

На правах рукописи

Лада Александр Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
СОЗДАНИЯ ГИБРИДНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электронные системы и информационная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук».

Научный руководитель:	Скобелев Петр Олегович , доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара
Официальные оппоненты:	Городецкий Владимир Иванович , доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией интеллектуальных систем ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург Швецов Анатолий Николаевич , доктор технических наук, профессор кафедры «Информационных систем и технологий» ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, (ИПУ РАН), г. Москва

Защита состоится «26» декабря 2018 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.03 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корпус № 6, ауд. 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: ул. Первомайская, 18.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.217.03 по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Главный корпус. Факс (846) 278-44-00.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.217.03



Зотеев В.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Управление мобильными ресурсами предприятий в реальном времени – актуальная и значимая задача, решение которой необходимо для широкого круга применений: от управления грузовыми перевозками и сервисными бригадами газовиков, водоканала и энергетиков – до позаказного управления кораблями и самолетами, беспилотными аппаратами, курьерами, мерчендайзерами, медицинскими и социальными работниками и др.

Исследования и разработки методов решения такого рода задач начались со ставшей уже классической задачи коммивояжера, одно из первых решений которой для грузовых перевозок было предложено в работе Dantzig G.B., Ramser J.H. «The Truck Dispatching Problem» (1959). Эта работа положила начало созданию новой дисциплины в исследовании операций, посвященной решению задач построения оптимальных маршрутов и оптимизации транспортных ресурсов Vehicle Routing Problem (VRP) – можно найти десятки методов и программных решений, которые решают данную задачу в различных вариантах задания временных окон и при ряде упрощающих допущений.

Однако на текущий момент имеется множество практических постановок таких задач, не имеющих точных методов решения, т.к. на практике всегда возникает ряд предметных особенностей, которые не ясно как учитывать, часто используются совсем различные критерии выбора оптимальных решений, ограничения и предпочтения, требуется индивидуальный подход к каждому заказу и ресурсу т.д. Дополнительно существенно усложняет и расширяет постановку задачи необходимость решать ее в реальном времени, когда поток событий постоянно изменяет саму постановку задачи (приходят новые заказы, случаются поломки или задержки и т.д.), что требует перестроить решение за приемлемое время. Эти факторы требуют разработки новых моделей, методов и алгоритмов решения в каждом конкретном случае.

В начале 2000-х годов М. Вулдридж (M. Wooldridge), Н. Дженнингс (N. Jannings) и В. Городецкий показали возможность применения мультиагентных технологий для решения такого рода задач. В работах Г. Ржевского (G. Rzevski), В. Виттиха и П. Скобелева были предложены модель ПВ-сети и виртуального рынка транспортного предприятия и метод адаптивного построения расписаний, а также созданы первые прототипы и промышленные системы управления грузовыми перевозками. В 2004-2008 гг. близкие работы по управлению грузовыми перевозками были выполнены В. Марком (V. Marik) и П. Вербой (P. Verba) и рядом других исследователей, что экспериментально показало возможность получения качественных расписаний, сопоставимых с работой опытного диспетчера, при решении отдельных задач. В развитие метода А. Сандхольма (A. Sandholm) в 2010 году Д. Эшли (D. Easley) и Д. Клейнбергом (J. Kleinberg) была доказана теорема, устанавливающая эквивалентность задачи о назначениях и итерационных аукционов на виртуальном рынке и подтверждены важные преимущества этого подхода, включая интуитивную понятность для пользователей, устойчивость к вводу новых бизнес-требований, возможность параллельной

обработки информации и т.д. В 2014 году О.Граничиным для задачи вычислений на grid-сетях была доказана возможность подобного решения NP-hard проблем планирования квази-оптимально и за полиномиальное время. В 2010-2017 гг. П.Скобелевым и И.Майоровым был предложен ситуационный подход к управлению ресурсами и разработана мультиагентная платформа для создания интеллектуальных систем, сохраняющая в сценах контекст ситуации для повышения качества и эффективности планирования в ходе изменения ситуации по событиям.

Вместе с тем в указанных работах не рассматривается возможность применения гибридных методов решения задачи, использующих одновременно преимущества классической оптимизации и динамического перепланирования по событиям реального времени. С развитием современных технологий большое значение получает возможность прямого информационно-коммуникационного взаимодействия с пользователями через мобильные ПК и требуются методы обработки этой информации. Очевидно, что возможность адаптации расписаний по событиям «здесь и сейчас» в ходе коммуникации с участниками процесса планирования в темпе поступления событий и с учетом контекста ситуации, которая складывается в реализации имеющихся заказов имеющимися ресурсами, могла бы существенно усилить оперативность и гибкость в принятии решений и повысить эффективность ресурсов.

В этой связи становится актуальной и значимой задача разработки моделей, методов и средств для создания гибридных мультиагентных систем управления мобильными ресурсами нового класса, которые бы позволяли строить начальные планы с использованием классических подходов, и далее применять методы адаптивного планирования по событиям в сочетании со средствами коммуникации с пользователями на базе мобильных ПК.

Целью диссертационного исследования является разработка методов и средств создания гибридных мультиагентных систем управления мобильными ресурсами, сочетающих преимущества классического и мультиагентного подходов для планирования ресурсов, и развития информационно-коммуникационного взаимодействия с пользователями, формирующими и исполняющими планы в реальном времени.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- провести системный анализ и выявить требования к решению современных задач управления мобильными ресурсами на предприятиях грузовых FTL и LTL перевозок, сервисных бригад газовиков и водоканала и доставок товаров из интернет-магазинов;
- формализовать постановку задачи управления мобильными ресурсами как для формирования начального плана, так и для дальнейшего адаптивного перестроения плана по внешним событиям;
- исследовать применимость существующих классических методов оптимизации и выбрать наиболее подходящие для построения начального плана в рассматриваемых задачах;

- разработать методы и средства управления мобильными ресурсами с использованием информационно-коммуникационных взаимодействий с лицами, формирующими и исполняющими план в реальном времени;
- разработать функции и архитектуру гибридной мультиагентной системы управления мобильными ресурсами;
- провести моделирование и экспериментальное исследование применимости разработанных методов и средств для повышения оперативности, гибкости и эффективности использования ресурсов в задачах управления мобильными ресурсами.

