

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ*

*Докт. физ.-мат. наук, проф. НУРМИНСКИЙ Е. А.¹⁾,
докт. техн. наук, проф. ПУГАЧЕВ И. Н.²⁾, канд. физ.-мат. наук ШАМРАЙ Н. Б.³⁾,
канд. техн. наук, доц. СЕДЮКЕВИЧ В. Н.⁴⁾*

¹⁾Дальневосточный федеральный университет (Россия),

²⁾Тихоокеанский государственный университет (Россия),

³⁾Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,

⁴⁾Белорусский национальный технический университет

E-mail: nurminskiy.ea@dvfu.ru

Рассмотрена транспортная система одного из слабо освоенных регионов Восточной Сибири, для которого планируются инвестиции в развитие соответствующей инфраструктуры. Эффективное использование инвестируемых средств предполагает изучение имеющегося спроса на транспортные услуги в области пассажирских перевозок, результаты которого могут быть использованы в планировании развития дорожной сети и системы автобусного сообщения.

В связи с отсутствием прямых данных об имеющемся спросе предпринята попытка его модельного описания с помощью модифицированных гравитационных моделей для определения объемов перемещения населения с использованием маршрутных автобусов и индивидуальных автомобилей между населенными пунктами. Всего в модели рассмотрено более 5000 корреспондирующих пар населенных пунктов для 86 населенных пунктов, где проживало свыше 80 % всего населения региона, из которых выделена потокообразующая часть в объеме 60 %. Перевозки в корреспондирующих парах определяли на основе гравитационных моделей с различными функциями притяжения и методом Эрроусмита для удовлетворения транспортных балансов. Наиболее адекватные результаты получены с помощью экспоненциальной функции притяжения для индивидуальных автомобилей и степенной – для маршрутизируемого пассажирского автотранспорта, что вполне согласуется с предпочтением маршрутизируемого автотранспорта для дальних перевозок. Древовидная структура имеющейся дорожной сети позволила избежать рассмотрения альтернативных маршрутов при перемещении пассажиров и непосредственно рассчитать транспортные потоки на определенных участках. Сравнение полученных на этой основе транспортных потоков с имеющимися частичными данными наблюдений демонстрирует удовлетворительное совпадение на основном массиве эмпирических данных. Результаты расчетов показывают эффективность подобного подхода, а сами данные могут служить ориентиром для транспортного планирования.

Ключевые слова: транспортный спрос, прогноз пассажиропотоков, расчет корреспонденций, моделирование автомобильных перемещений.

Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 15 назв.

DETERMINATION OF PASSENGER-TRAFFIC FLOWS IN REGIONAL TRANSPORT SYSTEM ON THE BASIS OF MODIFIED GRAVITY MODELS

*NURMINSKIY E. A.¹⁾, PUGACHEV I. N.²⁾,
SHAMRAY N. B.³⁾, SEDYUKEVICH V. N.⁴⁾*

¹⁾Far Eastern Federal University, Russian Federation (Russia),

²⁾Pacific National University, Russian Federation (Russia),

³⁾Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Russian Federation,

⁴⁾Belarusian National Technical University

The paper considers a transportation system of one poorly developed region of the Eastern Siberia where it is planned to make investments for improvement of the corresponding infrastructure. The efficient investment disbursement presupposes study of the existing demand for transport services in the field of passenger traffic. Results of the observations can be used for development planning of a road network and a bus service system.

Due to lack of direct data on the existing demand efforts have been made to obtain its model description while using modified gravity models that make it possible to estimate volumes of population transportation which is carried out between residential areas by public transport buses and private vehicles. The given models have permitted to make analysis of more than

* Работа частично поддержана грантом РФФИ 13-07-12010.

