

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИДСТУ СО РАН)

На правах рукописи

Костромин Роман Олегович

**МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ**

09.06.01 – Информатика и вычислительная техника

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в лаборатории 5.1. Параллельных и распределенных вычислительных систем отделения 5. Вычислительных и управляющих систем ИДСТУ СО РАН.

Научный руководитель:

Феоктистов Александр Геннадьевич,
кандидат технических наук,
в.н.с. ИДСТУ СО РАН, доцент

Рецензенты:

Черкашин Евгений Александрович,
кандидат технических наук,
с.н.с. ИДСТУ СО РАН, доцент

Бутаков Михаил Игоревич,
кандидат технических наук,
руководитель интеграционных проектов
ООО «Инфотех»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время как в России, так и за рубежом ведутся активные исследования, связанные с созданием и применением высокопроизводительных вычислительных систем различного назначения на основе парадигм Grid и облачных вычислений. Результаты этих исследований представлены в работах С.М. Абрамова, А.И. Аветисяна, А.П. Афанасьева, И.В. Бычкова, Вл.В. Воеводина, Б.М. Глинского, В.П. Иванникова, И.А. Каляева, И.И. Левина, А.И. Легалова, Г.И. Радченко, Л.Б. Соколинского, В.В. Топоркова, Г.А. Опарина, А.Н. Черных, Д. Андерсена, Р. Байя, К. Кессельмана, Э. Танненбаума, Я. Фостера и многих других российских и зарубежных ученых. В связи с высокой интенсивностью потоков вычислений в таких системах необходимо гибкое и эффективное управление ими. В процессе управления распределенными вычислениями требуется, во-первых, частое и сложно реализуемое на практике взаимодействие администраторов ресурсов с пользователями, решающими свои задачи с помощью этих ресурсов, и, во-вторых, детальный учет специфики решаемых задач и характеристик используемых ресурсов. К дополнительным проблемам процесса управления относятся: организационно-функциональная разнородность, динамичность и неполнота описания ресурсов; широта спектра решаемых задач; различные категории пользователей со своими целями и задачами.

Известные модели, методы, алгоритмы и программные средства управления распределенными вычислениями не решают перечисленные выше проблемы полностью. В этой связи актуальным направлением исследований является организация эффективного группового управления ресурсами распределенной вычислительной системы (РВС) в процессе решения сложной прикладной задачи на основе коллективного взаимодействия этих ресурсов. Учитывая динамическую природу РВС, целесообразно применять адаптивное управление ее ресурсами. Перспективным подходом к организации такого управления в РВС является использование мультиагентных технологий. В рамках такого подхода отдельные

ресурсы представляются специализированными приложениями (агентами), образующими в совокупности мультиагентную систему (МАС) управления. Анализ результатов исследований в области самоорганизации вычислительных систем (см., например, работы В.И. Городецкого, И.А. Каляева, G. Di Marzo Serugendo, F. Zambonelli) показывает, что эффективное управление подобными системами с помощью МАС достигается путем формирования оптимальных алгоритмов функционирования и рациональной структуры МАС в соответствии с заданной целью, определенными критериями качества, особенностями предметной области и условиями внешней среды.

Построение проблемно-ориентированной самоорганизующейся МАС порождает ряд проблем, связанных с автоматизацией процессов разработки агентов и агентных платформ, реализации эффективных и надежных алгоритмов функционирования агентов, накопления и применения предметных знаний агентами. Существующие в настоящее время инструменты для создания МАС не позволяют решить вышеперечисленные проблемы в полной мере.

Цель работы заключается в разработке новых моделей, методов, алгоритмов и инструментальных средств, отличных от традиционных средств подобного назначения, которые обеспечивали бы автоматизацию построения МАС и повышение качества управления РВС с помощью агентов.

Основные задачи для достижения поставленной цели:

- исследование известных методов и средств мультиагентного управления распределенными вычислениями;
- проведение сравнительного анализа известных методов и средств организации МАС;
- разработка модели предметной области функционирования агентов управления распределенными вычислениями;
- разработка модели поведения агентов;
- разработка алгоритмов функционирования агентов;
- разработка инструментального комплекса построения МАС для

управления распределенными вычислениями;

– оценка надежности и эффективности функционирования разрабатываемых в рамках диссертационного исследования МАС.

Объектом исследования являются теория и практика управления распределенными вычислениями.

Предметом исследования выступают модели, методы, алгоритмы и инструментальные средства управления РВС.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы и средства концептуального, конкретизирующего и автоматного программирования, организации распределенных вычислений и мультиагентных технологий.

Суть и научная новизна диссертации состоят в разработке новых моделей, алгоритмов и инструментальных средств мультиагентного управления вычислениями в гетерогенной РВС, эффективность применения которых обеспечивается более высоким уровнем интеллектуализации агентов по сравнению с подобными программными сущностями, используемыми на практике в вычислительных системах, за счет использования предметных знаний, гибкой системы обучения и адаптивного планирования своих действий.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1) новая автоматная модель поведения агентов, базирующаяся, в отличие от известных, на комплексном применении специально разработанного набора методов концептуального моделирования предметной области функционирования агентов, динамического планирования их действий в РВС и автоматного программирования;

2) уникальная система машинного обучения агентов, которая основывается на применении гибридной модели представления знаний, обеспечивающей интегрированное использование концептуального и имитационного моделирования, классификации заданий и параметрической настройки алгоритмов работы агентов в качестве методов обучения в сочетании с

процессами самостоятельного извлечения и взаимной передачи знаний агентами;

3) оригинальный мультиагентный алгоритм перераспределения ресурсов РВС в случае отказа ее программно-аппаратных средств, который, в отличие от известных алгоритмов подобного назначения, реализует адаптивное мультисценарное решение данной проблемы и тем самым существенно повышает степень отказоустойчивости вычислительного процесса;

4) инструментальный комплекс построения МАС, обеспечивающий реализацию разработанных моделей, методов и алгоритмов в процессе автоматизации основных этапов разработки, настройки, конфигурации и применения виртуальных сообществ агентов управления вычислениями.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Тема и основные результаты диссертации соответствуют следующим областям исследований, включенным в паспорт специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей:

– модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем;

– модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования.

