

*На правах рукописи*

**Шаров Максим Игоревич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА  
НА ПЕРЕВОЗКИ ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТОМ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

**ИРКУТСК – 2008**

Работа выполнена в Иркутском государственном техническом университете.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Головных Иван Михайлович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Зырянов Владимир Васильевич**

**Ведущая организация:** лаборатория «Имитационное моделирование и логистика на транспорте» кафедры «Организация перевозок, управление и безопасность на транспорте», автотранспортного факультета Красноярского государственного технического университета

Защита состоится “10” декабря 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.04 ГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет» по адресу: 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, с подписью составителя и заверенный печатью организации, просим выслать в адрес диссертационного совета на имя его ученого секретаря. Факс: (3952) 40-50-69.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО Иркутского государственного технического университета

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета, д.т.н  
профессор

\_\_\_\_\_ Н.Н. Страбыкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования** определяется ростом уровня автомобилизации и транспортной подвижности населения нашей страны, что усложняет процесс проектирования систем городского пассажирского транспорта (ГПТ) и управления этими системами. К числу актуальных задач относится разработка эффективных методов оценки спроса на транспортное обслуживание, в том числе позволяющих определять разделение этого спроса между ГПТ и индивидуальным автомобильным транспортом. Постоянно обновляемая информация о транспортном спросе позволяет повысить эффективность управления системой ГПТ и улучшить качество транспортного обслуживания населения.

Основной и важнейшей математической формой описания транспортного спроса населения на передвижения является межрайонная матрица корреспонденций. Существует два принципиальных подхода к оценке матрицы корреспонденций:

расчет матрицы между транспортными районами;

её обновление с использованием данных замеров пассажиропотоков на участках сети и «старой» (т.е. полученной ранее) матрицы корреспонденций.

Первый метод требует выполнения трудоемких обследований подвижности населения. Второй - позволяет использовать методы измерения пассажиропотоков, в том числе автоматизированные, вместе с тем он был мало изучен советскими и российскими специалистами, при этом в зарубежной практике управления транспортными системами этот метод активно используется. Поэтому данное диссертационное исследование посвящено разработке метода оценки матрицы корреспонденций на сети ГПТ с использованием значений пассажиропотоков и «старой» матрицы корреспонденций.

**Рабочая гипотеза** заключается в том, что обновление матрицы корреспонденций с использованием данных замеров пассажиропотоков на сети ГПТ и «старой» матрицы корреспонденций позволяет значительно уменьшить трудоёмкость определения транспортного спроса, обеспечивая при этом необходимую точность.

**Целью исследования** является повышение эффективности планирования и управления работой общественного пассажирского транспорта на основе разработки метода определения транспортного спроса, использующего данные замеров пассажиропотоков на сети ГПТ и «старую» матрицу корреспонденций.

**Объектом исследования** является процесс передвижения пассажиров на общественном и индивидуальном автомобильном транспорте.

**Предметом исследования** являются распределение пассажирских корреспонденций между районами города, с использованием общественного и индивидуального автомобильного транспорта, а так же сходимость предлагаемого метода обновления старой матрицы корреспонденций.

### **Задачи исследования:**

1. Теоретически обосновать метод оценки транспортного спроса, основанного на обновлении матрицы корреспонденций с использованием замеров пассажиропотоков на сети и «старой» матрицы корреспонденций.
2. Разработать методику подготовки исходных данных для предлагаемого метода оценки транспортного спроса.
3. Рассчитать традиционным методом (используя данные о подвижности населения, определяемые анкетным способом, и емкости транспортных районов) существующую матрицу на примере Иркутска.
4. Выполнить обновление «старой» матрицы корреспонденций с использованием данных о пассажиропотоках на примере сети ГПТ Иркутска.
5. Оценить точность предлагаемого метода оценки матрицы корреспонденций путем сравнения его с методом расчёта матрицы корреспонденций по данным обследований подвижности населения.

### **Научная новизна заключается в:**

- 1) новом подходе к оценке существующего транспортного спроса, использующем данные обследований пассажиропотоков и «старой» матрицы корреспонденций;
- 2) математической модели регрессионного обновления матрицы корреспонденций пассажирских потоков при использовании «старой» матрицы и данных замеров пассажиропотоков на сети;
- 3) данных о подвижности населения, полученных в условиях растущего (современного) уровня автомобилизации, позволяющих повысить точность оценки транспортного спроса и корректировать сеть ГПТ.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель обновления матрицы пассажирских корреспонденций, основанная на данных замеров пассажиропотоков и «старой» матрицы корреспонденций, позволяющая значительно снизить трудоёмкость и стоимость работ в сравнении с методом расчёта матрицы, базирующемся на данных подвижности населения и емкостях транспортных районов;
2. Методика подготовки исходных данных для обновления матрицы корреспонденций, включающая проведение обследований пассажиропотоков и правила выбора сечений на сети ГПТ;
3. Результаты сравнения точности метода расчёта существующей матрицы корреспонденций, основанного на данных о подвижности населения и метода обновления матрицы пассажирских корреспонденций.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечены: репрезентативными объемами выборок; проверкой сходимости расчётных и опытных данных, статистическими критериями; применением библиотек статистической обработки и оптимизации пакета MATLAB, и пакета макромоделирования пассажиропотоков VISUM.

**Практическая значимость работы.** Предложенный метод оценки транспортного спроса позволяет:

- муниципальным органам, перевозчикам, проектным организациям при планировании и проектировании работы ГПТ оценивать транспортный спрос на передвижения между районами города (т.е. существующую матрицу) используя только данные замеров пассажиропотоков, без сбора данных о районах прибытия и отправления, что позволяет значительно снизить трудоёмкость и стоимость таких работ;
- применять различные способы обследования пассажиропотоков, в том числе выполняемые с использованием новейших технологий (электронные проездные билеты, датчики входа-выхода на подвижном составе, детекторы).

**Внедрение результатов работы.** Предложенный в диссертации метод обновления существующих матриц корреспонденций применён в проектной работе, выполненной по заказу администрации г. Иркутска: «Расчет пассажирских потоков на городском маршрутном пассажирском транспорте и индивидуальном автомобильном транспорте в г. Иркутске».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены в научных докладах и выступлениях: на ежегодной научно-технической конференции Иркутского государственного технического университета (г. Иркутск, 2007 г.); на XV и XVI Международных научно-практических конференциях «Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния» (г. Екатеринбург, 2006, 2007 гг.); на V всероссийской научно-технической конференции (Красноярск, 2007 г.); на V международной научно-практической конференции (Минск, 2007г.); на VII и VIII международной научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (г. С-Петербург, 2006, 2008 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 публикации в рецензируемом издании, включенном в перечень ВАК, 6 - в российских изданиях и 2 - в зарубежных.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Содержит 160 страниц основного текста, включает 23 таблиц и 28 рисунков. Библиографический список содержит 132 источника.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена актуальность решаемой задачи, научная новизна и практическая ценность работы. Приводится краткое содержание основных разделов диссертации.

