На правах рукописи

Тесёлкин Александр Александрович

МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАТРИЦ ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

Специальность: 05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Хабаров Валерий Иванович**

Официальные оппоненты: -

-

Ведущая организация: -

Защита состоится «__» _____ 201_ года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» _______ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Фаддеенков Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современное состояние и актуальность темы исследования. Для эффективного стратегического и оперативного управления транспортным комплексом крупных городов, агломераций и регионов в современных условиях требуются системы поддержки принятия решений. Подобными системами являются интеллектуальные транспортные системы (ИТС). В контексте перехода России к цифровой экономике, разработка ИТС является приоритетной задачей для мегаполисов страны. В основе интеллектуальных транспортных систем лежит математическая транспортная модель, которая должна корректно описывать транспортную ситуацию в исследуемой области. Следовательно, ключевым моментом представляется идентификация параметров транспортной модели.

Центральной задачей разработки транспортной модели является определение равновесного состояния транспортной системы, т.е. задача о распределении потоков в сети, которая предполагает два основных этапа. На первом этапе оцениваются *матрицы корреспонденций* на основе исходных данных о транспортном потоке и его поведении. Второй этап заключается в распределении матриц корреспонденций на *граф транспортной сети* (или *транспортный граф*), т.е. в решении задачи о поиске транспортных потоков или *задачи транспортного равновесия*.

Задача транспортного равновесия, в свою очередь, может быть сведена к оптимизационной задаче. С основными исследованиями в этой области можно ознакомиться в работах В.И. Швецова и коллектива авторов под редакцией А.В. Гасникова. За последние полвека было разработано множество методов решения оптимизационной задачи транспортного равновесия.

Ограничения в оптимизационной задаче при построении математической транспортной модели определяются элементами матрицы корреспонденций. Проблема построения матрицы корреспонденций заключается как в сложности имеющихся алгоритмов, так и в достоверности используемой информации. Наиболее известными являются гравитационные и энтропийные методы, предложенные еще во второй половине XX века. Эти методы предполагают использование косвенной ненаблюдаемой информации об объемах транспортного потока на основе социально-экономических статистических показателей и информации о подвижности населения, получаемой из данных опросов.

Второй класс методов образуют статистические методы оценки матриц корреспонденций из данных наблюдений за интенсивностями транспортных потоков. В мировой литературе подобные методы появились 20-40 лет назад в работах P. Robillard, H.J. Van Zuylen, L.G. Willumsen, Y. Vardi и обозначаются термином сетевая томография (network tomography). Стоит отметить, что эти методы вызывают интерес не только в транспортных, но и в компьютерных сетях.

Статистические методы оценки матриц корреспонденций, по большей части, основаны на методах моментов, максимального правдоподобия и байесовских методах, стоит выделить работы S. Bera, K.V. Krishna Rao, C. Tebaldi и M. West, а также L.M. Hazelton и B. Li. В отечественной литературе вопрос исследован недостаточно полно, некоторые результаты представлены в диссертационной работе Р.Ю. Лагерева.

В отдельную группу можно выделить методы, основанные на марковских свойствах транспортных корреспонденций. В работе Ц. Ли, Д. Джаджа и А. Зельнера рассмотрены вопросы оценки параметров марковских процессов по агрегированным рядам, которые нашли интерпретацию применительно к задачам расчета корреспонденций на сетях. Развитие этих методов для различных состояний видится перспективным направлением исследований, так как они позволят существенно расширить инструментарий оценки корреспонденций. Стоит отметить, что транспортная проблематика является актуальной темой для применения статистики случайных процессов.

Статистические методы оценки предполагают наличие наблюдений за транспортным потоком. Однако сбор данных является дорогостоящим мероприятием, поэтому возникает задача планирования наблюдений. В работах H. Yang и J. Zhou предложен класс задач, получивший название «traffic counting location (TCL) problem». В последнее время разработаны несколько методов, направленных на решение этой проблемы (см. L.P. Gan, H. Yang и S.C. Wong). Однако в литературе слабо освещена задача планирования наблюдений для марковского представления транспортной сети.

Таким образом, применительно к задачам транспортного моделирования интерес представляет развитие методов оценки матриц корреспонденций по наблюдениям за потоками в транспортном графе и задача оптимального планирования этих наблюдений.

Цели и задачи исследования. Основной целью диссертационного исследования является разработка методов планирования наблюдений и оценки матриц корреспонденций по наблюдениям за потоками в транспортных графах и последующее их применение в задачах транспортного моделирования.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1) Выполнить классификацию моделей наблюдений за потоками в графе транспортной сети и соответствующих методов оценки матриц корреспонденций.

2) Разработать новый метод оценивания корреспонденций для определенной модели наблюдения.

3) Сформулировать задачу планирования наблюдения для оценки корреспонденций в транспортном графе и разработать методы решения поставленной задачи.

4) Применить новые методы оценки корреспонденций и планирования наблюдений на тестовых и реальных транспортных сетях.

5) Разработать программный продукт для моделирования и анализа транспортных сетей с реализацией предложенных методов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования транспортных потоков, методы оптимизации, а также теории графов, математической статистики и марковских процессов, теории оптимального планирования экспериментов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1) предложена классификация моделей наблюдения за транспортными потоками;

2) разработан метод оценки матрицы корреспонденций на основе анализа параметров соответствующих марковских моделей при наличии наблюдений за транспортными потоками;

3) поставлена и решена задача планирования наблюдений за потоками в транспортном графе для оценки корреспонденций;

4) разработан метод решения задачи планирования наблюдений за потоками в транспортном графе на основе оценок максимального правдоподобия;

5) разработан метод решения задачи планирования наблюдений за потоками в графе на основе байесовских оценок.

Положения, выносимые на защиту:

1) Классификация моделей наблюдения за потоками в транспортном графе.

2) Метод оценки матрицы корреспонденций на основе анализа параметров соответствующих марковских моделей при наличии наблюдений за транспортными потоками.

3) Метод решения задачи планирования наблюдений за потоками в транспортном графе на основе оценок максимального правдоподобия для оценивания корреспонденций.

4) Метод решения задачи планирования наблюдений за потоками в транспортном графе на основе байесовских оценок для оценивания корреспонденций.

Личный творческий вклад автора в совместных публикациях заключается в:

– систематизации свойств транспортного графа, необходимых для применения в задачах транспортного моделирования;

– исследовании, формализации и классификации моделей наблюдения за транспортными потоками;

– разработке метода оценки корреспонденций на основе анализа параметров соответствующих марковских моделей при наличии наблюдений;

– разработке метода решения задачи планирования наблюдений в транспортном графе на основе оценок максимального правдоподобия;

– разработке и исследовании байесовского подхода к решению задачи планирования наблюдений в транспортном графе;

– создании математических транспортных моделей г. Новосибирска, Новосибирской агломерации и Новосибирской области;

– разработке логической и алгоритмической части программного обеспечения для моделирования и анализа транспортных сетей.