Практическая значимость. Применение вышеперечисленных результатов обеспечивает существенное сокращение времени решения крупномасштабных задач и повышение эффективности использования ресурсов РВС. Данные результаты получены в рамках следующих научно-технических работ: проектов РФФИ № 14-08 3162-мол_а «Методические подходы и комплекс программ для оптимизации режимов работы крупных ТЭЦ», № 16-07-00931-а «Методология и инструментальные средства разработки и применения проблемно-ориентированных мультиагентных систем управления масштабируемыми вычислениями в разнородной распределенной вычислительной среде» и № 19-07-00097-а «Фундаментальные проблемы непрерывной интеграции функционального

наполнения распределенных пакетов прикладных программ на основе инженерии знаний»; проекта «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров» программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27; проекта «Методы, алгоритмы и инструментальные средства децентрализованного группового решения задач в вычислительных и управляющих системах» программы фундаментальных исследований президиума РАН № 30; базовых тем исследований ИДСТУ СО РАН № IV.38.1.2 «Разработка проблемно-ориентированных технологий, систем и сервисов поддержки научных исследований на основе интеллектуальных методов и алгоритмов организации параллельных и распределенных вычислений» и № IV.38.1.1 «Технологии разработки проблемно-ориентированных самоорганизующихся мультиагентных систем группового управления: методы, инструментальные средства, приложения». Практическое применение разработанных моделей, алгоритмов, методов и инструментальных средств подтверждено справкой об использовании разработанного программного обеспечения.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждаются корректным применением классических методов исследования, а также анализом адекватности разработанных моделей и алгоритмов на основе полунатурного моделирования.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались автором на следующих научных мероприятиях: 13th International Symposium «Intelligent Systems» (INTELS-2018, Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.), International Symposium on Cloud Computing and Services for High Performance Computing Systems (HPCS-2018, Орлеан, Франция, 2018 г.), 41th International Convention on Information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO-2018, Опатия, Хорватия, 2018 г.), 4th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2018, Самара, Россия, 2018 г.), XLVI Международной конференции «Информационные

технологии в науке, образовании и управлении» (IT+S&E`17, Гурзуф, Россия, 2017 г.), IV Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2017, Дивноморское, Россия, 2017 г.), XXII и XXIII Байкальской Всероссийской конференции с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (ИМТ, Иркутск – Байкал, Россия, 2017–2018 гг.), Multidisciplinary youth academic research conference on Science Present and Future: Research Landscape in the 21st century (Иркутск, Россия, 2017 г.), XIII Всероссийской конференции молодых ученых «Моделирование, оптимизация и информационные технологии» (Иркутск, Россия, 2017 г.), конференции «Ляпуновские чтения» (Иркутск, Россия, 2016–2018 гг.), IV и V Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ, Дивноморское, Россия, 2016, 2018 гг.), XVI и XVIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, Россия, 2015 г.; Иркутск, Россия, 2017 г.), XV Молодежной научно-практической конференции «Российская цивилизация: история, проблемы, перспективы» (Иркутск, Россия, 2015 г.), а также семинарах ИДСТУ СО РАН.

Публикации. Результаты научных исследований автора отражены в 37 научных работах. В их числе 6 публикаций [1–6] в российских журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертации, 9 публикаций [7–15], проиндексированных в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [16; 17].

Личный вклад автора. В перечисленных публикациях все результаты, связанные с проведением сравнительного анализа методов и средств организации МАС, разработкой автоматной модели поведения агентов и алгоритмов их функционирования, разработкой инструментальных средств создания агентов и проведением вычислительных экспериментов в рамках полунатурного моделирования МАС, получены автором лично. Из совместных работ в

диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат лично автору.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** рассматриваются общие вопросы организации и применения МАС для управления распределенными вычислениями, исследуются известные МАС, проводится сравнительный анализ методов и средств построения таких систем, обосновывается необходимость разработки нового инструментального комплекса создания МАС, формулируются системные и функциональные требования к разрабатываемому комплексу.

Глава 2 посвящена новым моделям, методам и алгоритмам мультиагентного управления распределенными вычислениями, разрабатываемым в рамках диссертационного исследования.

В **п. 2.1** представлена иерархическая структура МАС для управления РВС, на каждом уровне которой могут функционировать агенты с различными ролями и функциями. Агенты одного уровня могут объединяться в виртуальные сообщества, кооперироваться и конкурировать в рамках этих сообществ. Координация действий агентов осуществляется с помощью общих правил группового поведения. Агенты работают в соответствии с заданными ролями по своим правилам поведения в виртуальном сообществе. Данные о текущем состоянии РВС передаются в ее базу знаний системой метамониторинга. МАС ориентирована на управление потоками заданий распределенных пакетов прикладных программ (РППП), разрабатываемых с помощью специализированных инструментальных комплексов.

В **п. 2.2** дано описание специализированной концептуальной модели, которая, в отличие от известных вычислительных моделей, обеспечивает взаимосвязанное представление проблемно-ориентированного, программно-аппаратного, имитационного и управляющего слоев знаний о РВС. Тем самым обеспечивается проблемная ориентация МАС. Предложенная модель является частным случаем семантической сети. Она обеспечивает спецификацию знаний о

программных модулях для решения задач в предметных областях и работы с объектами РВС, схемных знаний о модульной структуре модели и алгоритмов, продукционных знаний для поддержки принятия решений по выбору оптимальных алгоритмов в зависимости от состояния среды, а также знаний о программно-аппаратной инфраструктуре системы и административных политиках в ее узлах.

