

*На правах рукописи*

**Горященко Алексей Сергеевич**

**Оптимизация задач маршрутизации на основе взаимодействующих  
интеллектуальных транспортных агентов**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

***АВТОРЕФЕРАТ***

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**МОСКВА**

**2022**

Работа выполнена в Отделении № 7 «Искусственный интеллект и принятие решений» Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской Академии Наук (ФИЦ ИУ РАН).

Научный руководитель: **Хачумов Вячеслав Михайлович**  
Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФИЦ «Информатика и управление» РАН (г.Москва)

Официальные оппоненты: **Смирнов Александр Викторович**  
Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории интегрированных систем автоматизации СПб ФИЦ РАН (г.Санкт-Петербург)

**Карпов Валерий Эдуардович**  
Кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории робототехники Федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»" (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (г.Москва)

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_ часов \_\_\_\_ минут на заседании диссертационного совета 24.1.224.01 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН) по адресу 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, 9 (конференц-зал, 1-й этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова, д. 40 и на официальном сайте ФИЦ ИУ РАН <http://www.frccsc.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба выслать по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, кор. 2, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.224.01.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2022 г.

Телефон для справок: +7 (499) 135-51-64.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.224.01  
кандидат физико-математических наук

И.В.Смирнов

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы исследования.** Агентное моделирование широко применяется для изучения свойств сложных динамических систем. Интеллектуальный агент – программная сущность, обладающая свойствами автономности, общественного поведения, реактивности и проактивности. В настоящей работе используется термин интеллектуальный транспортный агент – это интеллектуальный агент, применяемый для решения задач маршрутизации, дополнительно обладающий возможностью перемещения и атрибутами скорости и грузоподъемности.

Под задачами маршрутизации в настоящей работе понимаются транспортная задача (задача Монжа-Канторовича, transportation problem, TP) и мультитранспортный вариант задачи маршрутизации (задача Данцига-Рамсера, split delivery vehicle routing problem, SDVRP), особенности решения которых в предлагаемых постановках заключаются в том, что в первом случае используются коалиции транспортных агентов, а во втором – взаимодействующие агенты, не образующие коалиции. В дальнейшем эти задачи будут называться классическими.

Коалиции агентов – набор или группа агентов, возможно обладающих различными свойствами, действующие сообща для достижения поставленной общей цели, в условиях, когда индивидуальные агенты этой цели достичь не могут.

Решение задач формирования групп или коалиций для совместного достижения целей изучалось на примере автоматов в работах М.Л.Цетлина, В.Л.Стефанюка, В.И.Варшавского. Многоагентные системы и их применение анализируются в работах В.И.Городецкого и П.О.Скобелева. Подходы к формированию коалиций агентов и роботов рассматриваются в работах А.В.Смирнова. Изучение совместного поведения агентов и интеллектуальных роботов продолжено в работах В.Б.Тарасова, В.Э.Карпова, И.А.Каляева, А.А.Кулинича. Теория активных систем, элементы которых обладают собственными интересами и предпочтениями, рассмотрена в работах В.Н.Буркова и Д.А.Новикова. Различные подходы к решению оптимизационных задач, в том числе задач маршрутизации, представлены в работах В.М.Курейчика. Различные варианты задач

маршрутизации изучаются в работах C.Archetti, J.-F.Cordeau, J.Desrosiers, G.Laporte, A.Mingozzi, Е.М.Бронштейна.

Представляют значительный практический интерес задачи оптимизации маршрутизации, в которых состав элементов и/или их свойства могут изменяться в процессе решения. В этом случае использование ранее предложенных подходов, основанных на точных переборных алгоритмах, становится очень ресурсоемким и поэтому нецелесообразным. Это определяет внимание к развитию распределенных приближенных алгоритмов.

В России проф. Г.С.Осиповым был предложен подход к разработке мультиагентных интеллектуальных систем, в котором используется идея улучшения «способностей» агентов на основе оценки результатов их деятельности и последующего изменения оценки успешности.

Широкое внедрение в практику распределенных приближенных алгоритмов предполагает изучение близости получаемых результатов к результатам оптимальных алгоритмов. Настоящая работа посвящена изучению возможностей интеллектуальных агентов, обладающих механизмом оценки успешности, в рамках мультиагентной системы как способу повышения качества решений задач маршрутизации, в том числе транспортной задачи и мультитранспортного варианта задачи маршрутизации (SDVRP).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является повышение качества решения задач маршрутизации большой размерности на основе использования коалиций интеллектуальных транспортных агентов с изменяющимися в процессе деятельности характеристиками и оценками успешности действий.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих **задач**:

1. Формирование на основе анализа научных публикаций критериев выбора мультиагентной платформы и ее нагрузочное тестирование.
2. Разработка и реализация централизованного и распределенного алгоритмов формирования коалиций агентов с возможностью изменения их характеристик в процессе моделирования, изучение его свойств.

3. Разработка распределенного алгоритма решения задач маршрутизации на основе коалиций агентов, в том числе обладающих способностью к изменению оценок успешности, в мультиагентной системе и его программная реализация.

4. Проведение серии вычислительных экспериментов с целью получения сравнительных характеристик качества разработанных алгоритмов.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

п.4. «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

п.5. «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

п.10. «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах».

**Научная новизна** заключается в разработке и исследовании метода решения задач маршрутизации на основе интеллектуальных транспортных агентов, обладающих способностью к изменению оценок успешности, в условиях, когда каждый агент не обладает достаточными ресурсами для выполнения заданий, и характеристики агентов в процессе решения задачи могут меняться. Метод включает несколько новых алгоритмов и оценки их вычислительной сложности, в том числе:

1. Централизованный и распределенный алгоритмы формирования коалиций агентов с учетом случайного изменения их характеристик, существенно расширяющие класс решаемых задач маршрутизации, в которых состав элементов и их свойства могут изменяться в процессе решения;

2. Распределенный алгоритм решения задач маршрутизации в рамках мультиагентных систем, в которых агенты используют оценки успешности для улучшения своих способностей, что позволяет уменьшать их количество при прочих равных условиях;

3. Теоретическую и экспериментальную оценки вычислительной сложности созданных алгоритмов, из которых следует применимость разработанного метода для решения задач большой размерности и в условиях изменения характеристик агентов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Коалиционный метод решения задач маршрутизации в рамках агентного подхода в условиях случайного изменения характеристик и состава агентов, что существенно расширяет класс решаемых задач.

