Промежуточное представление является интерпретируемым сценарием, порождающим параллельный вычислительный процесс. В качестве механизма интерпретации выступает MAC организации параллельных вычислений.

Рассмотрено практическое применение разработанных средств для организации параллельной обработки потока изображений топологии интегральных микросхем (ИМС) [5-А, 6-А, 7-А, 15-А, 16-А, 17-А], а также обработки изображений дистанционного зондирования Земли. Предложены и реализованы сценарии предобработки и выделения контуров объектов на изображении, а также сценарий классификации дефектов на изображениях ИМС. Ускорение сценариев составило от 1.94 до 3.31 раз. При реализации сценариев создано 42 вычислительные гранулы, объединенные в библиотеки.

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по их практическому применению.

Приложения содержат текст исходного кода многоагентной системы организации параллельных вычислений, пример реализации вычислительной гранулы, а также акты внедрения результатов диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

В диссертационной работе получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Предложена модель представления параллельного алгоритма для обработки потока информационных объектов, основанная на графе сценариев обработки. В отличие от известных, модель позволяет представить параллельные приложения для обработки неоднородных потоков информационных объектов [5-А, 15-А, 16-А].

2. Предложена модель представления знаний об оптимальной структуре параллельной программы, накопленных в процессе функционирования параллельного приложения на базе виртуальной ассоциативной сети [2-А, 8-А, 9-А]. На основе модели создан гибридный эволюционный оптимизационный алгоритм для анализа параллельных приложений, представленных в виде графов обработки информационных объектов [1-А, 3-А, 8-А]. Полученный алгоритм превосходит по скорости

выполнения (до  $t$  раз, где  $t$  – количество операций в графе ПП) существующие универсальные алгоритмы эволюционной оптимизации [3-А]. Качество полученных решений при равном количестве итераций поиска решения в среднем улучшается на 15-20% [1-А, 3-А].

3. Предложен алгоритм динамической оптимизации параллельного приложения, основанный на использовании для управления вычислениями архитектуры программных агентов [11-А, 12-А, 13-А]. Использование алгоритма улучшает характеристики производительности ПП в динамической вычислительной среде (в среднем на 15-20%) за счет реконфигурации структуры приложения во время выполнения [14-А].

4. Предложены программные средства реализации многоагентной платформы на базе стандарта MPI, обеспечивающей организацию и поддержку ПП во время выполнения [11-А, 12-А]. Многоагентная платформа реализует алгоритм динамической оптимизации параллельного приложения на базе виртуальной ассоциативной сети [12-А, 13-А, 14-А].

5. Предложена архитектура системы автоматизации проектирования параллельных приложений для обработки информационных потоков, основанная на использовании графа сценариев обработки и графа архитектуры параллельного компьютера [4-А, 10-А]. Система поддержки проектирования позволяет выполнять статическое планирование и анализ производительности ПП с использованием разработанных алгоритмов оптимизации. По результатам анализа система проектирования позволяет создать ПП, использующее в качестве механизма функционирования многоагентную платформу.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты исследований использованы для практической реализации системы параллельной обработки топологических изображений многослойных интегральных микросхем [5-А, 6-А, 7-А, 15-А, 16-А]. Научные и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР и ОКР, в разрабатываемом программном комплексе моделирования процессов фотолитографии для систем автоматического контроля оригиналов топологии СБИС, ориентированном на кластерные высокопроизводительные мультипроцессорные вычислительные системы; в автоматизированной системе послойного восстановления топологии из цветного цифрового фотоизображения кристалла интегральной схемы; в программных средствах обнаружения и компенсации искажений, а также методах и алгоритмах эффективного доступа к многозональным спутниковым растровым изображениям и в учебном процессе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Статьи в научных журналах

1-А. Отвагин, А.В. Алгоритм решения задачи о назначении в мультипроцессорной системе на основе модели виртуальной сети / Р.Х. Садыхов, А.В. Отвагин // Вестник БрГТУ Машиностроение, автоматизация, ЭВМ. – 2001. – № 4 (10) – С. 93-97.

2-А. Отвагин, А.В. Алгоритм поиска решений на основе модели виртуальной сети в системах параллельной обработки / Р.Х. Садыхов, А.В. Отвагин // Автоматика и вычислительная техника. – 2001. – №1. – С. 25-33.

3-А. Отвагин, А.В. Оптимизация алгоритмов управления в управляющем вычислительном комплексе реального времени на базе модели виртуальной сети / Р.Х. Садыхов, А.В. Отвагин // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. – №4. – С. 88-94.

4-А. Отвагин, А.В. Архитектура системы анализа и проектирования параллельных программ / А.В. Отвагин, Р.Х. Садыхов // Информатика. – 2004. – №1. – С. 107-111.

5-А. Отвагин, А.В. Инструментальные средства параллельной обработки потоков изображений в системах технического зрения / А.В. Отвагин, А.А. Дудкин // Искусственный интеллект. - 2006. - № 3. - С. 623-633.

6-А. Otwaгин A. An MPI-Based Framework for Parallel Processing of Integrated Circuits Layout Images / A. Otwaгин, A. Doudkin // Int. J. of Computing. – 2006. - Vol. 5. - №2. - P. 55-61 .