Пусть Z , F и M – это множества параметров, операций и программных модулей модели. Множество модулей является элементом вычислительных знаний. Параметры, операции и их взаимосвязи отражают схемные знания. Операции из F определяют отношения вычислимости на множестве параметров Z . Каждой операции $f_i \in F$ соответствует модуль $m_j \in M$, где $i \in \overline{1, n_f}$, $j \in \overline{1, n_m}$, n_f – число операций, n_m – число модулей. Спецификация модуля включает: язык программирования, тип и семантику входных, выходных и транзитных параметров, способы передачи параметров, модуль представления, требуемый компилятор и другие сведения. С каждой операцией f_i связаны два множества параметров $Z_i^{in}, Z_i^{out} \subset Z$. Множество Z_i^{in} определяет параметры, значения которых необходимо задать, чтобы получить значения параметров, представленных множеством Z_i^{out} . Множества Z_i^{in} и Z_i^{out} являются множествами соответственно входных и выходных параметров модуля m_j , реализующего операцию f_i . Постановки задач могут формулироваться в полной или сокращенной (процедурной или непроцедурной) форме. По сформулированной постановке задачи строится схема ее решения (абстрактная программа) на основе методов статического, динамического или статико-динамического планирования вычислений. В множествах параметров и операций введены подмножества соответственно системных параметров, отражающих характеристики объектов РВС, и операций, представляющих алгоритмы планирования вычислений, мониторинга и распределения ресурсов, моделирования поведения среды и других действий.

В п. 2.3 предложена новая конечно-автоматная модель поведения агентов. Она представлена структурой $M^{agent} = \langle sm^p, \{sm_{i,j}^c : i \in \overline{1, n_{vc}}, j \in \overline{1, n_{rol}}\}, MES \rangle$, где sm^p – родительский автомат, $sm_{i,j}^c$ – дочерние автоматы, n_{vc} – число виртуальных сообществ, в которых состоит агент, n_{rol} – число ролей, которые может играть агент, MES – множество сообщений агента. Основной функцией родительского автомата sm^p является создание дочернего автомата $sm_{i,j}^c$ при каждом включении агента в новое виртуальное сообщество, где i и j – это номера соответственно виртуального сообщества и роли агента.

Модель родительского автомата определяется как $sm^p = \langle STS^p, sts_0^p, ACT^p, h^p, GV \rangle$, где STS^p – множество состояний родительского автомата, $sts_0^p \in STS^p$ – начальное состояние родительского автомата, $ACT^p \subset F$ – множество действий родительского автомата, $h^p \in F$ – логическая функция, определяющая условия переходов родительского автомата, GV – множество глобальных переменных родительского автомата, доступных дочерним автоматам. При создании агента все схемы выполнения действий являются абстрактными программами, которые генерируются на языке программирования Java.

Модель дочернего автомата задается структурой $sm_{i,j}^c = \langle STS_j^c, sts_{j,0}^c, ACT_j^c, h_j^c, SLT_i \rangle$, где STS_j^c – множество состояний дочернего автомата, $sts_{j,0}^c \in STS_j^c$ – начальное состояние дочернего автомата, $ACT_j^c \subset F$ – множество действий дочернего автомата, $h_j^c \in F$ – логическая функция, определяющая условия переходов дочернего автомата, SLT_i – система логического времени i -го сообщества. Дочерние автоматы разных агентов, входящих в одно виртуальное сообщество, взаимодействуют путем обмена сообщениями, передаваемыми через родительские автоматы. Автоматы, являющиеся потомками одного и того же родительского автомата, обмениваются информацией об использовании общих ресурсов агента через глобальные

переменные родительского автомата и агентную базу знаний.

При вступлении агента в i -е виртуальное сообщество для соответствующего дочернего автомата создается система логического времени SLT_i , определяемая структурой $SLT_i = \langle T, T_m, g_t, g_m, g_r \rangle$, где T – область значений логического времени, T_m – область значений временных маркеров датировки сообщений, $T_m \subseteq T$, g_t , g_m и g_r – функции соответственно датировки событий автомата, маркировки сообщений и сравнения значений логического времени, $\forall i \in \overline{1, n_{vc}}$. Система логического времени использует векторные часы, в которых число компонент вектора времени равно числу агентов виртуального сообщества, и обеспечивает отношение частичного порядка на множестве событий виртуального сообщества с учетом их обусловленности. Применение функции датировки сообщений позволяет осуществлять их обработку в установленной логической последовательности, а не в произвольном порядке поступления их в общий пул.

В п. 2.4 рассматривается расширение концептуальной модели РВС. С целью поддержки построения и применения конечно-автоматной модели поведения агентов концептуальная модель дополнена новыми объектами: агентами, их ролями, виртуальными сообществами и отношениями между ними, а также состояниями, функциями и графами переходов автоматов. В качестве состояния агента используется состояние-действие – последовательность системных операций, выполняемых над полем системных параметров модели. Фрагмент такой модели, описывающей объекты, необходимые для построения графов переходов агентов, представлен на рисунке 1. Здесь G – множество графов переходов, A – множество агентов, VC – множество виртуальных сообществ агентов, R – множество ролей агентов и $STS = STS^p \cup STS_1^c \cup \dots \cup STS_{n_{rol}}^c$ – множество состояний автоматов. На рисунке 1 отношения между объектами обозначены $o_1 - o_8$. Отношение o_4 отображает взаимосвязь состояний с операциями, реализующими функции переходов. Отношение o_5 представляет взаимосвязь состояний с остальными системными операциями. База знаний агента

