

На правах рукописи

ЛАГЕРЕВ Роман Юрьевич

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МАТРИЦ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ПО ДАННЫМ
ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ**

Специальность **05.22.10** – Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2006

Работа выполнена в Иркутском государственном техническом университете

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Михайлов Александр Юрьевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Рябчинский Анатолий Иосифович.

кандидат технических наук, доцент

Клепик Николай Константинович.

Ведущая организация

Ростовский государственный
строительный университет.

Защита состоится «01» декабря 2006 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.03 при Волгоградском государственном техническом университете по адресу: 400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ожогин В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Матрицы корреспонденций являются важнейшей информацией, характеризующей распределение транспортных потоков по улично-дорожной сети (УДС), и широко используются в транспортном планировании и проектировании организации дорожного движения (ОДД).

В 2003 г. разработан методический документ ОДМ «Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах», содержащий методику определения матрицы корреспонденций между расчетными транспортными районами на основе таких данных как численность населения, количество мест приложения труда, рекреационный потенциал, уровень автомобилизации, средние затраты времени на передвижения.

Вместе с тем, для проектов ОДД и реконструкции УДС, для микромоделирования транспортных сетей необходимо знать существующее распределение транспортных потоков. Такую информацию можно получить расчетом существующей матрицы корреспонденций. В нашей стране оценка существующих матриц корреспонденций выполняется на основе проведения опроса участников о маршрутах движения или регистрацией транспортных средств, что является чрезвычайно дорогой, трудоемкой, а часто и невыполнимой задачей. Поэтому в зарубежной теории и практике проектирования ОДД уже с 1970-х гг. уделяется большое внимание методам оценки существующих матриц корреспонденций транспортных потоков по данным интенсивности движения.

В связи с этим, особую практическую ценность представляет разработка методики оценки существующих матриц корреспонденций транспортных потоков применительно к российским условиям, с учетом, прежде всего, используемых в нашей стране методов обследований УДС.

Целью работы является разработка методики оценки существующих матриц корреспонденций транспортных потоков по данным интенсивности движения.

Объектом исследования являются транспортные потоки на УДС.

Предметом исследования являются существующие распределения транспортных потоков и матрицы корреспонденций.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- предложен принципиально новый подход к оценке существующего распределения транспортных потоков по УДС с использованием только данных обследований интенсивности движения;
- разработаны методы робастного оценивания матриц корреспонденций транспортных потоков, сводящиеся к задачам линейного и квадратичного программирования со смешанными ограничениями;
- исследованы свойства ошибок, возникающих при сведении данных обследований интенсивности движения в единую выборку, предложена методика выявления в этих данных выбросов.

Практическая ценность работы. Разработанная методика позволяет оценивать существующее распределение транспортных потоков на участках УДС, выполнять аппроксимацию исходных данных при построении картограмм интенсивности движения.

Реализация работы. Предложенная в работе методика оценки существующих матриц корреспонденций применена в проектной работе, выполненной по заказу администрации г. Иркутска: «Оценка пропускной способности и уровня загрузки улично-дорожной сети г. Иркутска».

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на VI Международной научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (Санкт-Петербург 2004 г.); на X–XII Международных научно-практических конференциях «Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния» (Екатеринбург 2004–2006 гг.); на II Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Москва 2004 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 1 публикация в издании, включенном в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Содержит 148 страниц основного текста, включает 39 таблиц и 37 рисунков. Библиографический список включает 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, охарактеризована структура, определены методы исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ исследований в области оценки матриц корреспонденций, который показал, что в нашей стране исследования в этой области выполнялись в основном для маршрутов общественного транспорта (А.А. Аникеич, А.П. Артынов, В.И. Астрахан, Н.О. Брайловский, Г.А. Варелопуло, Б.И. Грановский, В.Н. Ембулаев, Ю.М. Ермольев, Ш.С. Имельбаев, А.В. Курман, В.Н. Мягков, В.С. Огай, В.В. Сильянов, В.В. Скалецкий), где исходной информацией для оценки пассажирских корреспонденций служили данные о количестве входящих и выходящих пассажиров на каждом из остановочных пунктов.

За рубежом уделяется большое внимание методам оценки существующих матриц корреспонденций транспортных потоков по данным интенсивности движения (Т. Abrahamsson, G.H. Bell, E. Cascetta, C. Hendrickson, Shinya Kikuchi, G. Kim, D.M. Levinson, M.J. Maher, F.J. Martin, M. May, Dragana Miljkovic, N.L. Nihan, S. Nguyen, Harinarayan Paramahamsan, H. Spiess, D. Sherali, R. Sivanandan, Nanne Jacob Van Der Zijpp, H.J. Van Zuylen, L.G. Willumsen). Вместе с тем, в зарубежных методиках не рассматривается качество исходных данных, поскольку в большинстве они рассматривают случаи, когда данные об интенсивности движения поступают с периферийного оборудования.