2. Алгоритмы формирования коалиций и решения задач маршрутизации в рамках мультиагентных систем, в которых агенты используют оценки успешности для улучшения своих способностей в результате деятельности.

3. Сравнительные оценки вычислительной сложности алгоритмов формирования коалиций агентов; оценки близости результатов решения задач маршрутизации к оптимальным в случае, когда оптимальные решения возможны.

4. Результаты применения программной реализации предложенного метода для решения модельных задач маршрутизации в условиях изменения характеристик и состава агентов.

**Практическая значимость** заключается в том, что применение предложенного подхода, основанного на коллективном поведении агентов, делает возможным практическое решение задач маршрутизации большой размерности в условиях изменения параметров задачи в процессе нахождения решения. Программные реализации разработанных алгоритмов оформлены в виде свидетельства о регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс для решения распределительных задач с использованием коалиций интеллектуальных агентов», регистрационный N 2021617131 от 11.05.2021. Программный комплекс позволяет проводить прототипирование и отладку алгоритмов поведения автономных интеллектуальных технических систем.

**Методы исследования.** В работе использованы методы системного анализа, линейного программирования, методы оценки вычислительной сложности алгоритмов, методы машинного обучения, агентное

моделирование как метод имитационного моделирования и теория интеллектуальных динамических систем.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов подтверждается вычислительными экспериментами, успешной апробацией на научных конференциях и семинарах, а также реализацией предложенных алгоритмов с использованием мультиагентной системы и их применением для решения прикладных задач.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы докладывались диссертантом и обсуждались на 5 всероссийских и международных научно-технических конференциях, в том числе:

- Intelligent Systems Conference (IntelliSys) 2021 (2-3 сентября 2021, Amsterdam, The Netherlands).

- Future of Information and Communication Conference FICC-2019 (14-15 марта 2019, San Francisco, USA);

- Пятой Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием «Информатика, Управление и Системный Анализ» ИУСА-2018 (6-8 июня 2018, г.Ростов-на-Дону, Россия);

- 7-й Международной конференции "Системный анализ и информационные технологии" САИТ-2017 (13-18 июня 2017, г. Светлогорск, Россия);

- IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием ИУСА-2016 (8-11 июня 2016, г.Тверь, Россия);

- научных семинарах ФИЦ ИУ РАН, РУДН, ИПС им.А.К.Айламазяна РАН.

**Внедрение.** Разработанные алгоритмы внедрены в учебный процесс кафедры информационных технологий факультета ФМиЕН РУДН, программные реализации используются в деятельности ООО «РИТЕХ», получены соответствующие Акты.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных работах, 4 из которых опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК или индексируемых в базах данных Scopus, 3 – в материалах всероссийских и международных конференций и 1 – свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст работы изложен на 138 страницах, содержит 17 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 121 наименование.

### **Краткое содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность применения агентов и их коалиций в мультиагентных системах для решения задач маршрутизации, указывается цель работы, отмечается новизна результатов исследования, их практическая значимость, приводятся данные о структуре и объеме работы.

**Первая глава** посвящена рассмотрению вопросов развития интеллектуальных программных систем – от систем, основанных на правилах, до мультиагентных. Описана структура одной из типовых современных мультиагентных платформ, рассмотрены ее основные свойства, области применения, классы задач, которые можно решать с ее помощью. На основе анализа научных публикаций сформулированы критерии, которым должна отвечать используемая в настоящей работе мультиагентная платформа: соответствие спецификации FIPA, возможность работы с несколькими сотнями агентов, зависимость времени работы от количества агентов не хуже, чем линейная.

Описаны основные свойства известных к настоящему времени алгоритмов формирования коалиций агентов, основанных на использовании характеристической функции: точных переборных или приближенных. Преимущество приближенных алгоритмов по сравнению с точными заключается в возможности работы с сотнями и тысячами агентов, например, в задачах балансировки «умных электрических сетей».

Кратко рассмотрен представленный в научных публикациях знаковый подход к планированию и распределению ролей агентов. Обсуждены возможности алгоритма выбора предпочитаемых действий в коалиции интеллектуальных агентов. Алгоритм состоит в том, что наиболее предпочтительный агент-исполнитель выбирается на основе интегральной оценки успешности выполнения им предыдущих действий.

Приведены примеры использования агентного моделирования, в том числе коалиций агентов, для решения различных задач.



На основе рассмотренных научных публикаций сделан вывод о том, что подход к решению задач маршрутизации с использованием агентного моделирования является актуальным. При этом особый интерес представляют приближенные распределенные алгоритмы, позволяющие в полной мере использовать преимущества мультиагентных систем и современных коммуникационных сетей. Показано, что недостаточно изучены возможности интеллектуальных агентов, в том числе со способностью к изменению оценок успешности, в рамках агентного моделирования. Применение таких агентов позволит повысить качество решения, получаемого приближенным алгоритмом.

**Во второй главе** рассмотрена модельная задача, описаны предложенные алгоритмы и приведены их свойства. В качестве модельной рассматривается задача маршрутизации. В зависимости от количества агентов – источников (пунктов отправления), пунктов назначения и соотношения потребностей пунктов назначения, а также грузоподъемности источников имеют место либо классическая транспортная задача, либо мультитранспортный вариант задачи маршрутизации (SDVRP).

Пусть заданы:

1. Источники  $A_i$  с количеством продукции (грузоподъемностью)  $a_i$ , где  $a_i$  – целые числа,  $i=1..m$ .  $M^*$  - множество всех источников. Продукция является однородной.

2. Пункты назначения  $B_j$  с потребностью в продукции  $b_j$ , где  $b_j$  – целые числа,  $j=1..n$ .  $N^*$  - множество всех пунктов назначения.

3. Матрица стоимости  $c_{ij} > 0$  перевозки из пункта  $i$  в пункт  $j$ . Не ограничивая общности, считается, что скорости у транспортных агентов - источников одинаковы. Таким образом, стоимость перевозки пропорциональна расстоянию между пунктами.

