

**На правах рукописи**



**СЕЛИВЕРСТОВ ЯРОСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ  
ПОТОКАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВНЕШНЕЙ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ**

**Специальность 05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические  
системы страны, ее регионов и городов, организация производства на  
транспорте**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург – 2015**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук» (ИПТ РАН)

Научный  
руководитель

**Стариченков Алексей Леонидович**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий лабораторией «Проблем безопасности  
транспортных систем» ФГБУН «Институт проблем  
транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии  
наук»

Официальные  
оппоненты:

**Ларин Олег Николаевич**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Логистика и управление  
транспортными системами» ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный университет путей сообщения  
(МИИТ)»

**Феофилова Анастасия Александровна**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Организация перевозок и дорожного  
движения» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный  
строительный университет»

Ведущая  
организация:

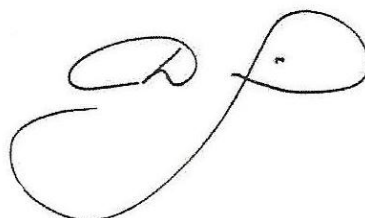
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)»

Защита состоится «11» июня 2015 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 223.012.01 на базе Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <http://spbguga.ru/530-ob-yavleniya-o-zashchite-dissertatsij>

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Я.М. Далингер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Повышение темпов экономического развития России, заявленное в Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 года, в условиях глобальной конкуренции и геополитического соперничества, охватывающего не только традиционные рынки сырья, товаров, капиталов, технологий и рабочей силы, но и системы национального управления поддержки инноваций, невозможны без сбалансированного развития территориальных и социальных систем.

Устойчивая тенденция роста урбанизации населения в 2007 году перешагнула исторический рубеж - доля мирового населения, живущего в городах, превысила отметку в 50 %, о чем было засвидетельствовано на Шестой сессии всемирного форума городов в рамках программы ООН по населенным пунктам.

Значительные диспропорции в размещении мест проживания населения и приложения труда, характерные для большинства мегаполисов России, приводят к появлению маятниковых пассажирских и транспортных потоков, а существующий дефицит транспортных коммуникаций и отсутствие интеллектуальных систем управления дорожным движением в «часы пик» становятся основной причиной потерь времени, экологического ущерба, причиной стрессов участников транспортного процесса и возникновением чрезвычайных дорожных ситуаций.

Управление транспортной системой крупных городов с применением информационных технологий широко используется в мировой и отечественной практике организации дорожного движения. Фундаментальные проблемы транспортных систем решали О.В. Белый, А.Э. Горев, Н.Н. Громов, О.Г. Кокаев, и другие. Проблемы городского транспортного моделирования отражены в работах В.В. Захарова, А.А.Замятина, В.В. Зырянова, В.Т. Капитанова, Г. И. Клинковштейна, А. В. Гасникова, В.В. Семенова, Е.А. Нурминского, Н.Б. Шамрай, В.И. Швецова, и других. Решению проблем управления транспортом и логистикой в границах системного анализа посвящены работы В.С. Лукинского, О.Н.Ларина, Л.Б. Миротина, Д.А.Скороходова, И.М. Смирнова, В.В. Щербакова и других. Комплексные вопросы безопасности транспортных систем рассмотрены в трудах А.Л. Стариченкова, А.И. Рябчинского, М.Л. Маринова, Н.В. Шаталовой, Дж. Микульски и других.

В основе систем управления (СУ) городскими транспортными потоками (ГТП) лежат математические и программно-алгоритмические модели. К настоящему времени уже разработаны транспортные модели, которые с определенной степенью достоверности отображают реальные транспортные процессы. С их использованием вычисляются потоки и загрузка элементов сети, составляется расписание движений общественного транспорта, выполняется локальное управление активными элементами транспортной сети

с целью перераспределения транспортных потоков на особо загруженных участках. Основной проблемой создания достоверных моделей является получение статистической информации о поведении пользователей в сети. Эта информация представляется в виде матриц корреспонденций, точность которых, в виду отсутствия надлежащих систем мониторинга транспортной мобильности, не превышает 10%. Использование недостоверных данных, полученных посредством единичных опросов и локальных систем мониторинга транспортной мобильности, приводит к построению ложных транспортных моделей, сводит на нет эффективность принимаемых управленческих решений, делает невозможным построение достоверных матриц корреспонденций.

Устойчивая тенденция последовательного внедрения отдельных составляющих информационных систем управления дорожным движением в практику организации городского транспортного процесса в мегаполисах России не сумела повысить пропускную способность транспортных сетей, снизить количество дорожно-транспортных происшествий и качественно повысить безопасность дорожного движения. Несмотря на большое число существующих технических решений, современные модели управления городской транспортной системой (ГТС) не реализуют в полном объеме функции управления.

Таким образом, в настоящее время существует **актуальная научная задача** разработки достоверных моделей управления ГТП.

**Объект исследования** - транспортная система города.

**Предмет исследования** - модели управления городскими транспортными потоками, элементы городской транспортной сети и системы транспортного мониторинга.

**Цель исследования** состоит в решении задачи повышения качества управления ГТС в условиях неопределенности внешней информационной среды за счет разработки новых и совершенствования существующих моделей управления ГТП.

Для достижения поставленной цели решены следующие **основные задачи**:

1. Проведен анализ существующих систем управления городскими транспортными потоками.
2. Проведен анализ способов местоопределения, классификации, идентификации, аутентификации и бесконтактной диагностики состояния подвижных транспортных объектов.
3. Выполнен анализ моделей построения и оценки матриц корреспонденций.
4. Разработана структурная схема системы городского транспортно-логистического мониторинга и предложено ее согласованное включение в модель управления ГТС.
5. Разработана логико-алгебраическая модель представления исходных данных, лежащая в основе модели управления городскими транспортными потоками.

6. Разработана агентная модель ГТС.
7. Разработана графо-аналитическая модель городской транспортной сети.
8. Разработана модель управления городскими транспортными потоками.
9. Разработана модель классификации межагентных отношений в ГТС.
10. Разработана модель распределения городских транспортных потоков и проверена ее адекватность.

**Методы исследования** – методы построения и оценки матриц корреспонденций, методы дискретной математики и теории графов, методы и алгоритмы реляционной алгебры, методы местоопределения, идентификации и аутентификации на транспорте, методы решения задач маршрутизации транспорта на графах, методы обработки статистической информации, методы имитационного моделирования.

**Результатами диссертационного исследования**, выносимыми на защиту являются:

1. Структурная схема системы городского транспортно-логистического мониторинга;
2. Модель управления городскими транспортными потоками.
3. Модель классификации межагентных отношений в ГТС.
4. Модель распределения городских транспортных потоков.

#### **Научная новизна результатов работы.**

Новизна первого научного результата заключается в том, что в отличие от существующих решений, предложена структурная схема системы городского транспортно-логистического мониторинга (СГТЛМ) в составе модели управления ГТС. Предложена ее интеграция с системой Федеральной службы государственной статистики в границах единой системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации. Система, построенная по предлагаемому принципу, позволит осуществлять сбор данных о положении и состоянии транспортных объектов, а также передавать эти данные по каналам связи на устройства обработки информации и диспетчерские центры, сравнивать, анализировать и архивировать информацию. Внедрение предложенного решения позволит повысить управляемость поведением ГТС, включая возникновение опасных ситуаций на транспорте посредством информационного упреждения.

