

## МЕТОДИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДОВ И РЕГИОНОВ РОССИИ

Уцев Ф.А., «А+С Консалт», Санкт-Петербург

Транспортное моделирование представляет собой универсальный инструмент решения инженерных и управленческих задач в сфере стратегического планирования развития транспортной инфраструктуры на городском [1], региональном и национальном [3] уровнях.

В докладе дан обзор накопленного ООО «А+С Консалт Санкт-Петербург» и некоторыми другими российскими научно-исследовательскими и проектными организациями опыта построения компьютерных транспортных моделей городов и регионов России в среде программного комплекса PTV Vision® VISUM [2].

**Транспортная модель г. Пермь.** В 2004 - 2007 гг. ООО «Агентство дорожной информации» совместно со специалистами Пермского государственного технического университета осуществило проект создания и калибровки транспортной модели по заказу Администрации г. Пермь.

Модель была разработана и реализована в программном комплексе PTV Vision® VISUM. Исходные данные модели включали в себя следующие компоненты:

- социально-экономические данные;
- показатели УДС;
- данные по общественному транспорту.

В целях построения транспортной модели территория г. Пермь была разделена на 64 транспортных района.

Результаты, полученные в ходе реализации проекта, состояли в следующем:

- Сформирована транспортная модель г. Пермь для дальнейшей работы по оперативному прогнозированию последствий мероприятий, связанных, в частности, с ремонтом Камского моста;
- Построены долгосрочные прогнозы изменения транспортной нагрузки УДС г. Пермь - для 2010 и 2020 гг.

**Транспортная модель г. Ишим.** В 2007 г. ЗАО «Петербургский НИПИГрад» при поддержке специалистов ООО «А+С КонсалтПроект» была разработана компьютерная модель грузопотоков г. Ишим, учитывающая взаимодействие общественного и индивидуального транспорта.

Модель была разработана и реализована в программном комплексе PTV Vision® VISUM.

Исходные данные, которые использовались для построения модели, состояли из следующих слоев:

- социально-экономические данные;
- показатели УДС;
- данные общественного транспорта;
- данные грузового транспорта.

Модель обладает следующими характеристиками:

- Население моделируемой территории - 70 000 чел.;
- 26 транспортных районов;
- 55 матриц корреспонденций.

Основные результаты проекта состояли в следующем:

- получена транспортная модель г. Ишим, откалиброванная и настроенная с точностью, позволяющей использовать данную модель в качестве инструмента принятия решения при составлении транспортных разделов Генерального плана города;

- построен транспортный прогноз для пяти альтернативных сценариев развития транспортной инфраструктуры города;
- проведено обучение работе с моделью в программном комплексе PTV Vision® VISUM двух специалистов организации-заказчика.

Особенностью модели г. Ишим является то, что удалось рассчитать модельный вариант почасовой динамики нагрузки общественного и индивидуального транспорта на УДС города для будних дней.

**Транспортная модель г. Новый Уренгой.** В 2007 г. специалистами ЗАО «Петербургский НИПИГрад» и ООО «А+С КонсалтПроект» был осуществлен совместный проект «Анализ и прогнозирование транспортных потоков на первую очередь Генерального плана г. Новый Уренгой» в рамках выполнения проекта была разработана компьютерная модель общественного и индивидуального транспорта.

Модель была разработана и реализована в программном комплексе PTV Vision® VISUM.

В ходе построения модели территория г. Новый Уренгой была разделена на 26 внутренних транспортных районов и 5 кордонных транспортных районов. В качестве данных социальной статистики использовались следующие показатели транспортных районов:

- Численность населения для существующего положения;
- Численность экономически активного населения для существующего положения;
- Число рабочих мест для существующего положения;
- Численность учащихся для существующего положения;
- Число учебных мест для существующего положения;
- Число рабочих мест в сфере услуг для существующего положения;
- Численность населения (прогноз на 2026 г);
- Численность экономически активного населения (прогноз на 2026 г);
- Число рабочих мест (прогноз на 2026 г);
- Численность учащихся (прогноз на 2026 г);
- Число учебных мест (прогноз на 2026 г);
- Число рабочих мест в сфере услуг (прогноз на 2026 г);

Прогнозные оценки рассчитывались на основе предположения о том, что показатели социально-экономического положения транспортных районов будут расти пропорционально населению с различными коэффициентами роста, зависящими от типа транспортного района.