На основании выполненного анализа были сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. теоретически обосновать методы робастной оценки существующих матриц корреспонденций, позволяющие использовать только данные обследований интенсивности движения в узлах УДС;
2. предложить методику подготовки исходных данных для оценки матриц корреспонденций транспортных потоков, разработать процедуру определения выбросов, возникающих при сведении данных обследований движения в узлах УДС в единую выборку;

3. провести тестирование и сравнительный анализ методов робастной оценки матриц корреспонденций, на основе выбранного метода разработать методику оценки матриц корреспонденций;
4. на основе предложенной методики осуществить экспериментальную оценку распределения транспортных потоков на примере реальных УДС, оценить эффективность предлагаемой методики и разработать рекомендации для ее практического использования.

Вторая глава посвящена формулировке теоретических положений робастного оценивания матриц корреспонденций транспортных потоков.

Наиболее распространенным и доступным способом сбора данных о транспортных потоках в нашей стране являются подсчеты интенсивности движения на отдельных элементах УДС, выполняемые в одно и то же время суток в различные дни. Поскольку при сведении в единую выборку данных интенсивности движения возникают ошибки (рис. 1), методы оценивания должны обладать робастностью – устойчивостью к возникающим грубым ошибкам.

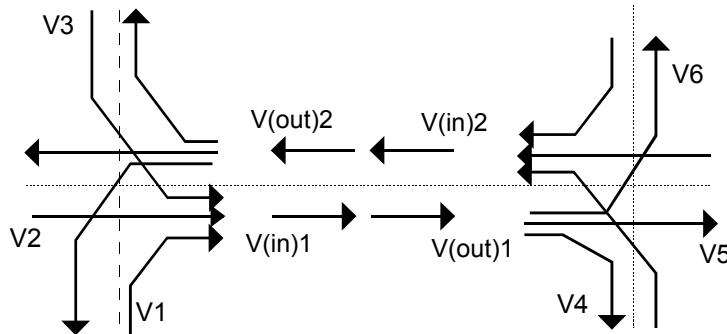


Рис. 1. Представление перегона улицы для оценки ошибок обследования интенсивности движения: $V(in)_1$, $V(in)_2$ – входящие на перегон потоки; $V(out)_1$, $V(out)_2$ – выходящие с перегона потоки; $V1$, $V2$, $V3$ – потоки, полученные в результате замеров на предыдущем перекрестке и образующие поток $V(in)_1$; $V4$, $V5$, $V6$ – потоки, полученные в результате замеров на следующем перекрестке и образующие поток $V(out)_1$; $d_1 = V(out)_1 - V(in)_1$ – ошибка подсчетов интенсивности движения на перегоне для 1-го направлений движения

К числу робастных методов относят так называемые L_v – оценки:

$$\sum_{i=1}^n \left| y_i - \sum_{j=1}^m \hat{x}_j a_{ij} \right|^v = \sum_{i=1}^n |e_i|^v \rightarrow \min, \quad 1 \leq v < 2, \quad (1)$$

где n - число наблюдений (длина выборки); y_i и a_{ij} , - значения соответственно зависимой и независимых переменных, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$; \hat{x}_j , - подлежащие оцениванию параметры; e_i , - остатки регрессии; v - фильтр выбросов.

В.И. Мудров и В.Л. Кушко предложили выполнять оценку (1) методом вариационно-взвешенных квадратичных приближений (ВВП), сводящимся к взвешенному методу наименьших квадратов (МНК) с весами w_i :

$$\sum_{i=1}^n |e_i|^v = \sum_{i=1}^n e_i^2 |e_i|^{v-2} = \sum_{i=1}^n e_i^2 w_i. \quad (2)$$

На нулевой итерации оценивают регрессию каким-либо методом (например, МНК или экспертная оценка), получают вектор оценок \hat{x}^0 , исходя из которого, получают веса

$$w_i = |e_i|^{v-2} = \left| \hat{x}_1^0 a_{i1} - \hat{x}_2^0 a_{i2} - \dots - \hat{x}_m^0 a_{im} \right|^{v-2}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Оценка взвешенного МНК в матричной форме имеет следующий вид:

$$\hat{x} = (A'WA)^{-1}A'WY, \quad (4)$$

где \hat{x} - оцениваемый вектор неизвестных параметров размерности $m \times 1$; A - матрица независимых переменных размерности $n \times m$; W - диагональная матрица весовых коэффициентов размерности $n \times n$; Y - вектор зависимых переменных размерности $n \times 1$.

Частным случаем L_v -оценки (1) является $v = 1$, что приводит к минимизации суммы абсолютных модулей отклонений (МНМ)

$$\sum_{i=1}^n \left| Y_i - \sum_{j=1}^m \hat{x}_j a_{ij} \right| = \sum_{i=1}^n |e_i|. \quad (5)$$

Минимизация суммы модулей остатков (5) может рассматриваться как задача линейного программирования:

$$\sum_{i=1}^n (r_i + s_i) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $r_i = \max(0, e_i)$; $s_i = \max(-e_i, 0)$, при ограничениях

$$\sum_{j=1}^m \hat{x}_j a_{ij} + r_i - s_i = Y_i; \quad r \geq 0; \quad s \geq 0$$

Отсутствие предварительной информации о маршрутах движения требует представить исходные данные для оценки распределения транспортных потоков так, чтобы каждая пара взаимно корреспондирующих вершин связывалась одним маршрутом. Можно осуществить разделение матрицы корреспонденций участка УДС на группу матриц корреспонденций, каждая из которых будет представлять «отдельный маршрут» (рис. 2).