**В первой главе** дана характеристика современного состояния планирования и управления работой городского пассажирского транспорта. Проанализированы основные подходы в области определения спроса на перевозки, получения и обновления матриц корреспонденций. В нашей стране исследованиями в этой области занимались А.П. Артынов, Н.О. Брайловский, С.А. Ваксман, Г. А. Варелопуло, Е.П. Володин, В.А. Гудков, И.М. Головных, И.С. Ефремов, Л.Б. Миротин, А.Ю. Михайлов, И.В. Спирин, М.Л. Дыданюк, Ш.С. Имельбаев, В.Ш.

Крупник, Н.В. Лившиц, А.Н. Мальгин, В.С. Огай, В.В. Скалецкий, Б.Л. Шмульян и др.

Выделяют два основных этапа планирования: оперативное (т.е. краткосрочное) и перспективное (т.е. планирование на длительный период времени). Исходной информацией на любой стадии планирования, проектирования, управления пассажирскими перевозками являются данные о спросе на передвижения (матрица корреспонденций).

Исходя из этого, можно сделать вывод, что наличие матрицы корреспонденции необходимо для организации работы ГПТ, как в настоящее время, так и на прогнозируемый период.

Процесс получение матрицы путем определения данных подвижности населения весьма трудоёмок и не всегда возможен. Значит, очень важно наличие методов обновления матриц корреспонденции, которые не требуют, больших усилий для получения исходных данных, а также дают возможность, проведения оперативного обновления с использованием автоматизированных средств регистрации пассажиров.

**Вторая глава** посвящена теоретическим аспектам и разработке метода регрессионного обновления матрицы корреспонденции с использованием значений пассажиропотоков, измеренных на транспортной сети.

Задачу определения транспортного спроса по результатам выборочного обследования потоков (пассажирских и транспортных) на транспортной сети рассматривали многие авторы: В.Н. Мягков, В.П. Федоров, А.Ю. Михайлов М. G. H. Bell, D. E. Boyce, E. Cascetta, G. Davis, S. Erlander, C. Fisk, M. Florian, R. Hamerslag, C. Hendrickson, D. O. Jornsten, Y. Iida, J. T. Lundgren, M. J. Maher, S. McNeil, S. Nguyen, N. L. Nihan, T. Sasaki, H. Spiess, J. Van der Zijpp, H. J. Van Zuylen, L. G. Willumsenl, H. Yang.

В работах M.G. Bell предложена модель прогноза корреспонденций, в которой потоки на сети известны в целом, без выделения составляющих по отдельным корреспондирующим парам районов. Такой подход, безусловно, связан с простотой получения данных (т.е. необходимо лишь измерять потоки на сети), при этом возможно использование устройств, автоматически фиксирующих величины транспортных потоков (детекторов транспорта различных типов).

Обзор применения за последние 30 лет методов обновления матриц корреспонденций на основе измеренных значений потоков представлен в отчете Международного института прикладного системного анализа (IIASA). Его автор Т. Abrahamsson полагает, что в наиболее общем виде обновление существующей матрицы корреспонденций формулируется следующим образом:

$$\min(g, v) = Y_1 F_1(g, \mathcal{G}) + Y_2 F_2(v, \mathcal{V}) \quad g, v \geq 0 \quad (1)$$

при условии  $v = \text{assign}(g)$ ,

где  $\mathcal{G}$  – обновление матрицы корреспонденций;  $\mathcal{V}$  – вектор значений наблюдаемых потоков;  $F_1, F_2$  – некоторые меры расстояния;  $\text{assign}(g)$  – распределение

потоков по сети, которые разделяют матрицу корреспонденций на потоки, следующие разными маршрутами.

Как один из видов оценки (1) можно рассматривать метод наименьших модулей (МНМ)

$$\sum_{i=1}^n |e_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| = \sum_{i=1}^n |y_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j| \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  - расхождения измеренных значений потоков  $y_i$  и расчетных значений потоков  $\hat{y}_i$  на звеньях сети (остатки регрессии);  $n$  – количество дуг, на которых известна интенсивность движения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $m$  – количество оцениваемых корреспонденций;  $a_{ij}$  – элементы матрицы инцидентий ( $a_{ij} = 1$  если корреспонденция  $j$  принадлежит дуге  $i$ , в противном случае 0);  $x_j$  - определяемые корреспонденции;  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Цель оценивания (2) состоит в нахождении такого вектора корреспонденций  $\mathbf{x}$ , при котором соответствующий пассажиропоток на звеньях сети  $\hat{y}$  максимально близок замеренному значению пассажиропотока  $y_i$ . Устойчивость указанной функции (2) к ошибкам измерений потоков, по сравнению с функцией  $\sum_{i=1}^n |y_i - \sum_{j=1}^m x_j a_{ij}|^2 = e_i^2$ , очевидна и поэтому она относится к так называемым методам робастной регрессии.

Любая предварительная информация о распределении потоков существенно повышает точность оценивания матрицы корреспонденций, к ним относятся:

- данные частичного обследования пассажиропотоков, распространяющиеся на генеральную совокупность;
- «старая» (ранее рассчитанная) матрица корреспонденций, корректируемая на основе данных замеренных пассажиропотоков;
- данные распределения пассажирских потоков по сети, полученных по «старой» матрице, корректируемые с использованием существующих значений пассажиропотоков.

В соответствии поставленной задачей настоящего диссертационного исследования необходимо разработать метод, пригодный для обновления определенной ранее матрицы корреспонденций при следующих условиях:

- рассматривается детальное представление сети в виде ориентированного графа, на специально выбранных сечениях которого замерами устанавливается значение пассажиропотока;
- берутся данные обследований пассажиропотока (ручной или автоматический подсчет, видеосъемка с последующей обработкой, датчики входа выхода, и т.д.);
- используется ранее рассчитанная матрица корреспонденций (материалы генплана, КТС и т.д.), а также картограмма пассажирских потоков, полученная по этой матрице;
- матрица корреспонденций между выделенными вершинами сети определяется методами математической статистики, т.е. с помощью робастного регрессионного анализа.

Для решения задачи (2) необходимо использовать методы линейного программирования, в которых на оцениваемые параметры налагаются ограничения по знаку ( $x \geq 0$ ). В рассматриваемой задаче обновления матриц корреспонденций оцениваемые переменные имеют только положительные значения, а знаковыми переменными являются только остатки регрессии. Поэтому для применения метода МНМ (2) требуется ввод дополнительных переменных, позволяющих включить остатки регрессии в состав целевой функции линейного программирования.

Для введения фиктивных переменных  $r_i$  и  $s_i$  выполняется ряд преобразований:

1) формируется новый столбец оцениваемых переменных  $x_2 = (x_1, x_2, \dots, x_m, r_1, r_2, \dots, r_n, s_1, s_2, \dots, s_n)$  размерности  $(m + 2n) \times 1$ , в котором - элементы, оцениваемые соответствующие потоки  $\hat{x}$ ,  $2n$  - фиктивные переменные.

