

УДК 656.02

Сравнительный анализ транспортного спроса и предложения в моделях транспортных систем городских агломераций

Л. А. Лосин^{1, 2}, Н. В. Булычева¹

¹Институт проблем региональной экономики РАН, Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Серпуховская ул., 38

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лосин Л. А., Булычева Н. В. Сравнительный анализ транспортного спроса и предложения в моделях транспортных систем городских агломераций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 943–953. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-942-943-953

Аннотация

Цель: Провести анализ методов математического моделирования, применяемых для определения спроса на городские передвижения и прогнозирования интенсивности потокораспределения в сети общественного транспорта. Определить зоны эффективного использования сетевого и досетевого подходов к построению транспортных моделей городских агломераций. Провести сравнительный анализ параметров транспортного спроса и предложения в сетевом и досетевом вариантах моделирования систем городского общественного транспорта. **Методы:** Математическое моделирование, методы обработки больших объемов данных, методы геоинформационного анализа. **Результаты:** Проанализированы применяемые в современных транспортных моделях методики определения транспортного спроса и предложения. Проведен сравнительный анализ досетевого и сетевого подходов в транспортном моделировании, определена зона их эффективного использования. Проведена апробация решения задачи определения параметров транспортного спроса и предложения на примере модели системы городского общественного транспорта Санкт-Петербургской агломерации. На основе результатов моделирования проанализированы зависимости транспортного спроса и предложения от исходных данных и ограничений модели. Сделан вывод о необходимости калибровки значения каждого параметра при использовании транспортного моделирования. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут служить основой для совершенствования методов математического моделирования, применяемых в городском транспортном планировании. Предлагаемые подходы к моделированию транспортного спроса и предложения могут использоваться при формировании прогнозных моделей, применяемых для обоснования проектных решений в документации территориального и транспортного планирования.

Ключевые слова: Транспортное моделирование, агломерация, транспортный спрос, общественный транспорт, матрица корреспонденций, пассажиропоток.

Введение

Необходимым условием эффективного и сбалансированного развития городских агломераций является обеспечение высокого уровня транспортного обслуживания населения. Границы городских агломераций охватывают территорию, в пределах которой осуществляются интенсив-

ные регулярные передвижения с трудовыми, культурно-бытовыми и рекреационными целями, управлять которыми можно только путем опосредованного воздействия. Сложность и многообразие процессов передвижения в городских агломерациях обуславливают необходимость применения средств математического моделиро-

вания для их анализа и прогнозирования. А это, в свою очередь, требует значительных вычислительных мощностей и больших объемов информации для использования таких методов в транспортно-градостроительном планировании.

Можно выделить различные уровни проектов, для обоснования решений которых используются методы моделирования: стратегическое планирование, транспортно-градостроительное проектирование, отраслевое планирование и т. д., при этом каждый уровень планирования характеризуется своей степенью детализации исследований. Методы моделирования позволяют решать задачи оценки функционирования транспортной системы в целом или ее укрупненных составных частей, выявления особенностей действующей транспортной системы, определения узких мест и депрессивных в транспортном отношении территорий. Исходными данными для решения этих задач являются характеристики функциональных городских систем, включая транспортную систему, а также показатели, характеризующие транспортное поведение населения [1].

Исследования формирования транспортного спроса на городские передвижения проводятся уже на протяжении многих десятилетий. Еще в опубликованной в 1956 году работе [2] исследовался спрос на передвижение между местами отправления и прибытий в виде функции средней стоимости поездки и загруженности дорог. Авторы этой работы связали величину спроса и пропускной способности со стоимостью поездки и величиной транспортного потока. Если спрос, как функция от средней стоимости, уменьшается по мере увеличения издержек, то стоимость издержек по кривой пропускной способности, как «предложения транспортных услуг по различным ценам», растет или остается постоянной при росте потока. При этом если спрос определяется для каждой пары точек или районов отправления и прибытий, то пропускная способность относится к отдельным участкам улично-дорожной сети.