Методы исследования. В качестве методологической основы решения указанных задач в диссертационной работе использовалась теория расписаний, метод сопряженных взаимодействий в ПВ-сетях, методы системного анализа, методы исследования операций и дискретной оптимизации, методы виртуального рынка на основе мультиагентных технологий. Для подтверждения теоретических результатов применялись методы математического и имитационного моделирования, а также экспериментальных исследований.

Достоверность результатов обеспечивается применением методологии системного анализа и исследования операций, сравнением результатов исследования с результатами традиционных методов и средств, практическим применением разработанных промышленных систем в работе предприятий, управляющих грузоперевозками, сервисными бригадами и интернет-магазином в части сборки и доставки товаров.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы управления мобильными ресурсами для выбранных классов предприятий (грузовые перевозки, мобильные бригады и интернет-доставки). Предметом исследования являются модели, методы и средства управления мобильными ресурсами в реальном времени для повышения эффективности деятельности предприятий.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем.

1) проведен системный анализ и предложен подход к формализации задач управления мобильными ресурсами для трех промышленных применений: грузовые перевозки, сервисные бригады и интернет-доставки;

2) на основе венгерского алгоритма решения задачи о назначениях, модели ПВ-сети и метода сопряженных взаимодействий предложен гибридный метод построения начального плана и его дальнейшей адаптации по событиям в реальном времени, позволяющий вести расчет себестоимости полного цикла (кругорейса) для задачи грузоперевозок;

3) разработана архитектура гибридной мультиагентной системы управления мобильными ресурсами с информационно-коммуникационным взаимодействием с пользователями и принятием решений «здесь и сейчас» для минимизации времени реакции на фактические события.

4) Получены новые экспериментальные результаты, показывающие рост эффективности ресурсов при использовании гибридного метода за счет сочетания

классического подхода и адаптивного информационно коммуникационного взаимодействия с пользователями.

Практическая значимость:

1. Разработанные методы и средства позволяют решать широкий круг задач управления мобильными ресурсами в реальном времени.

2. На основе разработанных методов и алгоритмов созданы и внедрены в промышленности мультиагентные системы (МАС) для управления:

- МАС SmartTrucks – для управления грузовыми перевозками;
- МАС SmartServices– для управления сервисными бригадами;
- МАС SmartDelivery – для управления развозками товаров из интернет-магазинов.

3. Результаты исследований и внедрения показывают прирост эффективности использования мобильных ресурсов на 15-40%.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная формализованная постановка различных задач управления мобильными ресурсами на основе классического и мультиагентного подходов.

2. Гибридный метод, состоящий в построении начального плана венгерским алгоритмом, и мультиагентные алгоритмы для адаптивной перестройки плана по мере прихода событий для задач управления мобильными ресурсами на основе классического и мультиагентного подходов.

3. Средства информационно - коммуникационного взаимодействия мультиагентной системы с операторами ресурсов на базе мобильных ПК для повышения адаптивности управления мобильными ресурсами.

4. Новые теоретические и экспериментальные результаты исследований на основе разработанных методов и средств, позволяющих повысить среднее число заказов, выполненных мобильными ресурсами на 15-40% за счет оптимизации начального плана и адаптации его по событиям в реальном времени.

Реализация результатов работы. Результаты исследования использованы при создании систем управления грузоперевозками, сервисными бригадами и доставкой товаров интернет-магазинов. Имеется акт внедрения научных результатов в ООО «НПК «Разумные решения» при выполнении контрактов с компаниями «Пролоджикс», «Лорри», «Монополия», «СВГК», «Ресурс-Транс», «Инстамарт», «Траско» и рядом других. Результаты были использованы в НИР Минобрнауки РФ «Разработка прототипа SaaS версии интеллектуальной системы управления сборными грузовыми перевозками, интегрированной с интеллектуальным терминалом водителя и информационно-аналитической подсистемой расчета показателей эффективности грузоперевозок в реальном времени» по государственному контракту № 14.514.11.4080 в 2013 году, «Разработка сетцентрической модели взаимодействия адаптивных планировщиков ресурсов для поддержки согласованной работы федерации (группы) региональных транспортных компаний и повышения эффективности междугородних грузовых перевозок» по государственному контракту № 14.576.21.0014 в 2015 году, выполнявшихся в ООО "НПК "Разумные решения", а

также в проекте Минобрнауки РФ и СамГТУ по государственному контракту № 14.574.21.0183 в 2017 году по созданию цифровой платформы для управления бригадами механизаторов предприятия растениеводства. Получены свидетельства РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. № 2009616690 от 02.12.2009 «Мультиагентная система управления транспортными ресурсами».

2. № 2012611092 от 26.01.2012 «Мультиагентная система управления грузоперевозками в реальном времени SmartTruck».

3. № 2016611179 от 27.01.2016 «Мультиагентная система SmartLogistics для управления сборными грузоперевозками».

4. № 2016612708 от 09.03.2016 «Сетецентрическая платформа взаимодействия адаптивных планировщиков ресурсов для поддержки согласованной работы региональных транспортных компаний».

5. № 2017615072 от 03.05.2017 «Интеллектуальная система SmartTrucks для управления внутригородскими, междугородними и международными грузоперевозками»

6. № 2017615344 от 12.05.2017 «Интеллектуальная система SmartTeams для управления мобильными бригадами и специальной техникой».

Результаты разработок используются в проекте Программы Президиума РАН по теме «Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации», в учебном процессе ФГБОУ ВО ПГУТИ в лекционном курсе и лабораторном практикуме по дисциплине «Методология управления», в учебном процессе ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в лекционном курсе «Моделирование информационных систем», а также в программе научно-исследовательских семинаров по дисциплине «Информационно-аналитические решения в логистике» НИУ «Высшая школа экономики» г. Москва.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором на Международной конференции по агентам и искусственному интеллекту (5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain); Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (2014 г., Самара); Всероссийской конференции «Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по приоритетному направлению «Транспортные и космические системы» (2014 г., Москва), на 19-й Международной конференции по информационным системам, кибернетике и информатике (19th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2015), Orlando, Florida, USA, July 12-15, 2015); на Девятой международной конференции управление развитием крупномасштабных систем ((MLSD'2016), 2016 г., Москва); на 7-й международной конференции по сервисам в холонических и мультиагентных системах (7th Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing (SOHOMA 2017), Nantes, France, October 19-20, 2017).