Замеры интенсивности транспортного потока на отдельных сечениях УДС, предназначенные для калибровки модели и определения степени её адекватности реальной ситуации, проводились на 48 местах подсчёта. Был проведен сбор о суточных интенсивностях потоков индивидуального транспорта и пассажиропотоков общественного транспорта.

Использованные при построении модели данные о системах транспорта, сети ИТ и маршрутной сети ОТ г. Новый Уренгой представлены в табл. 1.

Табл. 1 Данные о сети ИТ и маршрутной сети ОТ г. Новый Уренгой

Вид транспорта	Тип	Количество маршрутов (для ОТ)	Длина сети, км
Автобус ведомственный	ОТ	6	85,987
Автобус городской	ОТ	16	84,935
Грузовой транспорт	ИТ	-	90,941
Легковой автомобиль	ИТ	-	95,027
Маршрутное такси	ОТ	-	84,500
Пересаживающиеся	ОТ	-	0,117
Такси	ИТ	-	95,027

Основным результатом работы с моделью является расчет изменения нагрузки ОТ и ИТ на УДС к 2026 г, рассчитанный для двух сценариев:

- Нулевой сценарий (УДС г. Новый Уренгой не изменяется);
- Активный сценарий – реализация трёх основных строительных проектов:
  - ввод в эксплуатацию восточная магистраль, которая представляет новое соединение южного центра (ул. Промысловая) с северным центром (ул. №20);
  - строительство двухуровневой развязки на пересечении ул. Магистральная и Западной магистрали;
  - строительство Южного обхода с Южной магистралью на автодороге на поселок Уралец.

Модель обладает высокими характеристиками точности. В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции расчётной нагрузки, полученной по модели г. Новый Уренгой, и фактических замеров интенсивностей движения в сети для ИТ и ОТ.

Табл. 2. Характеристики точности г. Новый Уренгой.

Вид транспорта	Коэффициент корреляции
ИТ	0,958
ОТ	0,782

Расчетная картограмма мультимодального разделения транспортного движения г. Новый Уренгой по типам транспортных средств, построенная в PTV Vision® VISUM, приведена на рис. 1.