5000 populated locality pairs for 86 residential areas where the population constitutes more than 80 % and its passenger flow formation component is equal to 60%. Traffic flows between these settlement pairs have been estimated with the help of gravity models with various attraction functions and Arrowsmith method for provision of transportation balances. The most adequate results have been obtained while using an exponential attraction function for individual vehicles and a power attraction function for passenger route auto transport. Such approach is consistent with the preference of the route auto transport in case of long-distance transport service. A tree-like structure of the existing traffic system has given the possibility to avoid consideration of alternative routes in case of passenger transportation and directly calculate transport flows for certain road sections. Comparative analysis of the transport flows using the proposed methodology and the existing partial data of the executed observations reveals satisfactory coincidence of empirical data for the main part of the traffic system. The obtained results demonstrate an efficiency of the described approach and the presented data can be used as a benchmarking tool for transport planning.

Keywords: transportation demand, passenger flow forecasting, correspondence estimation, vehicle route modeling.

Fig. 4. Tab. 2. Ref.: 15 titles.

Введение. Программами развития Сибирского и Дальневосточного федеральных округов предполагаются значительные инвестиции в расширение транспортной инфраструктуры региона. Для эффективного использования инвестиций уже на этапе разработки таких проектов необходимо применять средства оценки их влияния на социально-экономическую жизнь региона, т. е. определить, какое влияние эти проекты окажут на объемы и качество транспортных услуг. Одно из таких средств – исследование транспортных систем с помощью математических моделей и методов. Последние позволяют получать объективные оценки функционирования транспортной системы, выбирать наиболее эффективные проекты и предотвращать затратные мероприятия, которые могут на самом деле привести к ухудшению транспортной ситуации. Ключевым моментом подобных исследований – прогноз спроса на транспортные услуги в пределах региона, что дает возможность спрогнозировать загрузку транспортной сети, системные и пользовательские затраты.

Исследование транспортных систем с помощью математических моделей и методов сегодня также актуально в связи с развитием в России навигационно-коммуникационных технологий, которые позволяют реализовать новые принципы управления транспортом и потоками, приводят к существенному увеличению эффективности логистики и эксплуатации машин и механизмов. Создание и развитие интеллектуальных систем управления в регионах даст возможность качественно изменить процессы организации и управления, наладить бесперебойную и безопасную работу транспор-

та, обеспечить лучшие условия для инфраструктурного развития. Для Сибири и Дальнего Востока особенно важно использование современных сервисов на удаленных территориях, создающих условия для доступной логистики и повышающих качество жизни в регионе [1]. Такие технологии открывают новые возможности для прогноза транспортного спроса, однако чтобы полностью реализовать их потенциал, необходимо уже сейчас разрабатывать математические модели спроса и оценивать их пригодность для тех или иных видов перемещений.

Оценке транспортного спроса в мировой литературе посвящено немало работ. Так, с основными подходами можно ознакомиться в [2], где описан опыт определения объемов перемещения населения между населенными пунктами Иркутской области по автодорожной сети и приведено сравнение рассчитанных на этой основе нагрузок на транспортную инфраструктуру с имеющимися частичными данными. Оценка транспортного спроса представляла собой часть выполнения государственного контракта 13-ОК/12 (от 12.09.2012) на научно-исследовательскую работу по составлению транспортной модели Иркутской области.

Математическое моделирование транспортного спроса. Ключевая информация в транспортном планировании – это объемы спроса на перевозки. Под транспортным спросом будем понимать объемы пассажиропотоков между различными населенными пунктами Иркутской области, где один из пунктов считается начальным, а второй – конечным. Формальным представлением этих данных является матрица корреспонденций, строкам которой соответствуют

зоны отправления, а столбцам – зоны прибытия. Обозначим через T_{ij} транспортный спрос между пунктами i и j (корреспонденция между i и j); очевидно, что все $T_{ij} \geq 0$. Если удастся объективно оценить объемы отправления O_i из пункта i и объемы выезда D_j из пункта j , то для элементов T_{ij} матрицы корреспонденций обычно требуется выполнение балансов:

$$\begin{aligned} \sum_j T_{ij} &= O_i, \quad i = 1, 2, \dots; \\ \sum_i T_{ij} &= D_j, \quad j = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (1)$$