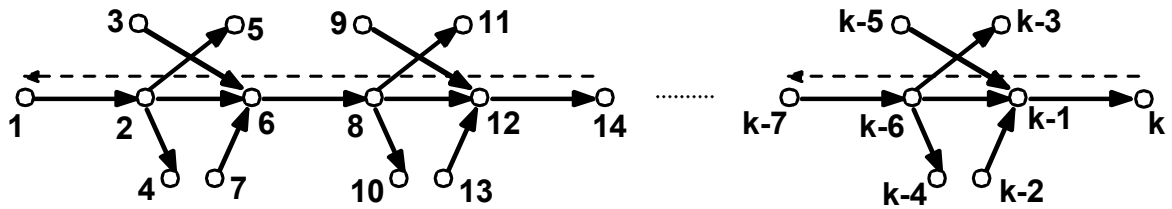


Рис. 2. Представление маршрута движения в виде ориентированного графа для определения матрицы корреспонденций: 1,3,4,5,7,9,10,11,13, ..., k-5, k-4, k-3, k-2, k - корреспондирующие вершины

С учетом такого представления участка сети (см. рис. 2), элементы матрицы A , характеризующие принадлежность корреспонденций дугам графа сети, будут иметь значения 1 или 0 (наличие или отсутствие j корреспонденции на i дуге).

Тогда задача оценки распределения потоков состоит в отыскании таких значений вектора корреспонденций \hat{x} , при которых соответствующие интенсивности движения на дугах графа сети \hat{y}_i ($\hat{y} = A\hat{x}$) максимально близки к наблюдаемым y_i

$$\sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \rightarrow \min. \quad (7)$$

Преобразуя (7) в задачу линейного программирования (6), вектор-столбец x размерности $(m \times 1)$ заменяется новым вектором переменных x_2 размерности $(m+2n) \times 1$, в котором оцениваемыми корреспонденциями являются элементы x_{2j} с индексами $j = \overline{1, m}$, а фиктивными переменными являются:

$$x_{2j} = \begin{cases} e_i, & \text{if } e_i \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, j = \overline{m+1, m+n}; \quad x_{2j} = \begin{cases} |e_i|, & \text{if } e_i \leq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, j = \overline{m+n+1, m+2n}.$$

Матрица принадлежности корреспонденций дугам графа сети A размерности $n \times m$ преобразуется в матрицу A_2 размерности $n \times (m+2n)$, т.е. дополняется двумя единичными матрицами размерности $n \times n$: $d_1 = \|E\|$, $d_2 = -\|E\|$.

После преобразований задача оценки распределения транспортных потоков формулируется в следующем виде:

$$\min \sum_{j=m+1}^{m+2n} x_{2j}, \quad (8)$$

при линейных ограничениях на переменные $A_2 x_2 = y$, $x_2 \geq 0$ и двухсторонних ограничениях $x_{lb} \leq x_2 \leq x_{ub}$, где x_{lb} и x_{ub} – векторы нижних и верхних ограничений оцениваемых параметров, $x_{lb} \geq 0$, $x_{ub} > 0$.

Как альтернатива оценке (8) в работе также изучались возможности применения задачи квадратичного программирования со смешанными ограничениями следующего вида:

$$\min \left(\frac{1}{2} x^T H x + f^T x \right), \quad (9)$$

где x – вектор оцениваемых параметров размерности $(m+2n) \times 1$; H – матрица Гессе, $(m+2n) \times (m+2n)$; f – вектор коэффициентов целевой функции $(m+2n) \times 1$.

Линейные и двухсторонние ограничения задачи (9): $Ax = y$, $x \geq 0$, $x_{lb} \leq x \leq x_{ub}$, $x_{lb} \geq 0$, $x_{ub} \geq 0$.

В целевые функции обеих задач (8, 9) входит часть вектора x , т.е. элементы с индексами $j = \overline{m+1, m+2n}$, а оцениваемыми корреспонденциями, характеризующими распределение транспортных потоков по УДС, являются элементы с индексами $j = \overline{1, m}$.