Практическая ценность заключается в разработанных методах оценки корреспонденций, которые основаны на наблюдениях, что позволяет применять их как для вычисления отдельных матриц корреспонденций, так и для калибровки транспортных моделей. Разработанные постановка и методы решения задачи планирования наблюдений формируют новый подход к проблеме мониторинга транспортных потоков, повышают информативность собираемых данных и эффективность применения методов оценки корреспонденций по наблюдениям. Предложенные методы нашли отражение в решении практических задач при разработке комплексных математических транспортных моделей г. Новосибирска, Новосибирской агломерации, Новосибирской области и ряда других научно-исследовательских работ по заказу государственных органов и бизнеса.

Разработанные методы реализованы в программном комплексе «TransportKit» и прошедшей государственную регистрацию программе для ЭВМ «Программная система - прототип интеллектуальной системы управления пассажирским комплексом города и его агломерации» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618578 от 04.08.2017).

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы в ряде научно-исследовательских проектов, в которых автор выступал основным исполнителем:

– №386-11 «Разработка прототипа интеллектуальной системы управления пассажирским комплексом г. Красноярска и его агломерации»» от 01.02.2011. Заказчик – ОАО «Краспригород».

– Контракт №290-13 «Разработка комплексной транспортной модели города Новосибирска» от 31.09.2013. Заказчик – МКП «Горэлектротранспорт».

– Государственный контракт №2016-11 "Разработка Комплексной транспортной схемы Новосибирской агломерации" от 9 июня 2016 года. Заказчик – Министерство строительства Новосибирской области.

– Государственный контракт №66-ОК/2017 "Разработка транспортной стратегии Новосибирской области до 2030 года" от 20 ноября 2017 года. Заказчик – Министерство транспорта и дорожного хозяйства Новосибирской области.

– Муниципальный контракт №126-13 «Разработка транспортной модели по объекту «Магистраль непрерывного движения от Красного проспекта до городской черты в направлении Бийск-Ташанта»» от 13 июня 2013 года. Заказчик – МКУ «Управление дорожного строительства».

– Государственный контракт №396-12 «Выполнение работ по обследованию пассажирских потоков на межмуниципальных маршрутах по формированию проекта межмуниципальной маршрутной сети Красноярского края» от 14 декабря 2012 года. Заказчик – Министерство транспорта Красноярского края.

– №013-р/2014 «Моделирование транспортных потоков на проектируемых транспортных развязках на км 15+500 и км 23+000 а/д К-17р «Новосибирск – Кочки – Павлодар (в пределах РФ)»» от 01 марта 2014 года. Заказчик – ООО «РосИнсталПроект».

– №83-15 «Работы по созданию имитационной транспортной модели пешеходных мостов около ТЦ «Галерея Новосибирск»» от 23.03.2015. Заказчик – ООО «Новомолл».

– №132-15 «Подготовка экспертизы на основе имитационной транспортной модели о пропускной способности железнодорожного переезда по улице Кубовая в Заельцовском районе» от 18.05.2015. Заказчик – ООО «Холдинговая компания «Группа компаний «Стрижи»».

– № 188-15 «Имитационное моделирование микрорайона в границах улиц: Б.Богаткова, Лескова, Покатная, Пролетарская» от 01 июля 2015 года. Заказчик – ООО «МетаИнжиниринг».

– № 317-15 «Имитационное моделирование пересечения улицы Кубовой и Краснояровского шоссе в Заельцовском районе г. Новосибирска» от 20 октября 2015 года. Заказчик – ООО «Холдинговая компания ГК «Стрижи»».

– № 353-15 «Имитационное моделирование вариантов организации дорожного движения в окрестности ТРК «Европейский» в г. Новосибирске» от 1 декабря 2015 года. Заказчик – ООО «МИГ-1».

– Муниципальный контракт № 27/2016 «Пути развития системы электронной оплаты проезда в наземном общественном транспорте города Новосибирска» от 08 декабря 2016 года. Заказчик – Мэрия города Новосибирска.

Часть исследований выполнена в рамках гранта Новосибирского государственного технического университета (№035 – НСГ – 15, в 2015-2016 гг.).

Полученные результаты, представленные в диссертационной работе, внедрены в практику деятельности Министерства транспорта и Министерства строительства Новосибирской области, департамента транспорта и дорожноблагоустроительного комплекса мэрии города Новосибирска, научно-исследовательской лаборатории «Информационные технологии транспорта» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» для решения задач по математическому моделированию транспортных потоков.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует п. 5 области исследований «Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечениях, …» паспорта специальности научных работников 05.13.17 – «Теоретические основы информатики» по техническим наукам.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы представлены на международном форуме по стратегическим технологиям "International Forum on Strategic Technology, IFOST-2016", Новосибирск, 2016 г.; международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2016 г.; международной конференции "International Conference Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'16", Рига, Латвия, 2016 г.; международных научно-технических конференциях «Политранспортные системы», Новосибирск, 2014г. и 2016 г.; международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте, ИнтеллектТранс-2014», Санкт-Петербург, 2014 г.; международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии», Новосибирск, 2014 г.; международных форумах «Транспорт Сибири», Новосибирск, 2015г. и 2016 г.; международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика», Новосибирск, 2017г.; всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 2015г., 2016г. и 2017 г.; международной научно-методической конференции «Актуальные вопросы образования. Роль университетов в формировании информационного общества», Новосибирск, 2018г.; городских конференциях молодых исследователей «Progress Through Innovation», Новосибирск, 2014г. и 2016 г.; конференции в рамках «Дней науки НГТУ», Новосибирск.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликованы 24 печатные работы, в том числе: 4 статьи в научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК; 3 публикации в трудах международных конференций, индексируемых Scopus и Web of Science (WoS); имеется одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 162 страницы, основная часть изложена на 135 страницах. Работа состоит из введения, 5-ти разделов основного содержания, включая 11 таблиц и 68 рисунков, заключения, списка использованных источников из 102 наименований и 3 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризованы научная новизна работы, ее практическая значимость, реализация и апробация результатов работы, приведено краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе работы приводится краткий обзор методических подходов к построению транспортной модели. Основой для транспортной модели является модель соответствующей транспортной сети.

Рассматривается модель физической транспортной сети и ее описание на языке теории графов. Транспортная сеть – это связный ориентированный взвешенный граф $G(V, E)$, где V – множество вершин, а E – множество ребер. Каждое ребро графа $e \in E$ характеризуется некоторым набором количественных атрибутов, называемых весами ребра. Далее такую конструкцию будем называть *транспортным графом*.