Основные публикации. Результаты диссертации опубликованы в 17 работах, из них 3 публикации в журналах, рекомендованных ВАК, 7 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus, 6 работ в трудах международных и всероссийских конференций, 1 учебное пособие; имеется также 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад аспиранта. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: [1], [4] – проведение экспериментальных исследований; [2], [14] – формализация задачи, разработка механизма планирования и архитектуры интеллектуальной системы управления сборными грузовыми перевозками в реальном времени; [3] – модель предметной области и разработка метода без возвращения грузовика на базу; [5] – формализация задачи, разработка метода сборки и доставки по событиям реального времени; [6], [11] – формализация задачи, анализ различных видов и разработка метода расчета себестоимости кругорейсов; [7], [8] – формализация задачи, приведение к задаче о назначениях, разработка метода построения начального расписания на основе венгерского алгоритма; [9], [10] – модель предметной области проведения экспериментальных исследований; [12], [15], [16] – модель предметной области метод управления междугородними и внутригородскими перевозками в реальном времени на основе мультиагентных технологий (МАТ); [13] – анализ работы современных транспортных холдингов, разработка метода сетецентрического взаимодействия транспортных систем планирования; [17] – модель предметной области и метод управления мобильными ресурсами в режиме реального времени.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 85 источников. Текст занимает 155 страниц основной части, содержит 29 рисунков, 22 таблицы и 12 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность и значимость темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследований, охарактеризована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения по апробации и реализации работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены задачи управления мобильными ресурсами предприятий, включая крупные грузовые комплектные перевозки, грузовые сборные перевозки, сервисные бригады и развозки товаров из интернет-магазинов. Выделены особенности таких задач, характеризующиеся типом заказов и транспортных ресурсов, возможностями совместного использования одного ресурса для нескольких заказов, интенсивностью потока событий и т.д. Показаны трудности при практическом решении этих задач в реальном времени.

Определена первичная задача в управлении транспортом – задача его маршрутизации (VRP), выполнен обзор существующих постановок, а также классических и эвристических методов её решения. Показаны основные недостатки существующих методов применительно к задаче маршрутизации и планирования ресурсов в реальном времени. Дополнительно к задаче

маршрутизации рассматривается задача получения и обработки внешних событий и данных посредством мобильных беспроводных устройств (телефонов и планшетов), оказывающих непосредственное влияние на решение задачи управления в реальном времени.

Выполнен обзор существующих промышленных систем управления мобильными ресурсами, основанных на классических математических методах линейного программирования, а также современных эвристических и мультиагентных методах.

Во второй главе предложена формализованная постановка и решение рассмотренных в первой главе задач управления мобильными ресурсами.

В качестве общего подхода для формализации рассматриваемого класса задач предложено создание мультиагентных «моделей мира» предприятия, расширяющих состав ранее предложенных агентов ПВ-сети специфическими для каждой предметной области управления мобильными ресурсами агентами, например, агентами грузов, агентами шин, агентами заправок и ремонтов и т.д.

Сформулирована математическая постановка задачи построения начального плана комплектных грузоперевозок, где для заданных таблично заказов O_i и ресурсов R_j нужно найти такое назначение всех M ресурсов на N заказов, при котором суммарный порожний переезд будет минимальным ($\sum_{i,j=1}^{m,n} DR_{i,j} \rightarrow \min$), при максимальном числе назначенных заказов P и выполнении условий допустимости назначения:

$$\begin{cases} TRf_j + DR_{ij} < TO_{fi}; \\ DR_{ij} < b; \\ TO_{si} - TRf_j - DR_{ij} < c, \end{cases}$$

где TRf_j – время высвобождения с предыдущего заказа, DR_{ij} – время переезда между заказами, TO_{fi} – время конца окна погрузки заказа, TO_{si} – время начала окна погрузки заказа, b, c – параметры, задаются экспертами логистами (обычно $b=10$, $c=24$, параметры измеряются в часах).

Для задачи строится матрица A допустимых назначений заказов O_i на ресурсы R_j . В ячейку матрицы, соответствующую назначению $O_i R_j$, записывается длительность порожнего переезда DR_{ij} из пункта нахождения грузовика R_j и времени его высвобождения TRf_j к пункту погрузки заказа O_i при условии, что грузовик R_j подходит заказу O_i и выполняется система неравенств допустимости, в противном случае ячейка остается пустой. При этом полагается, что длительность выполнения любого заказа O_i заведомо превосходит время начала погрузки любого (даже самого позднего) заказа $O_j (i, j = \overline{1, N})$, т.е. рассматривается ациклический случай задачи при котором ни один из грузовиков не успеет выполнить более одного заказа. Получим матрицу назначений вида

$$A = \begin{bmatrix} DR_{1,1} & \dots & DR_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ DR_{n,1} & \dots & DR_{n,m} \end{bmatrix}.$$

Для общего (циклического) случая задачи, когда заказы известны на широкий горизонт в будущем, становится возможным выполнение более поздних по времени заказов после выполнения более ранних. При этом местоположение и

время высвобождения каждого грузовика будут меняться по ходу назначения первых заказов, т.е. уже в ходе самого решения задачи. Тем не менее, построить матрицу A для этой задачи также возможно, если пренебречь условием совместимости заказов и грузовиков. Тогда можно построить расширенную матрицу A_{ext} для циклической задачи вида:

$$A_{ext} = \begin{bmatrix} DR_{1,1} & \cdots & DR_{1,m} & DO_{1,m+1} & \cdots & DO_{1,m+n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DR_{n,1} & \cdots & DR_{n,m} & DO_{n,m+1} & \cdots & DO_{n,m+n} \end{bmatrix},$$

где в колонках расширенной матрицы указан порожний переезд от пункта выгрузки каждого заказа O_i , т.е. матрица расширяется за счет «виртуальных» ресурсов, освобождающихся после выполнения первоначальных заказов. Но поскольку мы не знаем, какой именно грузовик будет выбран на первоначальный заказ, то нельзя проверить совместимость грузовика с этим заказом и отбросить недопустимое назначение. Для задачи о назначениях есть точный метод решения – венгерский алгоритм. Известно, что задача полиномиально разрешима и имеет асимптотическую сложность $O(n^3)$, этого вполне достаточно для решения даже при большой размерности матрицы назначений в задачах транспортных компаний.