Подходы к моделированию корреспонденций условно можно разделить на методы, использующие факторы роста (методы аналогий), и методы, учитывающие межзональные факторы (синтетические методы). Методы аналогий основаны фактически на предположении о неизменности структуры потокообразующих процессов, что не подходит к оценке влияния крупных транспортных проектов, сопровождающих значительные изменения социально-экономической ситуации в регионе. Для прогнозов транспортного спроса в таких ситуациях более подходят синтетические методы, в основе которых лежит предположение о том, что распределение корреспонденций может быть определено по базовым предположениям о природе передвижений и учету пространственных факторов. Одним из таких методов, широко используемых в мировой практике транспортных исследований, является расчет корреспонденций на основе модифицированной гравитационной модели [3–9], которая описывает корреспонденции с помощью уравнений вида

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij}),$$

где c_{ij} – затраты (временные, финансовые) на передвижение между пунктами i и j ; $f(c_{ij})$ – функция тяготения, характеризующая предпочтения индивидуумов при выборе передвижения из i в j ; A_i , B_j – калибровочные коэффициенты, которые подбираются так, чтобы удовлетворить балансы (1):

$$A_i = [\sum_{j=1}^n B_j f(c_{ij})]^{-1}; \quad B_j = [\sum_{i=1}^m A_i f(c_{ij})]^{-1}.$$

Подбор этих коэффициентов производится при помощи специальных процедур, называемых

методами балансировки [10–13]. В настоящем исследовании для численного расчета корреспонденций использовали метод [11], который показал вполне удовлетворительные результаты.

Статистика и транспортная характеристика региона. Иркутская область расположена в юго-восточной части Сибирского федерального округа. По площади территории (774,8 тыс. кв. км; 4,53 % территории России) область занимает 5-е место среди регионов России. По данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области, оценка численности постоянного населения Иркутской области с учетом окончательных итогов всероссийской переписи населения на 1 января 2012 г. составила 2424,4 тыс. чел., по плотности населения область занимает 69-е место в России. В состав области входят 33 муниципальных района, девять городских округов, 67 городских и 365 сельских поселений.

Как и все территории Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока, Иркутская область относится к слабоосвоенным территориям с уровнем обеспеченности автомобильными дорогами 42 % от расчетного показателя. Вместе с тем, промышленно-энергетический потенциал и стратегически выгодное географическое положение делают ее одним из важнейших регионов и серьезным кандидатом на реализацию программ развития и соответствующих проектов по совершенствованию транспортной инфраструктуры.

Для оценки транспортного спроса были выбраны 86 основных населенных пунктов области с суммарным количеством жителей 1976484, или 81,5 % от их общего числа. Экономически активное население, которое участвует в генерации транспортного спроса Иркутской области, составляет 61 %. Для калибровки модели использовали следующие данные: численность населения административных районов области, численность населения и годовой доход местного бюджета населенных пунктов, общее количество отправок со станций области по Транссибирской железной дороге, годовой оборот пассажиров на пригородном и междугородном автобусных

сообщениях, годовой оборот пассажиров на внутренних авиалиниях. Транспортный спрос в Иркутской области описывали четырьмя матрицами корреспонденций: перемещения на частных легковых автомобилях, маршрутных автобусах, железнодорожным транспортом, авиасообщением. Весь спрос на пассажироперевозки делили между указанными видами перемещений в пропорциях 19:65:15:1, что соответствовало имеющейся статистике продаж билетов и уровню автомобилизации области.

При расчете корреспонденций Иркутской области использовали два вида функций тяготения $f(c_{ij})$: $\lambda_{ij}e^{-\gamma c_{ij}^{\theta}}$ – для легковых автомобилей и $\lambda_{ij}c_{ij}^{-\theta}$ – для автобусов, где c_{ij} – среднее время (для автомобилей) или средние затраты (для остальных видов транспорта) на передвижение из i в j ; γ, θ – калибровочные коэффициенты; λ_{ij} – коэффициент «привлекательности» поездки из i в j . Самые полные и представительные результаты были получены на наиболее массовом виде перемещений, осуществляемых индивидуальными легковыми автомобилями, что и представлено в данной статье.