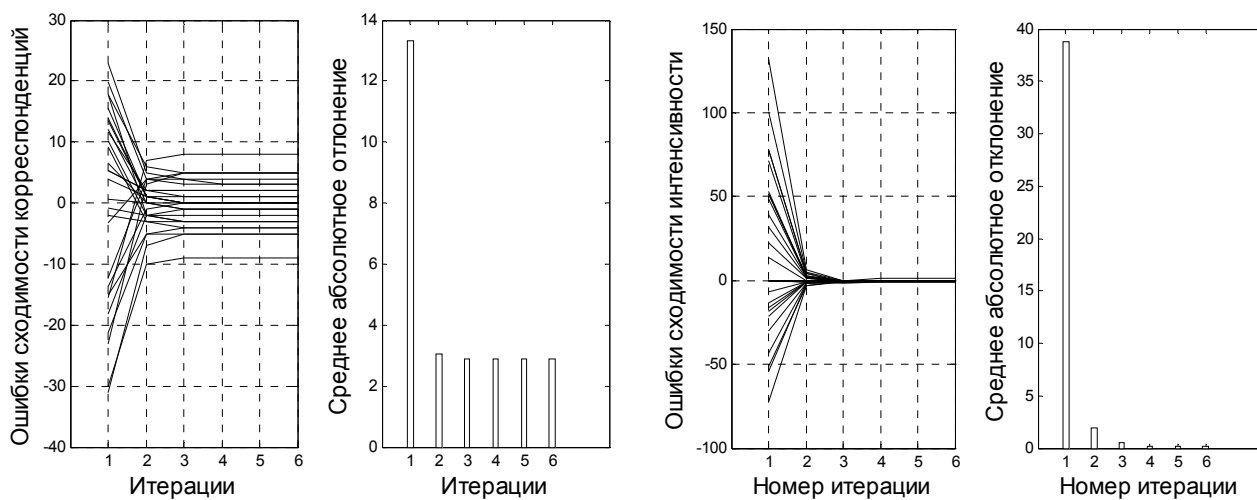
В третьей главе проведено экспериментальное тестирование предлагаемых методов оценки матриц корреспонденций, предложены критерии качества исходных данных.

Для оценки однородности выборок значений интенсивности движения и выявления выбросов используются значения разностей пар $d_i = V(\text{out})_i - V(\text{in})_i$. Сравниваются две выборки, одна из которых состоит из значений потоков, входящих на перегоны, вторая – выходящих (см. рис. 1). Проверяется гипотеза, что связанные выборки принадлежат к одной генеральной совокупности. Для выявления грубых ошибок в исходных данных предлагается использовать нормированное отклонение $\hat{z} = (d_i - \bar{d}) / S_d$, рассчитываемое для разностей пар входящих и выходящих потоков $d_i = V(\text{out})_i - V(\text{in})_i$.

Тестирование методов выполнено в два этапа: 1) тестирование на примере искусственных данных без ошибок (значения корреспондирующих потоков известны); 2) тестирование на примере искусственных данных с грубыми ошибками (значения корреспондирующих потоков известны).

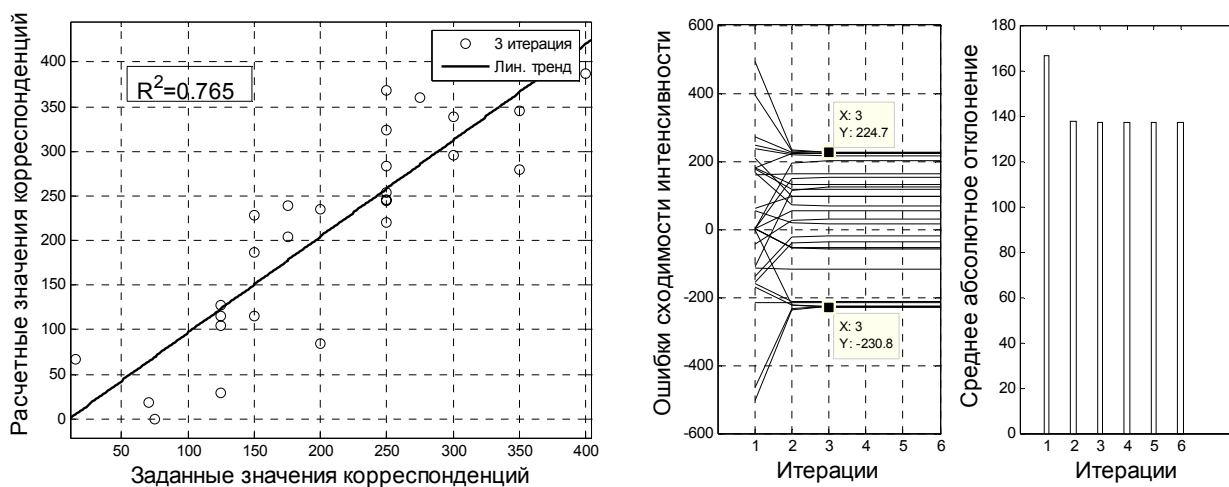
На первых двух этапах тестирования наиболее важным является оценка точности корреспонденций (рис. 3, рис. 4). Поэтому наибольшее внимание уделено сравнению регрессоров - заданных значений корреспонденций x_j и оцененных \hat{x}_j .

Тесты на примерах искусственных данных без ошибок выявили работоспособность методов в случае плохо обусловленных матриц A (см. рис. 3).