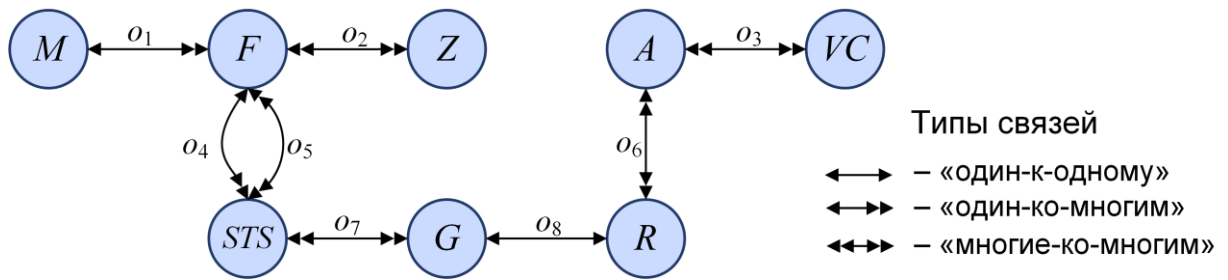


Рисунок 1 – Фрагмент описания расширенной концептуальной модели

создается на основе фрагмента модели РВС.

В п. 2.5 подробно описаны оригинальные алгоритмы функционирования агентов, базирующиеся на разработанной ранее автоматной модели поведения агентов (см. п. 2.3). Для каждого алгоритма приведены соответствующие им графы переходов, функции переходов и состояния-действия агентов.

В п. 2.6 представлен новый алгоритм перераспределения ресурсов РВС для остаточной схемы решения задачи в случае отказа ее программно-аппаратных средств, определено понятие остаточной схемы решения задачи, формализован процесс ее построения. Рассмотрена информационно-вычислительная модель системы диагностики, приведены основные виды отказов. Алгоритм включает следующие этапы работы: обнаружение отказа; обработка отказа; выбор сценария для обеспечения отказоустойчивости выполнения схемы решения задачи (рисунок 2); построение остаточной схемы решения задачи.

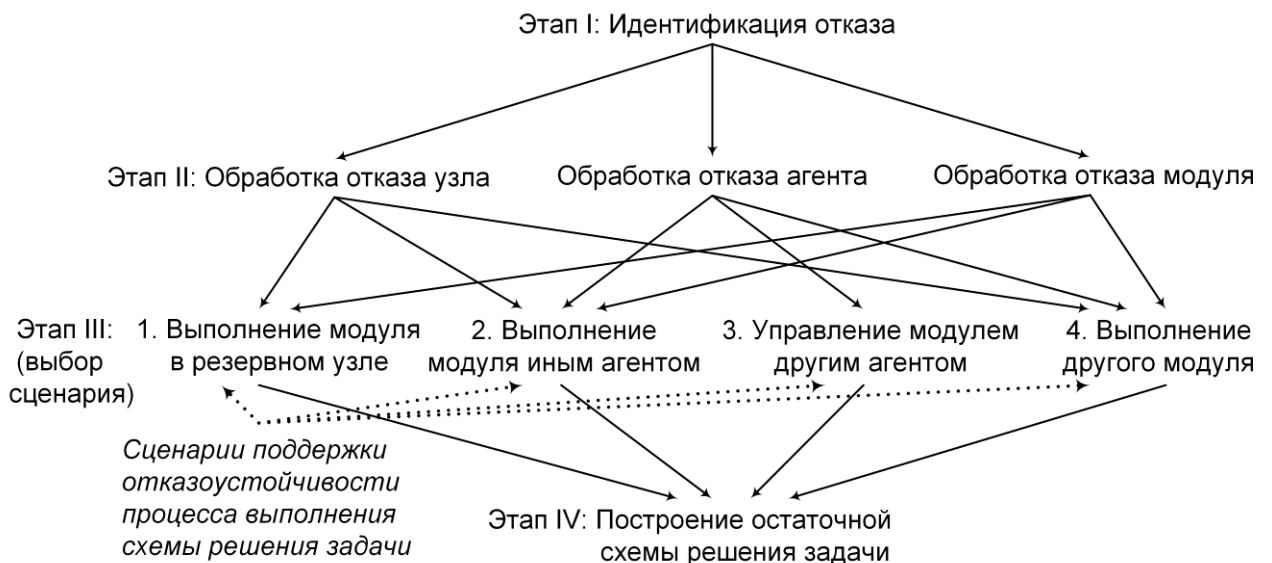


Рисунок 2 – Сценарии обработки отказов

В п. 2.7 предложена уникальная система машинного обучения агентов. Процесс обучения агентов строится на комплексном использовании методов концептуального моделирования, классификации заданий и параметрической настройки системы управления. Представлены методы, средства обучения агентов, рассматривается система классификации заданий, схема параметрической настройки, раскрыты аспекты их работы и особенности реализации.

В главе 3 рассмотрена агентная платформа JADE и предложена интеллектуальная надстройка над JADE, позволяющая автоматизировать процесс конструирования агентов. Освещены аспекты реализации инструментального комплекса организации MAC с применением платформы JADE, а также предложена методика применения инструментального комплекса.

В п. 3.1 обсуждаются ключевые особенности архитектуры платформы JADE, этапы подключения агентов к платформе при различных сценариях размещения агентов, а также основные трудности, сопровождающие разработку агентов в JADE.

В п. 3.2 представлен инструментальный комплекс для автоматизации разработки MAC. Одним из основных элементов данного комплекса является надстройка над JADE, которая включает библиотеку алгоритмов функционирования агентов, реализующую основные поведенческие функции агентов: формулировку постановок задач, планирование вычислений, распределение ресурсов, обеспечение отказоустойчивости вычислительных процессов и др. Данная надстройка отвечает за генерацию агентов MAC на основе базовых библиотек JADE, специальных библиотек поведения агентов, концептуальной модели PBC и прикладных модулей решаемой задачи. Генерация кода агента осуществляется в рамках каркасного подхода к конструированию программ (рисунок 3).

JADE предоставляет набор стандартных библиотек, обеспечивающих функционирование агентной платформы, в том числе обмен сообщениями.