Построение матриц корреспонденций как оценка спроса на передвижения

Определение спроса на передвижения между парой точек (районов), т. е. оценка объемов взаимных корреспонденций, является необходимым этапом моделирования транспортных систем. Одним из известных методов такого расчета является гравитационная модель, предложенная еще в XIX веке английским экономистом Кэри. Эта модель описывает среднее число поездок между парой мест как величину, пропорциональную произведению отправления и прибытий и обратно пропорциональную квадрату расстояния между ними («отталкивающий» фактор). В настоящее время во множестве моделей «отталкивающий» фактор представляется как функция, зависящая не только от расстояния (времени), но и от неких условных суммарных затрат на передвижение из района в район, связанных с числом пересадок, затратами времени, ценой проезда, удобством сообщения.

Наиболее распространенным методом расчета объемов межрайонных корреспонденций, реализованным в том числе в составе комплекса Citraf¹ [3] и позволяющим учитывать различные факторы, влияющие на величину транспортного спроса, является «энтропийный» подход [4, 5], в котором, в отличие от гравитационной модели, организован процесс реализации массового поведения с учетом ограничений и предпочтений, иными словами — процесс «дележа в стесненных условиях».

Ограничения на количество самостоятельного населения, т. е. населения, участвующего в ежедневных передвижениях, и количество рабочих мест или других объектов тяготения по транспортным районам естественны для постановки задачи формирования матриц корреспонденций. Из всех затрат на передвижения, которые должны учитывать участники

¹Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс для прогнозирования потоков пассажиров и транспорта в городах Citraf / В. П. Федоров (RU). № 2018611770.

движения, основными традиционно считаются предпочтения по использованию затрат времени, заданные в той или иной форме. Еще в довоенный период Г. В. Шелейховский [6] на бумаге вручную определял для разных расстояний и задаваемой средней скорости движения количество расселяющихся от мест их работы, применяя свою таблицу плотности вероятности расселения по временным интервалам. В дальнейшем данная методика совершенствовалась: в 1960-х годах в расчетах для института «Ленпроект», занимавшегося разработкой генерального плана Ленинграда [7], задавались начальная матрица затрат времени и откорректированная таблица плотности расселения Г. В. Шелейховского.

В информационно-программном комплексе Citraf матрица корреспонденций формируется при решении задачи максимизации энтропии, взвешенной относительно исходного предпочтения:

$$p(t_{ij}) = \exp(-\gamma t_{ij} - \mu c_{ij}),$$

где i, j — номера транспортных районов;

t_{ij} — затраты времени на передвижения между районами отправления и прибытия;

c_{ij} — денежные затраты на совершение корреспонденции;

γ — аналог двойственной оценки ограничения на среднее время доступности, если такое ограничение добавляется к ограничениям на численность работающих жителей и количество рабочих мест;

μ — переменная, двойственная ограничению на среднюю стоимость корреспонденции.

Затраты времени на передвижения между районами отправления и прибытия рассчитываются методом построения дерева кратчайших путей для каждого района прибытия из всех районов отправления с помощью алгоритма Дейкстры [8] в том случае, если в массиве исходной информации задается транспортный граф. Данное замечание не случайно, так как матрица затрат времени

в модели может рассчитываться и в так называемом досетевом варианте [9, 10], при котором время передвижения между парами транспортных районов не зависит от конфигурации транспортной сети. В отличие от традиционного сетевого подхода к расчету матриц, досетевой подход показывает свою эффективность при решении прогнозных задач на долгосрочную перспективу, поскольку перспективный транспортный спрос зависит от сетевых ограничений тем меньше, чем больше горизонт прогнозирования.