Требуется найти количество продукции  $x_{ij} \geq 0$ , перевозимое из пункта  $i$  в пункт  $j$ , такое что:  $\sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min$  (минимизация стоимости перевозки).

**В случае I**, если:

$$m \geq n, \quad (I.4)$$

$$a_i < b_j, \text{ для всех } i \text{ и } j, \quad (I.5)$$

$$\sum_i a_i \leq \sum_j b_j, \quad (I.6)$$

то имеет место классическая транспортная задача. Поскольку количество продукции у каждого источника меньше потребности любого пункта назначения, то возникает задача формирования коалиции источников. Источник  $A_i$  с наибольшим количеством продукции  $a_i$  выбирает пункт назначения  $B_j$ , для которого стоимость перевозки  $c_{ij}$  минимальна. Этот источник становится ведущим, он упорядочивает список остальных источников по стоимости перевозки в этот же пункт назначения  $B_j$ . Из этого списка ведущий выбирает  $k$  первых элементов, сумма количества продукции у которых достаточна для удовлетворения потребности пункта назначения  $B_j$  - они являются коалицией для пункта назначения  $B_j$ . Среди оставшихся источников снова выбирается ведущий и процесс продолжается. Алгоритм останавливается, если удовлетворены потребности всех пунктов назначения, или сумма количества продукции у оставшихся источников недостаточна для удовлетворения потребности ни одного пункта назначения.

Модельная задача является NP-полной<sup>1</sup>. Для оценки качества решений, получаемых предлагаемым алгоритмом, в работе сравниваются его результаты с результатами известного алгоритма решения транспортной задачи методом линейного программирования<sup>2</sup> в тех условиях, когда он применим. К настоящему времени известно несколько алгоритмов решения, например, со сложностью  $O(m \cdot n^2 \cdot (\log m + n \cdot \log n))$ <sup>3</sup>.

**В случае II**, если:

$$m < n, \quad (II.4)$$

$$a_i \text{ одинаковы и равны } Q \text{ для всех } i, Q > b_j \text{ для всех } j, \quad (II.5)$$

$$\sum_i a_i \geq \sum_j b_j, \quad (II.6)$$

$$\begin{aligned} &\text{все источники вначале находятся в одном пункте} \\ &\text{и после исчерпания продукции должны вернуться в этот пункт,} \end{aligned} \quad (II.7)$$

то имеет место мультитранспортный вариант классической задачи маршрутизации (SDVRP). Эта задача также является NP-полной<sup>4</sup>. Для этой задачи известны более чем 80 стандартных наборов входных данных, для некоторых из них (для большинства наборов входных данных с

<sup>1</sup> Karabati S., Kouvelis P., Yu G. A min-max-sum resource allocation problem and its applications //Operations Research. 2001. V.49. N.6. P.913-922

<sup>2</sup> Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. - М.: Наука, 1969. - 368 с.

<sup>3</sup> Brenner U. A faster polynomial algorithm for the unbalanced Hitchcock transportation problem //Operations Research Letters. 2008. V. 36. N. 4. P. 408-413.

<sup>4</sup> Dror M., Trudeau P. Split delivery routing //Naval Research Logistics (NRL). 1990. V.37. N.3. P.383-402

количеством до 50 агентов, а также для одного набора с 75 агентами и одного набора с 100 агентами) установлены результаты оптимального решения<sup>5</sup>.

Таким образом, значение общей стоимости перевозки, полученное оптимальным алгоритмом, может служить эталоном для оценки качества решений, полученных предложенными в настоящей работе алгоритмами, при условии использования одинаковых начальных данных.

В настоящей работе автором предложена новая модель решения транспортной задачи и задачи маршрутизации, имеющих большие размерности, основанная на использовании интеллектуальных агентов, как не использующих, так и использующих оценки успешности. Задача решается путем интеграции алгоритмов, взаимосвязь которых представлена на Рис.1.

Алгоритмы 1-3 являются централизованными. Алгоритм 1 предложен автором и решает задачу формирования коалиций с использованием характеристической функции. Схема Алгоритма 2 рассмотрена в работе [Г.С.Осипов<sup>6</sup>, 2018]. Этот алгоритм предназначен для распределения шагов заранее созданного плана по исполнителям, которые способны изменять оценки успешности, т.е. улучшать свои способности в результате деятельности. Алгоритм 2 реализован в ходе диссертационного исследования. Алгоритм 3 является объединением Алгоритмов 1 и 2, в котором при формировании коалиций исполнители изменяют оценки успешности.

Алгоритмы 4-6 предложены автором. Они функционируют в распределенной среде и в настоящей работе реализованы с использованием мультиагентной платформы. Алгоритм 4 предназначен для формирования коалиций из агентов, не использующих оценки успешности, и он применим для решения задачи маршрутизации. Алгоритм 5 решает задачу распределения шагов плана по исполнителям – интеллектуальным агентам в распределенной среде наследуя идею оценок успешности. Алгоритм 6 решает целевую транспортную задачу на основе

---

<sup>5</sup> Archetti C., Bianchessi N., Speranza M. G. Branch-and-cut algorithms for the split delivery vehicle routing problem //European Journal of Operational Research. 2014. V.238. N.3. P.685-698

<sup>6</sup> Осипов Г.С. Целенаправленное поведение коалиции когнитивных агентов // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: сб. матер. IV Всерос. конф., Калининград, 2018. С. 81–85.

формирования коалиций интеллектуальных агентов, интегрируя Алгоритмы 4 и 5 с учетом применения оценок успешности. Оценки изменяются в результате многократного решения целевой задачи.