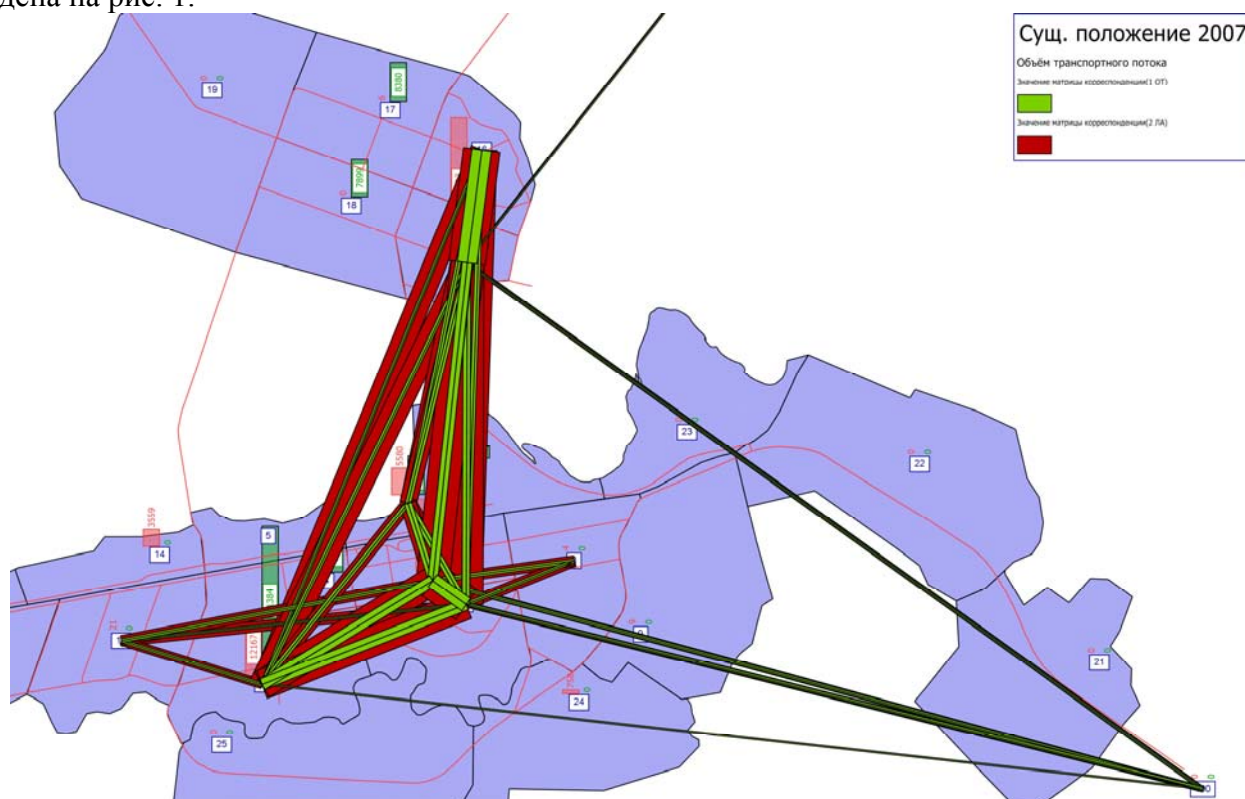


Рис. 1. Разделение транспортного движения г. Новый Уренгой по типам транспортных средств

На рис. 2, 3 приведены прогнозные картограммы нагрузки индивидуального и общественного транспорта на УДС г. Новый Уренгой на 2026 г. с учетом изменений структуры сети и структуры пространственного развития (включая расселение, размещение промышленности и т.д.).