Выделяются три подмножества в множестве вершин V: первое $S \subseteq V$ содержит вершины, порождающие потоки, т.е. элементы множества S являются источниками движения; второе $D \subseteq V$ содержит вершины, поглощающие потоки, элементы множества D являются стоками. Еще одно подмножество $M \subseteq V$ состоит из промежуточных, или внутренних, вершин.

Любая поездка в транспортном графе $G(V, E)$ начинается в вершине-источнике $i \in S$ и заканчивается в вершине-стоке $j \in D$. Пара вершин (i, j) называется *потокообразующей*.

Исходный транспортный граф $G(V, E)$ можно преобразовывать в другие графовые структуры, которые относятся к транспортным графам. *Реберным графом* $L(G)$ от графа G называется граф пересечений $\Omega(E)$. Аналогичным образом можно преобразовывать и реберный граф, получая *итерированный реберный* граф. В общем случае такой граф описывается рекуррентным соотношением $L^k(G) = L(L^{k-1}(G))$ (см. рисунок 1 для $k=2$).

Также транспортными графами являются и *транзитивные замыкания* исходного графа G (см. рисунок 2). *Транзитивным замыканием k-го порядка графа G* называется множество:

$$G^k = \left\{ T^k(i) : \forall i \in V \right\},$$

где $T^k(i)$ – *прямое транзитивное замыкание k-го порядка вершины* $i \in V$:

$$T^k(i) = \left\{ i \cup \Gamma^1(i) \cup \Gamma^2(i) \cup \ldots \Gamma^k(i) \right\},$$

а $\Gamma^k(i)$ – прямое отображение *k-го порядка* вершины $i \in V$:

$$\Gamma^k(i) = \Gamma^{k-1}\left(\Gamma^1(i)\right); \;\; \Gamma^1(i) = \left\{ j \in V :\; \exists e\left(i, j\right) \in E \right\}.$$

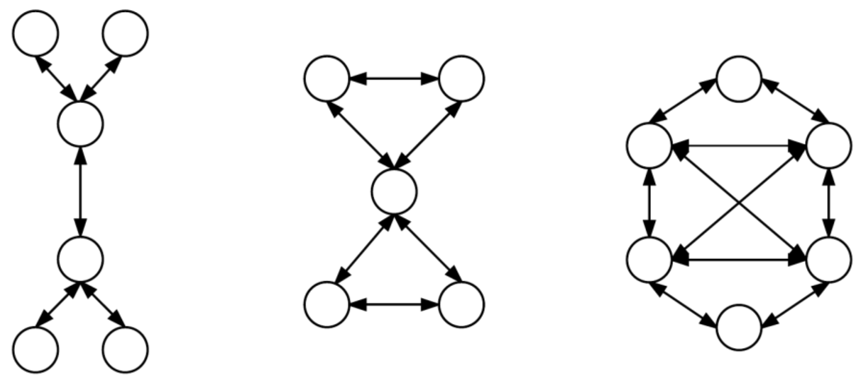

Рисунок 1 – Преобразования реберных транспортных графов

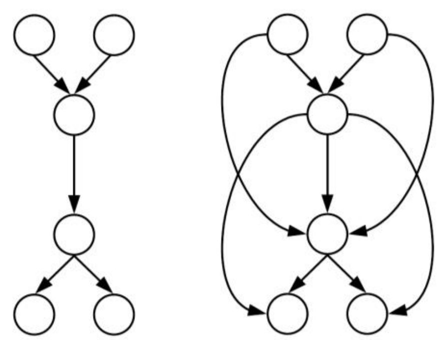

Рисунок 2 – Транзитивное замыкание 2-го порядка транспортного графа

Центральной проблемой при построении математической транспортной модели является задача поиска распределения потока в транспортной сети. В основе этой задачи лежит первое правило Вардропа, по которому участники движения выбирают пути следования: «пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты, соответствующие их минимальным транспортным расходам».

Имеется некоторый ориентированный взвешенный граф транспортной сети $G(V, E)$. Общий объем потока в графе формализован в виде *матрицы корреспонденций* $\rho = \left\{\rho_{ij}\right\}$ между потокообразующими парами вершин.

Между потокообразующей парой вершин (i, j) существует множество альтернативных маршрутов или путей $R_{(i,\,j)}$. Потоки по всем альтернативным маршрутам между i и j образуют множество:

$$X_{(i,j)} = \{x_r \geq 0 : r \in R_{(i,j)}, \sum_{r \in R_{(i,j)}} x_r = \rho_{\text{ij}}\}.$$

Необходимо получить *равновесное* распределение потоков $x^* \in X$ по графу $G(V, E)$ с учетом ограничений в виде ρ и структуры самого графа G. *Равновесным* называется такое распределение потоков, при котором ни один из участников движения не может изменить свой путь следования, не увеличив при этом затраты на передвижение.

Утверждение 1. Для каждой поездки между парой потокообразующих вершин (i, j) выбирается путь $r \in R_{(i,j)}$ с наименьшими затратами:

$$\upsilon_r(x^*) = \min_{q \in R_{(i,j)}} \upsilon_q(x^*), \qquad (1)$$

где $\upsilon_r(x^*)$ - функция затрат на передвижение по пути r в зависимости от распределения потоков x^*.

Потоки $x^* \in X$, удовлетворяющие условию (1), называются *равновесными*.

Утверждение 2. Вектор $x^* \in X$ удовлетворяет условию равновесия (1) тогда и только тогда, когда является решением вариационного неравенства:

$$\upsilon(x^*)(x - x^*) \geq 0, \forall x \in X. \qquad (2)$$

При определенных условиях вариационное неравенство (2) может быть сведено к оптимизационной задаче:

$$F(x) = \sum_{e \in E} \int_0^y \tau_e(z)dz \to \min, \qquad (3)$$

где $\tau_e(y)$ - затраты на прохождение ребра $e \in E$ в зависимости от идущего по нему потока y_e.

В оптимизационной задаче (3) существуют линейные ограничения:

$$\forall e \in E, r \in R \quad y_e = \sum_{e \in R} x_r, \ x_r \geq 0, \sum_{r \in R_{(i,j)}} x_r = \rho_{\text{ij}}. \qquad (4)$$

Решение задачи (3) и (4) может быть получено, например, с помощью *метода Франка-Вульфа* или *проекционных* методов.

При поиске транспортного равновесия необходимо оценить матрицы корреспонденций. Выделяется класс методов, основанных на физических аналогиях (например, *гравитационная модель*), и класс статистических методов оценки корреспонденций по натурным наблюдениям за транспортными потоками. В работе приведен обзор различных существующих подходов к оцениванию корреспонденций.