Новизна второго научного результата заключается в том, что предложена модель управления городскими транспортными потоками, в основу которой, в отличие от известных решений, положены принципы рациональной самоорганизации, включающие целевые ориентиры пользователя и целевые ориентиры системы. В целевые ориентиры пользователя укладывается первый принцип Вардропы и принцип безопасного следования, в целевые ориентиры городской транспортной системы укладывается второй принцип Вардропы и принцип надежного функционирования. Информационное наполнение модели производится на основе достоверной информации, поступающей с СГТЛМ. Внедрение предложенной модели системы управления способно повысить пропускную способность ГТС за счет устранения нерационального

распределения транспортных потоков, а также повысить надежность и управляемость за счет информирования участников транспортного процесса.

Новизна третьего научного результата заключается в том, что, в отличие от известных решений, предложена модель классификации межагентных отношений в ГТС. В основу модели положена формальная интерпретация социально-экономической активности городского населения через потребительскую активность, информационно-сетевую активность и транспортную активность городского населения. Предлагается подход к построению расширенной системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации. Таким образом, формальную классификацию отношений социально-экономической активности городского населения в системах управления городской транспортной системой предлагается производить с использованием расширенной системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации.

Новизна четвертого научного результата заключается в том, что в отличие от известных моделей, предложена модель распределения городских транспортных потоков, в основу которой были положены временные модели цепочек дневной активности городского населения, привязанные к достоверным матрицам корреспонденций. Предложенная модель позволила сбалансировать распределение городских транспортных потоков в связи с вводом в Санкт-Петербурге новых станций метрополитена: «Обводный канал», «Международная», «Бухарестская» и «Адмиралтейская», а также повысить эффективность управления ГТС и улучшить точность прогноза распределения транспортных потоков в мегаполисе.

**Практическая значимость работы и полученных результатов** определяется необходимостью перехода городской транспортной системы на новый уровень управления. Внедрение разработанных моделей управления ГТП в систему городского транспортного управления будет способствовать повышению: эффективности пассажирских, грузовых и специальных перевозок; эффективности реагирования на дорожно-транспортные происшествия и другие нештатные ситуации на улично-дорожной сети; безопасности дорожного движения; пропускной способности дорожной сети и, как следствие, росту инвестиционной привлекательности городской экономики за счет оптимизации транспортных перевозок.

**Достоверность** основных положений исследования обеспечена корректной постановкой задач и проведением натурных исследований, применением системного подхода при анализе предметной области, использованием современных расчетных методов и согласованностью полученных результатов с результатами работ других исследователей. Достоверность научных результатов подтверждается апробацией основных положений диссертации.

**Обоснованность** научных результатов определяется строгой аргументацией разработанных моделей, доказательным и корректным использованием апробированных методов исследования.

**Реализация.** В рамках диссертационного исследования был выполнен научно-исследовательский проект «Моделирование и оценка изменения динамики транспортных потоков с вводом метрополитеном станций «Обводный канал», «Адмиралтейская», «Бухарестская», «Международная». Научное направление: Транспорт. Диплом: серия ПСП №10605. Проект стал лауреатом конкурсного отбора среди молодых ученых, молодых кандидатов наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2010 году и был поддержан Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга.

#### **Внедрение результатов работы.**

Результаты работы «Моделирование и оценка изменения динамики транспортных потоков с вводом метрополитеном станций «Обводный канал», «Адмиралтейская», «Бухарестская», «Международная» были использованы Российско-Немецкой компанией «А+С Консалт» при разработке транспортной модели городского общественного пассажирского транспорта Санкт-Петербурга о чем свидетельствует Акт о внедрении результатов работы № А01-07-10.

Результаты диссертационного исследования были использованы в ФГБУН Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН) при выполнении следующих государственных научно-исследовательских работ 2011- 2014 годов:

1. НИР «Разработка методологии имитационного моделирования процесса интегрального обслуживания мультимодальных транспортных потоков», № государственной регистрации: 1-121-09.

2. НИР «Разработка научных основ построения интеллектуальных транспортных систем, на примере мегаполиса», № государственной регистрации: 114080450059.

**Апробация работы.** Научные результаты диссертационного исследования докладывались на семинарах в ИПТ РАН, в Доме ученых им. М. Горького Российской академии наук, а также на XII Международной научно-практической конференции: «Логистика: современные тенденции развития» , X Международной научно-практической конференции «Логистика: современные тенденции развития» , III Научно – практической конференции молодых ученых РАН «Фундаментальная и прикладная наука глазами молодых ученых. Успехи, перспективы, проблемы и пути их решения», Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы 2011», Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы-2014» .

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых журналах перечня ВАК, 6

публикаций в материалах научных конференций, научных журналах и сборниках научных трудов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 172 источника и приложения. Общий объем работы 179 страниц, 67 рисунков, 8 таблиц.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введение** обоснована актуальность темы, поставлена цель и сформулированы основные задачи исследования, определены предмет и объект исследования, раскрыта научная новизна и значимость результатов работы.

**В первой главе** проведен анализ существующих систем управления городскими транспортными потоками с выявлением недостатков, не позволяющих производить сбор разнородных данных для построения достоверных матриц корреспонденций.

В отличие от существующих схем транспортного мониторинга предложено построение структурной схемы городского транспортно-логистического мониторинга (ССГТЛМ), обеспечивающей комплексное наблюдение за транспортными объектами и их состоянием. Формальное наполнение ССГТЛМ опирается на аналитически выведенные условия достоверной мобильности, обуславливающие наличие функций идентификации, аутентификации, местоопределения и распознавания состояний подвижных и стационарных объектов городской транспортной системы, при этом ГТС задается множеством элементов:

$$TS : \mathcal{E} = \{\varepsilon_i, i = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где  $TS$  - городская транспортная система;  $\{\varepsilon_i\}$  - элементы ГТС.

Условия достоверной мобильности трактуются в следующей интерпретации:

1) каждый объект, входящий в городскую транспортную сеть или находящийся внутри нее, должен иметь идентификатор;

Процесс идентификационной нумерации элементного множества ГТС реализован посредством отображения  $f_N$ , которое каждому объекту из  $TS$  ставит уникальный номер из  $I$ , т.е.

$$f_N : TS \rightarrow I, \quad (2)$$

где  $I = \{id_n\}$  - множество уникальных номеров.

2) состояния транспортных объектов в ГТС должны быть распознаваемы;

Процесс параметризации, обуславливающий процедуру аутентификации и распознавания состояния элементного множества  $TS$ , задан оператором  $f_{CH}$ , который каждому объекту в сети ставит в соответствие набор характеристик, присущих данному объекту, т.е.

$$f_{CH} : TS \rightarrow CH, \quad (3)$$



где  $CH = \{ch_{\hat{r}}^{i}, \hat{r}=1, \dots, \hat{P}; i=1, \dots, N\}$  - множество характеристик элементов ГТС,  $ch_{\hat{r}}^{i} = \langle name, \{value\} \rangle$  - кортеж,  $name$  – имя  $\hat{r}$ -й характеристики,  $\{value\}$  – область допустимых значений.

3) процесс идентификации объектов в ГТС должен быть самоорганизован.

Выполнение 3-го условия определяется наличием в элементах ССГТЛМ блока потребительских функций, которые способствуют процессу внедрения подобных систем на принципах самоорганизации.