Сформулирована математическая постановка для задачи построения адаптивного плана комплектных грузоперевозок в реальном времени, в которой считается, что ее условия могут произвольно динамически меняться по ходу времени. Для решения предлагается расширить мультиагентный метод на основе ПВ-сетей специальными классами агентов грузовых перевозок, сервисных бригад или интернет-доставок.

При поступлении заказа его агент рассылает запрос на его размещение на агентах грузовиков, которые анализируют свое текущее состояние, наличие окон в будущем расписании, необходимость дополнительного переезда до пункта погрузки, оценивая свои затраты и отправляя свои предложения агенту заказа. Предварительно заказ получает агент грузовика, выполняющий его с наименьшими затратами: $Cost_i = d^i c^d + t^i c^t$, где d^i – длина маршрута включая переезд (в км), c^d – ставка переменных затрат (рублей за км), t^i – время простоя между заявками (в часах), c^t – ставка постоянных затрат (рублей за час). В случае улучшения глобальной целевой функции $\sum_{i=1}^m cost_i \rightarrow \min, P \rightarrow N$ (число распределенных заказов максимально-минимальных затратах на их выполнение) текущий вариант распределения заказов на ресурсы принимается как лучший для системы, и она переходит к новому циклу переговоров, пока все внешние события не будут обработаны (аналогично и для других агентов).

Если выбранный вариант отнимет ресурс у ранее назначенного заказа (возникает конфликт), то активность делегируется конфликтным заявкам, которые, в свою очередь, вновь пробуют отобрать для себя лучший ресурс. Если процесс переговоров не приводит к увеличению глобального KPI, то вычисления останавливаются на последнем принятом решении. Агенту заявки разрешается попробовать другой вариант – следующий по возрастанию затрат и т.д.

Далее формулируется и решается расширенная постановка задачи комплектных перевозок с учетом полного цикла (кругорейса), где требуется, во-первых, для каждого пункта доставки рассчитать вероятную прибыль (убыток) возврата обратно на базу на основе уже выполненных ранее заказов, а во-вторых, для каждого из M грузовиков выбрать подходящие ему M заказов (количество выбранных заказов равно количеству имеющихся грузовиков) таким образом, чтобы суммарная прибыль компании после возвращения всех грузовиков обратно на базу была максимальной. Выполнен анализ и приведены примеры секторов кругорейсов: «доходообразующий», «компенсационный», «локальный».

Полагается, что себестоимость любой перевозки можно представить как сумму постоянных и переменных затрат. Исходя из этого, для расчета возврата из каждого населенного пункта предложен следующий алгоритм:

1. Отбираются все города, по которым когда-либо были осуществлены перевозки, обозначим его как город H .

2. Отбираются все заказы, где город H является городом уезда (т.е. город, из которого мы начинаем порожний переезд, либо, как частный случай, начинаем из него погрузку заказа), далее все эти заказы сортируются по грузовикам.

3. Для каждого грузовика в данной выборке находятся следующие заказы в его исторической цепочке заказов. В качестве признака окончания цепочки (круга) берется факт захода грузовика в регион базирования компании.

4. Для каждой такой цепочки из полученной выборки получаются три усреднённых параметра для предполагаемого возврата из города H : складываются все суммы заказов цепочки, получается средняя выручка возврата, складываются все пробеги (порожний и полезный) по заказам цепочки и получается средний пробег возврата, считается общее время выполнения всех заказов цепочки и получается среднее время возврата. Получаем три средних оценочных параметра возврата из города H , которые записываются в его статистику. Средний пробег возврата и среднее время возврата на круге соотносятся с переменными и постоянными затратами. Если вычесть из выручки круга переменные и постоянные затраты, то получим прибыль (убыток) кругорейса.

Вторая часть задачи решается составлением матрицы допустимых назначений для ациклической задачи, описанной выше, только вместо длительности порожних переездов в ячейки матрицы будут записываться затраты на перевозку заявки грузовиком с учетом статистики возврата:

$$A = \begin{bmatrix} cr_{1,1} - co_1 - cw_1 & \cdots & cr_{1,m} - co_1 - cw_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ cr_{n,1} - co_n - cw_n & \cdots & cr_n - co_n - cw_n \end{bmatrix},$$

где $cr_{i,j}$ – затраты на перевозку i заказа j грузовиком, co_i – стоимость (выручка) i заказа, cw_i – результат возврата на круге из города разгрузки i заказа. Далее решается задача о назначениях венгерским алгоритмом. Алгоритм ищет минимальную сумму назначений и выберет из N заказов M заказов с минимальной общей суммой, а значит, и с максимальной общей прибылью для компании.

Далее формулируется постановка и предлагается метод решения задачи построения динамического плана работы сервисных бригад, где имеется M бригад

с определенным набором характеристик (квалификация сотрудников, наличие спец. оборудования и др.). Имеется N регламентных заявок с самым низким приоритетом выполнения и поток аварийных заявок, характеризующихся: срочностью выполнения (критическая, важная, средняя), необходимым набором требований, предъявляемым к бригаде, пунктом проведения и предварительной оценкой времени выполнения работ. Имеется поток внешних событий об отмене или изменении ранее поступивших заказов, и бригад, которые посредством мобильного терминала (смартфона или планшета) передают данные о фактическом времени выезда, начале и окончании работ по заявкам, а также координаты фактического местоположения каждой бригады. В каждый момент времени известны только те заказы, внешние события и данные, которые поступили до этого момента времени. Требуется построить начальный план выполнения регламентных заявок и адаптивно менять его с учетом событий и внешних данных реального времени.