7-А. Отвагин А.В. Параллельная обработка изображений топологии интегральных схем на базе многоагентной архитектуры / А.В. Отвагин, А.А. Дудкин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2007. – № 6. – С. 51-56.

Материалы конференций

8-А. Отвагин, А.В. Модель виртуальной нейронной сети в задачах распределенных сетевых вычислений / Р.Х. Садыхов, А.В. Отвагин // Сетевые компьютерные технологии: Сб. трудов Междунар. науч. конф., Минск, 25-29 окт. 2000 г. / БГУ, под ред. М.К. Бузы, С.Д. Пашкеева. – Минск, 2000. – С. 68-71.

9-А. Otwaгин A.V. Algorithm for optimization of parallel computation on the basis of genetic algorithms and model of a virtual network / R. Kh. Sadykhov, A.V. Otwaгин // Proceedings of the International Workshop on Discrete-Event System Design DESDes'01, Przytok, Poland, June 27-29, 2001. – Przytok, 2001. - P.121-126.

10-А. Otwaгин, A. The architecture of system for analysis and optimization of parallel program / A. Otwaгин, R. Sadykhov, A. Bogomazov // Modeling and

Simulation: Proceedings of International Conference, Minsk, 27-29 April, 2004. – Minsk, 2004. – P. 204-207.

11-А. Отвагин, А. The framework to create the system of self-optimizing mobile agents / А. Отвагин, R. Sadykhov, А. Chelalo / Modeling and Simulation: Proceedings of International Conference, Minsk, 27-29 April, 2004. – Minsk, 2004. – P. 208-211.

12-А. Отвагин, А.В. Платформа для создания систем самоорганизующихся мобильных агентов / А.В. Отвагин, Р.Х. Садыхов // Международная научная конференция «Суперкомпьютерные системы и их применение» SSA'2004: доклады конференции, Минск, 26-28 окт. 2004 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2004. – С. 121-125.

13-А. Отвагин, А.В. Самооптимизация алгоритмов управления на базе мобильных агентов / А.В. Отвагин, Р.Х. Садыхов // Информационные системы и технологии (IST'2004): Материалы II междунар. конф., Минск, 8-10 ноября 2004 г. – Ч. 2. / Академия управления при Президенте Республики Беларусь. – Минск, 2004. – С. 114-119.

14-А. Отвагин, А.В. Система динамической оптимизации приложений MPI / Р.Х. Садыхов, А.В. Отвагин // Сетевые компьютерные технологии: Сб. тр. II Междунар. науч. конф., Минск, 21-23 сент. 2005 г. / Изд. центр БГУ. – Минск, 2005. – С. 26-31.

15-А. Отвагин А. A Framework for Parallel Processing of Image Dataflow in Industrial Applications / А. Отвагин, А. Doudkin // Proceedings of the fourth International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI'2006), May, 31- June, 2, Brest, BSTU, Belarus. - 2006. - P. 162-167.

16-А. Отвагин, А.В. Инструментальная система параллельной обработки изображений интегральных схем / А.В. Отвагин, А.А. Дудкин // Информационные системы и технологии IST 2006: Третья Международная конференция, Минск, 1-3 ноября 2006 г. / Академия управления при Президенте Республики Беларусь. - Ч. 1. – Минск, 2006. - С. 113-119.

17-А. Отвагин А. Parallel Processing of Integrated Circuits Layouts Images. / А. Отвагин, А. Doudkin // Pattern Recognition and Information Processing»(PRIP'2007): Proceedings of the Ninth International Conference, May, 24-27, 2007, Minsk, UIIP NASB, Belarus. - Minsk, 2007. - P. 60-66.

#### Препринт

18-А. Отвагин, А.В. Методы и средства имитационного моделирования управляющих вычислительных комплексов реального времени / Р.Х. Садыхов, А.В. Отвагин. – Минск, 1999. – 50 с. - (Препринт/Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси; №7).

## РЭЗІЮМЭ

Атвагін Аляксей Ёладзіміравіч

Мадэлі, алгарытмы і сродкі арганізацыі паралельных вылічэнняў на базе  
віртуальнай асацыятыўнай сеткі

*Ключавыя словы:* інфармацыйны патока, паралельная апрацоўка, планаванне, аптымізацыя, віртуальная асацыятыўная сетка, шматэгентная сістэма, аўтаматызацыя праектавання праграм.