Для решения проблемы позиционирования  $R_{def} = 1m$  транспортных объектов в ССГТЛМ предложено комбинированное решение, совмещающее технологии глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), систем сотовой связи и локальных беспроводных радионавигационных сетей. Произведено построение ССГТЛМ и обоснована ее пригодность в осуществлении непрерывного транспортного мониторинга с целью информационного наполнения системы управления ГТП.

**Во второй главе** произведено формальное построение логико-алгебраической модели исходных данных с учетом (1). Разбиение  $f_{\psi}^d$  множества  $TS$  на непересекающиеся совокупности подмножеств осуществляется следующим образом:

$$f_{\psi}^d : TS = \bigcup_{\psi_q^d = \psi_1^1}^{\psi_{N_1}^1} \dots \bigcup_{\psi_1^D}^{\psi_{N_d}^D} TS_{\psi_q^d, \dots, \psi_q^D}, \quad \left| TS_{\psi_q^d} \right| = d_{\psi_q^d}, \quad (4)$$

где  $\Psi = \left\{ \psi_q^d; d=1, \dots, D; q=1, \dots, N_d \right\}$  - классы разбиения;  $q$  - номер разбиения;  $d$  - глубина классов разбиения;  $d_{\psi_q^d}$  - мощность класса разбиения (количество элементов в классе).

Далее вводится процесс идентификационной нумерации элементного множества  $TS$  (2) и параметризации  $TS$  (3), обуславливающий процедуру аутентификации и распознавания состояния элементного множества  $TS$ . Динамика процессов в ГТС задана временным оператором  $f_T$ , который каждому объекту из  $TS$  ставит в соответствие определенный момент или интервал времени из  $T$ , т.е.

$$f_T : TS \rightarrow \left[ \tau_T^{def} \vee (\tau_T; \tau_{T+1}) \right], \quad (5)$$

где  $T$  - множество моментов или интервалов времени, на котором задано отношение строгого порядка,  $\tau_1 < \tau_2, \dots, \tau_T < \tau_{T+1}$ ;  $\tau_T^{def} \in T$  - определенный момент времени, а  $(\tau_T; \tau_{T+1}) \in T$  - определенный интервал времени.

Элементы реальной ГТС в модели управления ГТП - это агенты  $A = \{a_i, i=1, \dots, N\}$ , заданные отображением  $f^{TS-A}$ , которое каждому элементу из  $TS$  ставит в соответствие агента из  $A$  с выполнением условий равномощности, т.е.:

$$f^{TS-A}: TS = \{\varepsilon_i, i=1, \dots, N\} \rightarrow A = \{a_i, i=1, \dots, N\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \sum_{i=1}^N a_i \quad (7); \quad |TS| = |A| \quad (8)$$

На базе логико-алгебраической модели исходных данных строится модель операторного базиса ГТС, содержащая операторы измерения -  $f_M$ , регулирования -  $f_R$  и планирования -  $f_{\Pi}$ , вида:

$$f_C = \langle f_M; f_R; f_{\Pi} \rangle, \quad (9)$$

где  $f_M = \{f_M^{\varepsilon_i}\} = f_N \cup f_{CH} \cup f_T \cup f^{TS-A}: \forall \varepsilon_i \in TS \exists f_M^{\varepsilon_i}: [t; e_{\varepsilon_i}(t); \varepsilon_i] \rightarrow [t, e_{\varepsilon_i}(t), s_{\varepsilon_i}(t)]$ ,  
 $s_{\varepsilon_i}(t) = t \times id_i \times a_i \times ch_{\pi}^{\varepsilon_i}$  - состояние ОУ ГТС;  $e_{\varepsilon_i}(t) = t \times id_j \times a_j \times ch_{\bar{r}}^{\varepsilon_j}$  -  
 воздействие на ОУ;  $f_R = \{f_R^{\varepsilon_i}\} = f_R^H \cup f_R^{TC}: \forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_R^{\varepsilon_i}: R(TS) \rightarrow r_{\varepsilon_i}(t_R)$ ;  
 $f_R^{\varepsilon_i}$  - оператор регулирования состояний ОУ ГТС;  $R(TS)$  - множество  
 регулирующих воздействий СУ ГТС;  $r_{\varepsilon_i}(t_R)$  - регулирующее воздействие,  
 поданное на ОУ  $\varepsilon_i \in TS$  в момент  $t_R \in T$ ;  $f_R^H$  - оператор регулирования  
 состояний для пользователя ГТС;  $f_R^{TC}$  - оператор регулирования состояний для  
 ОУ ГТС;  $f_{\Pi} = \{f_{\Pi}^{\varepsilon_i}\} = f_{\Pi}^H \cup f_{\Pi}^{TS/H}: \forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_{\Pi}^{\varepsilon_i}: sit_0^{\varepsilon_i}(t) \rightarrow s_P^{\varepsilon_i}(t_P)$ ;  $f_{\Pi}^{\varepsilon_i}$  -  
 оператор планирования состояний ОУ ГТС;  $sit_0^{\varepsilon_i}(t)$  - ситуация, в которой  
 находится ОУ ГТС в момент времени  $t \in T$ ;  $s_P^{\varepsilon_i}(t_P)$  - целевое состояние ОУ  
 ГТС в момент  $t_P \in T$ ;  $f_{\Pi}^H$  - оператор планирования состояний для пользователя  
 ГТС;  $f_{\Pi}^{TS/H}$  - оператор планирования состояний для объектов ГТС кроме  
 пользователей.

Оценка соответствия текущего состояния ГТС требуемому реализуется  
 через оператор контроля состояний  $f_{CS}$ , который для каждого  $\varepsilon_i$  объекта ГТС,  
 находящегося в состоянии  $sit_0^{\varepsilon_i}(t)$  в момент времени из  $T$ , вычисляет величину  
 отклонения  $r_{\varepsilon_i}(t_R)$  от требуемого состояния  $s_P^{\varepsilon_i}(t_P)$ , т.е.

$$f_{CS} = \left\langle f_M \cup f_{\psi}^d; E_{\varepsilon}^{\varepsilon_i}; r_{\varepsilon}(t_R) \right\rangle: \forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_{CS}^{\varepsilon_i}: |sit_0^{\varepsilon_i}(t) - s_P^{\varepsilon_i}(t_P)| \rightarrow r_{\varepsilon_i}(t_R) \quad (10)$$

где  $E_{\varepsilon}^{\varepsilon_i} \in TS$  - множество элементов ГТС, оказывающих влияние на объект  $\varepsilon_i$ .