Как и в задаче комплектных грузоперевозок решение ищется гибридным методом. Для начального плана строится расширенная матрица допустимых назначений. В колонках матрицы указан пробег бригады от пункта базирования до пункта выполнения работ каждого заказа, а в расширенной матрице указан пробег от пункта выполнения работ каждого заказа до другого заказа. Данная матрица формализует задачу о назначениях, которая решается венгерским алгоритмом, в результате получается начальный план, который далее модифицируется мультиагентным методом. Заказ получает агент бригады, выполняющий его с минимальным переездом. В случае улучшения глобальной целевой функции (KPI) новый вариант расписания принимается в качестве текущего. При этом стоит отметить, что KPI тем лучше, чем больше в нем запланированных заявок с более высоким приоритетом, т.е. KPI, где запланирована 1 критическая, 0 важных, 0 средних и 0 плановых заявок будет лучше, чем 0 критических, 10 важных, 10 средних и 10 плановых. При одинаковом количестве заявок одноименных приоритетов лучшим считается KPI с меньшим суммарным переездом.

Далее формулируется постановка и предлагается метод решения задачи построения начального плана сборных (LTL) грузоперевозок с временными окнами (VRPTW), где несколько заказов могут одновременно перевозиться одним грузовиком и требуется объединить и распределить N заказов по M грузовикам таким образом, чтобы число распределенных заказов было максимальным при минимальном числе грузовиков, при этом суммарное время выполнения всех заказов грузовиками и суммарный пробег также должны быть минимальными.

Для решения предлагается использовать «жадный» итерационный метод, где на каждом шаге из всех возможных допустимых вариантов выбирается вариант с наименьшим временем выполнения.

Все заказы сортируются по времени первого окна погрузки. Для удобства будем отсчитывать время от 0. В начальный момент времени T_0 произвольно выбирается первый из M грузовиков с прицепом заданной вместимости (TW), находящийся в базовой локации. При этом момент времени T_0 всегда меньше окна погрузки самого раннего заказа. Относительно этой начальной точки и

начального времени строится массив допустимых назначений для каждого заказа, в котором для грузовика рассчитывается время выполнения погрузки с учетом переезда к пункту погрузки рассматриваемого заказа (TLE_i) и время его полного выполнения (TUE_i), рассчитываемое по формулам:

$$TLE_i = (\text{если } TOL_i < LS_i, \text{ то } LS_i, \text{ иначе } TOL_i) + TL_i, TUE_i = TLE_i + TLU_i + TU_i,$$

где TOL_i – время переезда из начального пункта в пункт погрузки заказа, LS_i – время открытия окна погрузки, TL_i – время погрузочных работ, TLU_i – время переезда из пункта погрузки в пункт разгрузки, TU_i – время разгрузочных работ. Логическое выражение (если $TOL_i < LS_i$, то LS_i , иначе TOL_i) означает, что если время на переезд из начального пункта до пункта погрузки заказа меньше, чем время открытия окна погрузки, то берется время открытия окна, т.к. раньше этого времени грузовик загружать не начнут. Вариант, при котором $TOL_i > LF_i$, где LF_i – время закрытия окна погрузки, не рассматривается, т.к. в этом случае данный заказ априори не может быть запланирован.

Если $TLE_i < UF_i$, UF_i – время закрытия окна разгрузки и $W_i < TW$, где W_i – число груза в заказе, а TW – максимальная вместимость грузовика, то заказ считается возможным к выполнению. Из всех возможных к назначению заказов выбирается заказ с наименьшим временем переезда. Затем грузовик меняет местоположение, которое теперь соответствует месту погрузки выбранного заказа, а время его освобождения будет рассчитано по формуле:

$$T_i = (\text{если } TOL_i < LS_i, \text{ то } LS_i, \text{ иначе } TOL_i) + TL_i.$$

После первого назначения строится массив следующих допустимых назначений, из которого сразу исключаются заказы, которые:

- 1) с учетом уже набранного грузовиком на предыдущих шагах груза дают в сумме с этим заказом перегруз;
- 2) на их пункты погрузки грузовик уже не успеет, где $T_1 + TOL_i + TL_i > LF_i$;
- 3) с учетом возможной погрузки заявки грузовик не успеет выполнить разгрузки уже назначенных на него заказов.

Алгоритм повторяется до тех пор, пока не останется допустимых назначений заказов. Далее берется второй, третий и т.д. (произвольный) грузовик на базе с начальным временем T_0 и выполняется тот же алгоритм на заказах, оставшихся не распределенными после предыдущих грузовиков до тех пор, пока все N заказов не будут распределены, либо все M грузовиков не будут использованы.

Сформулирована постановка и метод решения задачи построения динамического плана сборных (LTL) грузоперевозок в реальном времени. Задача формулируется и решается аналогично динамической задаче комплектных перевозок, но при этом допускается возможность перевозки нескольких заказов в одном грузовике. При такой постановке требуется сократить число переговоров агентов, чтобы избежать комбинаторного взрыва при взаимодействии всех со всеми. Для этого применяются триангуляции Делоне, в результате для каждого агента сцены находятся его ближайшие соседи и каждый агент ведет переговоры только со своими соседями (рис. 1).