Выбор параметров γ и μ для модели конкретного города (агломерации) зависит от предполагаемого среднего времени доступности и средней стоимости достижения системы объектов обслуживания. Другие параметры, задаваемые во входном массиве модели, также зависят от особенностей конкретного города (агломерации) с его системами расселения, распределения рабочих мест, транспортной системой и отлаживаются в процессе калибровки. При расчете матриц «энтропийным» методом вводятся ограничения на ряд параметров, при этом задается и априорное предпочтение. Например, в функции тяготения в «энтропийной» задаче можно одновременно учитывать влияние и затрат времени, и денежных затрат при формировании корреспонденций, располагая соответствующей калибровочной информацией.

Определение параметров функционирования транспортной системы на основе анализа спроса на передвижения в сетевом и досетевом вариантах расчета матриц корреспонденций

Сетевые ограничения в модели задаются посредством транспортного графа, степень детализации которого зависит от уровня проектирования. Граф может включать как существующие, так и проектируемые участки улично-дорожной сети, а также трассы различных видов уличного

Таблица 1. Результаты сетевых и досетевых расчетов матриц корреспонденций для Санкт-Петербургской агломерации

Метод расчета	Вариант расчета	Параметр γ	Начальная скорость, км/ч	Среднее время, мин	Объем передвижений внутри транспортных районов, пасс.
Сетевой	1	-0,053	Отдельно для каждого вида транспорта	ОТ: 45,45 ИТ: 27,96	ОТ: 84 584 ИТ: 8662
Досетевой	2а	-0,05	29	41,24	57 823
	2б	-0,05	35	40,05	42 082

и внеуличного транспорта; для всех элементов задаются их скоростные параметры и ограничения. Объединение подграфов отдельных видов общественного транспорта в единую систему осуществляется за счет введения пересадочных связей в местах пересечения различных видов транспорта. Метод введения пересадочных дуг позволяет учесть и маршрутную сеть наземного общественного транспорта (при таком подходе значительно увеличивается объем графа). В зависимости от задачи в модели можно вводить, например, только скоростные маршруты или маршруты электротранспорта. На практике графом индивидуального транспорта часто считается граф улично-дорожной сети [11]. В описываемом исследовании транспортный граф Санкт-Петербургской агломерации содержит почти 5000 дуг, часть из которых относится к системе скоростного рельсового транспорта (метрополитен, пригородная железная дорога, трамвай).

В предлагаемом исследовании, выполненном на примере Санкт-Петербургской агломерации, представлены результаты расчетов пассажиропотоков на графе, выполненном в двух вариантах. В первом варианте (сетевой расчет) используется граф, описывающий сеть городского общественного транспорта; во втором (досетевой расчет) — граф, заданный регулярной прямоугольной сеткой. В обоих вариантах заданы одни и те же ограничения на численность работающих жителей и количество рабочих мест территории рассмотрения. Модель включает 246 расчетных транспортных районов; параметры системы расселения для этих районов нормированы на

основе статистической информации о численности населения по административным районам Санкт-Петербурга по состоянию на 1 января 2022 года [12].

При досетевом расчете регулярная сетка, покрывающая территорию рассмотрения (длина дуги в данном исследовании принята равной 1500 м), не зависит от структуры улично-дорожной сети, номенклатуры и конфигурации сети общественного транспорта. Задание начальной скорости передвижения, на основе которой рассчитывается матрица затрат времени и тем самым производится выбор мест прибытия, является основным параметром при определении спроса на передвижения (совместно с ограничением на среднее время доступности объектов обслуживания). Возможен также вариант задания начальной скорости в зависимости от предполагаемой суммарной пассажирской работы отдельного вида транспорта [13].

В табл. 1 приведены результаты расчетов, выполненных в рамках описываемого исследования на модели Санкт-Петербургской агломерации: один сетевой расчет (расчет 1) и два досетевых расчета (расчеты 2а и 2б), выполненных с использованием регулярной сетки. В сетевом расчете одновременно формируются две матрицы корреспонденций — для общественного (ОТ) и индивидуального (ИТ) транспорта. В обоих вариантах досетевого расчета ограничение на среднее время то же, но начальная скорость движения транспорта, одинаковая на всех дугах, в каждом варианте задается индивидуально.