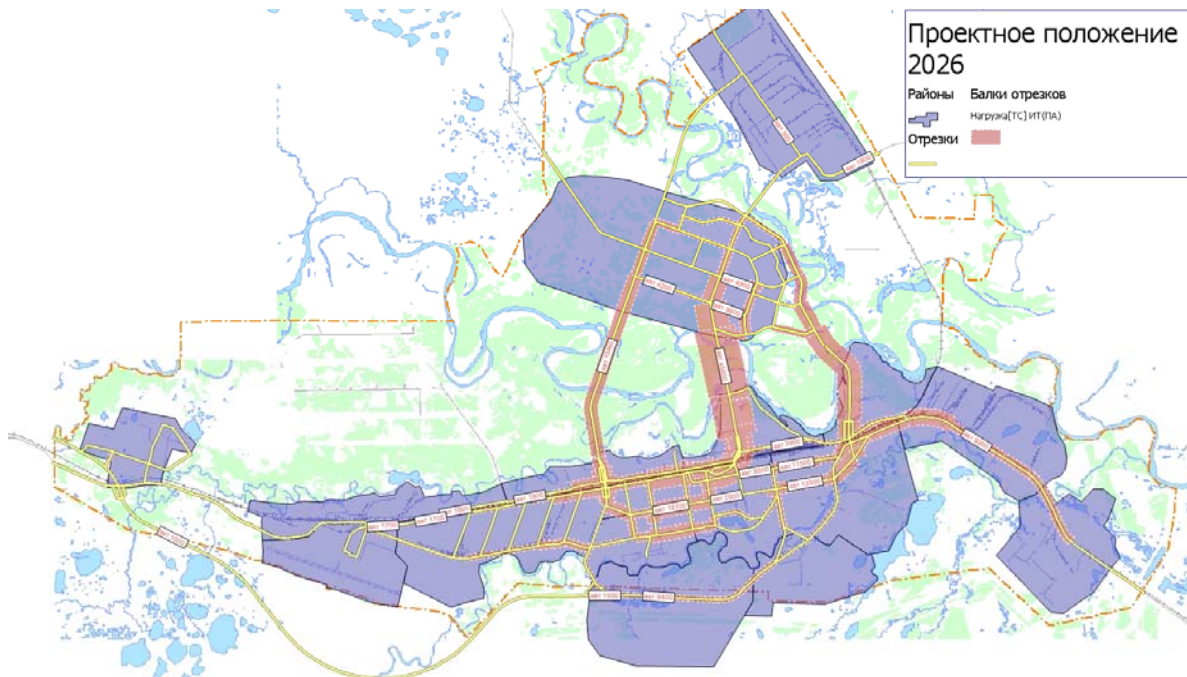


Рис. 2. Прогноз нагрузки ИТ в модели г. Новый Уренгой

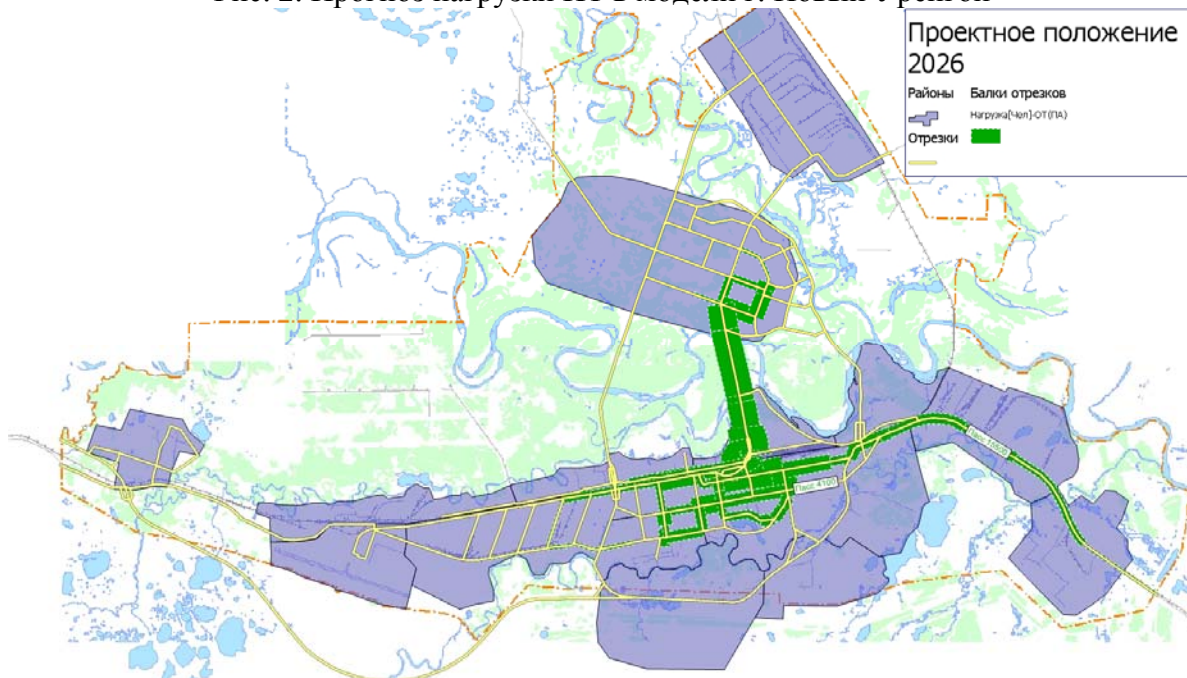


Рис. 3: Прогноз нагрузки ОТ в модели г. Новый Уренгой

Таким образом, модель г. Новый Уренгой дает пример успешного опыта применения транспортной модели в качестве инструмента построения прогнозов долгосрочного развития интегрированной системы индивидуального и общественного транспорта, необходимых для разработки Генерального плана города.