Выбор значений коэффициентов «привлекательности» λ_{ij} осуществляли на основе некоторых соображений о предпочтениях одних населенных пунктов другим. Такие предпочтения определяются не только удаленностью пунктов друг от друга, но и их административной значимостью и подчиненностью, показателями их экономической деятельности, туристической привлекательностью. В исследовании при моделировании передвижений населения коэффициенты λ_{ij} рассчитывали по следующей формуле:

$$\lambda_{ij} = k_{ij} \tau_j E_i^{\alpha_i} E_j^{\alpha_j},$$

где k_{ij} – коэффициент связности i -го и j -го населенных пунктов, определяемый в зависимости от их административной значимости и подчиненности; τ_j – туристическая привлекательность пункта j ; E_i – доход на душу населения в пункте i ; α_i, α_j – калибровочные коэффициенты.

Значения коэффициентов связности k_{ij} определяются по табл. 1 и зависят от административной значимости пунктов i и j (го-

род, поселок городского типа, поселок, село) и их принадлежности одному или разным районам.

Таблица 1

Значения коэффициентов связности

Административная значимость первого населенного пункта	Территориальная принадлежность населенного пункта	Коэффициент k_{ij} в зависимости от административной значимости второго населенного пункта			
		Город	Поселок городского типа	Поселок	Село
Город	Один район	1,0	1,0	0,7	0,4
	Разные районы	0,4	0,3	0,1	0,1
Поселок городского типа	Один район	1,0	0,7	0,3	0,2
	Разные районы	0,3	0,3	0,1	0,1
Поселок	Один район	0,7	0,5	0,2	0,2
	Разные районы	0,1	0,1	0,1	0,1
Село	Один район	0,5	0,2	0,2	0,2
	Разные районы	0,1	0,1	0,1	0,1

Ключевой входной информацией при расчете корреспонденций по гравитационной модели (1) являются объемы отправок O_i и прибытий D_j . По имеющейся статистике только для железнодорожной сети можно было воспользоваться эмпирическими данными отправок. Однако поскольку наблюдалась хорошая корреляция (0,89) между объемами отправок с железнодорожных станций и населением соответствующих им пунктов, для автодорожной сети объемы отправок рассчитывали как определенный процент от общего населения (10 % городского населения; 20 % населения поселков городского типа; 30 % населения поселков; 40 % населения сел). При этом полагалось, что $O_i = D_i$ для всех рассматриваемых пунктов i .

Моделирование автомобильных корреспонденций. При моделировании автомобильных перемещений посредством личного легкового и общественного транспорта использовали графовую модель автодорожной сети Иркутской области (рис. 1), отображающую реальную географическую информацию о расположении населенных пунктов.

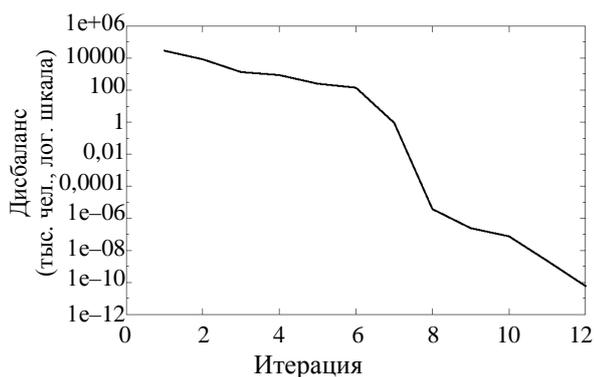


Рис. 2. График сходимости метода балансировки

Результаты вычисления автомобильных потоков по определенным участкам дорог, где имелись соответствующие данные, приведены на рис. 3.

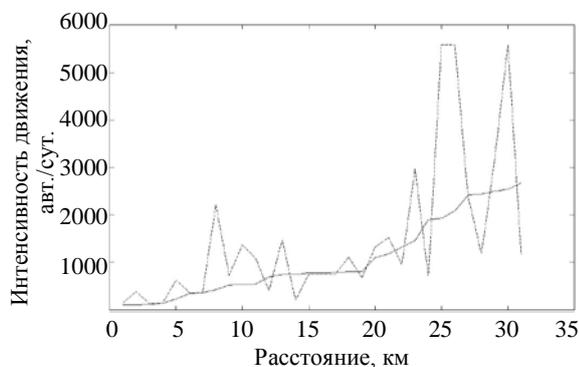


Рис. 3. Расчетные (сплошная линия) и эмпирические (пунктирная) значения потоков на участках автодорожной сети

Сравнение показывает достаточно хорошее совпадение прогноза с реальностью на всех 32 пунктах учета, за исключением небольшого количества дорог, представленных в табл. 2, на которых была отмечена аномально большая интенсивность движения.