Операторный базис ГТС реализует функционал управления на режимах  
 оптимального и допустимого управления, т.е.:

$$\forall \varepsilon_i \in TS, f_T, f_{CH}, t = def \exists f_C, U(TS): \begin{cases} f_C^{opt}, U(TS)_{opt} \rightarrow \{ch_{\bar{r}}^{AL}\} < \{ch_{\bar{r}}^{rand}\} < \{\overline{ch_{\bar{r}}^{AL}}\} \\ f_C^{AL}, U(TS)_{AL} \rightarrow \{ch_{\bar{r}}^{rand}\} \in CH_{\bar{r}}^{AL} \\ f_C^F, U(TS)_F \rightarrow \{ch_{\bar{r}}^{rand}\} \notin CH_{\bar{r}}^{AL} \end{cases} \quad (11)$$

где  $f_C$ ,  $f_C^{opt}$ ,  $f_C^{AL}$ ,  $f_C^F$  - операторы: текущего управления, оптимального управления, допустимого управления и потери управления ГТС, соответственно;  $\{ch_{\bar{r}}^{AL}\}$ ,  $\{\overline{ch_{\bar{r}}}^{AL}\}$  - значения нижней и верхней границы множества параметров оптимального управления;  $\{ch_{\bar{r}}^{rand}\}$  - множество значений  $i$ -ых параметров;  $CH_{\bar{r}}^{AL}$  - область допустимого управления;  $U(TS)$  - вектор состояния ГТС;  $U(TS)_{opt}$ ,  $U(TS)_{AL}$ ,  $U(TS)_F$  - состояния ГТС, соответствующие оптимальному, допустимому и потери управления;

Поведение  $B_t(TS)$  элементов ГТС в модельной интерпретации задается динамическим агентным графом ГТС следующего вида:

$$B_t(TS) = \Gamma_t(V; E) = \Gamma_t(\Gamma_t^{[r]}(A; R); T) \stackrel{f_{\Leftrightarrow}}{=} \Gamma_t(\Gamma_t(A; R); T), \quad (12)$$

где  $\Gamma_t^{[r]}(A; R)$  - граф-регистратор отношений, задающий вершины динамического агентного графа  $\Gamma_t(\Gamma_t(A; R); T)$ ;  $A = \{a_i\}$  - агентное множество элементов ГТС, задающее множество вершин графа  $\Gamma_t^{[r]}(A; R)$ ;  $R$  - множество регистрируемых отношений между агентами, задающее множество дуг графа  $\Gamma_t^{[r]}(A; R)$ ;  $f_{\Leftrightarrow}$  - оператор транзитивности отношений;  $\Leftrightarrow$  - знак свойства квази-транзитивности;  $\Gamma_t(A; R)$  - агентный граф расширенных отношений.

Динамический агентный граф под действием оператора классификации  $f_{\psi}^d$  преобразуется в динамический функциональный граф  $BF_t(TS)$  в соответствии с выражением:

$$B_t(TS) = \Gamma_t(\Gamma_t(A; R); T) \xrightarrow{f_{\psi}^d} BF_t(TS) = \Gamma_t(F; T), \quad (13)$$

где  $F$  - множество, классифицирующее функциональные отношения, обуславливающие поведение элементов ГТС посредством их динамические агентных графов  $\Gamma_t(\Gamma_t(A; R); T)$ .

Каждому элементу ГТС операторы измерения  $f_M^{\exists i}$  и классификации  $f_{\psi}^d$  ставят в соответствие множество его динамических функциональных графов:

$$\forall \exists_i \quad \exists f_M^{\exists i}, f_{\psi}^d \quad \exists_i \xrightarrow{f_M^{\exists i}, f_{\psi}^d} \Gamma_t^{\exists i}(F; E) \quad (14)$$

Далее через агентную модель производится построение графо-аналитической модели городской транспортной сети  $\Gamma^{PI}(V; E) \subset B_t(TS)$  где  $PI = (To \cup Ts \cup O)$  - транспортная сеть с множеством вершин  $V = \{v\}$  и множеством дуг сети  $E = \{e\}$ . Во множестве вершин  $V = \{v\} \subseteq A \subset B_t(TS)$  выделено два подмножества - зарождения ТП ( $S \subseteq V$ ), и поглощения ТП ( $D \subseteq V$ ), удовлетворяющих следующему выражению:

$$D, S \subseteq [To \cup Ts \cup O] \subset TS \quad (15)$$

Множество потокообразующих пар отправления-прибытия задается декартовым произведением, согласно следующей зависимости:

$$W = \{w = (\partial; \alpha) : \partial \in S, \alpha \in D\} \quad (16)$$

Матрица транспортных корреспонденций задается массивом  $\{\rho_w : w \in W\}$ , в котором каждой паре отправление-прибытие  $w = (\partial; \alpha) \in W$  ставится в соответствие определенный объем пользователей  $\rho_w$ , которые из пункта отправления  $\partial$  должны прибыть в пункт прибытия  $\alpha$ .

Маршрут на графе транспортной сети, соединяющий вершины  $\partial$  и  $\alpha$  задается последовательностью дуг следующего вида:  $e_1 = (\partial = \pi_0 \rightarrow \pi_1), e_2 = (\pi_1 \rightarrow \pi_2), \dots, e_{L-1} = (\pi_{L-2} \rightarrow \pi_{L-1}), e_L = (\pi_{L-1} \rightarrow \pi_L = \alpha)$ , где  $e_\gamma \in E$  при всех  $\gamma = 1, \dots, L+1$ , а множество альтернативных маршрутов определяется следующим выражением:

$$P_w = \bigcup_{i=1}^N p_i = \bigcup_{i=1}^N \bigcup_{l=1}^L e_{il} \quad (17)$$

Совокупность всех путей в графе транспортной сети обозначим через  $P = \bigcup_{w \in W} P_w$ , тогда поток  $x_p$ , следуя по пути  $p \in P$ , удовлетворяет условию:

$$X_w = \left\{ x_p \geq 0 : p \in P_w, \sum_{p \in P_w} x_p = \rho_w \right\} \quad (18)$$

Определить поток  $x_p$  по пути через поток по дуге  $y_e$ , в момент времени  $t \in T$  можно следующим образом:

$$x_p = \sum_{e \in P} \Theta_{ep} y_e, \quad \Theta_{ep} = \begin{cases} 1 & \text{если дуга } e \text{ проходит через путь } p, \\ 0 & \text{(в противном случае)} \end{cases}, \quad (19)$$

где  $\Theta = (\Theta_{ep} : e \in E, p \in P)$  - матрица инцидентности дуг и путей;  $y = (y_e : e \in E)$ -вектор, описывающий загрузку дуг сети;

Процедуру разбиения потока на элементы запишем в теоретико-множественной (20) и алгебраической (21) интерпретациях, т.е.:

$$Y_{e\Sigma} \Big|_{t=def} = \left( \bigcup_{CH_{\hat{r}}^{tr}} Tr_{CH_{\pi}^{tr}} \cup \dots \cup \bigcup_{CH_{\hat{r}}^h} H_{CH_{\hat{r}}^h} \right) \Big|_{t=def}, \quad (20)$$

$$\forall Tr_{CH_i^{tr}}, Tr_{CH_j^{tr}} : Tr_{CH_i^{tr}} \cap Tr_{CH_j^{tr}} = \emptyset; \quad \forall H_{CH_i^h}, H_{CH_j^h} : H_{CH_i^h} \cap H_{CH_j^h} = \emptyset$$

$$y_{e\Sigma} \Big|_{t=def} = \left( \sum_k^{\hat{K}} \sum_i^N tr_{ki} + \sum_{\lambda}^{\hat{\Lambda}} \sum_i^N h_i \right) \Big|_{t=def}, \quad (21)$$

где  $Y_{e\Sigma} = \left\{ \varepsilon_q \mid \varepsilon_q \in Tr \cup H \cup Tg \cup Gr, q = 1, \dots, Q \right\}$  - потоковое множество на дуге «e»;  $y_{e\Sigma} = |Y_{e\Sigma}|$  - мощность потокового множества на дуге «e»;

$Tr_{CH_{\hat{r}}^{tr}}$  - подмножество транспортных средств (ТрС)  $Tr$  вида  $CH_{\hat{r}}^{tr} \sim k \dots \hat{K}$  (виды или классы ТрС);  $H_{CH_{\hat{r}}^h}$  - подмножество пользователей  $H$  вида

$CH_{\hat{r}}^h \sim \lambda \dots \hat{\Lambda}$  (классы пользователей);  $\sum_k \sum_i^N tr_{ki}$  - общее количество ТрС на дуге, классифицированных по классам  $k$ ;  $\sum_{\lambda} \sum_i^N h_i$  - общее количество пользователей на дуге, классифицированных по классам  $\lambda$ ; знак « $\sim$ » читается как «представляет собой».