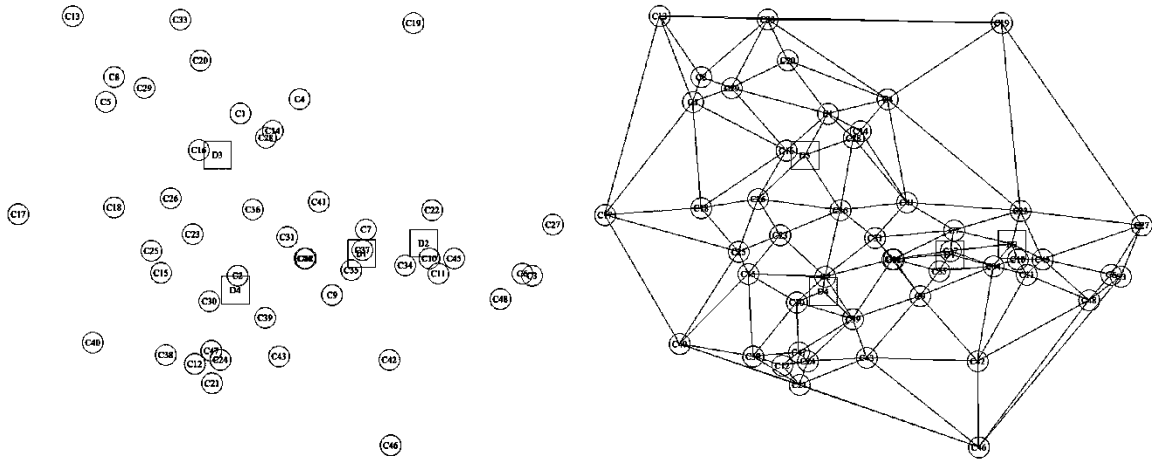


Рис.1. Исходные данные слева и построенная для них триангуляция Делоне справа.

Для построения триангуляции используется метод «разделяй и властвуй» со стратегией «строй и перестраивай», на что требуется затратить $\log N$ времени. Длиной маршрута $l(R)$ будем считать длину замкнутого пути, который проходит грузовик по маршруту. Обозначим за $w(C)$ массу (объем) потребления заказом C , $d(C)$ – время, затрачиваемое грузовиком на обслуживание (разгрузку) заказа C . Рассмотрим участок маршрута доставки $C_{i-1} \rightarrow C_i \rightarrow C_{i+1}$, ценой доставки P заказа C_i назовем $P(C_i) = |C_{i-1}C_i| + |C_iC_{i+1}| - |C_{i-1}C_{i+1}|$, где $i = 1, \dots, N$, N – количество пунктов обслуживания. Тогда тариф заказа C_i определим как $pr(C_i) = \frac{P(C_i)}{w(C_i)}$. Средним тарифом маршрута $R: C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow \dots \rightarrow C_n$ назовем $pr(R) = \frac{l(R)}{\sum_{i=1}^n C_i}$.

Агент грузовика стремится перевезти как можно больше заказов и уменьшить себестоимость маршрута, поэтому он старается привлекать заявки с низким персональным тарифом, в свою очередь, агент заявки стремится попасть к тому грузовику, который предложит ему минимальный тариф на перевозку. В результате взаимодействия агентов формируются цепочки доставки, в которых все заявки распределяются по грузовикам и для каждой определяется порядок, в котором грузовик их обслуживает.

Сформулирована постановка и метод решения задачи построения динамического плана сборки и доставки заказов покупателям интернет-магазинов. В задаче необходимо одновременно строить план сборки этих заказов сотрудниками магазинов. Требуется адаптивно перестраивать план развозки в случае отклонений от плана сборки, вызванных фактическими событиями и данными в реальном времени.

Решение начинается с выбора магазина для сборки заказа. В начале выбирается ближайший магазин к местонахождению клиента и рассчитывается время сборки заказа в этом магазине с учетом уже имеющихся заказов. Время сборки рассчитывается методом параллельных очередей, порядок в которых определяется согласно времени их поступления и корректируется по фактическим временам начала и окончания сборки каждого заказа. Эти фактические времена поступают напрямую от сборщика (через мобильный планшет сборщиков), когда он начинает или заканчивает сборку заказа. Количество этих очередей равно количеству сборщиков в магазине. Считается, что внутри каждой очереди все

заказы собираются последовательно. Каждый раз, при получении информации о новом факте сборки товара в магазине, пересчитывается текущая скорость сборки, с помощью которой пересчитываются плановые времена начала и окончания сборки по всем еще не собранным заказам.

После выбора магазина для сборки заказа происходит подбор курьера и консолидация заказа, в маршрут доставки путем использования гибридного метода для LTL развозок с модификациями:

- 1) возможность адаптивно менять магазин сборки заказа, если заказ не успели собрать до крайнего срока;
- 2) время маршрута считается с учетом прогноза «пробок» на дорогах;
- 3) в случае возникновения проблемы в процессе доставки заказа оценивается, повлияет ли задержка на время доставки;
- 4) в случае непредвиденного события (поломка, ДТП и прочее) на месте происшествия создается точка погрузки с заказами этого курьера и система перераспределяет эти заказы на другие маршруты других курьеров.

В третьей главе представлена архитектура и результаты экспериментальных исследований для построения системы управления мобильными ресурсами в реальном времени (рис. 2), включающая следующие элементы:

- 1) веб-портал – основной интерфейс пользователя;
- 2) мобильный интерфейс водителя – программно-аппаратное решение для инфокоммуникационного взаимодействия с водителями;
- 3) мобильное веб-приложение – программно-аппаратное решение для инфокоммуникационного взаимодействия с логистами и диспетчерами;
- 4) модуль поставщика географических данных – система построения маршрутов по дорогам;
- 5) модуль поставщика GPS/Глонасс – система сбора данных о фактическом местоположении;
- 6) модуль планирования – МАС для адаптивного построения расписания ресурсов на основе гибридных методов, алгоритмов и средств инфокоммуникационного взаимодействия.



Рис. 2. Архитектура системы управления мобильными ресурсами

С помощью различных моделей перевозок была исследована эффективность применения методов адаптивного планирования и информационно-коммуникационного взаимодействия для обработки событий реального времени

при планировании заказов на перевозку. Моделировалась задача планирования 100 заказов на 10 одинаковых грузовиках. Грузовики стартуют из одного города. Режимы насыщения отличаются для разных моделей. В результате наименьшая прибыль получена в модели 1 с возвращением на базу, поскольку планируется меньше заказов и при возвращении больше затраты. Модель 3 без возвращения и с планированием опоздавших заявок значительно превосходит модель 2 без возвращения на начальном участке, поскольку на одно и то же количество грузовиков планируется больше заказов (рис. 3, слева). В режиме насыщения она даёт небольшое преимущество по сравнению с моделью 2, потому что при большом количестве грузовиков мало заказов с опозданием, и модели 2 и 3 будут совпадать.