Во второй главе основное внимание уделяется моделям наблюдения за потоками в транспортном графе для оценки корреспонденций. Ниже приведено описание движения микрообъектов (транспортного потока) в интервал времени [t; t+1].

$$n(t+1) = P(t) \cdot n(t).$$

$P(t)$ - матрица вероятностей перехода микрообъектов в смежные вершины в соответствующий интервал времени, $n(t)$ - вектор размерности m, элементы которого отображают количество микрообъектов в каждой вершине в момент времени t. Ниже предполагается стационарность матрицы P из-за устойчивого характера движения микрообъектов. Выделяется несколько типов моделей наблюдения за поведением микрообъектов (транспортным потоком).

Классификация моделей наблюдения по расположению «наблюдателя»:

– *«Наблюдатель» в вершине*. «Наблюдатель» находится в некоторой вершине графа G и фиксирует только факт нахождения микрообъекта в вершине $i \in V$ в момент времени t. Это означает, что наблюдаются только агрегированные данные. Накапливается статистика $n_i(t), i \in V$ в моменты времени $t = \{0,1,\ldots,T\}$.

– *«Наблюдатель» на ребре*. «Наблюдатель» находится на некотором ребре графа G и фиксирует переходы микрообъектов из вершины $i \in V$ в вершину $j \in V$ в интервал времени (t–1; t). Накапливается статистика $n_{ij}(t),\ i, j \in V$ в интервалы времени $(t-1;t) \in \{(0;1),(1;2)\ldots,(T-1;T)\}$. Причем $n_i(t) = \sum_{j=1}^{m} n_{ij}(t)$.

Классификация моделей наблюдения по полноте собираемой информации:

– *Модель наблюдения при полной наблюдаемости.* Все вершины из множества V являются наблюдаемыми в любой момент времени.

– *Модель наблюдения при частичной наблюдаемости в множестве вершин.* Только часть вершин (множество V_O) из множества V являются наблюдаемыми. Остальные вершины (множество $V \backslash V_O$) остаются ненаблюдаемыми на протяжении всего времени наблюдения.

– *Модель наблюдения при частичной наблюдаемости по времени.* Актуальность модели наблюдения возникает только при нестационарной матрице переходных вероятностей $P(t)$.

Классификация моделей наблюдения по типу «наблюдателя»:

– *Локальный «наблюдатель»*. Все микрообъекты являются для «наблюдателя» неразличимыми, т.е. собираются только агрегированные данные $n_i, n_{ij},\ \ i, j \in V$ в вершинах или ребрах графа G. Эту модели наблюдения можно реализовать посредством одного наблюдателя.

– *Распределенный «наблюдатель»*. «Наблюдатель» может идентифицировать конкретный микрообъект, определить его траекторию и передать информацию о нем следующему *«наблюдателю»*. Таким образом, можно накапливать статистику о траекториях движения микрообъектов. Из-за сложности реализации распределенного «наблюдателя» можно рассматривать как одного или нескольких локальных «наблюдателей» для более сложного графа (например, транзитивного замыкания графа G).

Классификация моделей наблюдения по виду транспортного графа:

– *Модель наблюдения в классическом транспортном графе*. Наблюдается количество микрообъектов $n_e(t)$ на ребре $e \in E$ транспортного графа G за интервал $(t–1;\ t)$ или количество микрообъектов $n_i\ (t)$, фиксируемых в вершине $i \in V$ в момент времени t.

– *Модель наблюдения за перетоком в сети*. Наблюдается количество микрообъектов на ребре реберного графа $q \in L^k(G)$ за время t: $n_q\ (t)$. Интерпретация: интенсивность перетоков k-й степени.

– *Модель наблюдения за траекторией*. Траекторией назовем ребро в графе транзитивного замыкания $G^*(V^*, E^*)$. Наблюдается число микрообъектов на ребре $e^k \in E^k$ графа транзитивного замыкания k-й степени G^k за время t: $n_{ek}(t)$. Интерпретация: интенсивность потока на маршруте длиной не более чем k.

– *Модель наблюдения за корреспонденцией*. При такой модели наблюдения строится полный граф $F(G)$ между вершинами из множества S и D на основе графа G. Наблюдается количество микрообъектов на ребре графа $F(G)$, переместившихся из вершины $i \in S$ в вершину $j \in D$ за время t: $\rho_{ij}(t)$. Интерпретация: размер корреспонденции.

Если предположить, что движение микрообъектов по транспортному графу – это процесс «без памяти», то он может быть описан апериодической *марковской цепью с дискретным временем* $\{X_t\}$, причем каждое состояние цепи ассоциировано с некоторой вершиной графа G. Т.е. множество вершин V графа G совпадает с пространством состояний I (далее – V) марковской цепи $\{X_t\}$. Соответственно, множество ребер E графа G ассоциируется с множеством возможных переходов в смежные состояния. Марковская цепь $\{X_t\}$ характеризуется стохастической матрицей переходных вероятностей $P=\left\{p_{ij}\right\},\ \left(i, j=1,\ldots,m\right)$ и начальным распределением $\lambda=\left\{\lambda_i\right\},\ \left(i=1,\ldots,m\right)$. В общем случае матрица P зависит от времени t: $P(t)=\left\{p_{ij}(t)\right\}$. Каждый элемент матрицы переходных вероятностей есть условная вероятность перехода из состояния i в момент времени t в состояние j в момент времени t+1: $p_{ij}(t)=P\left\{X(t+1)=j \middle| X(t)=i\right\},\ \left(i, j \in V;\ t=0,...,T\right)$.

Любое движение микрообъектов по транспортному графу можно свести к процессу «без памяти», используя марковские цепи более высоких порядков (вероятность перехода в следующее состояние может зависеть от нескольких предыдущих переходов) или преобразованные транспортные графы.