Принадлежность элементов потокового множества к определенной корреспонденции запишем в теоретико-множественном (22) и алгебраическом (23) виде, следующим образом:

$$Y_{e\Sigma} \Big|_{t=def} = \left( Y_e^w \cup \bar{Y}_e^w \right) \Big|_{t=def}, \quad (22)$$

$$y_{e\Sigma} \Big|_{t=def} = \left( y_e^w + \bar{y}_e^w \right) \Big|_{t=def}, \quad (23)$$

где  $y_e^w$  - количество пользователей, находящихся на дуге  $e \in E$  в момент времени  $t = def$ , принадлежащих корреспонденциям  $w \in W$ , т.е.  $y_e^w = y_e$ ;  $\bar{y}_e^w$  - количество агентов, находящихся на дуге  $e \in E$  в момент времени  $t = def$ , не принадлежащих корреспонденции  $w \in W$ .

Затраты  $g_{ei}$ , на преодоление участка пути представлены в виде:

$$\forall e_i \quad \exists g_{ei} = g_{ei}^{\nabla} \cup g_{ei}^{\Delta} \quad (24)$$

$$g_{ei}^{\nabla} \cup g_{ei}^{\Delta} = \left\{ ch_{\nabla}^{g_{ei}} \cup ch_{\Delta}^{g_{ei}} \mid ch_{\nabla}^{g_{ei}} = const, ch_{\Delta}^{g_{ei}} = f(e_i; y_{ei}), \pi = 1, \dots, C, \Delta = 1, \dots, \Lambda \right\} \quad (25)$$

Совокупные затраты  $g_{ei}$  включают постоянную  $g_{ei}^{\nabla}$  и переменную  $g_{ei}^{\Delta}$  составляющие.

В реляционной модели затраты  $g_{ei}$  задаются в следующем виде:

$$g_{ei} : \left\{ \frac{\langle name, \{value\} \rangle, \langle name, \{value\} \rangle \dots; \langle name, \{value\} \rangle, \langle name, \{value\} \rangle \dots}{g_{ei}^{\nabla}} \mid \frac{\langle name, \{value\} \rangle, \langle name, \{value\} \rangle \dots; \langle name, \{value\} \rangle, \langle name, \{value\} \rangle \dots}{g_{ei}^{\Delta}} \right\}, \quad (26)$$

где name – имя  $\nabla, \Delta$ -й характеристики;  $\{value\}$  – значение или область допустимых значений.

Удельные затраты пользователей  $G_p = \{g_p\}$  на проезд по пути  $p$  в алгебраической (27) и реляционной (28) интерпретациях, соответственно, представим в следующем виде

$$G_p = G_p^\nabla + G_p^\Delta = \sum_{e_i \in p} (g_{e_i}^\nabla + g_{e_i}^\Delta) \quad (27)$$

$$G_p : \left\{ \frac{\langle name, \{\Sigma value\} \rangle, \langle name, \{\Sigma value\} \rangle \dots \langle name, \{\Sigma value\} \rangle, \langle name, \{\Sigma value\} \rangle \dots}{G_p^\nabla} \frac{\langle name, \{\Sigma value\} \rangle, \langle name, \{\Sigma value\} \rangle \dots \langle name, \{\Sigma value\} \rangle, \langle name, \{\Sigma value\} \rangle \dots}{G_p^\Delta} \right\} \quad (28)$$

Поскольку на затраты по одному маршруту может влиять загрузка других маршрутов, то последние  $G_p$  представляют собой функции от загрузки всей сети, то есть  $G_p = G_p(x)$ . Тогда, взаимосвязь потоков по путям и дугам в матричной форме, в обобщенном виде может описываться уравнением  $X = \Theta Y$ .

Операторный базис реализует целевую функцию управления процессами мобильности в ГТС, которая формируется под воздействием двух составляющих: целевых ориентиров пользователей  $P(H)$  и целевых ориентиров ГТС  $P(TS/H)$ . Вначале рассмотрим целевые ориентиры пользователя. Сформулируем их следующим образом:

1) пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты следования, соответствующие их минимальным транспортным расходам (I принцип Вардропы), т.е

$$\forall h \in H, h \rightarrow w(\partial; \alpha) \rightarrow p : p \in P_w, x_p > 0, \Rightarrow G_p(x) = \min_{p \in P_w} G_p(x_\Sigma) = g_w(x_\Sigma) \quad (29)$$

где  $p = e_1, \dots, e_\ell$ ;  $g_w(x_\Sigma)$  - минимальные транспортные затраты по маршрутам, соединяющим при загрузке сети пару  $w \in W$  вектором  $x_\Sigma$ ;

2) продвижение пользователя по пути с минимальными транспортными расходами осуществляется в динамической области безопасной транспортной мобильности.

Под динамической областью безопасной транспортной мобильности понимается область движения  $D_{h_i}^S$ , выбираемая пользователем самостоятельно, исходя из имеющейся информации  $I_{TS}^{h_i}$  об участниках процесса транспортной мобильности, правилах дорожного движения и состоянии транспортной инфраструктуры посредством функции информационного обеспечения, в следующем виде:

$$\forall h_i \in H, w(\partial; \alpha), p = p = e_1, \dots, e_\ell \exists f_{h_i}^s(I_{TS}^{h_i}) \Big|_{t=def} : h_i \longrightarrow D_{h_i}^S(e_{def}) \quad (30)$$

Функция информационного обеспечения  $f_{h_i}^s(I_{TS}^{h_i})$  формируется системой управления ГТС и предоставляет участникам транспортного процесса информацию о динамической области безопасной транспортной мобильности.

В диссертации представлена реализация второго целевого ориентира пользователя на примере определения участником транспортного процесса динамической области безопасной транспортной мобильности с использованием информации, получаемой от системы управления ГТС.

Рассмотрим целевые ориентиры ГТС. Они опираются на II принцип Вардропы и принцип надежного функционирования ГТС. Сформулируем их следующим образом:

1) пользователи сети выбирают маршруты следования, исходя из минимизации общих транспортных расходов (ОТР) городской транспортной системы, т.е.

$$G_{GTC} \Big|_T = \left[ G_{GTC}^{\Delta} + G_{GTC}^{\nabla} \right] \Big|_T = \left[ G_{TF} + G_{EF}^{GTC} \right] \Big|_T \rightarrow \min, \quad (31)$$

где  $G_{GTC}$  - общие транспортные расходы;  $G_{GTC}^{\Delta}$  - переменная составляющая общих транспортных расходов;  $G_{GTC}^{\nabla} = G_{EF}^{GTC}$  - постоянная составляющая общих транспортных расходов, эквивалентная расходам, связанным с влиянием внешних факторов;  $G_{TF}$  - общие транспортные расходы, зависящие от динамических характеристик транспортного потока;  $TF$  - индекс транспортного потока следующего вида:  $TF = TR \cup H \cup Gr \cup Tg$ .