**Транспортная модель г. Вологда.** В 2008 г. при поддержке специалистов ООО «А+С КонсалтПроект» по заказу ООО «Проектно-изыскательский институт «Облстройпроект»» была разработана транспортная модель г. Вологды, предназначенная для расчёта и калибровки матриц корреспонденций, описывающих распределение потоков общественного и индивидуального транспорта г. Вологда.

Модель была реализована и настроена средствами программного комплекса RTV Vision® VISUM.

Город был разделён на 57 транспортных районов, в том числе 7 кордонных районов. В качестве данных социальной статистики использовались следующие показатели

транспортных районов:

- Численность населения;
- Численность экономически активного населения;
- Число рабочих мест;
- Численность учащихся;
- Число учебных мест;
- Число рабочих мест в сфере услуг.

Данные по УДС, использованные при построении модели, включают следующие показатели:

- 2018 узлов;
- 5612 отрезков
- Сеть автомобильных дорог общей длиной 1014 км.

Данные по общественному транспорту включали в себя маршрутную сеть и данные об остановках. Основные характеристики системы ГОПТ г. Вологда приведены в табл. 3.

Табл. 3. Данные по ГОПТ для транспортной модели г. Вологда

Вид ГОПТ	Количество маршрутов	Длина маршрутной сети, км.	Число остановок
Автобус	82	343,806	255
Троллейбус	5	108,501	69

Замеры интенсивности транспортного потока на отдельных сечениях УДС, предназначенные для калибровки модели и определения степени её адекватности реальной ситуации, проводились на 362 местах подсчёта. Был проведен сбор данных о почасовых интенсивностях потоков легковых автомобилей, троллейбусов и автобусов, причём учитывались различия автобусов по секционности (большие, средние, малые). Кроме того, для более точной картины дорожной ситуации были собраны дополнительные данные - о суточной интенсивности потока легковых автомобилей и об интенсивности потоков грузового транспорта.

Основные результаты реализации проекта состоят в следующем:

- сформирована транспортная модель г. Вологда, откалиброванная и настроенная с достаточной точностью для поддержки принятия решений в области оптимизации функционирования системы ГОПТ, а также разработки КТС города;
- проведен расчёт нагрузки на УДС г. Вологда;
- проведено обучение работе с моделью в программном комплексе PTV Vision® VISUM двух специалистов заказчика.

**Транспортная модель Пермского края.** В 2008 г. по заказу Министерства градостроительства и развития инфраструктуры Пермского края специалистами ООО «А+С Консалт» и ООО «Агентство дорожной информации» была выполнена совместная исследовательская работа в сфере государственного управления «Разработка методики и инструмента принятия управленческих решений для оценки их последствий в сфере транспортного проектирования с использованием новейших информационных технологий».

Транспортная модель Пермского края, сформированная в рамках выполнения данного проекта, была разработана и реализована в программном комплексе PTV Vision® VISUM. Исходные данные модели включали в себя следующие компоненты:

- Данные по автомобильным дорогам;
- Данные по сети общественного транспорта, в том числе:
  - Железная дорога;
  - Автобусы;
  - Воздушный транспорт;
  - Водный транспорт;

- Районирование;
- Данные обследований;
- Данные социальной статистики по транспортным районам.

42 муниципальных района и 6 городских округов Пермского края были разделены на:

- 190 транспортных районов модели;
- 8 кордонных районов на автомобильных дорогах;
- 4 кордонных района для воздушных маршрутов;
- 6 кордонных районов для железных дорог.

В настоящий момент в модели 208 транспортных районов.

Одной из новаций данного проекта, с точки зрения математической реализации модели было то, что при расчёте матриц корреспонденций использовалась описанная в [4] трёхпараметрическая функция оценки вероятности поездки EVA-1. Эта функция обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционно используемыми для этой цели функциями, такими, как обратная зависимость Кирхгофа и экспоненциальная оценочная функция (логит-функция). Функция оценки EVA-1 позволяет отдельно регулировать заложенные в модель параметры поведения участников движения для трёх типов поездок: на малые, средние и большие расстояния. Кроме того, в модели предусмотрена возможность задавать различные параметры оценки вероятности поездки для разных типов участников движения (водителей легковых автомобилей, водителей грузовых автомобилей, пассажиров ОТ). Это позволяет особенно эффективно калибровать процесс распределения транспортных потоков.