Формирование равновесного потокораспределения как оценка транспортного предложения

Формирование в модели пассажирских и транспортных потоков осуществляется с учетом важного фактора — ограниченной пропускной способности элементов транспортной сети. Введение этих ограничений приводит к ухудшению условий пользования элементами сети из-за увеличения затрат времени при росте нагрузки на них. При этом выбор каждым участником движения пути следования определяется условием минимизации затрат времени на передвижения (как и условием минимизации стоимости проезда в некоторых расчетах). Выбор пути следования всякий раз производится без согласования с другими участниками движения и осуществляется в каждой промежуточной вершине маршрута движения. При различиях в информационном обеспечении этапы моделирования в досетевом варианте не отличаются от традиционного сетевого расчета, при котором в итерационном процессе, основанном на пересчете скоростей на дугах в зависимости от величины пассажиропотока, формируется равновесный пассажиропоток [5].

Исследования потокового равновесия в транспортных сетях ведутся достаточно давно [14]. Более полувека назад в работе [2] авторы сформулировали математическую модель равновесия в транспортной сети и свели ее к задаче математического программирования. В работе [15] дано определение равновесного потока и доказана теорема существования его в смысле этого определения.

В информационно-программном комплексе Citraf предлагается два способа построения равновесного потокораспределения:

– применяется гипотеза о том, что каждый участник движения с вероятностью 1 выбирает путь следования, обеспечивающий ему минимальные затраты времени;

– применяется гипотеза о том, что на выбор пути следования могут влиять несколько факторов (затраты времени, стоимость и т. п.) и каждый участник движения с некоторой вероятностью может выбрать любой путь следования.

Во втором случае вводятся ограничения на величины средних значений каждого вида затрат. Если эти ограничения являются жесткими, то вероятность выбора путей с большими затратами становится достаточно малой.

В отличие от моделирования корреспонденций, ориентация на затраты времени (или другие затраты) как фактора при выборе пути следования существенно более обоснована, поскольку выбор корреспондирующих районов уже состоялся на предыдущем этапе моделирования при построении матриц.

В ходе решения задачи каждый из участников движения стремится выбрать для себя кратчайший путь, ориентируясь на затраты времени, являющиеся результатом аналогичного поведения всех участников движения. При этом для учета провозной способности транспорта и пропускной способности магистралей сети предполагается, что затраты времени t_{ij} на дуге (i, j) транспортного графа непрерывно и монотонно увеличиваются с ростом интенсивности потока f_{ij} . Таким образом,

$$t_{ij} = t(f_{ij}), f_{ij} = \sum_{l=1..k} f_{ij}^l,$$

где k — количество транспортных районов.

Каждый район-сток l порождает индивидуальный тип потока на дуге (i, j) $F = \{f_{ij}^l\}$. Пусть $T_n^l(F)$ — наименьшие затраты времени, необходимые для достижения из узла n потоком типа l своего стока, тогда искомый поток F^* должен обладать следующим свойством:

$$T_i^l(F^*) = t(f_{ij}^*) + T_j^l(F^*) \text{ при } f_{ij}^l > 0.$$

Таблица 2. Результаты сетевых и досетевых расчетов интенсивности пассажиропотоков для Санкт-Петербургской агломерации