2) в матричной форме задача, кроме нового вектора-столбца оцениваемых параметров  $x_2$ , представляется измененной добавлением фиктивных переменных матрицей  $A$  размерности  $n \times (m + 2n)$ :

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}$$

3) поскольку оцениваемые параметры  $x_1, \dots, x_m$ , которые входят в состав вектора  $x_2$ , не должны влиять на целевую функцию, т.е.  $\sum_{i=1}^n e_i = f_j^T x_{2j}$ , вектор коэффициентов при неизвестных целевой функции  $f$  размерности  $(m + 2n) \times 1$  формируется по принципу:  $f_j = 0, j = \overline{1, m}$ ;

$$f_j = \begin{cases} 1, & \text{if } e_i \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, j = \overline{m+1, m+n};$$

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

В соответствии с приведенной выше процедурой, вектор ошибок  $e$  определяется с учетом результатов оценки вектора корреспонденций  $\hat{x}$  на предыдущей итерации. В зависимости от знака ошибки  $e_i$ , задаются элементы вектора  $x_2$ , начиная с индекса  $m + 1$  (фиктивные переменные) по правилу:  $r_i = \max(0, e_i), i = \overline{n+1, n+m}; s_i = \max(-e_i, 0), i = \overline{n+m+1, n+2m}$ .

В матричной форме решение получает следующий вид:

$$\min \sum_{i=1}^n |e_i| = \min(f_j^T x_{2j}), \quad (3)$$

при линейных ограничениях налагаемых на переменные

$$A_2 \times X_2 = y, \quad (4)$$

и двухсторонних ограничениях налагаемых на вектор оцениваемых параметров  $x_{lb} \leq x_2 \leq x_{ub}, x_{lb} \geq 0, x_{ub} > 0$ .



Для решения задачи линейной оптимизации (3) использовалась библиотека OPTIMIZATION TOOLBOX, в которой реализована соответствующая функция LINPROG пакета MATLAB, что позволяет проводить вычисления с разреженными матрицами большой размерности.

**В третьей главе** описаны общие методики экспериментальных исследований: определение величин пассажиропотоков и транспортного спроса.

1. Установлена последовательность метода определения транспортного спроса, по данным подвижности населения. Установлено количество транспортных районов. Представлены основные положения анкетного обследования населения и необходимый объём выборки для города численностью до 600 тысяч человек.

2. Разработана анкета для оценки подвижности населения и программное приложение в среде Microsoft Office “Access” (рис. 1) для обработки полученных анкет транспортного обследования. Получено и обработано 3 157 анкет.

3. Установлены необходимые характеристики подвижности населения и транспортной сети для расчёта матрицы корреспонденций: транспортная подвижность населения; коэффициент пересадочности и суточной неравномерности; уровень качества транспортного обслуживания (затраты времени на передвижение по трудовым целям); уровень и структура затрат времени на передвижение (накладные затраты: продолжительность подходов к остановочным пунктам, время ожидания на них; время, затрачиваемое на пересадки, и подходы от остановочных пунктов; суммарное время поездок). Наряду с этим произведена оценка годового объёма транспортной работы и средней скорости сообщения.

4. Рассмотрены основные методики определения пассажиропотоков. Предложена методика определения пассажиропотоков для регрессионного обновления матрицы корреспонденции, на специально выбранных сечениях.

Создание объектов : форма

Введите улицу (микрорайон), номер дома и наименование организации (гаража, стоянки), а также почтовый индекс, к которой относится данный объект...

Наименование улиц	Дом	Зона
12 платф	37	16
3 Июля ул	39	16
30 Иркутской Див	58	16
5 Армии ул	1	7
8 Марта пер	18	7
9 Января ул	20	7
Авиаторов ул	20/1	7
Автомобильная ул	20а	7
Айвазовского пер	22а	7
Академика Бурде	22б	7
Академика Курчат	23	7
Академика Образ	24	7
Академика Павло	24а	7
Академика Павло	26	7
Аксакова ул	27	7
Александра Матр	29	7
Александра Чекал	33	7

Остановки			
4-я Советская		16	0
8-я больница		65	0
Автовокзал		4	1
Батарейная		65	0
Госпиталь Ветеранов	М-он Юбилейный	86	0
З-д нерудных материал		57	0
Иркутный мост	Возле АЭС	46	0
Общежитие		16	0
пос Горького		45	0
С-во Геолог		45	0
С-во Наука		45	0
С-во Сосна		45	0
4-я Советская		16	0
6-я Советская		16	0
Академическая		85	0
Академическая	Два направления	82	1
Академическая	Южная	84	1

Дом: 20    Зона: 7    Агрег-я зона: 1

Улицы: Академическая    Остановки: Южная    Примечание: Два направления    Зона: 84    В зоне (1)? 1

Удалить    Создать    ПОЕЗДКИ    Удалить    Создать    Выход

Рис. 1. Программное приложение для обработки транспортных анкет

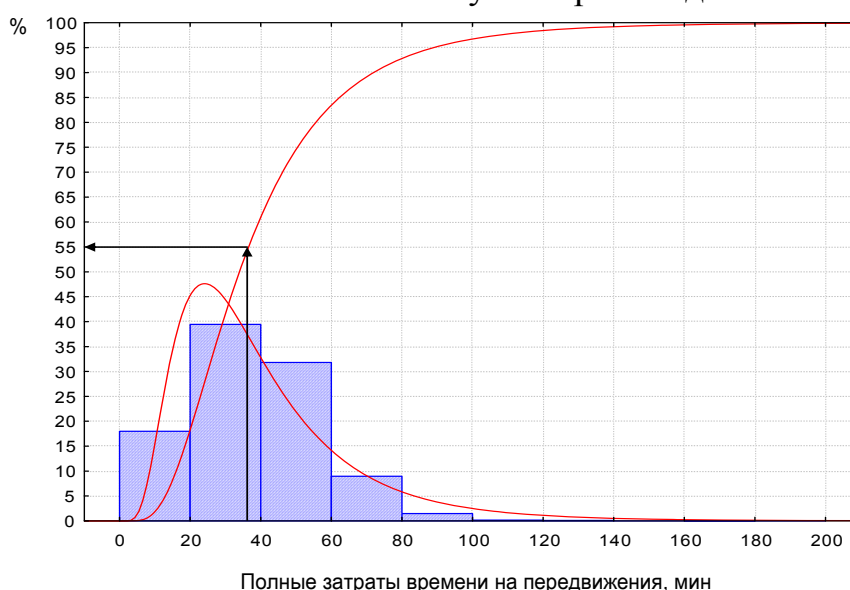
Важной задачей является выбор сечений сети, их количество будет всегда меньше, чем число корреспонденций. Выбранные сечения должны располагаться на:

- границах зон, где сосредоточены основные потоки, тяготеющие к конкретной зоне;
- основных магистралях, на которых сосредоточены большая часть маршрутов, например, мосты, главные улицы и т.д.
- крупных остановочных пунктах и перекрестках, а также иметь удобные места, обеспечивающие обзор для проведения натурных обследований.