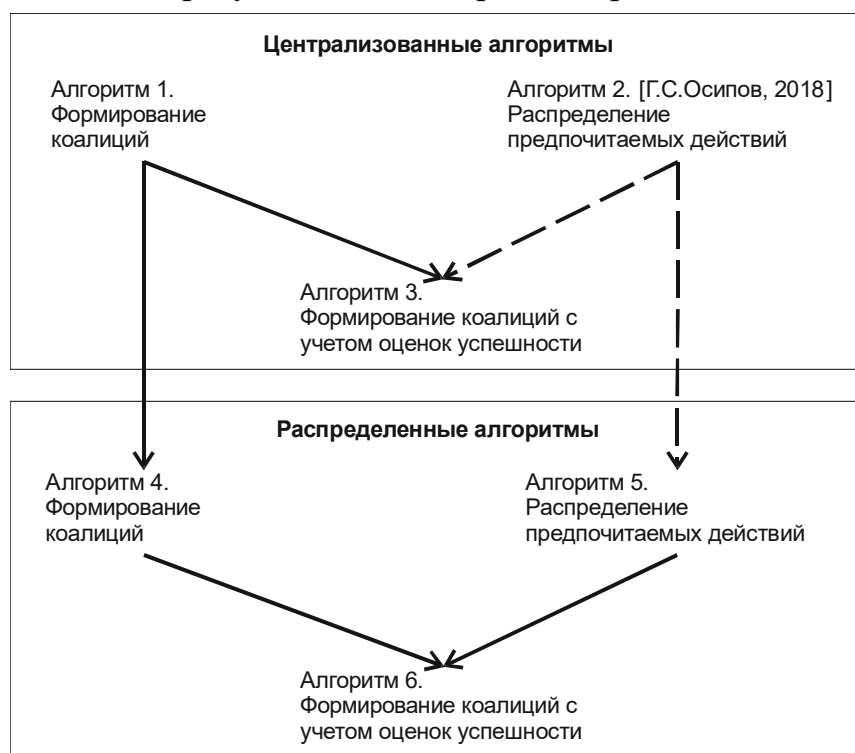


Рис.1. Алгоритмы, предложенные в диссертационной работе

Алгоритмы, решая задачу маршрутизации, наследуют ее терминологию, а именно: оперируют понятиями «Пункт назначения» (Factory), «Источник» (Truck), «продукция», «стоимость перевозки». Кроме того, в Алгоритмах 2 и 5 используются понятия «Действие» (Action) и «Полезность» (ActionValue). Из-за ограниченности объема автореферата в его тексте приведена только существенная часть Алгоритма 4.

### **Алгоритм 1. Формирование коалиций агентов**

Исходные данные:

Пункты назначения  $B_j$  из  $N^*$  с требуемым весом продукции; Источники  $A_i$  из  $M^*$  с перевозимым весом продукции; Матрица стоимости  $c_{ij} > 0$  перевозки из пункта  $i$  в пункт  $j$ .

Получаемый результат: для каждого объекта типа Пункт назначения формируется коалиция объектов типа Источник или сообщение о невозможности создания коалиции.

Сложность Алгоритма 1:  $O(n \cdot (2m + m \log m))$ .

### **Алгоритм 2. Распределение предпочитаемых действий агентов**

Пусть в дополнение к описанной выше задаче маршрутизации у каждого источника из  $M^*$  известны:

- значение «полезности»  $r_i$ , которое задает оценку успешности источника  $i$  при выполнении назначенных ему заданий. Оно может увеличиваться после участия в успешно сформированной коалиции.
- вектор пар  $\langle t:p \rangle_i$  вида  $\langle \text{название задания} \rangle : \langle \text{способность к выполнению этого задания} \rangle$ , задающий, какие задания может выполнять источник  $i$  и с какой вероятностью успеха. Значение «способности» может увеличиваться в результате успешного выполнения задания.

Исходные данные: Требуемое действие (Action); Минимально необходимое значение «полезности» (ActionValue);

Источники из  $M^*$  с данными:

- значение «полезности» источника при формировании коалиций (вещественное  $r_i > 0$ )
- вектор пар (ActionList)  $\langle \text{название задания} \rangle : \langle \text{способность к выполнению этого задания} \rangle$ , где «название» – строчная переменная, а «способность к выполнению» – вещественное  $\text{ActionVal} > 0$ .

Получаемый результат: коалиция объектов типа Источник или сообщение о невозможности создания коалиции.

Сложность Алгоритма 2:  $O(m \cdot (2 + \log m))$ .

### **Алгоритм 3. Формирование коалиций агентов с учетом оценок успешности**

Для моделирования улучшения способностей агентов в процессе деятельности, к агентам добавлена способность к изменению оценок успешности. В результате успешного выполнения действий значение этой оценки у агентов увеличивается.

Исходные данные: Коэффициент изменения оценки (вещественное  $\text{coeff} > 0$ ); Пункты назначения  $B_j$  из  $N^*$  с данными как в Алгоритме 1;

Источники  $A_i$  из  $M^*$  с данными:

- значение «полезности» источника при формировании коалиций (вещественное  $\text{Trust}_i > 0$ )
- перевозимый вес продукции  $a_i \geq 0$ .

Получаемый результат: для каждого объекта типа Пункт назначения формируется коалиция объектов типа Источник или сообщение о

невозможности создания коалиции. Источники, участвующие в коалиции, умножают значение «полезности» на величину  $\text{coeff}$ .

Сложность Алгоритма 3:  $O(n \cdot (3m + m \log m))$ .

### **Распределенные Алгоритмы 4-6**

Предложенные Алгоритмы 1-3 были распараллелены: каждый объект типа Источник или Пункт назначения представляется одним интеллектуальным агентом, действующим самостоятельно и обменивающимся с другими агентами информационными сообщениями. Распределение позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма для каждого агента, но приводит к увеличению числа агентов и необходимости обмена сообщениями между ними. Полученные таким образом Алгоритмы 4-6, названные в работе распределенными, позволяют изменять число агентов и/или их свойства во время работы.

#### **Алгоритм 4. Формирование коалиций агентов**

В результате обмена информацией определяется «ведущий» агент, который формирует коалицию из множества оставшихся агентов. «Ведущий» отправляет другим агентам приглашение на вхождение в коалицию. Агент, получивший приглашение, может согласиться на вхождение в коалицию или отказаться. В случае отказа «ведущий» отправляет приглашение другому агенту. Если получены подтверждения от всех агентов, приглашенных в коалицию, то «ведущий» агент сообщает о том, что коалиция сформирована.

Исходные данные: Агенты типа Пункт назначения (F) с данными как в Алгоритме 1; Агенты типа Источник (My, Leader, Sender), имеющие уникальные идентификаторы ID и данные о весе перевозимой продукции ( $a_i \geq 0$ ); Матрица стоимости  $c_{ij} > 0$  перевозки из пункта  $i$  в пункт  $j$ ; Сообщение Message, содержащее управляющую команду.