Метод расчета	Вариант расчета	Параметр γ	Скорость при расчете матрицы, км/ч	Ограничение на максимальную скорость, км/ч	Среднее время предложения/спроса, мин	Средняя дальность, км	Скорость сообщения, км/ч	Средняя стоимость, руб.	Пассажирская работа, пасс.-км
Сетевой	1	-0,053	Отдельно для каждого вида транспорта		ОТ: 60, 7/45,5 ИТ: 43,9/28,0	ОТ: 13,4 ИТ: 21,8	ОТ: 18,5 ИТ: 29,8	ОТ: 58,5 ИТ: 101,4	ОТ: 8332 ИТ: 6607
Досетевой	2а	-0,053	29	45	60,0/41,2	13,0	18,8	67,4	12 683
	2б	-0,05	29	45	60,9/42,1	13,4	19,1	69,5	13 142
	2в	-0,05	29	80	59,0/42,1	13,4	20,1	71,8	13 189
	2г	-0,05	35	45	65,3/40,1	14,6	19,4	75,9	14 527
	2д	-0,05	35	80	63,0/40,1	14,7	20,6	78,8	14 590

Поскольку F^* является потоком, то естественно, что для множества чисел $\{f_{ij}^{*l}\}$ должны выполняться условия неразрывности в вершинах графа, и при сделанных относительно $t_{ij} = t(f_{ij})$ предположениях и справедливости указанного свойства искомый поток является решением следующей задачи выпуклого программирования:

$$\sum_{(i,j)} \int_0^{f_{ij}} t_{nm}(s) ds \Rightarrow \min,$$

$$f_{ij} = \sum_{l=1..k} f_{ij}^l,$$

где s — поток, при выполнении для $\{f_{ij}^l\}$ условий неразрывности потока.

Для решения задачи используется алгоритм, реализующий метод возможных направлений.

В отличие от сетевого расчета, где скорость на дуге может только уменьшаться с ростом нагрузки на ней, при досетевом расчете (при задании графа в виде регулярной сетки при начальной общей для всех дуг минимальной скорости), скорость на дуге возрастает при увеличении нагрузки. Процесс изменения скорости продолжается в модели до тех пор, пока на каждой следующей итерации для части участников ока-

зывается более выгодным изменить свои ранее выбранные траектории и воспользоваться более привлекательными участками сетки с большей скоростью. Представленные далее результаты расчетов пассажиропотоков получены с помощью функции пересчета скорости в зависимости от пассажиропотока:

$$v_{ij} = v^0 \exp\left(0,02(f_{ij})^{1/2}\right),$$

где v_{ij} — текущая скорость на дуге с потоком f_{ij} ; v^0 — общая начальная скорость.

При такой функции пересчета скорости в итерационном процессе формирования пассажиропотоков имеется сходимость средней скорости сообщения при заданной минимальной скорости 5 км/ч и ограничениях на максимальную скорость в разных вариантах, соответственно 45 и 80 км/ч. Как видно из табл. 2, средняя скорость в каждом варианте при достижении равновесного потокораспределения — не менее 18 км/ч.

Как и в предыдущей серии расчетов (табл. 1) рассмотрен один сетевой расчет (расчет 1) и несколько досетевых (расчеты 2а — 2д). Во всех вариантах количество самостоятельного населения одинаковое.

Таблица 3. Результаты досетевых расчетов интенсивности пассажиропотоков для Петербургской агломерации (в зависимости от скорости)

Метод расчета	Вариант расчета	Параметр γ	Скорость при расчете матрицы, км/ч	Ограничение на максимальную скорость, км/ч	Среднее время предложения/спроса, мин	Средняя дальность, км	Скорость сообщения, км/ч	Средняя стоимость, руб.	Пассажирская работа, пасс.-км
Досетевой	26	-0,05	29	45	60,9/42,1	13,4	19,1	69,5	13 142
	26*	-0,05	27	45	59,4/42,8	12,9	18,9	66,9	12 579
	26**	-0,05	25	45	57,6/43,6	12,4	18,7	64,3	12 018