С помощью данных библиотек реализуются базовые функции управления жизненным циклом агентов и взаимодействия с платформой. За наполнение агента поведением отвечает разработчик МАС.

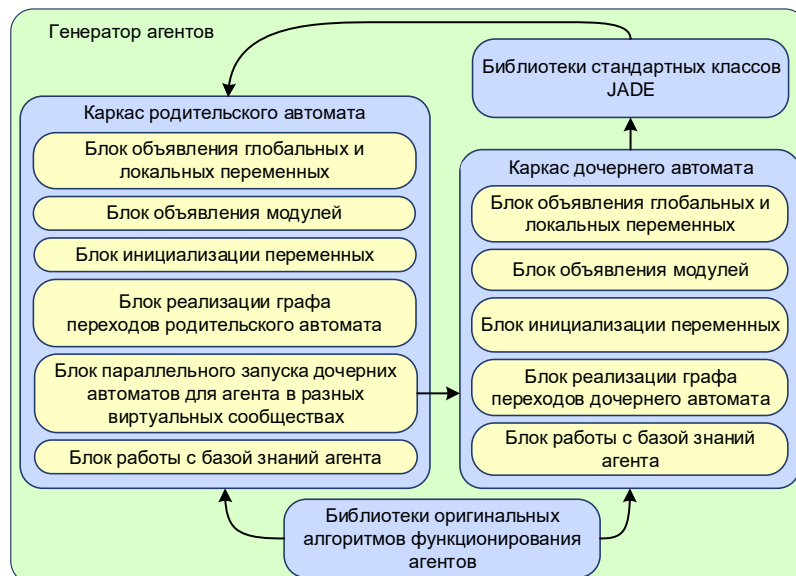


Рисунок 3 – Генерация программного кода агента

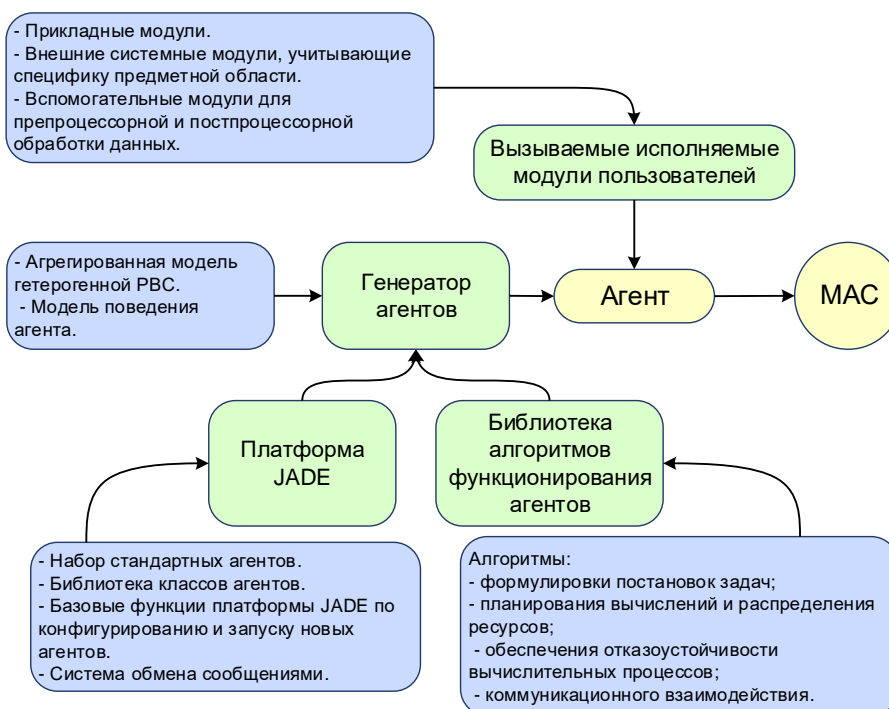


Рисунок 4 – Надстройка к JADE

Для создания дополнительных методов стандартных классов JADE, представляющих функции (операции) агентов МАС, применяется библиотека

«встроенных» оригинальных алгоритмов, оформленных в виде модулей, а также подключаемые исполняемые модули пользователей (рисунок 4). Каждому агенту назначается модель поведения, связанная с имеющимися алгоритмами, а также передается полная информация о модели РВС. Сгенерированный таким образом агент в результате сборки и компиляции автоматически размещается на выбранном узле и подключается к МАС.

В **п. 3.3** предлагается методика применения разработанного инструментального комплекса, включающая следующие основные этапы: установку и запуск платформы JADE; настройку конфигурации МАС; разработку конечно-автоматных моделей поведения агентов; генерацию программного кода агентов; размещение агентов и их подключение к JADE; подключение агентов к выбранному инструментальному комплексу разработки РППП.

Глава 4 посвящена экспериментальному анализу результатов практической апробации разработанных моделей, методов, алгоритмов и инструментальных средств мультиагентного управления вычислениями при решении задач в экспериментальной РВС, организованной на базе ресурсов Центра коллективного пользования (ЦКП) «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» (ИСКЦ) и других научно-образовательных организаций. Структура РВС, характеристики ее ресурсов и схема управления вычислениями в ней представлены в **п. 4.1**.

В **п. 4.2** осуществляется сравнительный анализ трудоемкости построения МАС на основе JADE с использованием разработанного в диссертации инструментального комплекса и без него. Показано, что трудозатраты на создание МАС в первом случае значительно ниже (рисунок 5).

В **п. 4.3** производится оценка качества мультиагентного управления. С этой целью анализируется отказоустойчивость вычислений с помощью полунатурного моделирования. Сформирован синтетический поток заданий с использованием формата Standard Workload Format (SWF) на основе вычислительной истории, полученной в процессе решения ряда научных и прикладных задач в ЦКП ИСКЦ. Данный поток был поочередно выполнен под управлением трех систем:

метапланировщиков GridWay и CondorDAGMan, а также рассматриваемой в диссертации MAC с обучением агентов и без него. В процессе работы этих систем моделировались отказы их компонентов и узлов PBC.