Исходя из специфики транспортного графа $G(V, E)$, множество его вершин делится на три блока. Это разбиение предопределяет структуру матрицы переходных вероятностей соответствующей цепи Маркова в блочном каноническом виде (5). P_D, P_M, P_S – матрицы переходных вероятностей внутри множеств D, M, S соответственно. R_{MD} есть матрица вероятностей перехода из состояний множества M в состояния множества D. R_{SD}, R_{SM} - матрицы вероятностей перехода из состояний множества S в состояния множества M и D, соответственно.

$$P = \begin{pmatrix} P_D & 0 & 0 \\ R_{MD} & P_M & 0 \\ R_{SD} & R_{SM} & P_S \end{pmatrix}. \tag{5}$$

В качестве метода оценивания матрицы $P = \left\{ p_{ij} \right\}, \left(i, j = 1, \ldots, m \right)$ при наличии наблюдения за переходами микрообъектов $n_{ij} = \sum_t n_{ij}(t)$ рассмотрим *метод максимального правдоподобия* и *байесовский метод*. *Функция правдоподобия* в этом случае равна:

$$L\left(n, P\right) = \prod_{i=1}^{m} \prod_{j=1}^{m_i} p_{ij}^{\;n_{ij}} = \prod_{i=1}^{m} p_{i1}^{n_{i1}} p_{i2}^{n_{i2}} \ldots p_{im_i-1}^{n_{im_i-1}} \left(1 - \sum_{j=1}^{m_i-1} p_{ij} \right)^{n_i - \sum\limits_{j=1}^{m_i-1} n_{ij}} . \tag{6}$$

Оценка максимального правдоподобия (ОМП) p_{ij} имеет вид:

$$\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, i = 1, \ldots, m; j = 1, \ldots, m_i . \tag{7}$$

Байесовскую оценку p_{ij} можно получить с помощью моды апостериорного распределения:

$$\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij} + a_{ij} - 1}{\sum\limits_j n_{ij} + \sum\limits_j a_{ij} - m_i}, \;\; i = 1, ..., m, \; j = 1, ..., m_i . \tag{8}$$

Если имеется только агрегированная информация о нахождении микрообъектов в вершинах $n_i(t)$, то оценки p могут быть найдены как решение задачи квадратичного программирования:

$$\hat{p} = \arg\min_p \left(n - Up \right)^T \left(n - Up \right), \tag{9}$$

с учетом ограничений (условий нормировки):

$$p_{ij} \geq 0,\ \sum_j p_{ij} = 1,$$
$$\forall i, j = 1, \ldots, m$$

где U – блочная диагональная матрица с элементами:

$$U_j = \begin{bmatrix} n_1(0) & n_2(0) & \ldots & n_m(0) \\ n_1(1) & n_2(1) & \ldots & n_m(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_1(T-1) & n_2(T-1) & \ldots & n_m(T-1) \end{bmatrix}.$$

В работе рассматриваются различные методы оценки матриц корреспонденций в зависимости от моделей наблюдений. Особый интерес представляет новый метод оценивания на основе канонического представления марковской цепи и матрицы переходных вероятностей (5). Использование марковского подхода для локальных моделей наблюдения исключает необходимость в формировании матрицы назначения для вычисления корреспонденций, что расширяет возможности применения метода.

Множество D целиком состоит из поглощающих состояний, а из любого состояния множества S невозможно попасть в другое состояние этого множества, т.е. все состояния множества S являются невозвратными, множества S и D напрямую не связаны, поэтому:

$$P_D = I,\ P_S = 0,\ R_{SD} = 0,$$

где I - единичная матрица.

Таким образом, матрицу P можно переписать в следующем виде:

$$P = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ R_{MD} & P_M & 0 \\ 0 & R_{SM} & 0 \end{pmatrix}. \qquad (10)$$

Обозначим B_{SD} как матрицу опосредованных вероятностей перехода из состояний множества S в состояния множества D. Опосредованную вероятность перехода b_{ij} из некоторого невозвратного состояния i в поглощающее j можно получить следующим образом:

$$b_{ij} = p_{ij} + \sum_{k \in T} p_{ik} b_{kj}.$$

Матрица опосредованных переходных вероятностей B_{SD} равна:

$$B_{SD} = R_{SM} \left(I - P_M\right)^{-1} R_{MD}.$$

Матрица $(I - P_M)^{-1}$ называется *фундаментальной* матрицей марковской цепи и является невырожденной.

Результирующая матрица корреспонденций $\hat{\rho}$ может быть вычислена как:

$$\hat{\rho} = B_{SD} \cdot \lambda, \tag{11}$$

где λ - диагональная матрица, образованная начальным распределением соответствующей марковской цепи $\{X_t\}$. λ_{ii} равны общему числу микрообъектов (суммарному потоку) в i-й исходной вершине ($i \in S$). Аналогично, с точностью до перестановки, можно рассмотреть диагональную матрицу финального (предельного) распределения марковской цепи π . Фактически, элементы матрицы соответствуют потоку, въезжающему в конечные вершины (D).

$$\hat{\rho} = \pi \cdot B_{SD}. \tag{12}$$

В третьей главе рассматриваются вопросы планирования наблюдений за транспортными потоками для оценки корреспонденций. Приводится новая постановка задачи планирования наблюдений за потоками в транспортном графе.

Задачу планирования наблюдений для модели с локальными «наблюдателями» на ребрах графа можно интерпретировать следующим образом. Наблюдатели фиксируют переходы микрообъектов, находясь в состояниях $\{i = 1,...,m;\, i \in V\}$ в моменты времени $t = \{0,1,\ldots,T\}$. Для каждого состояния известны допустимые переходы (всего m_i). На весь процесс отведен ресурс в N наблюдений. Каждый наблюдатель получает часть этого ресурса $\{n_i, i = 1,..,m\}$, причем $\sum\limits_{i=1}^{m} n_i = N$. Требуется найти распределение $n^* = \{n_i, i = 1,..,m\}$, максимизирующее некоторый функционал от *информационной матрицы Фишера* $I(P,n)$. Состояния цепи и соответствующий им объем ресурса $\{n_i \in \mathbb{R}, i \in V\}$ образуют *план наблюдений*. Элементы матрицы переходных вероятностей P являются параметрами.

$$I(P,n) = E\left(\left[\frac{\partial \ln L(n,P)}{\partial P}\right]^2\right). \tag{13}$$

Постановка задачи планирования наблюдений предлагается в следующем виде:

$$n^* = \arg\max_{n} \Phi\left[n,\, I(P,n)\right], \tag{14}$$

где Φ - некоторый критерий оптимальности.

Для решения обозначенной задачи планирования наблюдений рассмотрены методы на основе ОМП-оценок и байесовских оценок.