а) б)
Рис. 3. Оценка точности восстановления матрицы корреспонденций (данные интенсивности движения без ошибок, МНМ, МНК, $\times 1b = 0.5$, $x_{ub} = 1.5$ $div = 15$):
а – сходимость корреспонденций; б – сходимость интенсивности движения

Тестирование методов на примере искусственных данных с внесенными грубыми ошибками в значения интенсивности движения (вариационный размах $\pm 30\%$) также показывает, что методы сохраняют сходимость. Кроме того, при экстремальном загрязнении исходных данных методы восстанавливают значения интенсивностей с меньшими ошибками ($-230 \dots 224$), чем внесены в исходные данные ($-496 \dots 239$) (см. рис. 4).



а) б)
Рис. 4. Оценка точности восстановления матрицы корреспонденций (данные интенсивности движения с грубыми ошибками, МНМ, МНК, $\times 1b = 0.5$, $x_{ub} = 1.5$ $div = 15$):
а – сходимость корреспонденций; б – сходимость интенсивности движения

Установлено, что наибольший эффект на качество восстановления корреспонденций и скорость схождения соответствующих потоков оказывают двухсторонние ограничения задач линейного и квадратичного программирования (8, 9). В соответствии с результатами тестирования установлены рекомендуемые значения ограничений:

- нижние ограничения оцениваемых переменных $xlb_j = kx_j$, $k = \{0 \dots 0,8\}$;
- верхние ограничения оцениваемых переменных $xub_j = kx_j$, $k = \{1,2 \dots 2\}$;
- нижние ограничения искусственных переменных $vlb_i = 0$;
- верхние ограничения искусственных переменных $vub_i = e_i / \text{div}$, $\text{div} = \{5 \dots 30\}$.

В четвертой главе рассмотрены вопросы подготовки исходных данных, выполнена апробация методики на примере реального участка УДС в г. Иркутске, разработаны методические рекомендации для практического использования предлагаемой методики.

Исходные данные для оценки матрицы корреспонденций представляются в форме ориентированного графа со значениями интенсивности потока на дугах. Должно применяться описание сети, при котором корреспонденции, реализуемые по нескольким путям, разделяются на набор отдельных матриц корреспонденций. Таким образом, участок сети разбивается на графы так, чтобы каждая пара корреспондирующих вершин соединялась между собой только одним маршрутом (см. рис. 2, рис. 5).

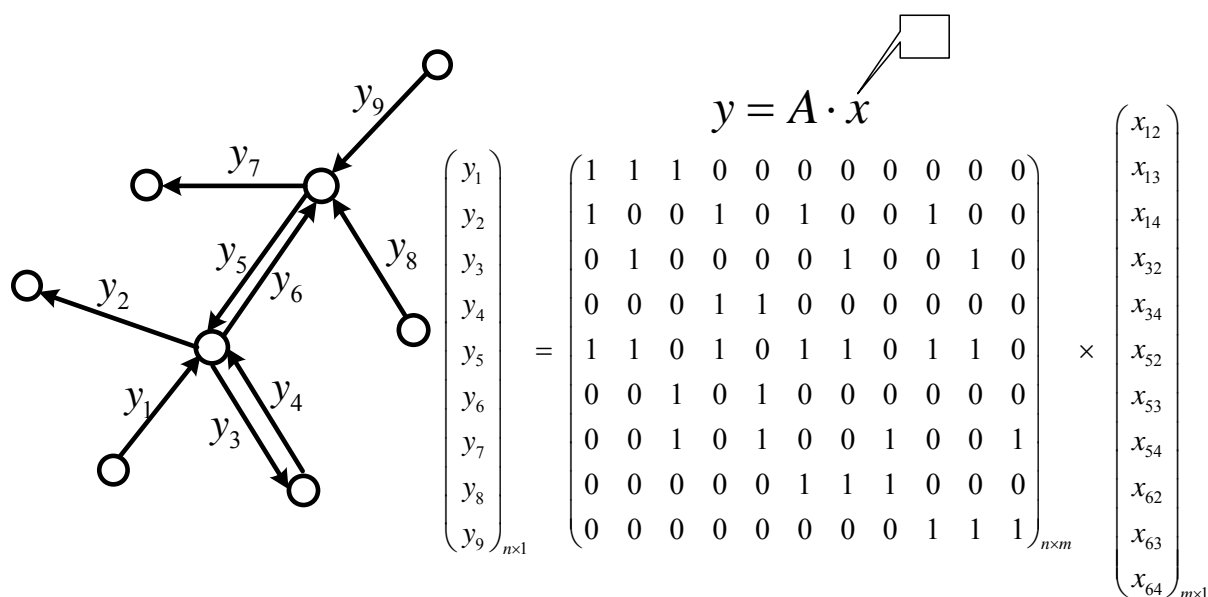


Рис. 5. Представление в матричной форме задачи распределения транспортных потоков по данным интенсивности движения (y_i - интенсивность потока, x_{ij} - корреспонденции)

В результате матрица принадлежности маршрутов дугам графа A является булевой, поскольку ее элементы a_{ij} имеют значение 0 или 1. Так, если корреспонденция j проходит по дуге i , то $a_{ij} = 1$, иначе $a_{ij} = 0$. Индексы строк соответствуют индексам дуг, а индексы столбцов – корреспонденциям, что более предпочтительно с позиции подготовки и ввода исходных данных (рис. 5).