Наилучшей является модель планирования 4. Она даёт примерно на 20% большую прибыль, чем модели 2 и 3. При выполнении плана она позволяет обойтись меньшим количеством грузовиков (рис. 3, справа).

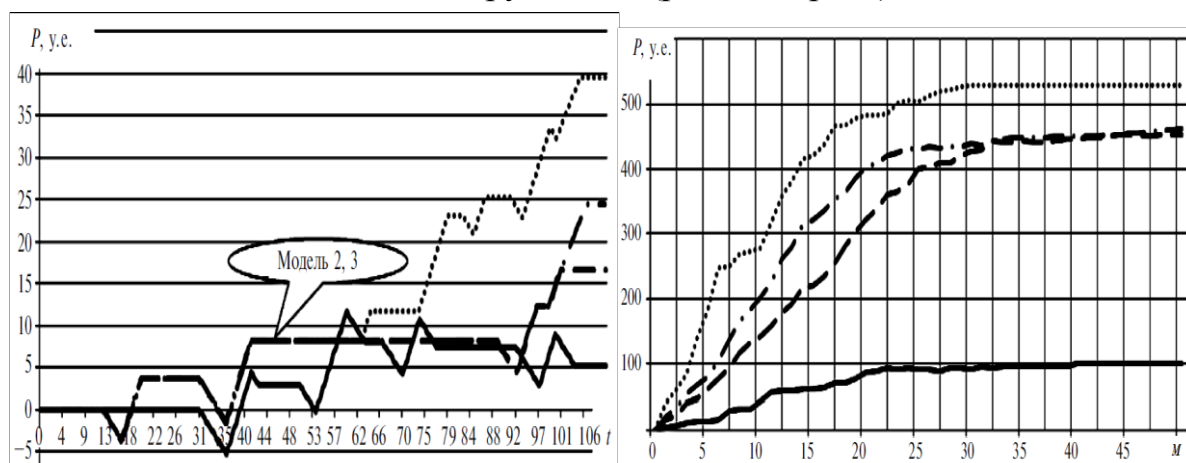


Рис. 3. Зависимость прибыли от времени (слева) и от числа грузовиков (справа) по моделям:
 — модель 1; - - - модель 2; -•- модель 3; ••••• модель 4

Далее исследованы предлагаемые в работе методы в сравнении с лучшими на текущий момент аналогами на известных модельных примерах. Для этого была выбрана наиболее сложная задача планирования сборных грузов, но ряд критериев, предпочтений и ограничений был исключен, чтобы сделать результаты сравнимыми с известными. В качестве исходных данных были выбраны модельные примеры задач с интернет-ресурса (<http://neo.lcc.uma.es/vrp/>), посвященного решению транспортной задачи в различных постановках и ограничениях, для которых известны лучшие алгоритмы и их значения решений для каждого модельного примера. Результаты представлены в таблице.

№	Пример	MAC, расстояние в у.е.	T счета, сек	Известное лучшее решение, расстояние в у.е.	T счета, сек	Различие MAC (%)
1	Pr01	1238,62	0.014	1083,98	64.91	14,26%
2	Pr02	2205,31	0.016	1763,07	69.99	25,08%
3	Pr03	3371,24	0.012	2408,42	59.91	39,97%
4	Pr04	3567,31	0.009	2958,23	51.8	20,58%
5	Pr07	1732,44	0.005	1423,35	53.29	21,71%
6	Pr08	2727,46	0.004	2150,22	50.27	26,84%

Полученный результат отличается от наилучшего, известного на данный момент, не более чем на 40%, в среднем – на 20–25% по набору тестовых примеров, при том, что время получения результата на порядок меньше, чем у известных лучших алгоритмов для модельных примеров (менее 1 сек против 1 минуты). При детальном анализе и сравнении решений обнаружено, что предлагаемый метод относительно правильно распределяет заявки погрузовикам (как в лучших решениях), но недостаточно оптимально осуществляет маршрутизацию грузовика, выстраивая порядок доставки, что может быть компенсировано введением агента маршрута.

В четвертой главе рассматриваются мультиагентные информационные системы управления ресурсами, разработанные при участии автора в 2009-2017 гг.

Система управления грузовыми FTL перевозками SmartTrucks реализует полный цикл управления ресурсами в реальном времени и предоставляет возможность автоматически контролировать бизнес-процесс получения заявки, загрузки и выгрузки груза. В результате внедрения системы на 5% возросло число выполненных заказов, увеличился коэффициент использования собственного флота, снизилось на 4% число опозданий к клиенту, уменьшилась трудоемкость расчетов и число ошибок, достигнуто уменьшение холостого пробега каждого грузовика на 3-5% и рост других важных показателей использования ресурсов.

Система управления мобильными бригадами SmartTeams была разработана в 2011 году по заказу «Средневожской газовой компании» (ООО «СВГК», г. Самара) на создание автоматизированной системы управления аварийной службой газа 04. Разработанная система позволяет эффективно распределять поступающие заявки между аварийными бригадами, контролировать процесс выполнения хода работ и адаптивно вносить изменения в случае появления непредвиденных событий. В результате использования данной системы компании «СВГК» удалось повысить эффективность использования транспортных ресурсов на 40%.

Система управления интернет-магазином SmartAssembly&Delivery была разработана в 2016г. для компании «Инстамарт», г. Москва. Компания первой решила освоить рынок доставки продуктов питания через интернет в Москве непосредственно из крупных супермаркетов, таких как «Ашан» и «Метро». В результате система позволила сократить среднее время сборки заказа на 15%, среднее количество задержек при доставке заказов клиентам на 22% вследствие быстрого построения плановых маршрутов доставки с учетом пробок, а также адаптивного реагирования на фактические задержки во время доставки.

В заключении диссертации подводятся итоги проведенного и завершено в рамках поставленных задач диссертационного исследования и формулируются основные результаты работы.

Основные результаты

1. Проведен системный анализ современных задач управления мобильными ресурсами на предприятиях грузовых FTL и LTL перевозок, сервисных бригад и интернет-доставок.

2. Формализована постановка задачи гибридного построения расписания мобильных ресурсов для формирования начального плана и дальнейшего адаптивного перестроения плана по внешним событиям.