Получаемый результат: коалиция или сообщение о невозможности ее создания.

В этом алгоритме используются вспомогательные функции:

**1. Function *MakeCoalition1* (C, CW, CC, T, MaxWeight):**

**Input:** C – список включенных в коалицию агентов; CW – вес коалиции; CC – количество агентов в коалиции; T – указатель на текущий агент типа Источник; MaxWeight – минимально необходимый вес для коалиции

**Output:** C – обновленный список включенных в коалицию агентов; CW – обновленный вес коалиции

## 2. Function *SendResponse (Agent)*:

**Input:** Agent – агент-получатель ответа

**Output:** отправляет получателю сообщение "AcceptToJoin" или "DeclineToJoin" – согласие или отказ от участия в коалиции.

Каждый агент типа Источник обрабатывает поступающие сообщения следующим образом:

**Case *Message.Text* of:**

"*Publish*":

DF.Add(*My.ID*, *C<sub>ij</sub>*, *My.Weight*) //публикуем расстояние и вес

"*SearchAll*":

*AllTrucks*=DF.GetAll() //получаем все опубликованные данные

"*FormGroup*":

*SortedDist*=Sort(*AllTrucks*, *DistFT*, *T<sub>a</sub>*) // упорядочение по росту расстояния и уменьшению веса продукции

*Leader*= *SortedDist*[0]

**if** *My<sub>ID</sub>*==*Leader<sub>ID</sub>* **then** //текущий агент – лидер

*Coalition*.Append(*Leader*)

*CoalitionWeight*=*Leader<sub>a</sub>*

*CoalitionCount*=1

MakeCoalition1(*Coalition*, *CoalitionWeight*, *CoalitionCount*,  
*Leader<sub>Next</sub>*, *F<sub>b</sub>*)

**if** ( *CoalitionWeight*≥*F<sub>b</sub>* ) **then**

**for all** *C* ∈ *Coalition*: sendMessage(*C<sub>ID</sub>*, "OfferToJoin")

**else print** "Коалиция не сформирована"

"*OfferToJoin*":

SendResponse(*Sender<sub>ID</sub>*)

"*AcceptToJoin*":

*CoalitionCount*=*CoalitionCount*-1

**if** *CoalitionCount*==0 **then** //все агенты подтвердили участие

**print** "Коалиция сформирована "+*Coalition*

"*DeclineToJoin*":

// отказавшийся агент исключается из коалиции

```

CoalitionWeight = CoalitionWeight - SenderWeight
CoalitionCount = CoalitionCount - 1
Next = SenderNext
// продолжается формирование коалиции
MakeCoalition1(Coalition, CoalitionWeight, CoalitionCount,
               Next, Fb)
if ( CoalitionWeight ≥ Fb ) then
    for all C ∈ Coalition: sendMessage(CID, "OfferToJoin")
    else print "Коалиция не сформирована"

```

Сложность Алгоритма 4 для каждого агента:  $O(n+m \cdot (2+\log m))$ .

Для распределенных алгоритмов важной характеристикой является оценка количества сообщений, передаваемых в процессе их работы. Количество передаваемых сообщений:  $O(n(m+1))$ .

#### **Алгоритм 5. Распределение предпочитаемых действий агентами**

Общая оценка количества продукции или успешности выполнения конкретным агентом выбранного действия вычисляется как произведение оценок:  $N_{ti} = r_i \cdot p_i$ .

Исходные данные: Требуемое действие (Action); Минимальная необходимая успешность (ActionValue);

Агенты типа Источник (Trucks) с данными:

- значение полезности этого источника при формировании коалиций (вещественное  $r_i > 0$ )
- вектор пар (ActionList) <название задания>: <способность к выполнению этого задания>, где «название» – некоторое значение, а «способность к выполнению» – вещественное  $ActionVal > 0$ .

Сообщение Message, содержащее управляющую команду.

Получаемый результат: для заданных значений Action и ActionValue формируется коалиция объектов типа Источник или выдается сообщение о невозможности создания коалиции.

Сложность Алгоритма 5 для каждого агента:  $O(n \cdot (m^2 + m \cdot (1+\log m)))$ .

Количество передаваемых сообщений:  $O(n \cdot (3+2m))$ .

#### **Алгоритм 6. Формирование коалиций с учетом оценок успешности**

Алгоритм 6 является Алгоритмом 4 с добавлением способности к изменению оценок успешности.



Отличия от Алгоритма 4 состоят в том, что:

- используется общий вес продукции у Источника, вычисляемый для источника  $i$  как произведение веса имеющейся продукции на значение полезности:  $N_i = r_i \cdot a_i$ .

- источники, участвовавшие в коалиции, увеличивают значение собственной полезности на некоторый множитель. Таким образом, если продукция у источника была израсходована не полностью, то при последующем его участии в коалиции общий вес будет вычислен как произведение веса неизрасходованной продукции на новое, увеличенное значение полезности.

Для применения Алгоритмов 4 и 6 к задаче II достаточно поменять местами Источники и Пункты назначения, изменения в самих алгоритмах не требуются.

**Третья глава** содержит описание структуры агентов, форматов и типов сообщений и программной реализации предложенных алгоритмов на языке программирования Python.

Структура агента и цикл изменения оценки успешности приведены на Рис.2. У каждого агента имеется значение «Успешности агента» – насколько «ответственно» агент выполняет назначенные ему задания. Кроме того, с каждым действием, которое может выполнять агент, связано значение «Успешности действия» – насколько хорошо этот агент может выполнять требуемое действие. Общая «Оценка успешности агента при выполнении действия» = «Успешность действия» \* «Успешность агента». «Успешность действия» – число  $(0,1]$ , «Успешность агента» – положительное число. Также задаются коэффициенты изменения успешности действий и агентов  $C_R$ ,  $C_A$ . После успешного выполнения действия агент умножает свои значения «Успешности агента» и «Успешности действия» на соответствующие коэффициенты. В случае отказа агента от назначенного действия, «Успешность агента» делится на  $C_R$ , «Успешность действия» не изменяется.

Предложенная модель позволяет гибко менять параметры взаимодействия агентов в процессе моделирования на основе учета их текущих характеристик, что положительно влияет на качество решений задач маршрутизации.