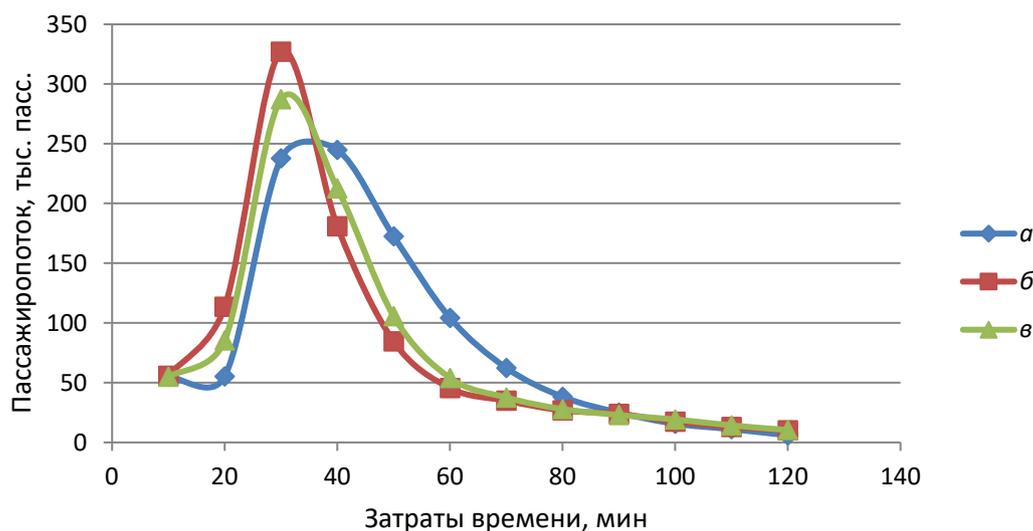


Рис. 1. Кривые распределения спроса и предложения:

- a* — кривая распределения спроса с ограничением скорости 29 км/ч;
б — кривая распределения предложения с ограничением на максимальную скорость 80 км/ч;
в — кривая распределения предложения с ограничением на максимальную скорость 45 км/ч

В табл. 3 представлены результаты расчетов по вариантам, в которых изменяется только скорость при расчете матрицы, т. е. меняется спрос на передвижения на графе, представленном в виде регулярной сетки (досетевой расчет), в зависимости от скорости.

Сравнение значений среднего времени передвижения по итогам расчета матриц корреспонденций и интенсивности пассажиропотоков показывает разницу между спросом и предложением. Спрос зависит от ограничения на среднее время и скорости передвижения по кратчайшим рассто-

яниям при расчете матрицы корреспонденций, предложение — от полученного спроса на передвижения, функции пересчета скорости и ограничения на максимальную скорость.

На рис. 1 представлены кривые распределения спроса на регулярной сетке при расчете матрицы со скоростью 29 км/ч и предложения для расчетов с ограничениями на максимальную скорость 80 и 45 км/ч. Полученные в итерационном процессе дифференцированные скорости в этих двух расчетах формируют направления (трассы) с наибольшими пассажиропотоками (рис. 2).