**В четвертой главе** приведены результаты апробации предложенной методики обновления матрицы корреспонденции по данным замеров величин пассажиропотоков на сети ГПТ Иркутска и «старой» матрицы корреспонденции, разработанной в 1985 г. в рамках Генерального плана Иркутска ЦНИИП градостроительства и картограммы пассажирских потоков, выполненных той же организацией.

По результатам выполненного анкетного обследования средняя транспортная подвижность в Иркутске - 876 передвижений с использованием транспорта в год. Общая подвижность (передвижений/сутки на 1 чел) – 2,4; маршрутная подвижность (поездок/сутки на 1 чел.) – 4,06; коэффициент пересадочности 1,5. По результатам оценки сетевой подвижности транспортная работа маршрутного нерельсового транспорта составляет 2 млрд 627 млн пасс.км/год. При этом для расчета принимались следующие значения: средняя продолжительность поездки - 19,6 мин; скорость сообщения – 18 км/ч; численность населения, участвующего в передвижениях (исключаются дети дошкольного возраста и школьники начальных классов) – 536 тыс. чел.

По результатам обследования (рис. 2.) требования СНИП 2.07.01-89\* не выполняются. Затраты времени населением на передвижения по трудовым целям составляют 38 мин лишь у 55% респондентов.



**Рис. 2. Распределение затрат времени на передвижение по трудовым целям в один конец.**

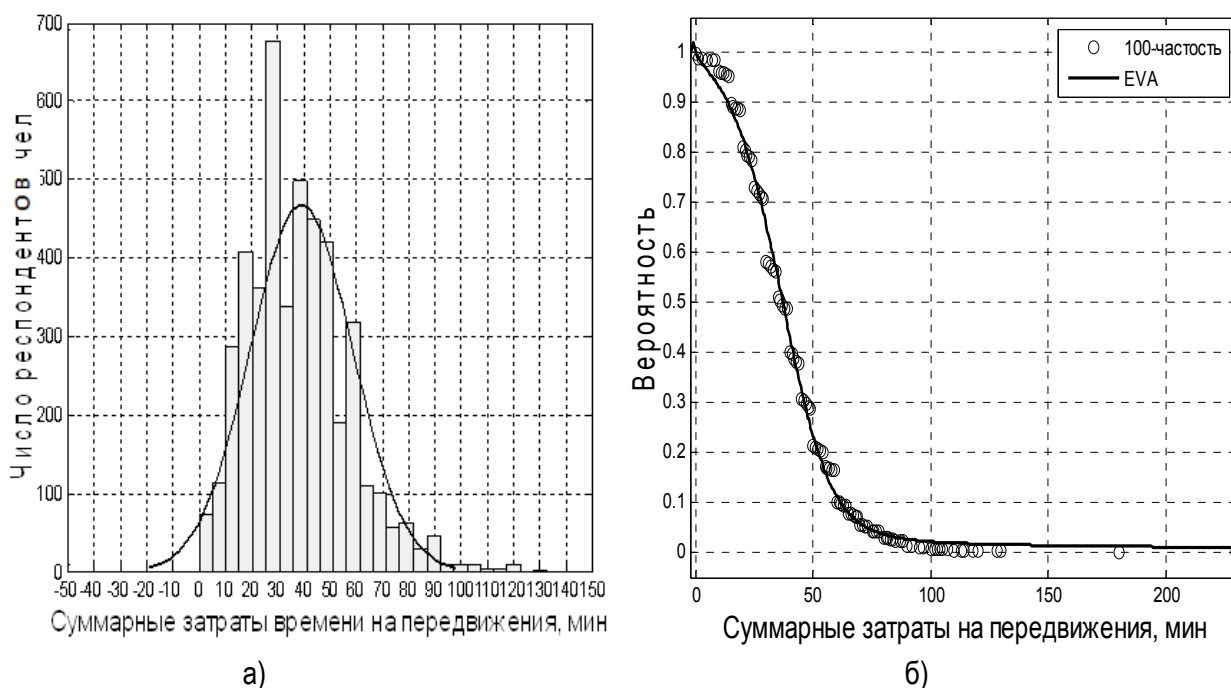
По результатам оценки суточного распределения поездок установлено что: максимальный часовой поток приходится на период 7:00 – 8:00; величина коэффициента суточного максимума – 0,127. Получены следующие параметры исходных данных для оценки кривой тяготения:

Число респондентов, чел.	3157
Максимальные затраты времени, мин	230
Минимальные затраты времени, мин	1
Среднее значение затрат, мин	39.06
Медиана выборки	37
Размах выборки	230
Стандартное отклонение	19.54
Дисперсия	381.90

Выполненный по материалам анкетных данных поиск функций тяготения показал, что наилучшей аппроксимацией обладает функция EVA (рис 3, табл. 1).

$$BW_{ij} = \frac{1}{(1 + W_{ij})^{\varphi(W_{ij})}} \quad \varphi(W_{ij}) = \frac{E}{1 + e^{(F - GW_{ij})}} \quad (6)$$

где E, F, G – калибровочные коэффициенты.



**Рис. 3. а) - гистограмма распределения суммарных затрат времени на передвижения в г. Иркутске, аппроксимация нормальным распределением; б) - кривая тяготения, построенная с использованием данных выборочного анкетирования на основе модели EVA**

Коэффициент множественной детерминации для рассмотренной функции  $R^2 \geq 0.98$ , что подтверждает высокое качество аппроксимации данных анкетных обследований.

Статистика исходных данных для оценки кривой тяготения

Тип передвижения	Е	Ф	Г
Все виды передвижений	1,078	3,855	0,0707
Индивидуальный транспорт	0,915	4,330	0,1199
Общественный транспорт	0,8618	4,517	0,09017

Для выполнения балансировки корреспонденций с учетом функций тяготения жителей Иркутска разработана программа «Матрица», основанная на гравитационной модели расчёта, позволяющая задавать разные функции тяготения (рис. 4).

В расчетах, выполняемых для Иркутска, было принято: число расчетных транспортных районов-92 (детальный расчет); число укрупненных зон-13 (рис. 5).