Таблица 2

Расчетные и эмпирические значения потоков на участках автодорожной сети с большими отклонениями

Населенный пункт		Интенсивность движения, авт./сут.	
Начальный	Конечный	Прогноз	Наблюдение
28 км	Большая Речка	2541	5580
Большая Речка	Листвянка	2089	5580
Усть-Ордынский	Оса	427	2200
Зима	Саянск	1931	5589

Причинами этого могли быть особые условия движения, скажем, большой грузовой поток, включенный в общие данные, наличие по этому направлению большого числа дачных участков, которые не учитывались в модели, или какие-либо иные особенности учета. Возможно, что после уточнения всех обстоятельств степень совпадения прогноза и реальных данных (рис. 4) на этих отдельных сингулярных участках можно будет повысить.

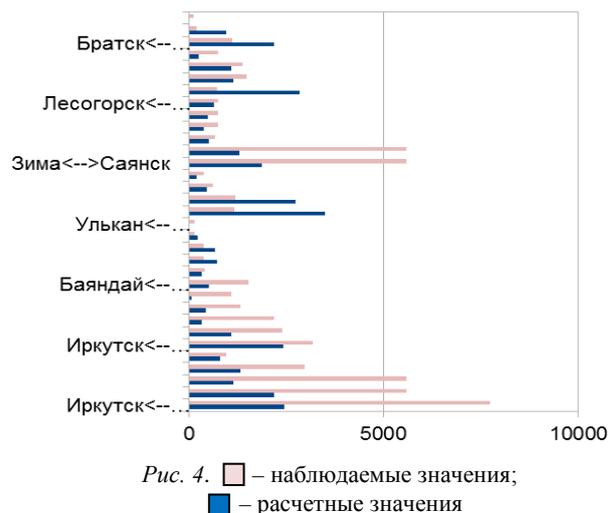


Рис. 4. — наблюдаемые значения; — расчетные значения

ВЫВОД

Проведенные исследования показали, что моделирование транспортного спроса в региональных автодорожных сетях на основе модифицированной гравитационной модели приводит к адекватным результатам, которые вполне можно использовать как объективные характеристики транспортной сети при создании проектов ее развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пугачёв, И. Н. Использование навигационных спутниковых систем в управлении автомобильными перевозками / И. Н. Пугачёв, Ю. И. Куликов, Г. Я. Маркелов // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2011. – № 4. – С. 64–69.
2. Ortuzar, J. D. Modeling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. – Wiley, 2011. – 4th ed. – P. 606.
3. Voorhees, A. M. A General Theory of Traffic Movement / A. M. Voorhees // Transportation. – 2013. – Vol. 40, № 6. – P. 1105–1116.
4. Carrothers, G. A. An Historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction / G. A. Carro-

thers // Journal of the American Institute of Planners. – 1956. – Vol. 22. – P. 94–102.

5. **Voorhees, A. M.** Forecasting Peak Hours of Travel / A. M. Voorhees // Highway Research Board Bulletin. – 1958. – Vol. 203. – 37–46.

6. **Wilson, A. G.** A Statistical Theory of Spatial Distribution Models / A. G. Wilson // Transportation Research. – 1967. – Vol. 1. – P. 253–269.

7. **Wilson, A. G.** A Family of Spatial Interaction Models and Associated Developments / A. G. Wilson // Environment and Planning A. – 1971. – Vol. 3 (1). – P. 1–32.

8. **Лившиц, В. В.** Математическая модель случайно-детерминированного выбора и ее применение для расчета трудовых корреспонденций / В. В. Лившиц // Автоматизация процессов градостроительного проектирования. – М.: ЦНИИП градостроительства, 1973. – С. 39–57.