Первый и второй принципы Вардропы имеют общий системный оптимум, представляющий собой функционал, минимизирующий время ожидания участников транспортного процесса на городской улично-дорожной сети, т.е. чем быстрее пользователь прибудет из пункта отправления в пункт назначения, тем меньше будет величина общих транспортных расходов. Отбросим постоянную часть ОТР в (31), тогда

$$G_{GTC} \Big|_T \sim G_{TF} \Big|_T \quad (32)$$

Затраты  $G_{TF}$  зависят от величины потока -  $X$ , интенсивности движения потока -  $M$ , времени движения потока -  $TM$ , добротности перемещения потока по сети ГТС -  $QM$ ; пропускной способности сети -  $CM$ . Таким образом,  $G_{TF}$  примет следующий вид:

$$G_{TF} = G_{TF}(X; M; TM; QM; CM) \quad (33)$$

Множеству показателей  $[X; M; TM; QM; CM]$  соответствует интегральный показатель – время движения ТП  $[TM(X)]$ , следовательно, допустим переход от (33) к виду

$$G_{TF}(X; M; TM; QM; CM) \sim G_{TF}(TM(X)) \quad (34)$$

Зависимость (34) выражается через функцию ограничений движения по времени

$$TM = \min_{fX} \sum_{i=1}^N \tau_i^0 \left[ 1 + a \left( \frac{fX_i}{cm_i} \right)^b \right], \quad X = \sum_i^N fX_i, \quad fX_i \geq 0, \quad (35)$$

где  $fX = (fX_1, \dots, fX_i, \dots, fX_n)$  - вектор распределения ТП  $X$  по путям;  $\tau_i^0$  - время свободного движения по  $i$ -му пути;  $fX_i$  - ТП на  $i$ -м пути;  $cm_i > 0$  - пропускная

способность  $i$ -го пути;  $tm_i = \tau_i^0 \left[ 1 + a \left( \frac{fx_i}{cm_i} \right)^b \right] > 0$  - время прохождения ТП по  $i$ -му пути;  $a, b$  - калибровочные коэффициенты.

В условиях реального времени соблюдение участником дорожного движения целевых ориентиров пользователя и ГТС идет через принятие решения о выборе кратчайшего по времени маршрута движения из пункта отправления в пункт назначения. Кратчайший по времени маршрут вычисляется бортовым навигатором транспортного средства или персональным планировщиком участника транспортного процесса с использованием информации, полученной от СГТЛМ.

Реализация первого целевого ориентира пользователя и первого целевого ориентира ГТС представлена на примере выбора водителем оптимального маршрута в режиме реального времени.

Рассмотрим второй целевой ориентир ГТС:

2) городская транспортная система в процессе движения пользователей функционирует в области допустимой надежности, т.е. для любого объекта  $\gamma_i$  из множества  $(Ts \cup To \cup Tc)$ , который находится в поле действия операторов ГТС  $(f_M, f_R, f_P, f_{CS}, f_\psi^d)$  существует оператор управления объектом  $\gamma_i$ , который удерживает характеристики объекта  $\gamma_i$  в области допустимой надежности при помощи регулирующих воздействий  $r_{\gamma_i}^E(t)$ , а именно:

$$\forall \gamma_i \in (Ts \cup To \cup Tc), f_M; f_R; f_P, f_{CS}, f_\psi^d, \forall t, \exists f_C : u_{\gamma_i} \xrightarrow{r_{\gamma_i}^P(t)} \{ch_{\gamma_i}^{\gamma_i}\} \in CH_{\gamma_i}^{AL}, \quad (36)$$

где  $u_{\gamma_i}$  - вектор состояния объекта  $\gamma_i$ ;  $r_{\gamma_i}^P(t_S)$  - регулирующее воздействие, в момент времени  $t_S$ , удерживающее объект  $\gamma_i$  в области допустимой надежности средствами  $P$ .

Таким образом, выполнение второго целевого ориентира системы управления ГТС позволяет удерживать состояние объектов ГТС в состоянии требуемой надежности и оперативно реагировать на возникновение аварийных ситуаций.

Реализация второго целевого ориентира ГТС представлена на примере работы системы управления эксплуатационным состоянием участка городской улично-дорожной сети.

**В третьей главе** представлено комплексное решение проблемы структурной упорядоченности неоднородных межагентных отношений в модели ГТС путем совместного использования системы уникальной идентификации субъектов социально-экономической деятельности (СУИССЭД), единой системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации (ЕСКК ТЭСИ), единой адресной системы (ЕАС), подведомственных Федеральной службе государственной статистике по региону.



Осуществлено построение модели классификации межагентных отношений в ГТС. К основным составляющим модели относятся:  $B_t(TS)$ -динамический агентный граф ГТС, определяющий динамическое поведение элементов ГТС;  $ICD_i = \{icd_{di}\}$ - множество идентифицирующе-классифицирующих документов;  $ID_i = \{id_{\eta i}\} \equiv [СУИССЭД]$  - множество уникальных идентификаторов  $\eta = 1, \dots, n$  объекта  $\varepsilon_i$ , входящих в систему уникальной идентификации субъектов социально-экономической деятельности;  $CL_i = \{cl_i\} \equiv [ЕСКК ТЭСИ]$ - множество иерархических классификаторов объекта  $\varepsilon_i$ , входящих в единую систему классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации;  $f_M$ - оператор измерения;  $f_T$ - временной оператор;  $f_\psi^d$  - оператор классификации объектов ГТС в соответствии с множеством классификаторов  $CL_i$ ;  $f_r$  - оператора распознавания отношений;  $F = \{\phi_{r_{ij}}\}$ -множество функциональных отношений между объектами ГТС.

Динамический агентный граф ГТС выражается через сумму (склеивание) подграфов потребительского, транспортного и информационно сетевого поведения пользователей и элементов ГТС, в виде

$$B_t(TS) = \Gamma_t^H \left( \left( \Gamma_t^N(V; E) \cup \Gamma_t^T(V; E) \cup \Gamma_t^{IS}(V; E) \right); T \right) \cup \Gamma_t^{TS/H}(\Gamma_t(V; E); T), \quad (37)$$

где  $\Gamma_t^H \left( \left( \Gamma_t^N(V; E) \cup \Gamma_t^T(V; E) \cup \Gamma_t^{IS}(V; E) \right); T \right)$  - граф социально-экономической активности городского населения;  $\Gamma_t^N(V; E)$ - граф потребительской активности городского населения;  $\Gamma_t^T(V; E)$ - граф транспортной активности городского населения;  $\Gamma_t^{IS}(V; E)$  - граф информационно-сетевой активности городского населения;  $\Gamma_t^{TS/H}(\Gamma_t(V; E); T)$ - контрольный граф обратной связи ГТС.

Функциональные отношения  $F = \{\phi_{r_{ij}}\}$  между объектами идентифицируются посредством множества  $CLe$ , т.е.

$$CLe = [ЕСКК ТЭСИ \cup СУИССЭД \cup ЕАС], \quad (38)$$

где  $CLe$  - расширенная система классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации,  $CLe \equiv [ЕСКК ТЭСИ]$ .