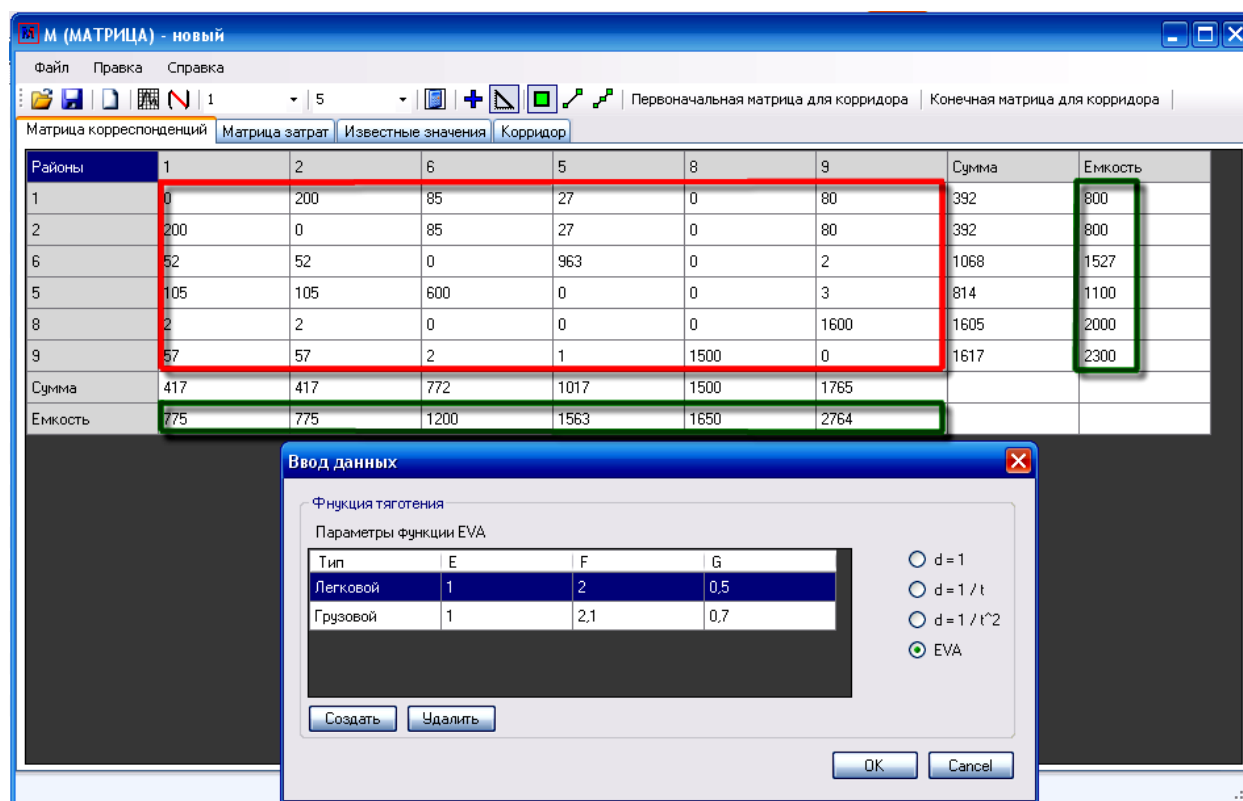


Рис. 4. Общий вид рабочего окна «Матрица»

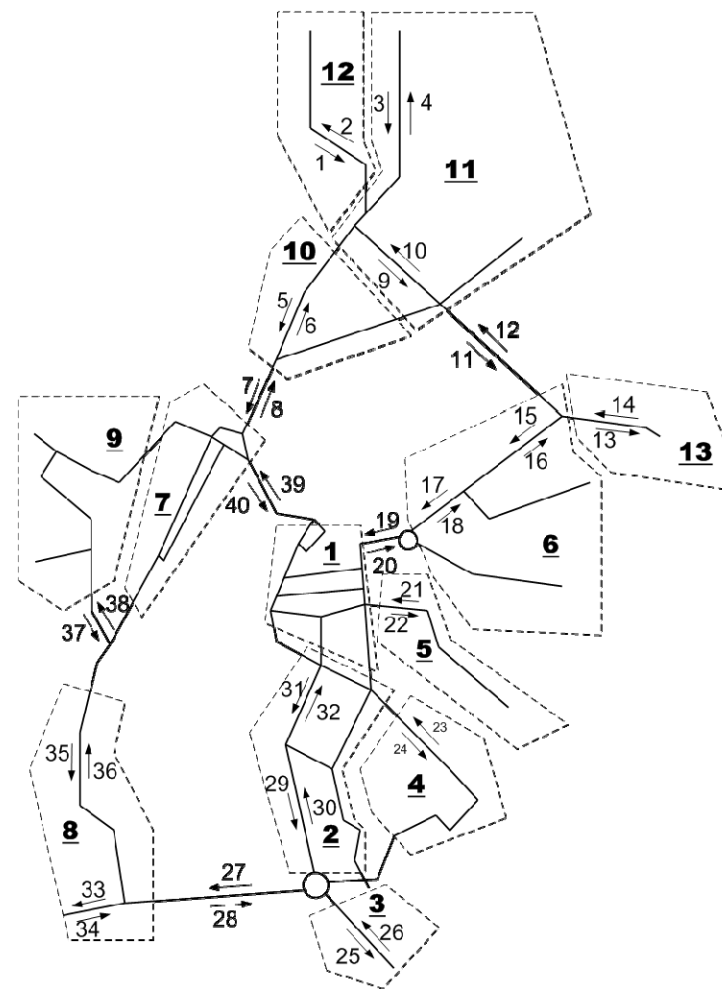
Для реализации предложенного метода оценки матрицы корреспонденций (3-5) была разработана программа с использованием библиотеки OPTIMIZATION TOOLBOX среды MATLAB. Размерность оцениваемой матрицы  $40 \times 156$ , где 40 – количество сечений на сети ГПТ (табл. 2), 156 - количество корреспонденций. По результатам эксперимента сходимость потоков, по предложенной методике достигается уже на третьей итерации (рис. 6).

Заключительным этапом работы являлась оценка точности предложенного метода оценки транспортного спроса.