9. **Системный анализ** и проблемы развития городов / Ю. С. Попков [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 512 с.

10. **Furness, K. P.** Time Function Iteration / K. P. Furness // Traffic Engineering & Control. – 1965. – No 7. – P. 458–460.

11. **Arrowsmith, G. A.** A Behavioural Approach to Obtaining a Doubly Constrained Trip Distribution Model / G. A. Arrowsmith // Operational Research Quarterly. – 1973. – Vol. 24, No 1. – P. 183–194.

12. **Lamond, B.** Bregman's Balancing Method / B. Lamond, N. F. Stewart // Transportation Research. – 1981. – Vol. 15 (B). – P. 239–248.

13. **Schneider, M. H.** A Comparative Study of Algorithms for Matrix Balancing / M. H. Schneider, S. A. Zenios // Operations Research. – 1990. – Vol. 38, No 3. – P. 439–455.

14. **Территориальный орган** Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://irkutskstat.gks.ru>.

15. Транспорт и связь: стат. ежегодник Иркутской области. – Иркутск: Иркутскстат, 2012. – 100 с.

REFERENCES

1. **Pugachiov, I. N.,** Kulikov, Yu. I., Markelov, G. Ya. (2011) Usage of Navigation Satellite Systems in Order to Control Automobile Transportation. *Gruzovoye i Passazhirskoye Avtokhozyastvo* [Freight And Passenger Transport Service], 4, 64–69 (in Russian).

2. **Ortuzar, J. D.,** & Willumsen, L. G. (2011) *Modeling Transport*. 4th ed. Wiley. 606.

3. **Voorhees, A. M.** (2013) A General Theory of Traffic Movement. *Transportation*, 40 (6), 1105–1116. Doi: 10.1007/s11116-013-9487-0.

4. **Carrothers, G. A.** (1956) An Historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, 22, 94–102 Doi: 10.1080/01944365608979229.

5. **Voorhees, A. M.** (1958) Forecasting Peak Hours of Travel. *Highway Research Board Bulletin*, 203, 37–46.

6. **Wilson, A. G.** (1967) A Statistical Theory of Spatial Distribution Models. *Transportation Research*, 1, 253–269. Doi: 10.1016/0041-1647(67)90035-4.

7. **Wilson, A. G.** (1971) A Family of Spatial Interaction Models and Associated Developments. *Environment and Planning A*, 3 (1), 1–32. Doi: 10.1068/a030001.

8. **Livshits, V. V.** (1973) Mathematical model for Random Judgement-Based Sampling and its Application for Calculation of Labour Correspondences. *Automation of Urban Planning Processes*. Moscow, Central Scientific-Research and Design Institute for Town Planning, 39–57 (in Russian).

9. **Popkov, Yu. S.,** Posohin, M. V., Gutnov, A. Je., & Shmul'jan, B. L. (1983) *System Analysis and Problems of Urban Development*. Moscow, Nauka. 512 p. (in Russian).

10. **Furness, K. P.** (1965) Time Function Iteration. *Traffic Engineering & Control*, 7, 458–460.

11. **Arrowsmith, G. A.** (1973) A Behavioural Approach to Obtaining a Doubly Constrained Trip Distribution Model. *Operational Research Quarterly*, 24 (1), 183–194.

12. **Lamond, B.,** & Stewart, N. F. (1981) Bregman's Balancing Method. *Transportation Research*, 15 (B), 239–248.

13. **Schneider, M. H.,** & Zenios, S. A. (1990) A Comparative Study of Algorithms for Matrix Balancing. *Operations Research*, 38 (3), 439–455. Doi: 10.1287/opre.38.3.439.

14. **Local Organization of Federal State Statistics Service for the Irkutsk Region.** Available at: <http://irkutskstat.gks.ru> (accessed 25 January 2015).

15. **Transport and Communication. Annual Abstract of Statistics for the Irkutsk Region.** Irkutsk, Irkutskstat, 2012. 100 p. (in Russian).

Поступила 18.11.2014