Модель Пермского края откалибрована и настроена с точностью, позволяющей использовать модель в качестве инструмента принятия управленческих решений. В табл. 4 приведены значения коэффициентов корреляции расчётной нагрузки, полученной по модели Пермского края, и фактических замеров интенсивностей движения в сети по видам транспорта.

Табл. 4. Характеристики точности модели Пермского края

Вид транспорта	Коэффициент корреляции
Легковой транспорт	0,720
Лёгкий грузовой транспорт	0,696
Тяжёлый грузовой транспорт	0,695

Транспортная модель Пермского края обеспечивает возможность:

- проводить анализ транспортной доступности на территории региона с помощью изохрон;
- визуализировать расчет нагрузки на дорожную сеть и сеть ОТ с детализацией по видам транспорта;
- проводить прогнозный расчёт последствий ввода новых и реорганизации старых маршрутов ОТ;
- прогнозировать эффект от реализации инвестиционных проектов в области дорожного строительства как с точки зрения перераспределения потоков, так и в части экологического ущерба.

Модель успешно решает задачу прогнозирования транспортных потоков Пермского края с детализацией по всем видам ОТ и ИТ как для существующей сети, так и для возможных сценариев ее развития. Проводимые посредством данной модели расчеты могут служить основой формирования региональных целевых программ в области транспорта. Также на основе анализа, проводимого с помощью данной модели, могут быть разработаны рекомендации по формированию планов функционально-пространственного развития отдельных крупных городов Пермского края.

**Текущие проекты.** Помимо перечисленных проектов, в стадии завершения находятся следующие проекты, основным исполнителем которых является ООО «А+С Консалт Санкт-Петербург»:

- НИОКР «Создание 1-ой очереди информационно-аналитической системы «Транспортная модель Тверской области»» (заказчик – Департамент транспорта и связи Тверской области);
- НИР «Развитие транспортной модели городского пассажирского транспорта, сформированной в программном обеспечении PTV Vision® для государственных нужд Санкт-Петербурга» (заказчик – ГУ «Организатор перевозок»).

**Развитие моделирования в России.** Опыт описанных выше и других российских проектов в области транспортного планирования и моделирования свидетельствует о том, что основными трудностями реализации подобных проектов являются:

- Значительные пропуски в исходных данных;
- Отсутствие во многих городах и регионах отлаженных процедур непрерывного сбора транспортной и дорожной статистики;
- Отсутствие нормативно закреплённой стандартной формы сводного представления транспортных данных.

Развитие нормативной базы и стандартов является необходимой предпосылкой развития городского, регионального и национального транспортного планирования на основе моделей в России. Вместе с тем, перспективным направлением исследований представляется совершенствование самого аналитического аппарата моделирования, повышение его адаптивности к неполноте и слабой структурированности исходных данных. Рассмотрим одну из таких возможностей.

Общепринятым в современной транспортной науке языком описания состояния транспортной системы с точки зрения распределения транспортных потоков в ней являются **матрицы корреспонденций**. Элементы матриц корреспонденций – это количества поездок между парами транспортных районов, выделяемых на основе функционального районирования моделируемой территории, которое предусмотрено Генеральным планом развития города или другими нормативными планировочными документами.

Классический подход к расчету матриц корреспонденций, реализованный в программном комплексе PTV Vision® VISUM, основан на **эквивифинальности** [5] трех теоретических концепций, используемых для обоснования методов моделирования распределения транспортного движения:

- Гравитационного подхода;
- Энтропийного подхода;
- Байесовского подхода.