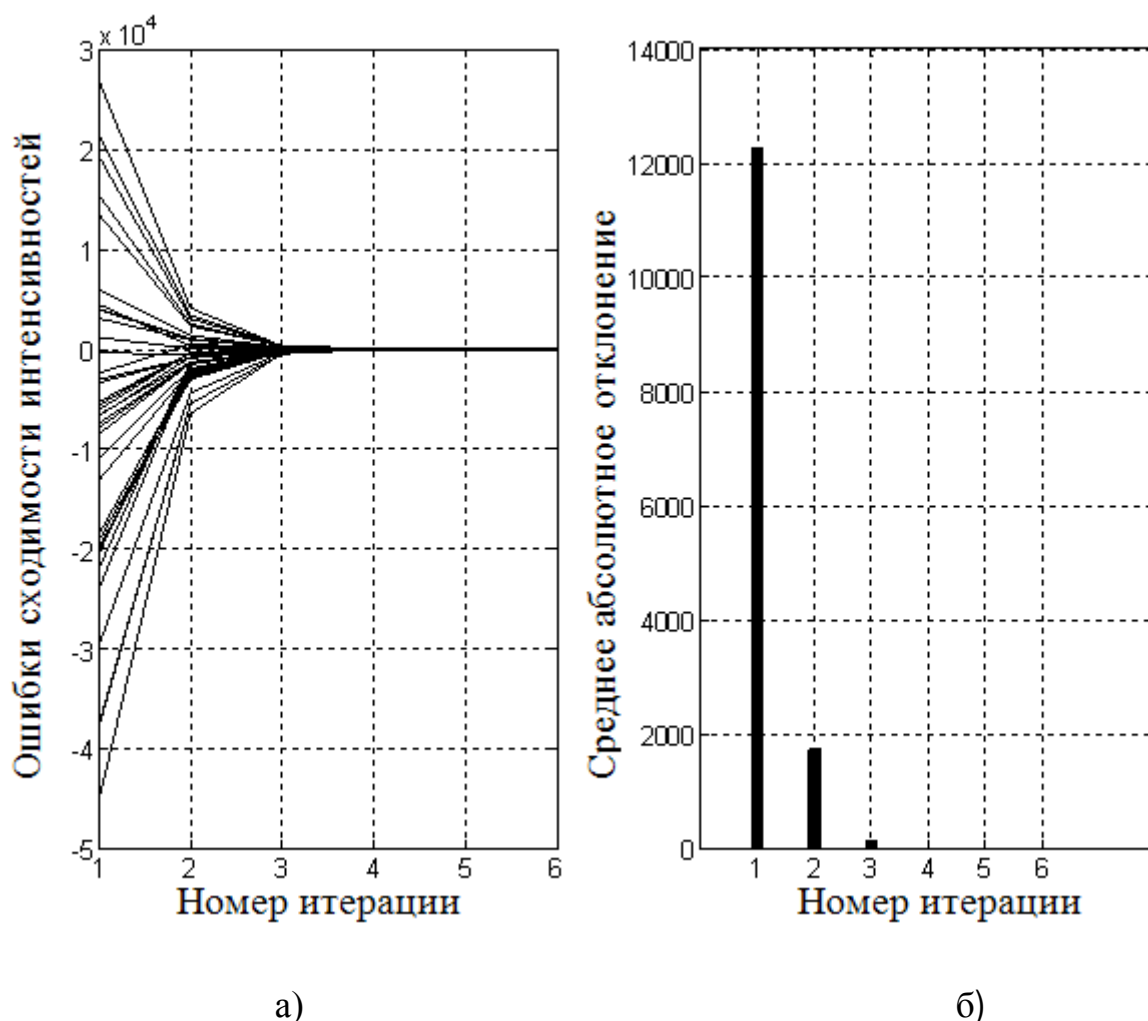
**Таблица 2**  
**Замеренные величины пассажиропотоков на сети ГПТ г. Иркутска**

Номера сечений на сети ГПТ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P	55372	57057	42221	44862	77558	82210	80549	84067	6292	6431
Номера сечений на сети ГПТ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P	6698	6820	3987	3857	9146	9398	40087	38534	40087	38534
Номера сечений на сети ГПТ	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
P	25216	22124	68160	67879	30264	30721	37119	30965	80759	47880
Номера сечений на сети ГПТ	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
P	100309	104334	81165	73762	71313	70138	75901	76223	172743	148066
Номера сечений на сети ГПТ	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
P	100309	104334	81165	73762	71313	70138	75901	76223	172743	148066

P – пассажиропоток, пасс./сутки



**Рис. 5.** Транспортная сеть города с вы-  
 бранными сечениями (1-13 - № транс-  
 портных районов; 1-40 – № сечений на  
 сети)



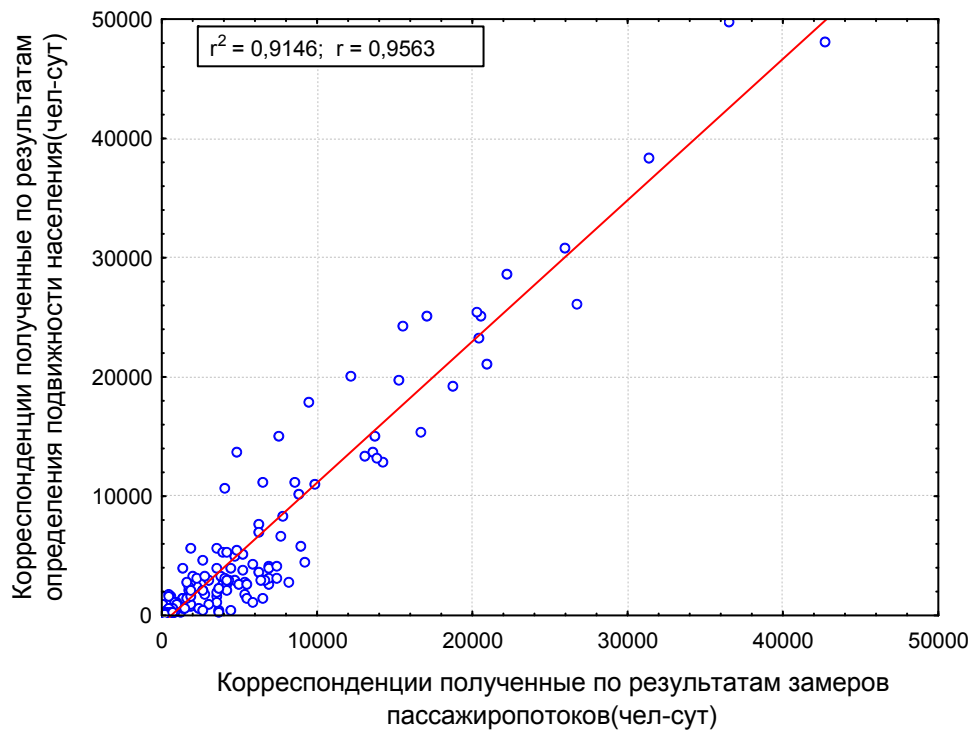
**Рис. 6. Оценка сходимости корреспонденций: а) Ошибки значений потоков  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  (остатки регрессии); б) Среднее абсолютное отклонение потоков**

Основными показателями оценки качества определения целевых параметров являются коэффициент корреляции ( $R$ ) и величина  $R^2$ , называемая множественным коэффициентом детерминации, которая показывает долю вариации зависимой переменной, обусловленную регрессией или изменчивостью объясняющих переменных. Она является мерой качества уравнения регрессии, характеристикой прогностической силы анализируемой регрессионной модели: чем ближе  $R^2$  к единице, тем лучше регрессия описывает зависимость между объясняющими и зависимой переменными. Результаты их расчётов представлены на рис. 7 и в табл. 3.