Для *классического случая (ОМП-оценки)* информационная матрица Фишера $I(P,n)$ является блочно-диагональной:

$$I(P,n) = E\begin{bmatrix} A_1 & \cdots & O \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ O & \cdots & A_m \end{bmatrix}, \tag{15}$$

где с учетом (13) для всех $i = 1,...,m$:

$$A_i = \begin{bmatrix} \frac{n_{i1}}{p_{i1}^2} + \frac{n_{im_i}}{p_{im_i}^2} & \cdots & \frac{n_{im_i}}{p_{im_i}^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{n_{im_i}}{p_{im_i}^2} & \cdots & \frac{n_{im_i-1}}{p_{im_i-1}^2} + \frac{n_{im_i}}{p_{im_i}^2} \end{bmatrix}.$$

Для исключения зависимости от P рассматриваются минимаксные D-оптимальные планы, для которых задача (14) имеет вид:

$$n^* = Arg \max_n \min_P \ln \det I(P,n). \tag{16}$$

С учетом (15), для решения задачи (16) необходимо найти:

$$\min_P \ln \det I(P,n) = \min_P \left((m_i - 1) \sum_{i=1}^m \ln n_i + \sum_{i=1}^m \ln B_i \right),$$

где

$$B_i = \prod_{j=1}^{m_i-1} \frac{1}{p_{ij}} + \sum_{k=1}^{m-1} \prod_{j \neq k}^{m_i-1} \frac{1}{p_{im}} \frac{1}{p_{ij}}.$$

Решением задачи является:

$$n_i^* = \frac{N(m_i - 1)}{\sum_{i=1}^m (m_i - 1)} \forall i = 1,\ldots,m. \tag{17}$$

Таким образом, план наблюдения (распределение ресурса) для классического случая можно интерпретировать следующим образом: общий объем наблюдений N перераспределяется между наблюдателями, ассоциированными с состояниями марковской цепи, пропорционально $m_i - 1 (i = 1,\ldots,m)$, где m_i - количество возможных переходов в состоянии $i \in V$.

Байесовский подход к задаче планирования наблюдений (14) предполагает наличие априорной информации $\{a_{ij}\}$ о поведении микрообъектов в транспортном графе $G(V, E)$ и соответствующей марковской цепи $\{X_t\}$, причем матрица переходных вероятностей цепи $\hat{P}$ оценена согласно (8).

Для вычисления информационной матрицы $I(P|n)$ может быть использовано следующее выражение:

$$I\left(P|n\right)=I\left(n|P\right)+I\left(P\right)=-E_n\left(\frac{\partial^2 \ln L\left(n,P\right)}{\partial P^2}\right)+\left(\frac{\partial \ln f(P)}{\partial P}\right)^T\left(\frac{\partial \ln f(P)}{\partial P}\right). \quad (18)$$

Информационная матрица Фишера для байесовского случая $I\left(P|n\right)$ выглядит следующим образом:

$$I\left(P|n\right)=\begin{bmatrix} E_n[A_1]+B_{11} & \cdots & B_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{m1} & \cdots & E_n[A_m]+B_{mm} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где A_i – эквивалентны (15), а B_{ik} - блок размера $m_i \times m_k$ с элементами:

$$b_{ijkl}=\left(\frac{\partial \ln f(P)}{\partial p_{ij}}\right)\cdot\left(\frac{\partial \ln f(P)}{\partial p_{kl}}\right)=\left(\frac{\left(a_{ij}-1\right)}{p_{ij}}-\frac{\left(a_{im_i}-1\right)}{p_{im_i}}\right)\cdot\left(\frac{\left(a_{kl}-1\right)}{p_{kl}}-\frac{\left(a_{km_k}-1\right)}{p_{km_k}}\right)=$$

$$=\frac{\left(a_{ij}-1\right)\left(a_{kl}-1\right)}{p_{ij}p_{kl}}-\frac{\left(a_{im_i}-1\right)\left(a_{kl}-1\right)}{p_{im_i}p_{kl}}-\frac{\left(a_{ij}-1\right)\left(a_{km_k}-1\right)}{p_{ij}p_{km_k}}+\frac{\left(a_{is_i}-1\right)\left(a_{km_k}-1\right)}{p_{im_i}p_{km_k}}.$$

Если рассматривать D-оптимальные планы в качестве критерия оптимальности Φ, то задача (14) с учетом (18) имеет вид:

$$n^*=Arg\max_n \ln\det\left(E_P\left[I\left(n|P\right)\right]+E_P\left[I\left(P\right)\right]\right), \quad (20)$$

где $E_P[\ ]$ - оператор математического ожидания по параметрам P.

Задачу (20) можно свести к виду:

$$n^*=Arg\max_n\left(\sum_{i=1}^m \ln\det C_i\right), \quad (21)$$

$$C_i=\begin{bmatrix} c_{11}^i & \cdots & c_{1(m_i-1)}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{(m_i-1)1}^i & \cdots & c_{(m_i-1)(m_i-1)}^i \end{bmatrix},$$

$$c_{kl}^i=\begin{cases} n_i(a_i-1)\cdot\left(\dfrac{1}{a_{ik}-1}+\dfrac{1}{a_{im_i}-1}\right)+\left(a_i-1\right)\left(a_i-2\right)\left(\dfrac{1}{\left(a_{ik}-2\right)}+\dfrac{1}{\left(a_{im_i}-2\right)}\right), \text{ при } k=l \\ n_i\dfrac{(a_i-1)}{a_{im_i}-1}+\dfrac{\left(a_i-1\right)\left(a_i-2\right)}{\left(a_{im_i}-2\right)}, \text{ при } k\neq l \end{cases}.$$

с учетом ограничений:

$$\sum_{i=1}^m n_i=N,\ \forall i=1,\dots,m\ \ n_i\geq 0.$$

Оптимизационная задача (21) является нелинейной с линейными ограничениями и может быть решена с помощью численных методов. Важно отметить, что $\det C_i$ является полиномиальной функцией от n_i степени $m_i - 1$, соответственно распределение ресурса (план наблюдения) по узлам будет зависеть от количества выходящих дуг $m_i - 1$ и от априорных значений a_{ij}.

Описанные результаты теоретически обоснованы и могут применяться в практических задачах для обследования потоков на транспортной сети в целях калибровки транспортных моделей и первичной оценки матриц корреспонденции.

В четвертой главе представлены возможности практического применения разработанных методов планирования наблюдений и оценки матриц корреспонденций по данным наблюдений в задачах транспортного моделирования. Представлены основные показатели комплексных математических транспортных моделей г. Новосибирска, Новосибирской агломерации, Новосибирской области. Эти транспортные модели разрабатывались в рамках государственных контрактов, внедрены и успешно используются для поддержки принятия решений в Мэрии г. Новосибирска, Министерствах строительства и транспорта Новосибирской области. Центральное место в транспортных моделях занимает задача поиска транспортного равновесия для оцененных матриц корреспонденции. На рисунках 3-5 представлено распределение равновесных транспортных потоков по сети Новосибирска, Новосибирской агломерации и Новосибирской области соответственно. Толщиной линии выделены интенсивности транспортных потоков на ребрах графа.