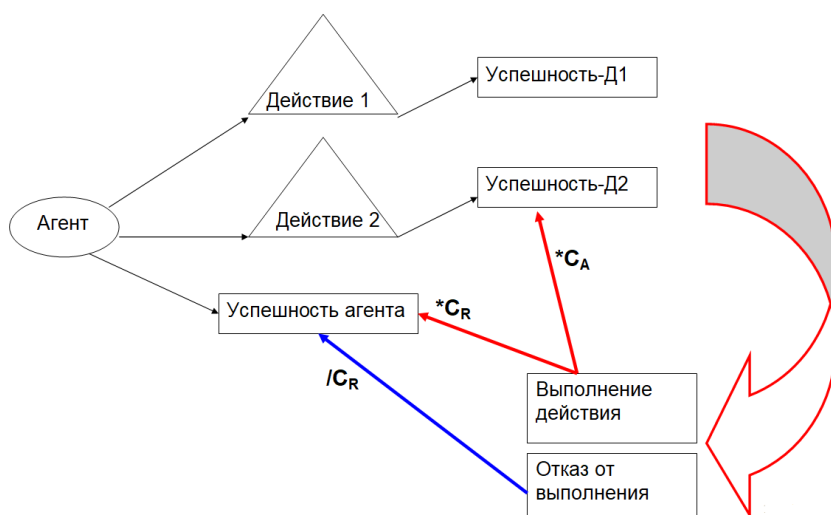


Рис. 2. Предложенная структура агента и цикл изменения оценки успешности

Алгоритмы 4 и 6 реализованы с использованием мультиагентной системы SPADE. При реализации каждый объект (Источники и Пункты назначения) представляется одним агентом. Агенты получают информацию друг от друга и от среды путем передачи и получения сообщений. В состав программной реализации входят агенты-источники, агенты-пункты назначения и управляющий агент.

Приведены типы и форматы сообщений, которыми агенты обмениваются. Каждое сообщение имеет следующий формат: <идентификатор отправителя>; <идентификатор получателя>; <управляющая команда>; <дополнительная информация> (детализация дается в тексте диссертационной работы).

**Четвертая глава** содержит описание и результаты экспериментальной проверки качества работы Алгоритмов 4 и 6, а также примеры использования созданного программного комплекса для решения различных практических задач.

#### *Результаты тестирования Алгоритма 4 для задачи I*

*Эксперимент 1. Зависимость количества сообщений и времени формирования коалиций от количества агентов*

Данные о зависимости количества переданных сообщений и времени, затраченного на формирование всех коалиций, от количества агентов-источников и агентов-пунктов назначения приведены в Таблице 1.

Позиции и потребность в продукции агентов-пунктов назначения и координаты и вес имеющейся продукции у агентов-источников были сгенерированы случайным образом. Результаты эксперимента показывают, что время, затраченное на формирование всех коалиций при фиксированном количестве агентов-пунктов назначения и изменении количества агентов-источников, изменяется линейно, что согласуется с ранее полученными теоретическими оценками сложности алгоритмов.

### *Эксперимент 2. Сравнение с оптимальным алгоритмом*

Для сравнения результатов работы предложенного Алгоритма 4 с результатами оптимального алгоритма решения транспортной задачи (случай I), был выбран сбалансированный вариант задачи; устранены возмущающие факторы для применимости оптимального алгоритма.

В качестве начальных данных были использованы значения, полученные случайным образом. Для каждого набора начальных данных вычисляются: значение суммарной стоимости перевозки, полученное оптимальным алгоритмом, принимаемое за 100%, и превышение значения суммарной стоимости, полученное предложенным алгоритмом. Полученные значения приведены в Таблице 1. Превышение затрат – усредненные значения, полученные в результате пяти независимых испытаний.

Таблица 1. Зависимость количества сообщений и времени от количества агентов и отклонение значений суммарной стоимости перевозки, полученных предложенным и оптимальным алгоритмами

Количество пунктов назначения	Количество источников	Количество сообщений	Время, сек	Отклонение, %
5	20	25	0.2	18
	50	84	4.6	5,9
	100	117	105	4,2
10	20	40	1.5	29
	50	144	40	17
	100	237	230	27
20	20	42	5	19
	50	61	86	31
	100	378	307	9

Превышение суммарной стоимости перевозки, полученное предложенным алгоритмом по сравнению с суммарной стоимостью оптимального алгоритма, составляет не более 31%. Это значение согласуется с данными в научных публикациях – отклонение от оптимального алгоритма составляет 12-70%. Преимуществом предложенного в настоящей работе алгоритма является возможность его работы в условиях, когда оптимальный алгоритм неприменим – если состав элементов и/или их свойства могут изменяться в процессе решения.

### *Результаты тестирования Алгоритма 6 для задачи I*

Для изучения влияния способности к изменению оценок успешности на решение транспортной задачи были проведены следующие эксперименты.

#### *Эксперимент 3. Увеличение оценок успешности при удовлетворении потребности одного и того же Пункта назначения*

В этом эксперименте рассматривались один пункт назначения и несколько источников. В результате успешного участия источников в коалициях у них увеличивалась оценка полезности и, следовательно, общая оценка имеющейся у них продукции, а состав и начальные положения источников не изменялись. После нескольких последовательных запусков характеристики источников улучшались. Была изучена зависимость скорости увеличения оценок полезности от значения множителя увеличения оценки полезности. Результаты пяти независимых испытаний были усреднены.

Таблица 2. Влияние значения оценки полезности на количество итераций

Множитель для увеличения оценки полезности	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
Количество итераций	17	8	5	5	4

При росте множителя увеличения оценки полезности, то есть при большей способности к обучению, количество требуемых повторов, то есть время, нужное для обучения, снижается. Приведенная зависимость позволяет оценить целесообразность дальнейшего улучшения характеристик агентов-источников для минимизации затрат на запуск пункта назначения.

*Эксперимент 4. Влияние увеличения оценки полезности на суммарную стоимость перевозки при удовлетворении потребности набора пунктов назначения*

В Таблице 1 показано, что для частного случая сбалансированной транспортной задачи отклонение результатов, полученных предложенным Алгоритмом 4, от оптимального составляет от 4 до 31%. Для того, чтобы результаты работы алгоритма стали ближе к оптимальным, к распределенному Алгоритму 4 была добавлена способность к изменению оценки успешности. В результате своей деятельности агент выполняет последующие задания более эффективно.