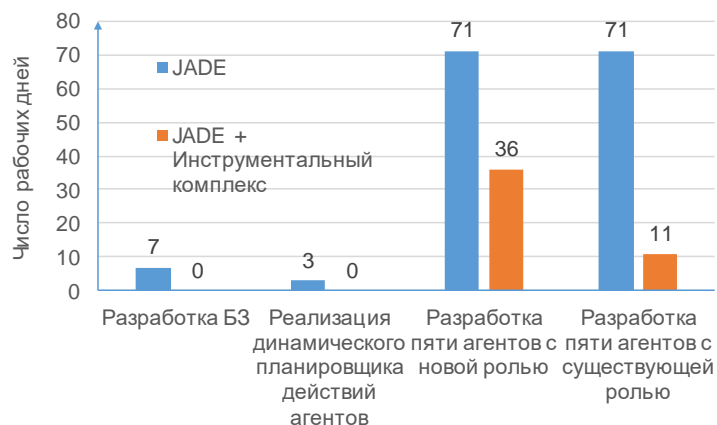


Рисунок 5 – Трудозатраты на создание MAC

В рамках экспериментов суммарное число используемых ядер изменялось от 320 до 352. Разные узлы характеризовались различной степенью их надежности. Рисунки 6 и 7 демонстрируют преимущество MAC с точки зрения отказов узлов и компонентов управляющих систем, что особенно очевидно при использовании MAC с обучением агентов.

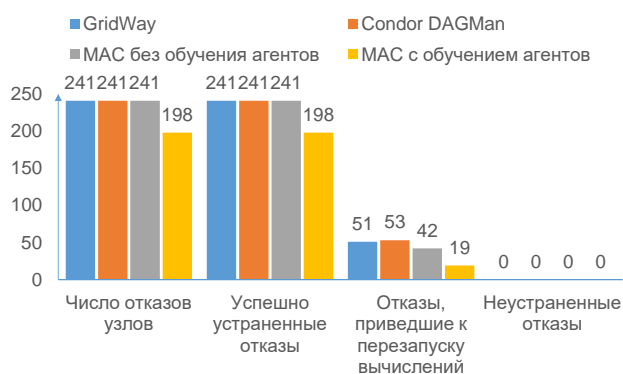


Рисунок 6 – Устранение отказов узлов

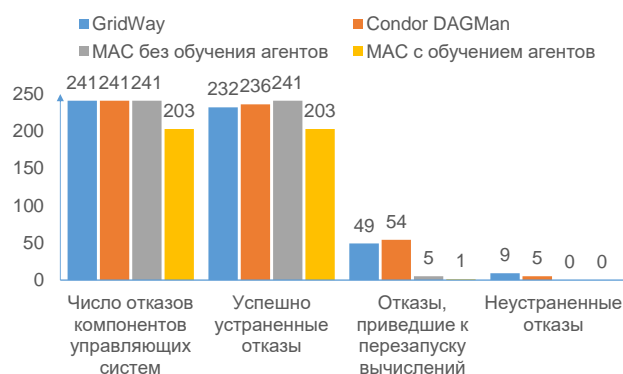


Рисунок 7 – Устранение отказов компонентов системы управления

При этом средняя загрузка процессора узлов экспериментальной PBC под управлением систем GridWay и Condor DAGMan составляет соответственно 81% и 77%. Применение MAC с обучением агентов и без него позволило повысить

данный показатель до 87% и 82% соответственно.

Проведен сравнительный анализ эффективности передачи сообщений между агентами в различных типах сетей (локальная, городская и глобальная). Число агентов для каждого типа сети составило 10, 100 и 1000. Результаты проведенных экспериментов показали высокую надежность и эффективность процесса обмена сообщениями между агентами МАС.

Представлены результаты сравнения процессов функционирования разработанной МАС с системами GridWay и Condor DAGMan с точки зрения теории массового обслуживания. Эти результаты показывают существенное улучшение следующих четырех показателей качества обслуживания очереди заданий при использовании МАС: число заданий с нулевым временем ожидания (а), среднее время пребывания задания в очереди (b), коэффициент полезного использования ресурсов РВС (с) и общее время выполнения заданий потока (d). Улучшение перечисленных выше четырех показателей обслуживания очередей заданий составляет от 1.01% до 21.34% по сравнению с системой Condor DAGMan и от 0.30% до 7.09% по сравнению с системой GridWay (рисунок 8).

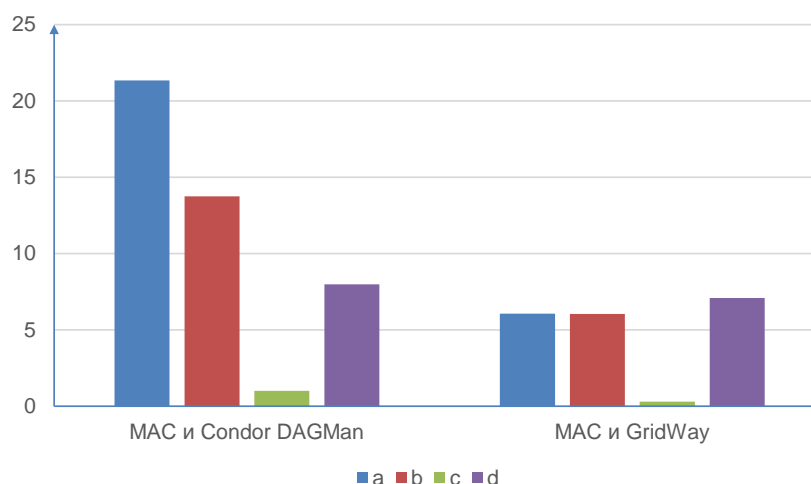


Рисунок 8 – Улучшение показателей качества обслуживания очереди заданий

Выполнена оценка балансировки загрузки ресурсов РВС. Показано, что применение МАС позволяет улучшить балансировку вычислительных ресурсов РВС (рисунок 9) по сравнению с балансировкой, обеспечиваемой системами HTCondor и PBS Torque (рисунок 10), используемыми в узлах РВС.