Эквивифинальность означает, что три указанных подхода приводят к одному и тому же практическому методу расчета элементов матрицы корреспонденций как решения системы уравнений:

$$v_{ij} = b_{ij} \cdot f q_i \cdot f z_j. \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n v_{ij} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m v_{ij} = Z_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Здесь  $m$  – число транспортных районов-источников поездки,  $n$  – число транспортных районов-целей,  $Q$  – объем транспортного потока из района-источника,  $Z$  – объем транспортного потока в район-цель,  $v$  – матрица корреспонденций,  $b$  – предварительная оценка матрицы корреспонденций. Матрицу  $b$  строят на основе результатов опроса населения или на основе той или иной гипотезы о свойствах субъективных оценок затрат на

поездку, которыми руководствуются участники движения.

В классическом подходе предполагается, что исходных данных достаточно для достоверного расчета величин  $Q$  и  $Z$ . Если это предположение не выполняется, то принцип эквивалентности нарушается.

В российских условиях, как правило, имеют место непреодолимые или преодолимые посредством слишком высоких затрат трудности, препятствующие сбору всей статистической информации, необходимой для моделирования на основе стандартных методов. Поэтому актуальной является задача развития самих математических моделей транспортных процессов в сторону повышения их гибкости и адаптивности к особенностям состава исходных данных. В этой связи предлагается математическая модель расчета матрицы корреспонденций на основе обобщения энтропийного подхода.

**Модель расчета матрицы корреспонденций по неполным данным.** Рассмотрим некоторую транспортную систему  $S$ . *Состоянием* системы назовем набор данных о транспортных потоках в ней. Средством описания состояния транспортной системы является матрица корреспонденций или набор нескольких таких матриц.

Так как реальные системы обладают сложным вариантным поведением, их состояние не может быть предсказано с абсолютной точностью, то есть их поведение содержит элемент неопределенности. Тогда следует считать, что транспортная система  $S$  может находиться в одном из  $N$  состояний с вероятностями  $p_1, p_2, \dots, p_N$ . Каждое состояние здесь следует интерпретировать как *упорядоченную пару* транспортных районов, а вероятность каждого состояния – как элемент *нормированной* матрицы корреспонденций.

В теории информации вводится универсальная мера количества информации, которая требуется для полного знания поведения системы  $S$ . Такой мерой является *энтропия* [6,7]. Формула энтропии для системы с конечным числом состояний имеет вид:

$$H(p) = \sum_{k=1}^N p_k \cdot \log(1/p_k). \quad (4)$$

Пусть теперь наших знаний достаточно, чтобы утверждать, что система  $S$  находится в каждом из своих состояний с вероятностями  $q_1, q_2, \dots, q_N$ . Эти вероятности следует интерпретировать как элементы нормированной матрицы предварительных оценок.

Во многих прикладных задачах требуется измерить количество дополнительной информации, обладая которым, мы сможем утверждать, что система  $S$  находится в состоянии номер  $k$  с вероятностью  $p_k$ . Это количество информации принято измерять при помощи *информационного выигрыша*:

$$I_q(p) = \sum_{k=1}^N p_k \cdot \log(p_k/q_k) = H_q(p) - H(p). \quad (5)$$

Вероятности  $q_1, q_2, \dots, q_N$  называются *априорными* и характеризуют наше знание о системе  $S$  до получения дополнительной информации.

Вероятности  $p_1, p_2, \dots, p_N$  называются *апостериорными* и характеризуют наше знание о системе  $S$  после получения дополнительной информации.

Рассмотрим общую постановку задачи оценивания неизвестных апостериорных вероятностей по априорным вероятностям состояний при наличии дополнительной информации.

Пусть на основе статистического оценивания получены априорные вероятности состояний исследуемой системы:

$$q_i, i=1,2,\dots,N.$$

Предположим, что известны также вероятности некоторого множества событий

$$A_j, j=1,2,\dots,m,$$

связанных с функционированием моделируемой системы, и условное распределение вероятностей каждого из событий  $A_j$  в зависимости от того, в каком состоянии находится исследуемая транспортная система  $S$ .

В качестве конкретных примеров событий  $A_j$  отметим следующие возможности:

- Обследуемая поездка совершается по конкретной причине (например, из дома на работу);
- Обследуемая поездка совершается с конкретной целью (ее пункт назначения – вполне определенный транспортный район);
- Обследуемая поездка совершается с использованием конкретного вида транспорта (личного автомобиля, метро и т.д.).
- Обследуемая поездка имеет путь, проходящий через конкретный участок дороги.