Для применения рассматриваемой методики необходимо использовать некоторое начальное значение корреспондирующих потоков \hat{x}_j^0 , которое необходимо получить на основе какой-либо предварительной обработки данных интенсивности движения. Рекомендуется вычислять вектор начальных значений корреспонденции \hat{x}_j^0 с использованием гравитационной модели:

$$\hat{x}_{ij}^0 = a_i b_j A_i B_j, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (10)$$

где a_i – интенсивность движения из вершины i ; b_j – интенсивность движения в вершину j ; $A_i B_j$ – коэффициенты балансировки по столбцам и строкам матрицы корреспонденций.

В качестве одного из примеров апробации предлагаемой методики представлен участок левобережных и правобережных подходов к старому Ангарскому мосту (г. Иркутск). Данный участок УДС представлен ориентированным графом, включающим 8 корреспондирующих вершин и 31 дугу, на которых измерены пиковые значения интенсивности движения (рис. 6).

В отличие от тестов, выполненных в главе III, где известны точные значения корреспондирующих потоков, соответствующие значения интенсивности движения, в данном случае выполняется оценка реального распределения транспортных потоков по УДС.

Обследование участка УДС на подходах к старому мосту через Ангару выполнено следующим образом:

- на перекрестках с использованием видеосъемки проведены измерения интенсивности движения по отдельным направлениям (рис. 6) в вечерние пиковые часы будних дней в период с 17.00 до 19.00 с разделением подсчетов на каждые 30 мин;
- полученная видеосъемка оцифровывалась и обрабатывалась с использованием разработанного программного продукта PCE-GET, выявлялся час пик и определялась соответствующая максимальная интенсивность движения;

- проведен статистический анализ полученных данных интенсивности движения, который подтвердил корректность сведения данных в единую выборку.