В этом эксперименте рассматривались несколько пунктов назначения и источников. Источники, успешно создавшие коалицию, перемещались в координаты расположения пункта назначения, количество имеющейся у них продукции уменьшалось на значение, которое было потрачено для запуска этого пункта. Для источников из коалиции их оценка полезности увеличивалась на некоторый множитель. В процессе работы вычислялась суммарная стоимость перевозки. Было показано уменьшение суммарной стоимости перевозки после запуска фиксированного набора пунктов потребления при увеличении множителя оценки полезности за успешно созданную коалицию. Результаты пяти независимых испытаний были усреднены.

Таблица 3. Влияние изменения оценки полезности на суммарную стоимость перевозки

Множитель оценки полезности	1,00	1,10	1,15	1,20	1,25
Суммарная стоимость перевозки	495	440	434	430	421

Таким образом, при росте множителя оценки полезности с 1,05 до 1,25 суммарная стоимость перевозки сокращается на 15%. Это означает, что использование механизма оценок успешности для агентов позволяет без изменения схемы алгоритма получать результаты, более близкие к результатам оптимального алгоритма.

*Результаты тестирования Алгоритма 4 для задачи II*

Сравнение результатов применения Алгоритма 4 для решения мультитранспортного варианта задачи маршрутизации (случай II) с точно

установленными в научных публикациях оптимальными результатами для этих же наборов входных данных приведено в Таблице 4.

Таблица 4. Сравнение значений суммарной стоимости перевозки, полученных предложенным и оптимальным алгоритмами

Название набора	Оптимальный результат	Результат Алгоритма 4	Отклонение, %
eil30	510	588	16
eil33	835	961	15
p01_7090	2109	2451	16
SD1	228	257	13
SD2	708	873	23
SD3	432	492	14
SD4	630	693	10
SD5	1392	1593	14

Превышение суммарной стоимости перевозки, полученной предложенным Алгоритмом 4 по сравнению со стоимостью перевозки оптимального алгоритма, составляет не более 23%. Это значение согласуется с данными, приведенными в научных публикациях, в которых отклонение от оптимального алгоритма составило 15-45%. Существенным преимуществом предложенного в настоящей работе алгоритма является возможность его работы в условиях, когда оптимальный алгоритм неприменим – если состав элементов и/или их свойства могут изменяться в процессе решения.

#### *Решаемые модельные задачи*

**Задача 1 - тушение лесных пожаров** группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Каждый БПЛА имеет некоторый запас воды. Каждый пожар имеет порог объема воды, при превышении которого он будет потушен. Порог объема воды для тушения каждого пожара существенно превосходит запасы воды у каждого БПЛА. Группе БПЛА требуется потушить все пожары, при этом минимизируя собственные перемещения.

При решении задачи с помощью предложенных в настоящей работе алгоритмов используются обозначения: БПЛА являются Источниками, пожары – Пунктами назначения, продукция – объем имеющейся воды,

элементы матрицы стоимости – евклидовы расстояния между соответствующими БПЛА и пожарами.

Таблица 5. Полученное решение

Пожар	Объем воды	Номера и <b>объем воды</b> у БПЛА
1	60	16:7, 19:17, 6:36
2	90	10:8, 16:25, 17:12, 5:4, 7:7, 9:34
3	75	1:2, 11:10, 12:4, 14:18, 16:2, 2:15, 20:24
4	50	1:7, 15:13, 4:30
5	70	13:20, 15:22, 18:6, 8:22

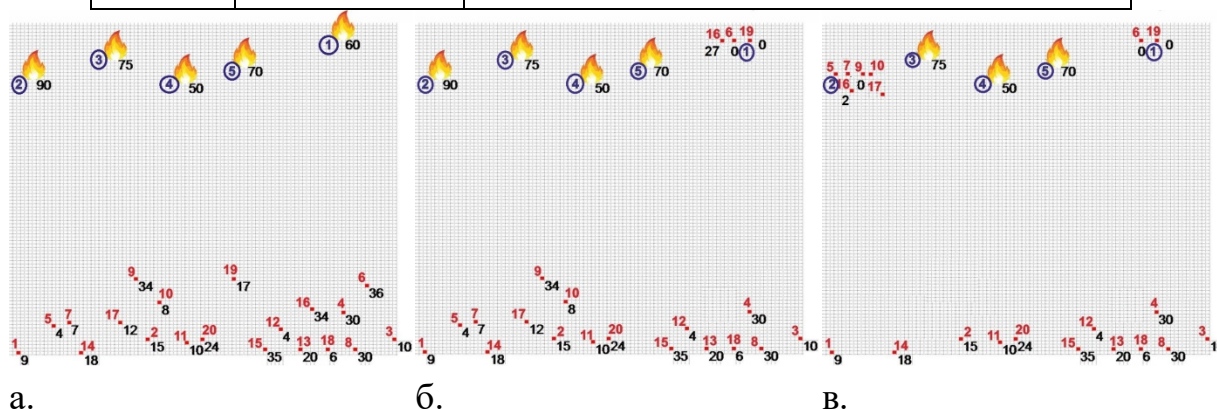


Рис. 5. Положение БПЛА и пожаров: а – начальное, б – после тушения пожара 1, в – после тушения пожара 2

**Задача 2 – доставка однородного сырья** грузовиками на фабрики. Каждый грузовик перевозит некоторое количество сырья. Для запуска производства фабрике требуется получить сырье, при этом потребность каждой фабрики превосходит грузоподъемность каждого грузовика. Грузовикам требуется запустить все фабрики, доставив на них сырье, и минимизируя суммарный пробег. При этом на пути грузовиков к фабрикам имеются препятствия.

При решении задачи с помощью предложенных в настоящей работе алгоритмов используются обозначения: грузовики являются Источниками, фабрики – Пунктами назначения, продукция – вес перевозимого сырья, элементы матрицы стоимости – длины кратчайших путей между соответствующими грузовиками и фабриками, найденные при помощи алгоритма А\*. На Рис.6 серым цветом обозначены препятствия, зеленым – построенные кратчайшие пути для одного из грузовиков.