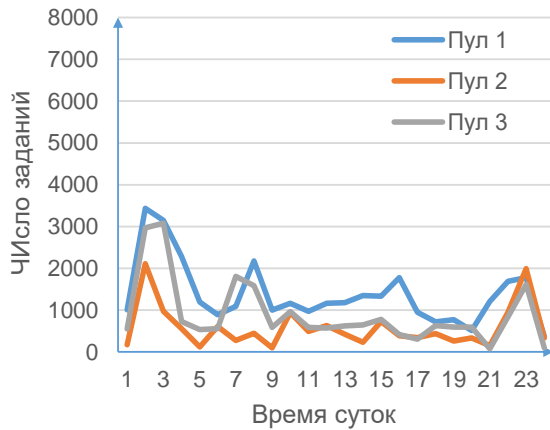


Рисунок 9 – Балансировка загрузки с дополнительным применением MAC

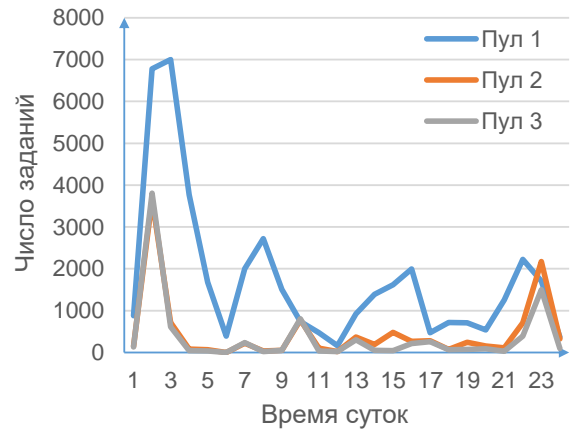


Рисунок 10 – Балансировка загрузки с помощью HTCondor и PBS Torque

Разработан специализированный алгоритм определения длительности окон в расписании системы PBS Torque. Применение алгоритма продемонстрировано на примере решения задачи развития энергетического сектора Вьетнама для оптимизации энергетической безопасности на определенный период. Использование окон позволило ускорить процесс решения задачи на 16%.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Приложения содержат скан-копии акта внедрения и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, результаты сравнительного анализа инструментариев для создания MAC и детальное описание SWF-формата.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Главным результатом диссертации является разработка моделей, методов, алгоритмов и инструментальных средств организации MAC для управления распределенными вычислениями в разнородных РВС. Характерной особенностью предложенного подхода к организации MAC является применение методов и средств машинного обучения агентов.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1) разработана новая автоматная модель поведения агентов, базирующаяся, в отличие от известных, на комплексном применении специально разработанного набора методов концептуального моделирования предметной области

функционирования агентов, динамического планирования их действий в РВС и автоматного программирования;

2) предложена уникальная система машинного обучения агентов, которая основывается на применении гибридной модели представления знаний, обеспечивающей интегрированное использование концептуального и имитационного моделирования, классификации заданий и параметрической настройки алгоритмов работы агентов в качестве методов обучения в сочетании с процессами самостоятельного извлечения и взаимной передачи знаний агентами;

3) разработан оригинальный мультиагентный алгоритм перераспределения ресурсов РВС в случае отказа ее программно-аппаратных средств, который, в отличие от известных алгоритмов подобного назначения, реализует адаптивное мультисценарное решение данной проблемы и тем самым существенно повышает степень отказоустойчивости вычислительного процесса;

4) создан инструментальный комплекс построения МАС, обеспечивающий реализацию разработанных моделей, методов и алгоритмов в процессе автоматизации основных этапов разработки, настройки, конфигурации и применения виртуальных сообществ агентов управления вычислениями.

Все задачи, поставленные перед исследованием, были успешно выполнены. Предложенные в диссертации модели, методы, алгоритмы и инструментальные средства управления рассмотренными в работе РВС допускают свое естественное развитие и обобщение применительно к другим классам информационно-вычислительных и управляющих систем.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК:

1. Феоктистов, А.Г. Управление заданиями в гетерогенной распределенной вычислительной среде на основе знаний / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, Ю.А. Дядькин // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2018. — № 2. — С. 10–17.

2. Феоктистов, А.Г. Мультиагентный алгоритм построения остаточной

схемы решения задачи в распределенных пакетах прикладных программ / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, И.А. Сидоров, С.А. Горский // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2018. — № 8. — С. 59–69.

3. Feoktistov, A. Virtualization of Heterogeneous HPC-clusters Based on OpenStack Platform / A. Feoktistov, I. Sidorov, R. Kostromin, V. Sergeev, V. Bogdanova // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Вычислительная математика и информатика. — 2017. — Т. 6, № 2. — С. 37–48.

4. Феоктистов, А.Г. Разработка и применение предметно-ориентированных мультиагентных систем управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2016. — № 11. — С. 65–75.

5. Феоктистов, А.Г. Мультиагентный алгоритм перераспределения вычислительных ресурсов для остаточной схемы решения задачи в Grid / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 9, ч. 2. — С. 244–248.

6. Костромин, Р.О. Модели, методы и средства управления вычислениями в интегрированной кластерной системе / Р.О. Костромин // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 6, ч. 1. — С. 35–38.

Публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

7. Feoktistov, A. Orlando tools: Energy research application development through convergence of grid and cloud computing / A. Feoktistov, S. Gorsky, I. Sidorov, R. Kostromin, A. Edelev, L. Massel // Commun. Comput. Inf. Sci. — 2019. — V. 965. — P. 289–300.