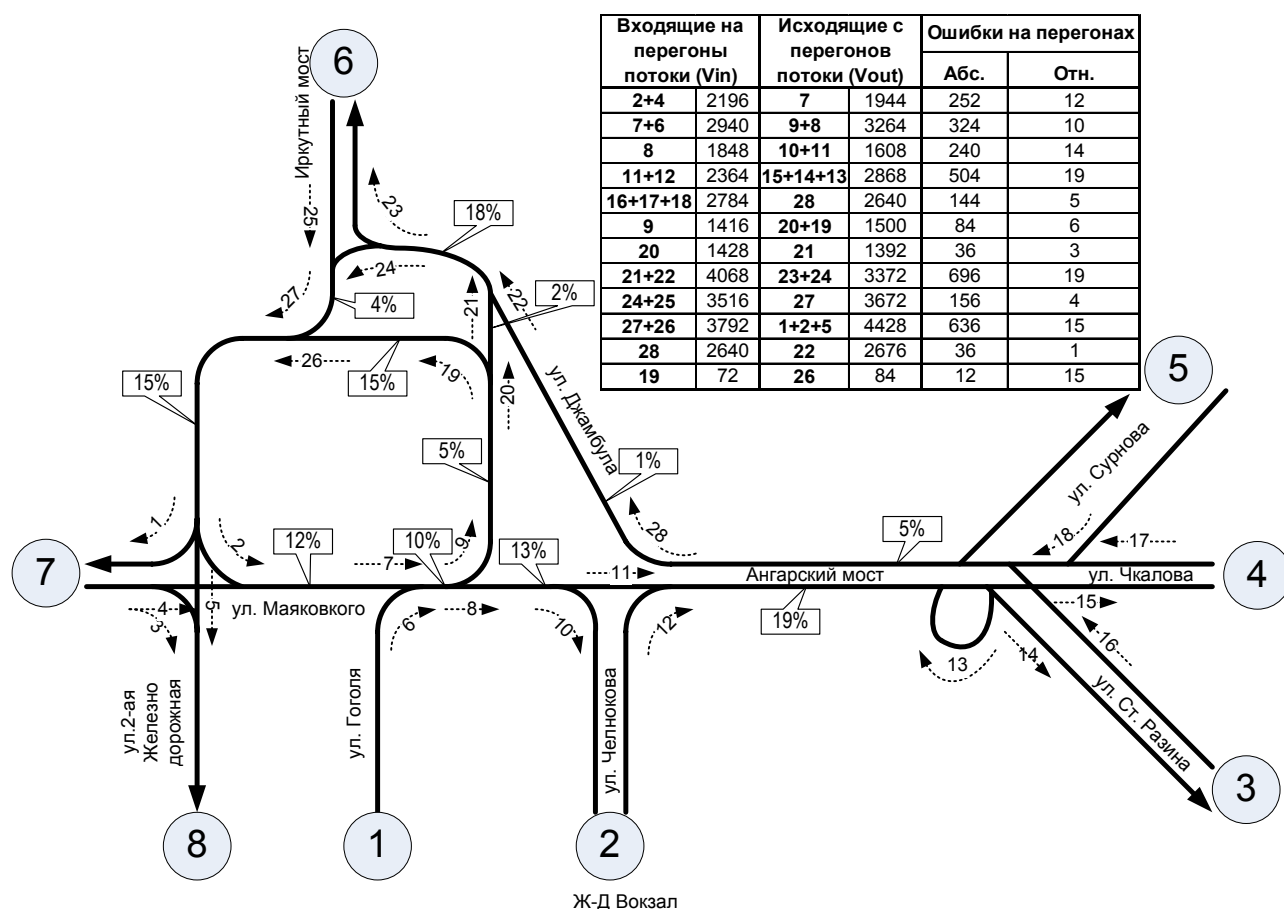


Рис. 6. Улично-дорожная сеть левобережных и правобережных подходов к старому мосту через р. Ангару в г. Иркутске (ошибки сходимости потоков на перегонах, %)

Поскольку при восстановлении матриц корреспонденций по реальным данным значения самих корреспонденций неизвестны, то показателем качества оценки матрицы является мера сходимости наблюдаемых значений интенсивности движения y_i с расчетными \hat{y}_i . Применительно к рассматриваемому участку УДС сходимость потоков достигается на 3-ей итерации.

В целом полученный результат можно оценивать как достаточно точный для практического использования. Коэффициент детерминации достигает значения 0.95 (рис. 7). Существующее распределение транспортных потоков на УДС на подходах к старому Ангарскому мосту в г. Иркутске представлено матрицей корреспонденций (табл. 1), точность восстановления которой представлена в табл.2.

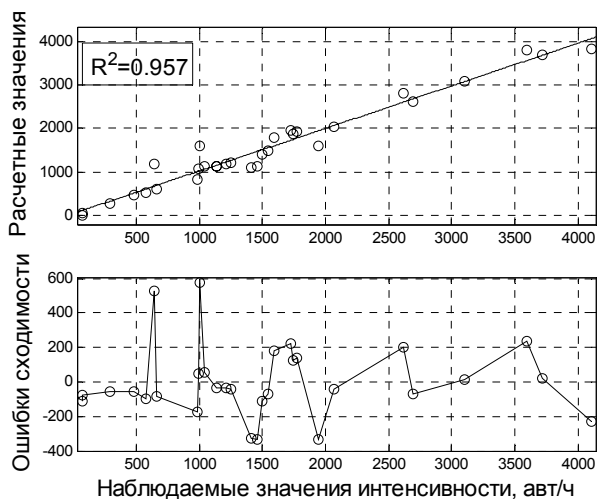


Рис. 7. Оценка сходимости потоков, МНМ,
 $x_{lb} = 0.5$, $x_{ub} = 1.5$, $div = 30$

Таблица 1
 Результаты восстановления матрицы
 корреспонденций транспортных потоков

		Поток в вершину							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Поток из вершины	1	-	126	350	300	125	125	70	15
	2	-	-	407	163	547	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	61	178	273
	4	-	-	-	-	-	118	214	273
	5	-	-	-	-	-	509	524	458
	6	-	53	382	91	304	-	479	564
	7	-	90	206	106	184	610	-	72
	8	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2

Оценка точности восстановления матрицы						
max	min	Абс.сред	Разброс	Ст.откл.	R ²	t кр.Ст.
601	-335	142.9	936	210.2	0.95	-0.04

Опыт применения методики на УДС г. Иркутска показывает, что она наилучшим образом соответствует задачам локальной реконструкции УДС и адресных мероприятий организации движения. Методика эффективна в тех случаях, когда невозможно проводить сбор данных о маршрутах следования транспортных средств, позволяет дополнять обследования регистрацией номеров транспортных средств и не требует дополнительных усилий по проверке исходных и полученных данных.

При оценке существующего распределения транспортных потоков на участке УДС на подходах к старому Ангарскому мосту (см. рис. 6) была выполнена оценка трудоемкости и стоимости проведения вариантов обследований по получению исходных данных:

- с использованием методики оценки матриц корреспонденций по данным интенсивности движения;
- по методике с использованием анкетирования водителей.