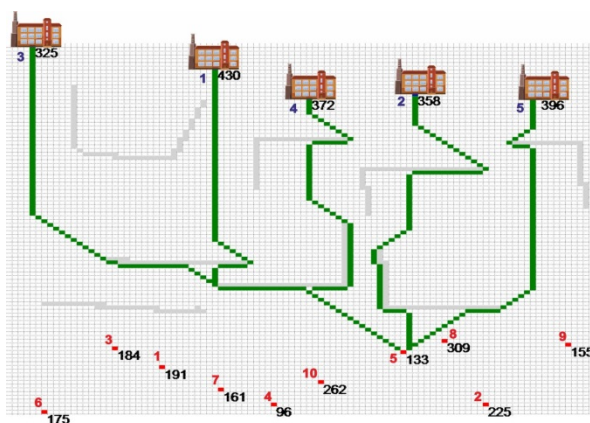


Таблица 6. Полученное решение

Фаб-рика	Вес	Номера и вес сырья у грузовиков
1	430	1:191, 10:55, 3:184
2	358	10:207, 8:151
3	325	6:167, 8:158
4	372	4:96, 5:133, 6:8, 7:135
5	396	2:215, 7:26, 9:155

Рис. 6. Положение грузовиков и фабрик

В результате выполнения работы показано, что применение у интеллектуальных агентов способности к изменению оценок успешности позволяет улучшить результаты работы жадного алгоритма формирования групп агентов. Предложенный подход применен к решению транспортной задачи, при условии когда каждый агент не обладает ресурсами для самостоятельного выполнения задания, и к решению мультитранспортного варианта задачи маршрутизации. Показано, что при увеличении скорости изменения оценок успешности с 1,05 до 1,25, суммарная стоимость перевозки сокращается на 15% - это позволяет получать результаты, более близкие к результатам оптимального алгоритма, без изменения схемы предложенного алгоритма. Важное свойство реализаций предложенных распределенных Алгоритмов 4-6 – возможность изменения количества и характеристик агентов в процессе моделирования, что позволяет применять предложенные алгоритмы для моделирования задач, приближенных к реальным. Вычислительная сложность алгоритмов для каждого агента ниже, чем в централизованном варианте алгоритма, что позволяет в полной мере использовать преимущества мультиагентных систем и современных коммуникационных сетей. Установлено, что время, затраченное на формирование всех коалиций при фиксированном количестве агентов-пунктов назначения и изменении количества агентов-источников, изменяется линейно, что экспериментально подтверждает ранее приведенные теоретические оценки сложности алгоритмов. Показано, что полученная предложенным алгоритмом суммарная стоимость перевозки превышает не более, чем на 31% стоимость



перевозки у оптимального алгоритма на входных данных, для которых применим оптимальный алгоритм в случае классической транспортной задачи, и не более, чем на 23% в случае мультитранспортного варианта классической задачи маршрутизации. Результаты работы в виде алгоритмов и программ внедрены в учебный процесс кафедры информационных технологий факультета ФМиЕН РУДН и используются в деятельности ООО «РИТЕХ».

### **Основные результаты**

1. Разработан и исследован коалиционный метод решения задач маршрутизации (классической транспортной задачи и мультитранспортного варианта классической задачи маршрутизации) в рамках агентного подхода в условиях случайного изменения параметров и состава агентов.

2. Разработаны алгоритмы формирования коалиций и решения задач маршрутизации в рамках мультиагентных систем, в которых агенты используют способности к изменению оценок успешности для улучшения своих характеристик в результате деятельности.

3. На основе анализа алгоритмов и вычислительных экспериментов получены их сравнительные характеристики качества. Вычислительные эксперименты демонстрируют, что коалиционный метод позволяет получать практически значимые результаты для задач большой размерности и в условиях случайного изменения характеристик решаемой задачи.

4. Создан программный комплекс (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ N 2021617131 от 11.05.2021) для решения задач маршрутизации, обладающий возможностью изменения числа и свойств участвующих в моделировании агентов, на основе мультиагентной платформы SPADE и языка программирования Python.

5. Показана возможность использования программного комплекса для решения модельных задач маршрутизации в условиях изменения характеристик и состава агентов.

### **Публикации по теме диссертации**

#### **В изданиях из списка ВАК РФ**

1. Горященко А.С. Применение мультиагентной системы для решения задачи формирования групп агентов //Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 4. С. 70-77. (DOI: 10.14357/20718594190408)

2. Goryashchenko A. Algorithm and Application Development for the Agents Group Formation in a Multi-agent System Using SPADE System. In: Arai K., Bhatia R. (eds) Advances in Information and Communication. FICC 2019. Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. V. 70. P.1136-1143. (DOI: 10.1007/978-3-030-12385-7\_77) (**Scopus**)

3. Горященко А.С. Решение динамической распределительной задачи на основе коалиций агентов //Современные наукоемкие технологии. 2021. № 5. С. 39-44. (DOI: 10.17513/snt.38655)

4. Goryashchenko A. A multi-agent system with smart agents for resource allocation problem solving. In: Arai K. (eds) Intelligent Systems and Applications. IntelliSys 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. V.296. P.794-801. (DOI: 10.1007/978-3-030-82199-9\_53) (**Scopus**)

### **В сборниках трудов конференций**

5. Горященко А.С. Разработка модуля задания правил продукционной системы // в сб. трудов IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием ИУСА-2016, Т.1, С. 105-109

6. Горященко А.С. Продукционная система для планирования совместных действий коалиции интеллектуальных агентов. // в сб. аннотаций VII Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2017, С. 25

7. Горященко А.С. Изучение свойств и разработка механизма формирования групп агентов на примере мультиагентной системы SPADE // Всероссийская научная конференция молодых ученых с международным участием «Информатика, управление и системный анализ» (Ростов-на-Дону, 6-8 июня 2018 г.). Ростов-на-Дону: Мини-тайп, 2018. С. 147–152

### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

8. «Программный комплекс для решения распределительных задач с использованием коалиций интеллектуальных агентов»: свидетельство о регистрации программы, реестр программ для ЭВМ, № 2021617131 / Горященко А.С., 11.05.2021.

*Автор выражает искреннюю благодарность и признательность д.ф.-м.н., проф. Г.С. Осипову.*