**Таблица 3**

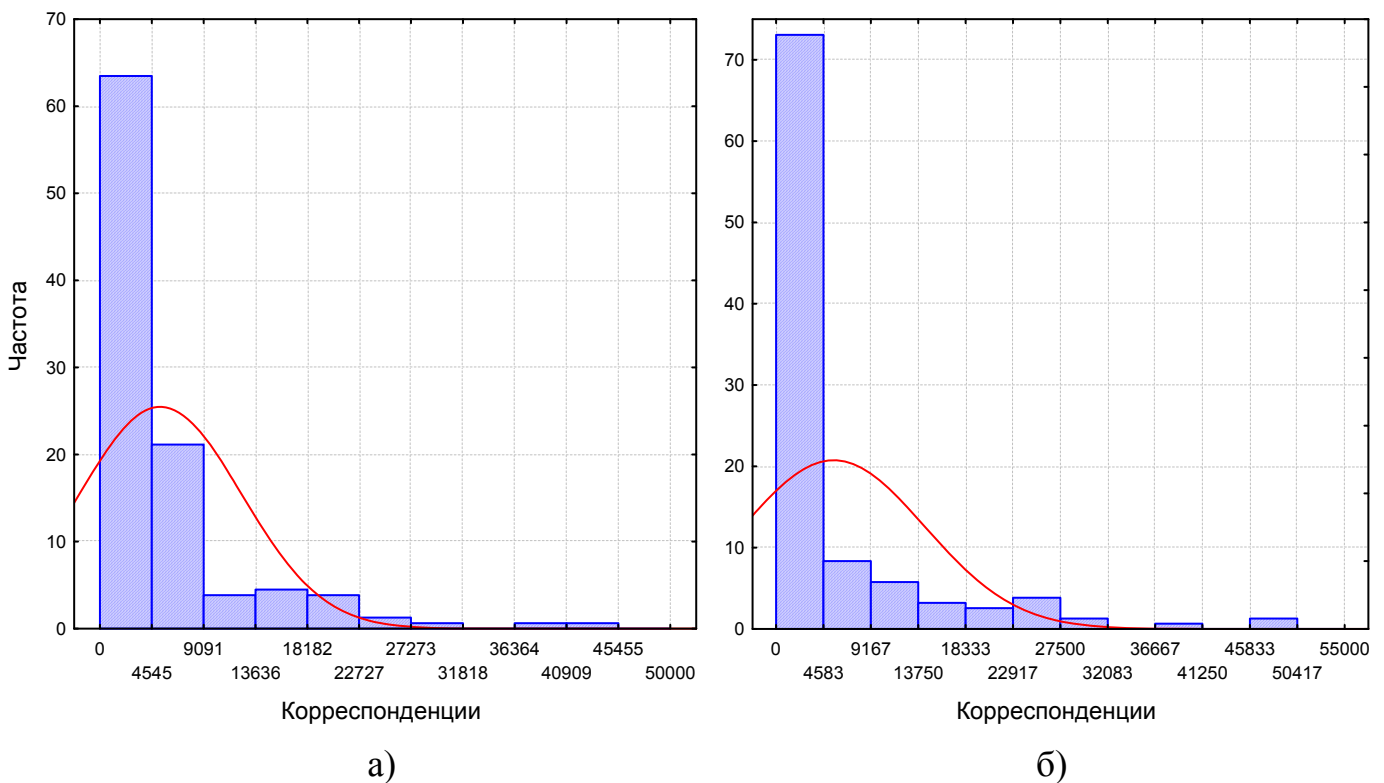
**Анализ точности оценки**

Сравниваемые параметры	Статистика	
	$R$	$R^2$
Корреспонденции	0,95	0,91

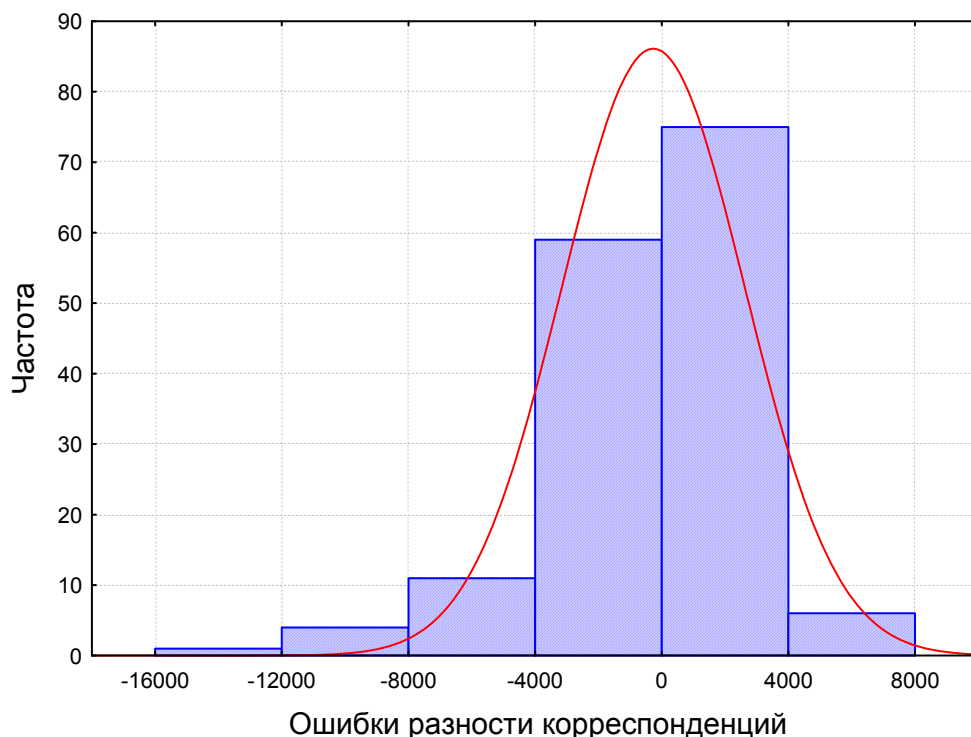


**Рис. 7. График корреляционной зависимости корреспонденций**

Поскольку корреспонденции не подчиняются нормальному закону (рис. 8), необходимо было использовать статические оценки, не требующие нормальности распределения.



**Рис. 8. Гистограмма распределения корреспонденций: а) обновленная матрица корреспонденций; б) матрица, полученная с использованием данных о подвижности населения**



**Рис. 9. Гистограмма распределения ошибок разности между корреспонденциями**

Одна из представленных в диссертации статистических процедур – проверка значимости среднего значения разности пар с применением  $t$ -критерия Стьюдента, который признается в статистической литературе оптимальным критерием метода парных сравнений. Проверка статистической значимости разности пар проводится по формуле:

$$\hat{t} = \frac{\bar{d}}{S_d} = \frac{(\sum d_i)/n}{\sqrt{\frac{\sum d_i^2 - (\sum d_i)^2/n}{n(n-1)}}}, \quad (7)$$

при этом число степеней свободы для критерия Стьюдента  $\nu = n - 1$ .