Оценка ущерба от задержки транспортных средств выполнялась в соответствии с ВСН-21-83 «Указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог». В рассмотренном случае предложенная методика позволила снизить трудоемкость, продолжительность и стоимость обследований на 60% в сравнении с методикой на основе анкетирования водителей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и теоретически обоснованы методы робастной оценки существующих матриц корреспонденций транспортных потоков с использованием данных интенсивности движения при условии, что улично-дорожная сеть задается набором ориентированных графов, соответствующие вершины которых связаны между собой одним маршрутом.
2. Предложена методика подготовки исходных данных, процедура предварительной оценки их точности и выявления в них выбросов, использующая метод парных сравнений входящих на перегоны и выходящих с перегонов потоков. Оценка точности обследований интенсивности движения на узлах УДС г. Иркутска позволила установить следующие:
 - 2.1. Средняя абсолютная ошибка на перегонах УДС варьируется в диапазоне 50–120 авт./ч, а максимальные абсолютные значения ошибок (разность значений входящего на перегон и выходящего с перегона потоков) достигают 350–480 авт./ч.
 - 2.2. Наиболее строгой оценкой точности обследований интенсивности движения является отношение средней абсолютной ошибки к среднему значению интенсивности движения на перегоне, составившей в среднем 15%.
 - 2.3. Для выявления выбросов рекомендуется использовать нормированное отклонение разностей значений входящих на перегоны и выходящих с перегонов потоков.
3. По результатам сравнительного тестирования метода наименьших модулей и метода наименьших квадратов с использованием искусственных матриц корреспонденций сделаны следующие выводы:
 - 3.1. Установлено, что методы обладают сходимостью в случае плохо обусловленных матриц и матриц неполного ранга. Это позволяет использовать их для оценки распределения транспортных потоков, когда число соответствующих пар превышает количество дуг, на которых измерены значения интенсивности движения, что особенно важно для практического использования.

- 3.2. Наибольший эффект на качество восстановления корреспонденций транспортных потоков и скорость схождения значений интенсивности движения на перегонах УДС оказывают двухсторонние ограничения задач оптимизации. В соответствии с результатами тестирования установлены рекомендуемые значения ограничений.
- 3.4. Показано, что лучшая сходимость, при наличии выбросов в данных интенсивности движения, достигается при использовании метода наименьших модулей, состоящего из 3-х итераций. При сильном загрязнении исходных данных увеличение числа итераций может несколько снизить качество оценки.
- 3.5. Установлено, что методика оценки матриц корреспонденций транспортных потоков по данным интенсивности движения может быть сведена к задаче линейного программирования со смешанными ограничениями – за основу рекомендован метод наименьших модулей.
- 3.6. Точность оценки матриц корреспонденций рекомендуется выполнять с использованием следующих статистик: критерия Стьюдента для парного сравнения наблюдаемых и расчетных значений потоков, средней абсолютной разности пар наблюдаемых и расчетных значений потоков.
4. Предлагаемая методика позволяет оценивать существующее распределение транспортных потоков на УДС, выполнять аппроксимацию исходных данных при построении картограмм интенсивности движения, что позволяет использовать ее при разработке проектов организации дорожного движения и реконструкции УДС. Кроме этого, методика может использоваться для оценки межостановочной матрицы пассажирских корреспонденций на общественном транспорте, при этом в качестве вершин задаются остановочные пункты, а в качестве дуг – перегоны между остановками. Методика внедрена Администрацией г. Иркутска для выполнения работы по оценке пропускной способности и уровня загрузки УДС г. Иркутска. Использование методики в реальных проектах показало, что в сравнении с обследованиями, включающими сбор данных о маршрутах следования, предлагаемая методика снижает трудоемкость и стоимость обследований до 60% .

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лагерев Р.Ю. Генерация исходных данных для оценки восстановления матриц корреспонденций //Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Мат-лы XI Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Комвакс АМБ, 2004. – С.26 – 28.
2. Лагерев Р.Ю. Методы восстановления матриц корреспонденций потоков по данным загрузки звеньев сети //Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – Иркутск: ИИТМ ИрГУПС, Вып. 3, 2005. – С.111 – 115.
3. Лагерев Р.Ю. Оценка матриц корреспонденций изолированных маршрутов методом максимального правдоподобия //Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – Иркутск: ИИТМ ИрГУПС, Вып. 3, 2005. – С.126 – 132.
4. Лагерев Р.Ю. Методы уравнивания данных интенсивности транспортного потока на сетях //Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Мат-лы XII Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Комвакс АМБ, 2006. – С.83 – 88.
5. Михайлов А. Ю., Головных И. М., Лагерев Р. Ю. Робастное восстановление матриц корреспонденций с использованием библиотеки Optimization Toolbox //Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: Труды 2-ой Всероссийской научн. конф. – М.: ИПУ РАН, 2004. – С.1063-1073.
6. Михайлов А.Ю., Головных И.М., Лагерев Р.Ю. Оценка существующей матрицы корреспонденций на основе данных интенсивности движения //Вестник КГТУ. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, Вып. 35, 2004. – С.191 – 199.
7. Михайлов А.Ю., Лагерев Р.Ю. Восстановлением матриц корреспонденций с использованием библиотеки Optimization Toolbox пакета MATLAB //Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: Мат-лы X Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Комвакс АМБ, 2004. – С.43 – 49.
8. Михайлов А.Ю., Лагерев Р.Ю. Робастное восстановление матриц корреспонденций // Организация и безопасность движения в крупных городах: Сб. докл. 6-я Междунар. конф. – С.Петербург: СПбГАСУ, 2004. - С. 232 – 234.