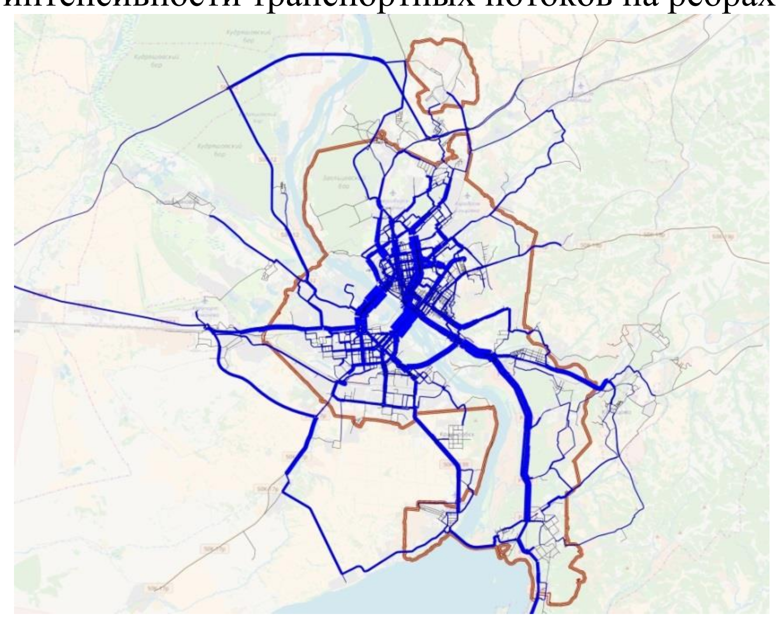

Рисунок 3 – Распределение равновесных потоков по улично-дорожной сети города Новосибирска

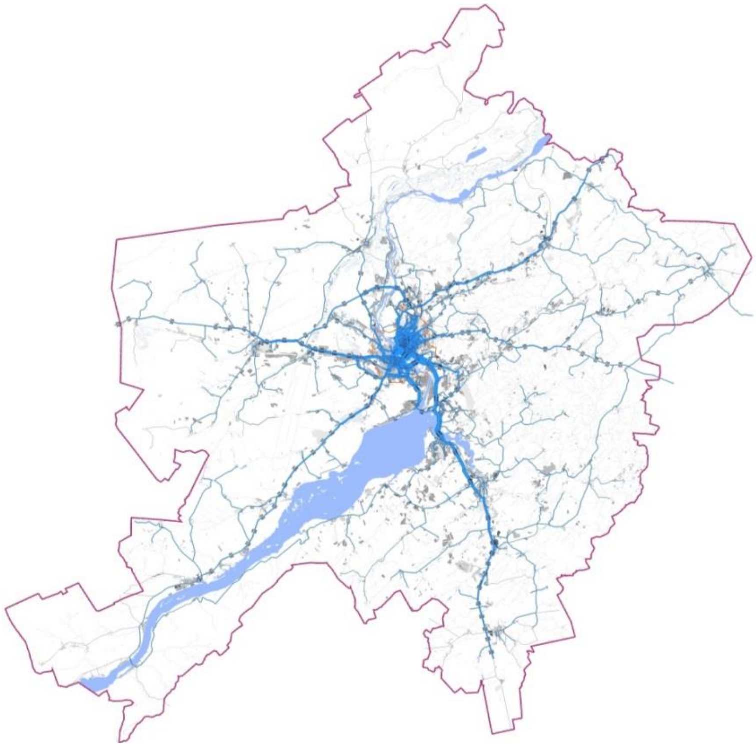

Рисунок 4 – Распределение равновесных потоков по улично-дорожной сети Новосибирской агломерации

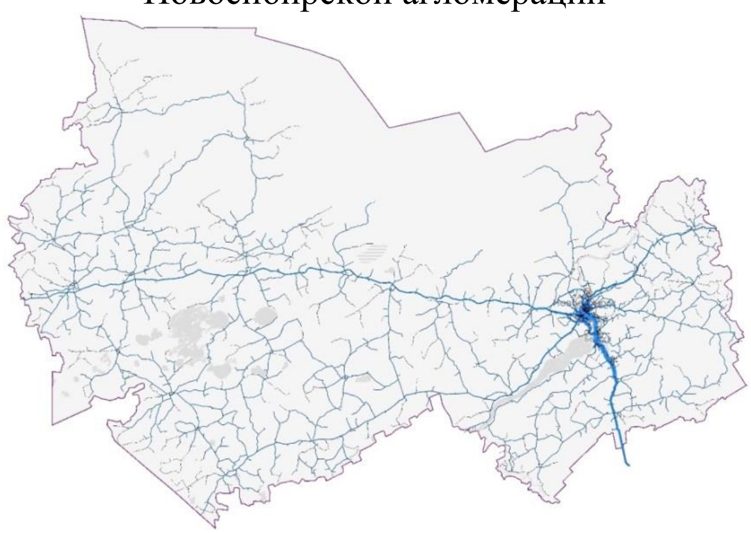

Рисунок 5 – Распределение равновесных потоков по улично-дорожной сети Новосибирской области

В пятой главе приводится краткое описание программной системы моделирования и анализа транспортных сетей, в разработке которой автор принимал участие в рамках диссертационного исследования. В программном обеспечении реализованы предложенные в работе методы. Система позволяет работать с любыми транспортными графами, импортировать/экспортировать данные из известных ГИС-систем, вычислять матрицы корреспонденции различными способами, решать задачи планирования наблюдений в сети и поиска равновесных потоков. На рисунке 6 представлен скриншот применения функции «Построение равновесных потоков» в программе.

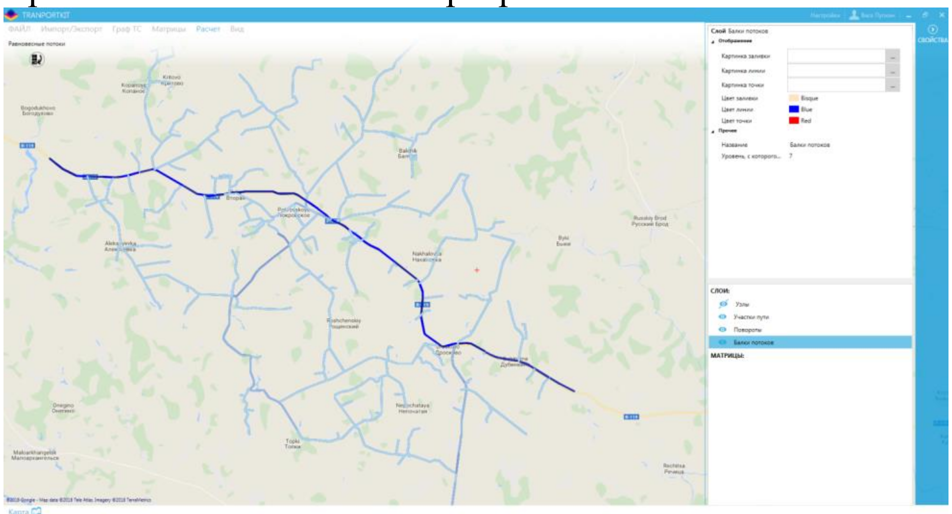

Рисунок 6 – Пример распределения транспортных потоков

Вычислительные модули разработанного программного продукта применялись при создании комплексных транспортных моделей г. Новосибирска, Новосибирской агломерации и Новосибирской области.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленными задачами исследования получены следующие результаты:

1. Рассмотрены модели наблюдения за объемом транспортного потока в сети. Предложены классификации моделей в зависимости от вида выборки наблюдений, типа наблюдения и полноты собираемых данных. Формализованы возможные представления графа транспортной сети – транспортного графа. Каждая из моделей наблюдения рассмотрена в контексте возможности оценки матрицы корреспонденций на основе наблюдений. Для этого предложена интерпретация модели перемещения микрообъектов по транспортному графу в качестве марковской цепи с дискретным временем.