Рассматриваемая выше формула (7) представляет собой отношение среднего значения разностей и соответствующего стандартного отклонения  $S_d$ . Проверяется нуль-гипотеза  $\mu_d=0$ , где  $\mu_d$  – истинное среднее значение разности пар. Противопоставляемая ей альтернативная гипотеза предполагает  $\mu_d \neq 0$  (двухсторонний критерий). Нуль-гипотеза принимается, если рассчитанное значение критерия Стьюдента  $t$  меньше критического или равно ему  $t_{(n,\alpha)}$ . Проверка связанных выборок с помощью  $t$ -критерия имеет менее строгие допущения (Л. Закс), переменные могут значительно отклоняться от нормального распределения (достаточно чтобы их разности распределялись по нормальному закону). В целом распределения разности ошибок близки к нормальному (рис. 9), что позволяет достаточно обоснованно применять критерий Стьюдента.



Статистическое сравнение двух методов

Сравниваемые параметры	Среднее	<i>N</i>	Стандартное отклонение	<i>t</i>	<i>df</i>
Корреспонденции рассчитанные	5303,583	156	2890,551	-1,14816	155
Корреспонденции обновлённые	5569,301				

Коэффициент Стьюдента  $t$  при сравнении двух матриц составил 1,14, что не превышает критического значения  $t_{0,05;155} = 1,96$  (табл. 4). Результат позволяет утверждать, что заявленная рабочая гипотеза подтверждена, а предложенный в работе метод имеет достаточную работоспособность и может быть применен на практике.

На основании полученных результатов предложена корректировка сети основных автобусных маршрутов Иркутска.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертация является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором содержится решение задачи повышения эффективности планирования и управления работой городского пассажирского транспорта на основе применения метода определения транспортного спроса, использующего регрессионное обновление матрицы корреспонденций, внедрение которого позволит значительно снизить трудозатраты и стоимость обследований. Это позволило сделать следующие выводы:

1. Традиционный метод получения данных о транспортном спросе является трудоёмким и дорогостоящим процессом.
2. Теоретически обоснован метод регрессионного обновления матрицы корреспонденции по данным замеров величин пассажиропотоков и «старой» матрицы корреспонденции, которая описана в М-файле программной среды MATLAB.
3. Предложена методика подготовки исходных данных для обновления матрицы корреспонденций, включающая проведение обследований пассажиропотоков и правила выбора сечений на сети ГПТ. Методика позволяет использовать современные автоматизированные средства регистрации пассажиров, что значительно снижает трудоёмкость обследований.
4. Оценка характеристик подвижности населения Иркутска в современных условиях, которые были определены по специально разработанной анкете, позволили установить, что:
  - только 55% населения при поездке на работу укладываются в установленный норматив 38 мин. Средняя продолжительность времени поездки составляет 19,6 минут;

- максимальный пассажиропоток приходится на утренние часы с 7:00 – 8:00, а коэффициент суточного максимума составляет 0,127, что подтверждается исследованиями, которые были проведены в других городах;
  - средняя подвижность населения в сутки составила 2,4 поездок на одного человека в сутки, а количество поездок, которое приходится на одного жителя в год, составляет 876.
5. Используя существующий метод расчета транспортного спроса на основе данных о подвижности населения, была рассчитана матрица корреспонденций. В специально разработанном программном обеспечении применялась гравитационная модель. В процессе чего было установлено:
- наибольшее сосредоточение пассажиропотока отмечено в 1 зону (центр города), что говорит о необходимости разнесения функций центра в другие районы города.
  - наилучшей аппроксимацией данных при расчете кривой расселения обладает функция EVA, коэффициент множественной детерминации для рассмотренной функции  $R^2 \geq 0.98$
6. Апробация предложенного метода на реальной сети ГПТ показала, что он позволяет решать основную задачу в области планирования и управления работой ГПТ. В процессе реализации была обновлена матрица корреспонденций, полученная в 1985 г.
7. Оценка точности предложенного метода показала, что он сопоставим с методом расчёта матрицы корреспонденций на основе данных о подвижности, а коэффициент корреляции составил  $R \geq 0.95$ . Так же, при проверке значимости разницы пар выборки, было установлено, что коэффициент Стьюдента  $t = 1.14$ , что не превышает критического значения  $t_{0.05;155} = 1.96$
8. Разработанный метод позволяет существенно снизить сроки и затраты на определение транспортного спроса, потому как использует, только лишь данные замеров величин пассажиропотоков и «старой» матрицы корреспонденции. Ожидаемый экономический эффект от внедрения мероприятия в Иркутске составил более 1 млн. рублей.

**Основные материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:**

**В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций:**

1. Шаров М.И. Методика оценки транспортного спроса для проектов организации дорожного движения /М.И. Шаров//Вестник ИрГТУ. 2007. - №4(32). - С.151-154.
2. Шаров М.И. Результаты сравнения методов оценки транспортного спроса на сети городского общественного транспорта /М.И. Шаров//Вестник ИрГТУ. 2008. - №3(35). - С.144-147.

### **Опубликованные в других изданиях:**

3. Шаров М.И. Оценка пропускной способности остановочных пунктов / А.В. Зедгенизов, М.И. Шаров, А.Б. Куприянова // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы XV международной научно-практической конференции – Екатеринбург: АМБ, 2006. - С.197 – 201.

4. Шаров М.И. Исследование параметров расселения г. Иркутска / М.И. Шаров, А.Б. Куприянова, А.Г. Левашев, Р.Ю. Лагереv // Вестник стипендиатов DAAD, Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2006. – С.90-95.

5. Шаров М.И. Обследование подвижности населения в г. Иркутске / М.И. Шаров, А.В. Зедгенизов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы XIII Международной научно-практической конференции – Екатеринбург: АМБ 2007.- С. 171 – 173.

6. Шаров, М.И. Оценка кривой тяготения жителей г. Иркутска относительно центра по данным анкетирования / М.И. Шаров, Р.Ю. Лагереv, А.Б. Куприянова // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы XIII Международной научно-практической конференции – Екатеринбург: АМБ 2007.- С. 167 – 171.

7. Шаров, М.И. Результаты анкетного обследования подвижности населения в г. Иркутске в 2006 г. / М.И. Шаров // Политранспортные системы. Материалы V Всероссийской научно – технической конференции - Красноярск: Красноярский государственный технический университет, 2007. – С. 197-202.

8. Шаров, М.И. Расчет кривых тяготения с использованием данных выборочного анкетирования на основе модели EVA. / М.И. Шаров, А.В. Зедгенизов, А.Г. Левашев, Р.Ю. Лагереv // Материалы пятой международной научно-практической конференции – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2007 – С.535 – 541.

9. Шаров М.И. Сравнение точности методов оценки корреспонденций на сети городского общественного транспорта / М.И. Шаров, Р.Ю. Лагереv // Сборник докладов 8-й международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» – Санкт–Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно – строительный университет. - 2006. - С. 248 – 250.

10. Sharov M.I. Robust estimation of Origin-Destination matrix from volumes counts / A. U. Lagerev, A. Y. Mikhailov, M.I. Sharov // Networks for mobility 2008: Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium / Martin, U. et al. (Eds.). – Stuttgart, FOVUS, 2008. – P. 54 – 56