Временной оператор  $f_T$ , операторы идентификации отношений  $f_r$  и классификации  $f_\psi^d$  разбивают множество  $F$  на множества упорядоченных отношений-классификаторов потребительской -  $F_N$ , социально-инфраструктурной -  $F_O$ , транспортной -  $F_{Ts}$  и информационно-сетевой -  $F_{IS}$  деятельности, т.е.

$$F \begin{bmatrix} f_T, f_\psi^d, f_r \end{bmatrix} = F_N \cup F_O \cup F_{Ts} \cup F_{IS}, \quad (39)$$

Таким образом, социально-экономическая активность пользователя  $h_i$ , представленная в составе динамического агентного графа ГТС (37), разбивается упорядоченным набором функциональных отношений (38) на однородные классы функциональных активностей, принимая следующий вид:

$$\begin{aligned} Bt_{h_i} &= \Gamma_t^H \left( \left( \Gamma_t^N(V;E) \cup \Gamma_t^T(V;E) \cup \Gamma_t^{IS}(V;E) \right); T \right) = \Gamma_t^{h_i} \left( \Gamma_t^{h_i}(A_{h_i}^N; R); T \right) \cup \\ &\cup \Gamma_t^{h_i} \left( \Gamma_t^{h_i}(A^O; R); T \right) \cup \Gamma_t^{h_i} \left( \Gamma_t^{h_i}(A^{TS/(N \cup IS)}; R); T \right) \cup \Gamma_t^{h_i} \left( \Gamma_t^{h_i}(A_{h_i}^{IS}; R); T \right) =, \quad (40) \\ &= \Gamma_t^{h_i}(F_N; T) \cup \Gamma_t^{h_i}(F_O; T) \cup \Gamma_t^{h_i}(F_{TS}; T) \cup \Gamma_t^{h_i}(F_{IS}; T) \end{aligned}$$

Классам функциональных активностей оператор классификации  $f_\psi^d$  ставит в соответствие надлежащие классификаторы из  $CLe$ . Таким образом, динамический агентный граф социально-экономической активности пользователя  $h_i$ , переводится в наборы потребительских -  $CLe_N$ , социально-инфраструктурных -  $CLe_O$ , транспортных -  $CLe_{TS}$  и информационно-сетевых -  $CLe_{IS}$  динамических функциональных графов классификаторов в виде:

$$Bt_{h_i} \xrightarrow{f_\psi^d} \Gamma_t^{h_i}(CLe_N; T) \cup \Gamma_t^{h_i}(CLe_O; T) \cup \Gamma_t^{h_i}(CLe_{TS}; T) \cup \Gamma_t^{h_i}(CLe_{IS}; T), \quad (41)$$

где  $CLe_N, CLe_O, CLe_{TS}, CLe_{IS} \in CLe$

Очевидно, что общий вид формулы (41) для динамического агентного графа ГТС (37) под действием оператора классификации  $f_\psi^d$  преобразуется в следующее выражение:

$$B_t(TS) \xrightarrow{f_\psi^d} BF_t(TS) = \Gamma_t(CLe; T) \quad (42)$$

В диссертации представлена реализация модели классификации межагентных отношений в ГТС на примере анализа процесса городской социально-экономической активности пользователя  $h_\alpha$  с номером  $id_1^h$ .

Информационное наполнение данной модели осуществляется СГТЛМ через регистрацию процесса социально-экономической активности пользователя.

Регистрация процесса социально-экономической активности пользователя позволяет сформировать достоверные матрицы корреспонденции и произвести построение динамического агентного графа поведения пользователя (см. рисунок).

Предложенный подход классификации и упорядоченности социально-экономического поведения городского населения в границах интеллектуальных транспортных систем, развертываемых Министерством транспорта РФ и Федеральной службой государственной статистики позволит с единых позиций реализовать процесс автоматического анализа транспортной мобильности городского населения, а также устанавливать причинно-следственные закономерности в функционировании ГТС.

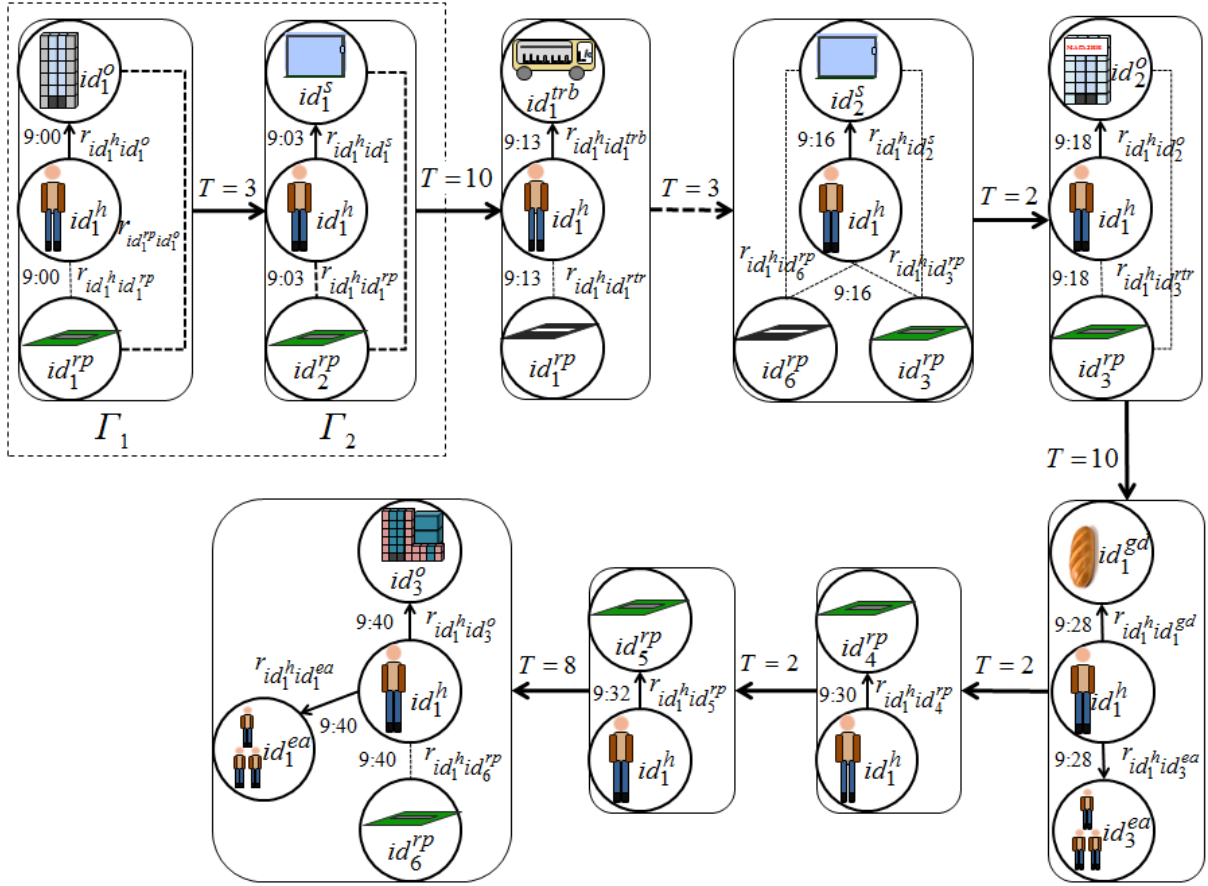


Рисунок. Динамический агентный граф пользователя  $h_\alpha$  с  $id_1^h$ .