2. Предложен метод оценки матриц корреспонденций, использующий представление графа в виде марковской цепи и применимый для нескольких моделей наблюдения. Метод основан на каноническом разложении матрицы переходов марковской цепи и сводится к оценке опосредованных переходных вероятностей цепи с использованием ее фундаментальной матрицы.

3. Осуществлена постановка задачи планирования наблюдений за потоками в транспортном графе с целью оценки транспортных корреспонденций, которая

сводится к задаче распределения ресурса по узлам марковской цепи с дискретным временем и интерпретируется как задача оптимального планирования наблюдений за марковской цепью.

Разработаны методы планирования наблюдений для поставленной задачи в случае оценок максимального правдоподобия и байесовских оценок. Для классического случая (ОМП-оценок) использованы минимаксные D-оптимальные планы. Решение задачи планирования получено в аналитическом виде. При применении байесовского подхода использованы D-оптимальные планы. Соответствующая задача планирования наблюдений сведена к нелинейной оптимизационной задаче с линейными ограничениями.

Полученные результаты применимы для проведения обследований потоков на транспортной сети в целях калибровки транспортных моделей и первичной оценки матриц корреспонденции.

4. Предложенные методы применены на тестовых и реальных транспортных сетях. Сформированы рекомендации по использованию методов в задачах транспортного моделирования.

5. Разработан программный комплекс для моделирования и анализа транспортных систем. Комплекс прошел государственную регистрацию, предусмотренную для программ ЭВМ.

Научные результаты диссертационной работы и разработанная программная система использованы при разработке комплексных транспортных моделей г. Новосибирска, Новосибирской агломерации и Новосибирской области в рамках научно-исследовательских работ по заказу Мэрии г. Новосибирска, Министерства строительства и Министерства транспорта Новосибирской области. Полученные результаты внедрены в работу научно-исследовательской лаборатории «Информационные технологии транспорта» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания из Перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1 Еремин С.В, Теселкин А.А., Хабарова К.В., Хабаров В.И.. Интеллектуальная система для стратегического управления пассажирским комплексом Красноярска и агломерации // Бюллетень транспортной информации: Журнал. – 2013. – № 2 (212). – С. 9-13.

2 Хабаров В.И., Теселкин А.А., Косолапов К.П. Планирование экспериментов для оценки матрицы транспортных корреспонденций // Доклады

Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 109-116. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-109-116

3 Хабаров В.И., Теселкин А.А. Марковские модели в задачах оценивания транспортных корреспонденций // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 91-105. doi: 10.17212/1814-1196-2016-1-91-105.

4 Хабаров В.И., Теселкин А.А. Байесовский подход к задаче планирования наблюдений за транспортными // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 3 (36). – С. 105–118. doi: 10.17212/1727-2769-2017-3-105-118

Другие издания:

5 Tesselkin A., Khabarov V. Estimation of Origin-Destination Matrices Based on Markov Chains // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 178C. – P. 107-116. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.071

6 Khabarov V., Tesselkin A. Method for Estimating Origin-Destination Matrices Using Markov Models // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Part 1. – P. 389-393. doi: 10.1109/IFOST.2016.7884135

7 Tesselkin A.A., Tesselkina K.V., Khabarov V.I. Elements of data mining for the development of mathematical transport models // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016): proc. – Novosibirsk, 2016. – Volume 1, Part 2. – P. 354-357. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806488

8 Khabarov V., Tesselkin A. Estimation of Origin-Destination Matrices Based on Markov Chains // Proceedings of the 16th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (RelStat'16), 19–22 October 2016. – Riga, Latvia, 2016. – P. 257–264.

9 Теселкин А.А., Теселкина К.В. Оценка параметров модели транспортных корреспонденций по данным сотовых операторов / А.А. Теселкин, К.В. Теселкина // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 4. – С. 10-14.

10 Теселкин А.А. Вопросы практического применения методов оценки матриц корреспонденции // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы». – Новосибирск: СГУПС, 2017. – С. 601-603.

11 Теселкина К.В., Теселкин А.А. Разработка программной системы моделирования и анализа транспортного комплекса города // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы». – Новосибирск: СГУПС, 2017. – С. 605-606.

12 Теселкин А.А., Хабаров В.И. Методы восстановления матриц корреспонденций по данным натурных обследований // В сборнике:

«Политранспортные системы». Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия - ЕС. – Новосибирск, 2015. С. 418-423.

13 Тесёлкина К.В., Тесёлкин А.А. Критерии устойчивости и надежности транспортных систем // «Наука, образование, кадры». Материалы конференции в рамках V Международного форума «Транспорт Сибири». – Новосибирск, 2016. – С. 17-23.

14 Хабаров В.И., Тесёлкин А.А., Сарычев С.П. Система управления транспортным комплексом как элемент интеллектуальной транспортной системы // «Наука, образование, кадры». Материалы конференции в рамках V Международного форума «Транспорт Сибири». – Новосибирск, 2016. – С. 13-17.

15 Теселкин А.А. Статистические подходы к оценке транспортных корреспонденций по данным наблюдений // «Наука. Технологии. Инновации». Сборник научных трудов: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 2. – С. 244-246.

16 Теселкин А.А. Байесовский подход к задаче планирования экспериментов для оценки транспортных корреспонденций // «Наука. Технологии. Инновации». Сборник научных трудов: в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 245-247.

17 Хабарова К.В., Теселкин А.А., Хабаров В.И. Оценки надежности транспортной сети / // Сборник докладов IV международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» (ИнтеллектТранс-2014). – Санкт-Петербург, 2014. – С. 392-395.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

18 Теселкин А.А., Теселкина К.В., Хабаров В.И. Программная система – прототип интеллектуальной системы управления пассажирским комплексом города и его агломерации, Программа для ЭВМ №2017618578, от 04.08.2017.