Перечень примеров может быть продолжен. Выделение событий  $A_j$  на практике должно определяться составом имеющихся исходных данных. Именно поэтому говорится о модели расчета по неполным данным – исследователь может «подгонять» структуру модели под имеющийся массив данных.

Введем обозначения:

$$\pi_{ij} = P(A_j | S_i), \quad (6)$$

$$\psi_j = P(A_j). \quad (7)$$

Основной принцип оценивания апостериорных вероятностей основан на том, что у нас нет никакой другой информации о системе  $S$ , кроме оценок априорных вероятностей  $q_i$ ,  $\psi_j$ , а также значений условных вероятностей  $\pi_{ij}$ , которые предполагаются точно известными из самого устройства системы  $S$ .

Таким образом, с учетом (5) – (8) расчетные нормированные значения элементов матрицы корреспонденций могут быть определены из решения следующей оптимизационной задачи:

$$\sum_{i=1}^N p_i \cdot \log(p_i / q_i) \rightarrow \min \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \pi_{ij} \cdot p_i = \psi_j, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1. \quad (10)$$

Условия оптимальности в задаче (9) – (11) имеют вид:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \pi_{ij} \cdot q_i \cdot \prod_{k=1}^m y_k^{\pi_{ik}}}{\sum_{i=1}^N q_i \cdot \prod_{k=1}^m y_k^{\pi_{ik}}} = \psi_j, \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

Здесь  $y_k$  – вспомогательные переменные, выражаемые через множители Лагранжа. Расчетные нормированные значения элементов матрицы корреспонденций  $p_i$  могут быть выражены явным образом через  $y_k$  по формулам:

$$p_i = q_i \cdot x \cdot \prod_{k=1}^m y_k^{\pi_{ik}}, \quad (12)$$

$$x = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \left( q_i \cdot \prod_{k=1}^m y_k^{\pi_{ik}} \right)}. \quad (13)$$

Система (11) – (13) является обобщением билинейной системы (1) – (3), которая получается из (11) – (13), когда все условные вероятности равны нулю или единице, то есть когда в ходе обследования можно точно установить источник и цель перемещения каждой обследованной поездки.

Круг проблем, подлежащих исследованию в связи с описанной задачей, включает следующие задачи:

- Разработка и анализ эффективных алгоритмов численного решения задачи определения элементов матрицы корреспонденций из решения системы уравнений (11);
- Анализ чувствительности решения к ошибкам измерений исходных данных, на основе которых оцениваются априорные вероятности;
- Анализ процессов накопления ошибок в случае, если алгоритм решения состоит из нескольких последовательных этапов, и последующая корректировка алгоритма с целью минимизации ошибки;
- Разработка алгоритмов назначения условных вероятностей в случаях, когда они не являются точно известными из содержательных соображений.

#### Литература

1. Бонсалл П.У., Чемперноун А.Ф., Мейсон А.К., Уилсон А.Г. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе. / пер. с англ. – М.: Транспорт, 1982. – 207с.
2. Мягков В.Н., Пальчиков Н.С., Федоров В.П. Математическое обеспечение градостроительного проектирования. Л.: Наука, 1989.
3. Швецов В.Л., Ущев Ф.А. Средства моделирования PTV VISION ® VISUM как основа технологии управления транспортными системами // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: Сборник докладов восьмой международной научно-практической конференции. СПб гос. архит.- строит. ун-т. СПб, 2008 – 544 с.
4. Шиллер К. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт в Швейцарии // Материалы IV международного семинара пользователей PTV VISION ®. Спб, 2008.
5. Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2: Verkehrsplanung, 2. Aufgabe, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997.
6. Ortuzar J.D., Willumsen L.G.. Modeling Transport. John Wiley & Sons Ltd, 2001.
7. Wilson A.G.. Entropy in Urban and Regional Modeling. Pion, London. 1970.