В диссертации представлена обобщенная модель управления ГТП, в основе которой лежат разработанные выше модели.

**В четвертой главе** проведен анализ методов построения матриц корреспонденций, а также разработана модель распределения ГТП, в основе которой лежат временные модели цепочек дневной активности городского населения, привязанные к достоверным матрицам корреспонденций.

В качестве эталонных цепочек дневной активности выбраны наиболее вероятные цепочки на интервале 1 месяц, с учетом дня недели.

Тогда, эталонный поведенческий граф транспортного процесса, обусловленного поведением городского населения, имеет следующий вид:

$$\bigcup_{i=1}^N \bar{\Gamma}_t^{h_i} \left( \left( \Gamma_t^N(V; E) \cup \Gamma_t^T(V; E) \cup \Gamma_t^{IS}(V; E) \right); T \right) = \bigcup_{(ts/h)_i} \bar{\Gamma}_t^{(ts/h)_i} \left( \Gamma_t^{(ts/h)_i} (A_{h_i}^{TF}; R); T \right), \quad (43)$$

где  $\bar{\Gamma}_t^{h_i}$  - усредненная цепочка дневной активности  $\Gamma_t^{h_i}$  пользователя  $h_i$  на интервале 1 месяц;  $\bar{\Gamma}_t^{(ts/h)_i}$  - контрольный граф обратной связи пользователя  $h_i$  на интервале 1 месяц.

Транспортная активность городского населения функционально упорядочивается через расширенную систему классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации, в соответствии с (38)-(42).

На базе предложенной модели в программном пакете PTV Vision® VISUM осуществлен прогноз распределения динамических транспортных потоков на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена с вводом новых станций метрополитена: «Адмиралтейская», «Обводный канал», «Бухарестская» и «Международная».

По результатам проведенного исследования выработаны рекомендации, направленные на улучшения транспортного обслуживания городского населения в Санкт-Петербурге.

**В заключении** приведены основные результаты работы, которые свидетельствуют о том, что разработанные модели обеспечивают надлежащее управление ГТС в условиях неопределенности внешней информационной и качественно превосходят существующие аналоги.

### **III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Предложена структурная схема системы городского транспортно-логистического мониторинга, которая, в отличие от существующих схем, обеспечивает комплексное наблюдение за транспортными объектами и их состоянием посредством функций идентификации, аутентификации, распознавания состояний и местоопределения.

2. Предложена модель управления городскими транспортными потоками на основе распределенной системы управления динамическими транспортными потоками. В отличие от существующих моделей, которые опираются на первый и второй принципы Вардропа, в основу разработанной модели положены принципы рациональной самоорганизации, включающие целевые ориентиры пользователя и целевые ориентиры ГТС. В целевые ориентиры пользователя укладывается первый принцип Вардропа и принцип безопасного следования, в целевые ориентиры ГТС укладывается второй принцип Вардропа и принцип надежного функционирования. Модели, построенные с учетом предложенных принципов, обладают большей адекватностью и достоверностью.

3. Предложена модель классификации межагентных отношений в ГТС. Классификацию отношений социально-экономической активности городского населения в системах управления ГТС, в отличие от существующих методов, опирающихся на абстрактные характеристики, типа: дом-работа или работа-магазин, предлагается производить с использованием расширенной системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации, увязанной с Федеральной службой государственной статистики по региону.

4. Предложена модель распределения ГТП. В основу модели положены эталонные цепочки дневной активности городского населения, упорядочивание которых осуществляется в границах расширенной системы классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации. Данная модель превосходит существующие модели, так как создание примыканий между районами, маршруты следования подвижных объектов и отрисовка

карты может осуществляться в автоматическом режиме с использованием информации полученной от системы городского транспортно-логистического мониторинга. На базе предложенной модели в программном пакете RTV Vision® VISUM осуществлен прогноз распределения динамических транспортных потоков на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена с вводом новых станций метрополитена.

## **СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертации:**

1. Селиверстов, Я.А. Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах [Текст] / Я.А. Селиверстов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 1/2013, С.43-49.

2. Селиверстов, Я.А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса [Текст] / Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 4(200). С.57-68

3. Селиверстов, Я.А. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды [Текст] / А.Л. Стариченков, Я.А. Селиверстов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. №6 (210). С. 81-94.

4. Селиверстов, Я.А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса [Текст] / Я.А. Селиверстов // Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №5 (24) [Электронный ресурс]-М.: Науковедение, 2014 -.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/159TVN514.pdf>, свободный. - Загл. с экрана.- Яз. рус. англ., С. 1-39.

5. Селиверстов, Я.А. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга [Текст] / А.Л. Стариченков, Я.А. Селиверстов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 1/2015.С. 29-36.

**Научные публикации в других изданиях:**

6. Селиверстов, Я.А. О применении методов искусственного интеллекта при построении современных логистических [Текст] / Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов // Сб. трудов IX-я Междунар. науч.-практ. конф. 15, 16 апреля 2010г./ ред. кол.: В.С. Лукинский (отв. ред.) [и др]. – СПб. : СПбГИЭУ, 2010. – С.355-357.

7. Селиверстов, Я.А. Элементы моделирования процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах [Текст] / Я.А. Селиверстов // Труды конференции Всероссийской научно- практической конференции

«Транспорт России: проблемы и перспективы 2011». 22-23 ноября 2011г. СПб, ООО «Ю-Питер», 2011.С. 83-89.

8. Селиверстов, Я.А. О построении достоверных математических моделей транспортных процессов в коммуникационных сетях [Текст] / Я.А. Селиверстов // Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. «Логистика: современные тенденции развития» 19 апреля 2013г. / ред. кол.: В.С. Лукинский (ред.) [и др]. – СПб. : СПбГИЭУ, 2013. – С.364-367. ISBN 978-5-9978-0571-5.

9. Селиверстов, Я.А. Подходы к построению достоверных транспортных моделей [Текст] / Я.А. Селиверстов // Материалы работ молодежной научной конференции 23-24 мая 2013 года «Студенты и молодые ученые – инновационной России». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 370 с. ISBN 978-5-7422-3958-1.

10. Селиверстов, Я.А. Подходы к построению достоверных транспортных моделей[Текст]/ Я.А. Селиверстов // III Научно – практическая конференция молодых ученых РАН «Фундаментальная и прикладная наука глазами молодых ученых. Успехи, перспективы, проблемы и пути их решения» Санкт-Петербург, 5-7 июня 2013 г.,-СПб,:ООО «Издательство «ЛЕМА» - 110 с.

11. Селиверстов, Я.А. Моделирование процессов перераспределения транспортных потоков на городской транспортной сети Санкт-Петербурга с учетом ввода Приморской и Невской линий внутреннего[Текст] / Я.А. Селиверстов // Транспорт России: проблемы и перспективы-2014. Материалы международной научно-практической конференции. 1-2 октября 2014 г. СПб.: ИПТ РАН.- Санкт-Петербург, 2014.-319с.