Дысертацыя прысвечана планаванню і арганізацыі эфектыўнай апрацоўкі інфармацыйных патокаў адвольнай альбо детэрмінаванай структуры на высокапрадукцыйнай паралельнай вылічальнай сістэме. Для рацыянальнага планавання паралельных вылічэнняў распрацаваны алгарытм віртуальнай асацыятыўнай сеткі, прадстаўляючы сабою варыянт гібрыднага генэтычнага алгарытму. Алгарытм выкарыстоўвае механізмы назаплення вопыту і навучэння для паскарэння пошуку рашэнняў і ўзвышэння іх якасці. Прапанаван спосаб папярэдняй сялекцыі рашэнняў на аснове прочнасці кластэрызацыі асацыятыўнай сеткі, які дазваляе скараціць аб'ём аналізуемых рашэнняў. Ёвядзен новы аператар кластэрызацыі, змяшчаючы механізмы змянення папуляцыі класічнага генэтычнага алгарытму. Выкананы эксперыменты, якія зацвярджаюць эфектыўнасць алгарытма віртуальнай асацыятыўнай сеткі. Распрацавана мадыфікацыя алгарытма віртуальнай асацыятыўнай сеткі для дынамічнай аптымізацыі паралельных вылічэнняў з улікам характарыстык прадукцыйнасці вылічальнай сістэмы.

На аснове прапанаваных алгарытмаў распрацавана сістэма праектавання і аналізу паралельных праграм, а таксама шматэгентная сістэма арганізацыі паралельных вылічэнняў. Гэтыя сістэмы дазваляюць правесці поўны цыкл апрацоўкі паралельных праграм, якія прадугледжаны для апрацоўкі інфармацыйных патокаў. На базе прапанаваных сістэм спраектаваны паралельныя праграмы для папярэдняй апрацоўкі і выдзялення аб'ектаў на ізабражэннях слаёў інтэгральных мікрасхем, а таксама апрацоўкі мнагазональных спутніковых растравых ізабражэнняў.

Галіна выкарыстання вынікаў дысертацыйнай працы – распрацоўка паралельных праграм, аналіз і аптымізацыя паралельных вылічэнняў.

## РЕЗЮМЕ

Отвагин Алексей Владимирович

Модели, алгоритмы и средства организации параллельных вычислений на базе виртуальной ассоциативной сети

*Ключевые слова:* информационный поток, параллельная обработка, планирование, оптимизация, виртуальная ассоциативная сеть, многоагентная система, автоматизация проектирования программ.

Диссертация посвящена проблеме планирования и организации эффективной обработки информационных потоков произвольной или детерминированной структуры на высокопроизводительной параллельной вычислительной системе. Для рационального планирования параллельных вычислений разработан алгоритм виртуальной ассоциативной сети, представляющий собой вариант гибридного генетического алгоритма. Алгоритм использует механизмы накопления опыта и обучения для ускорения поиска решений и повышения их качества. Предложен способ предварительной селекции решений на основе прочности кластеризации ассоциативной сети, позволяющий сократить объем анализируемых решений. Введен новый оператор кластеризации, заменяющий механизмы изменения популяции классического генетического алгоритма. Выполнены эксперименты, подтверждающие эффективность алгоритма виртуальной ассоциативной сети. Разработана модификация алгоритма виртуальной ассоциативной сети для динамической оптимизации параллельных вычислений с учетом характеристик производительности вычислительной системы.

На основе предложенных алгоритмов разработана система проектирования и анализа параллельных программ, а также многоагентная система организации параллельных вычислений. Эти системы позволяют провести полный цикл разработки параллельных программ, предназначенных для обработки информационных потоков. На базе предложенных систем спроектированы параллельные программы для предварительной обработки и выделения контуров объектов на изображениях слоев интегральных микросхем, а также обработки многозональных спутниковых растровых изображений.

Область применения результатов диссертационной работы – разработка параллельных программ, анализ и оптимизация параллельных вычислений.

## RESUME

Otwagin Aleksej Vladimirovich

Models, algorithms and tools for organization of parallel computations on the basis of a virtual associative network

*Keywords:* informational flow, parallel processing, planning, optimization, virtual associative network, multiagent system, automation of application development.

This dissertation deals with planning and organization of effective processing of a informational flows with arbitrary or determined structure on a high-performance parallel computing system. For effective planning of parallel computations the algorithm of a virtual associative network is developed which is a variant of a hybrid genetic algorithm. This algorithm uses mechanisms of an experience accumulation and learning for solution search speedup and raising of its quality. A method for preliminary selection of solutions on the base of a durability of clusterization of a virtual associative network is proposed that reduces the amount of analyzed solutions. A new operator of clusterization for replacing of mechanisms of population modifications from classic genetical algorithms is introduced. The experiments for confirmation of virtual associative network algorithm efficiency are performed . The modified algorithm of a virtual associative network is also proposed that is used for dynamic optimization of parallel computations with accounting of a performance characteristics of a computing system.

On the basis of proposed algorithms the system for development and analysis of a parallel programs and a multiagent system for parallel computation organization are realized. These systems allow a full stage development of parallel programs for informational flows processing. On the base of these systems the parallel applications for preprocessing and contour of objects detection on a integrated circuits layer images, and applications for processing of multispectral satellite images are developed.

The areas of dissertation results implementation are a parallel program development and an analysis and optimization of parallel computations.

*Научное издание*

**ОТВАГИН Алексей Владимирович**

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И СРЕДСТВА ОРГАНИЗАЦИИ  
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА БАЗЕ ВИРТУАЛЬНОЙ  
АССОЦИАТИВНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.15 – Вычислительные машины и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать	09.11.2007.	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.		Заказ 662.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛП №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6.