8. Feoktistov, A. Machine Learning in a Multi-Agent System for Distributed Computing Management / I. Bychkov, A. Feoktistov, R. Kostromin, I. Sidorov, A. Edelev, S. Gorsky // Data Sci. Inf. Technol. Nanotechnology 2018: CEUR-WS Proc. — 2018. — V. 2212. — P. 89–97.

9. Feoktistov, A. Multi-agent Algorithm for Re-allocating Grid-resources and Improving Fault-tolerance of Problem-solving Processes / A. Feoktistov, R. Kostromin,

I. Sidorov, S. Gorsky, G. Oparin // *Procedia Comput. Sci.* — 2019. — V. 150. — P. 171–178.

10. Tchernykh, A. Orlando Tools: Development, Training, and Use of Scalable Applications in Heterogeneous Distributed Computing Environments / A. Tchernykh, A. Feoktistov, S. Gorsky, I. Sidorov, R. Kostromin, I. Bychkov, O. Basharina, A. Alexandrov, R. Rivera-Rodriguez // *Commun. Comput. Inf. Sci.* — 2019. — V. 979. — P. 265–279.

11. Feoktistov, A. Agent Behavior Model for Distributed Computing Management in the Environment with Virtualized Resources / A. Feoktistov, R. Kostromin, A. Chernykh // *Proc. of the 41th Intern. Convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO-2018)*. — Riejka: IEEE, 2018. — P. 1153–1158.

12. Feoktistov, A. Development of Distributed Subject-Oriented Applications for Cloud Computing through the Integration of Conceptual and Modular Programming / A. Feoktistov, R. Kostromin, I. Sidirov, S. Gorsky // *Proc. of the 41th Intern. Convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO-2018)*. — Riejka: IEEE, 2018. — P. 256–261.

13. Feoktistov, A. Multi-Agent Approach for Dynamic Elasticity of Virtual Machines Provisioning in Heterogeneous Distributed Computing Environment / A. Feoktistov, I. Sidorov, A. Tchernykh, V. Zorkalzev, S. Gorsky, R. Kostromin, I. Bychkov, A. Avetisyan // *Proc. of the Intern. Conf. on High Performance Computing and Simulation (HPCS-2018)*. — IEEE, 2018. — P. 909–916.

14. Feoktistov, A. Knowledge Elicitation in Multi-Agent System for Distributed Computing Management / A. Feoktistov, A. Tchernykh, S. Gorsky, R. Kostromin // *Proc. of the 40th Intern. Convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO-2017)*. — Riejka: IEEE, 2017. — P. 1350–1355.

15. Bychkov, I. Job Flow Management for Virtualized Resources of Heterogeneous Distributed Computing Environment / I. Bychkov, A. Feoktistov,

I. Sidorov, R. Kostromin // *Procedia Engineering*. — 2017. — Vol. 201. — P. 534–542.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

16. Программа мониторинга очередей заданий в гетерогенной распределенной вычислительной среде: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 10.04.2018 № 2018616092 / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин. — М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2018.

17. Библиотека алгоритмов для эффективного извлечения и применения проблемно-ориентированных знаний агентами: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 11.12.2017 № 2017663706 / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин. — М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2017.

Публикации в других изданиях:

18. Бычков, И.В. Обучение агентов на основе параметрической настройки их алгоритмов управления распределенными вычислениями / И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров, А.В. Еделев, С.А. Горский, Р.О. Костромин // *Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. IV Междунар. конф. и молодежной школы (ИТНТ-2018)*. — Самара: Новая техника, 2018. — С. 2237–2247.

19. Feoktistov, A. Orlando Tools for Scientific Applications Development and Use: Convergence of Grid and Cloud Computing / A. Feoktistov, S. Gorsky, I. Sidorov, R. Kostromin, A. Edelev, L. Massel // *Суперкомпьютерные дни в России: тр. междунар. конф.* — М.: Изд-во МГУ, 2018. — С. 378–389.

20. Феоктистов, А.Г. Мультиагентный алгоритм построения остаточной схемы решения задачи в гетерогенной распределенной вычислительной среде / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, И.А. Сидоров, С.А. Горский // *Материалы 5-й Всерос. науч.-техн. конф. «Суперкомпьютерные технологии»*. — Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2018. — Т. 2. — С. 71–75.

21. Feoktistov, A. Integration of Heterogeneous HPC-clusters Using OpenStack

Platform / A. Feoktistov, I. Sidorov, V. Sergeev, V. Bogdanova, R. Kostromin // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2017): Короткие статьи и описания плакатов XI Междунар. конф. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. — С. 90–99.

22. Феоктистов, А.Г. Извлечение знаний агентами в системе управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2017. — № 3. — С. 136–143.

23. Феоктистов, А.Г. Мультиагентная система управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2017. — № 4 (4). — С. 18–22.

24. Костромин, Р.О. Методы и средства извлечения знаний в мультиагентной системе управления распределенными вычислениями / Р.О. Костромин, А.Г. Феоктистов, Ю.А. Дядькин // Материалы 10-й Всерос. мультikonф. — Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2017. — Т. 3. — С. 117–119.

25. Бычков, И.В. Интеллектуальная технология управления вычислениями в виртуализированной кластерной среде / И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров, Р.О. Костромин, В.И. Зоркальцев, А.В. Еделев // Материалы 10-й Всерос. мультikonф. — Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2017. — Т. 3. — С. 84–86.

26. Феоктистов, А.Г. Извлечение знаний агентами в системе управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2017. — № 3. — С. 136–143.

27. Феоктистов, А.Г. Средства разработки и применения проблемно-ориентированных мультиагентных систем управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Материалы 4-й Всерос. науч.-техн. конф. «Суперкомпьютерные технологии». — Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2016. — Т. 2. — С. 108–112.