3. Разработаны методы и средства повышения адаптивности решения задачи управления мобильными ресурсами за счет поддержки информационно-коммуникационных взаимодействий с лицами, формирующими и исполняющими план в реальном времени.

4. Разработаны базовые функции и архитектура гибридной мультиагентной системы управления мобильными ресурсами.

5. Проведено моделирование и экспериментальное исследование применимости разработанных методов и средств для повышения адаптивности и роста эффективности использования ресурсов, показывающее возможность увеличения эффективности до 20-40%.

6. На основе базовой системы создан ряд промышленных систем управления мобильными ресурсами в реальном времени, повышающих на 15-25% эффективность использования мобильных ресурсов.

Опубликованные работы по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях из перечня ВАК:

1. Сазонов В.В., Скобелев П.О., Лада А.Н., Майоров И.В. Применение мультиагентных технологий в транспортной задаче с временными окнами и несколькими пунктами погрузки // Управление большими системами (электронный журнал). 2016. №64. – С. 65-80.

2. Скобелев П.О., Лада А.Н., Кожевников С.С., Рыбак Д.С., Пустовой И.А., Царев А.В. Разработка интеллектуальной системы управления сборными грузовыми перевозками в реальном времени // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». 2013. №3(39). – С. 65–74.

3. Амелина Н.О., Лада А.Н., Майоров И.В., Скобелев П.О., Царев А.В. Исследование моделей организации грузовых перевозок с применением мультиагентной системы для адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Проблемы управления. 2011. №6. – С. 31–37.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

4. V.V. Sazonov, P.O. Skobelev, A.N. Lada and I.V. Mayorov Application of Multiagent Technologies to Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows // Automation and Remote Control, 2018, Vol. 79, No. 9, pp. 345-353.

5. Lada Alexander, Skobelev Petr. The method of calculating the assembly and delivery plan for groups of cargoes in the special VRPTW problem of intra-city food delivery // Studies in Computational Intelligence, vol. 762. Springer, Cham, 2018. – P. 489-500. ISBN 978-3-319-73750-8.

6. A. Lada. Method for Transportation Cost Calculation on the Basis of Full Cycle (Round Trip) / A. Lada, P. Skobelev, V. Sazonov // Indian Journal of Science and Technology. – Vol 9(20), May 2016. – pp. 3-11. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94478.

7. P.O. Skobelev, A.N. Lada. A Solution to the Subtask of Initial Distribution of Transport Resources in a Special Optimization FTL Transportation Problem in Real-time Using the Hungarian Algorithm // Indian Journal of Science and Technology. – Vol 9(12), March 2016. – pp. 25-33.

8. Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov. Finding an initial plan of transport resources FTL allocation in a special VRP problem using linear programming methods // Proceedings of the 19th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2015), Orlando, Florida, USA, July 12-15, 2015, vol.1. – International Institute of Informatics and Systemics, – P. 16-21. ISBN 9781941763247.

9. Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system // Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013), February 15-18, 2013, Barcelona, Spain. – SciTePress, Portugal, 2013, Vol. 2. – pp. 244-249. ISBN 978-989-8565-39-6.

10. Oleg Granichin, Petr Skobelev, Alexander Lada, Igor Mayorov, Alexander Tsarev. Comparing adaptive and non-adaptive models of cargo transportation in multi-agent system for real time truck scheduling // Proceedings of the 4th International Conference on Evolutionary Computation Theory and Applications (ECTA'2012), October 5-7, 2012, Barcelona, Spain. – SciTePress, 2012. – pp. 282-285.

Публикации в других изданиях:

11. Лада А.Н., Сазонов В.В., Скобелев П.О. Расчет себестоимости транспортных перевозок с учетом полного цикла (кругорейса) // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): Материалы Девятой международной конференции, 03 - 05 окт. 2016 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А.Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна. – Т. 2: Секции 5 – 12 – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 75-76.

12. Скобелев П.О., Лада А.Н., Орлов И.В. Метод построения тандем-плана комплектации и курьерской внутригородской развозки сборных грузов в специальной WRPTW задаче доставки продуктов питания // Труды XIX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 12-15 сентября 2017 г. – Самара: ОФОРТ, 2017. – С. 501-507. – ISBN 978-5-473-01154-8.

13. Petr Skobelev, Igor Mayorov, Alexander Lada, Nikolay Malkovsky. Solving the initial transport resources allocation subproblem in a special FTL real-time transportation optimization problem by the Hungarian method // Proceedings of 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems MICNON 2015 Saint Petersburg, Russia, 2015. – P.638-643.

14. Скобелев П.О., Лада А.Н., Орлов И.В. Сетевая модель взаимодействия транспортных подразделений как основа управления современным автотранспортным комплексом // Современные сложные системы управления: НТКС'2017: мат-лы XII междунар. науч.-практ. конф., 25-27 октября 2017 г., Липецк, Россия. В 2 ч. Ч.1. – Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. – С. 274-278.

15. Скобелев П.О., Лада А.Н., Рыбак Д.С., Пустовой И.А., Пейсахович Д.Г. SMART LOGISTICS: мультиагентная система управления сборными грузами для внутрирегиональных развозок // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 30 июня-03 июля 2014г. – Самара: СНЦ РАН, 2014. – С. 253-261. – ISBN 978-5-93424-703-5.

16. Иващенко А. В., Лада А.Н., Майоров И.В., Скобелев П.О., Царев А.В. Анализ эффективности применения мультиагентной системы управления региональными перевозками в реальном времени // Материалы 4-й МКПУ-2011, 3-8 октября 2011 г., с. Дивноморское, Геленджик, Россия. Т.1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С. 353-356. ISBN 978-5-8327-0404-3.

Учебные пособия:

17. Иващенко А. В., Лада А.Н., Симонова Е.В., Скобелев П.О. Мультиагентная технология управления мобильными ресурсами в режиме реального времени // Учебное пособие. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 180 с.

Автореферат отпечатан с разрешения
диссертационного совета Д 212.217.03
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 12 от 24 октября 2018г.)
Заказ № 638. Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244