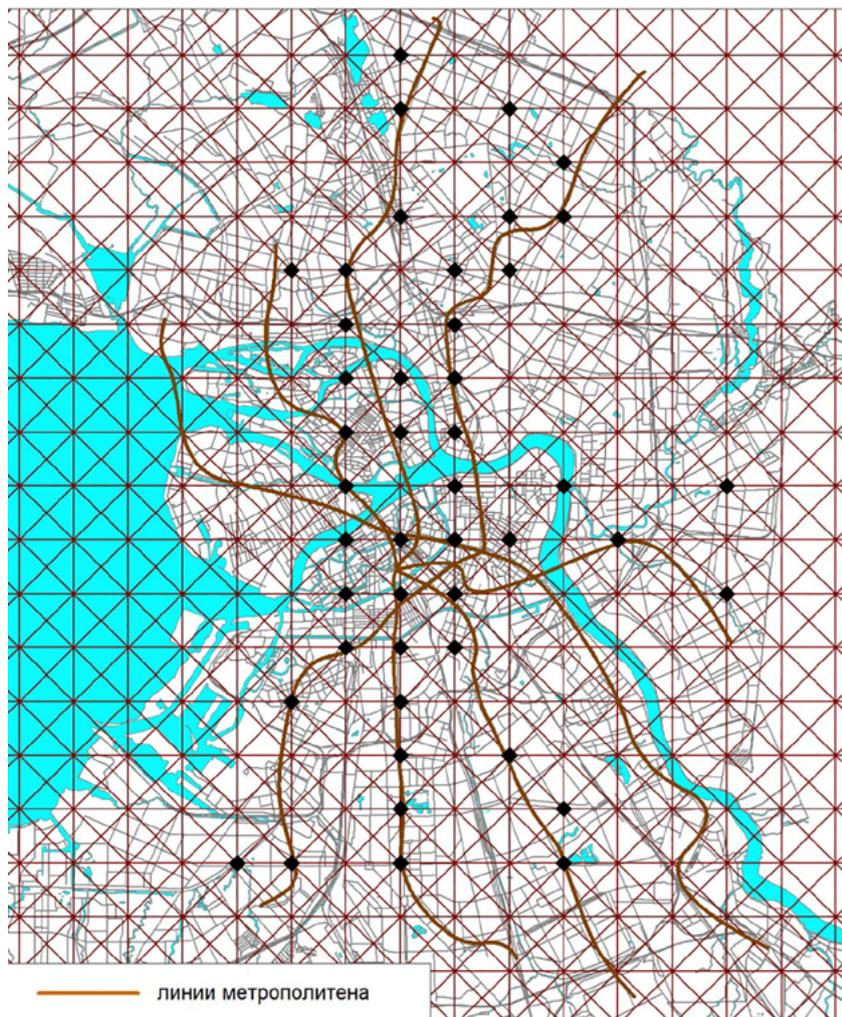


Рис. 2. Узлы регулярной сетки, в которых фиксируются пассажиропотоки более 50 000 пасс. в час (расчет 2б)

Выводы

Проведенные исследования на базе информационно-программного комплекса Citraf позволяют сделать вывод о необходимости калибровки значения каждого параметра при использовании транспортной модели. Эффективность использования досетевого моделирования состоит в том, что при достаточно простом способе формирования вариантов расчета можно получить для сравнения большой ряд параметров, характеризующих спрос и предложение транспортных услуг, что особенно эффективно при долгосрочном планировании дорогостоящих инфраструктур-

ных проектов. Важно, чтобы каждый проект обеспечивал «максимальный суммарный эффект от всей создаваемой системы объектов обслуживания в территориальных образованиях городской агломерации» [16].

Библиографический список

1. Капский Д. В. Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. — Минск: БНТУ, 2019. — Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. — 94 с.

2. Beckmann M. J. *Studies in the Economics of Transportation* / M. J. Beckmann, C. B. McGuire, C. B. Winston. — Yale University Press, New Haven, Conn, 1956.
3. Лосин Л. А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач / Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. — Минск: БНТУ, 2017. — С. 88–95.
4. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров; отв. ред. Б. Л. Овсевич. — Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1989. — 144 с.
5. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии // Сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. — СПб.: Нестор-История, 2015. — 84 с.
6. Шелейховский Г. В. Транспортные основания композиции городского плана / Г. В. Шелейховский. — Л.: 1936.
7. Дынкин А. Г. Методология расчета перспективных пассажиропотоков / А. Г. Дынкин, Э. Г. Мовчан // Применение математических методов и электронно-вычислительной техники в градостроительстве. — Киев, 1966. — С. 74–92.
8. Алексеев В. Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных: учебник / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов. — Нижний Новгород: ННГУ, 2005. — 307 с.
9. Федоров В. П. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне / В. П. Федоров, Л. А. Лосин // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 2(39). — С. 44–47.
10. Булычева Н. В. Досетевая модель общественного транспорта как цифровая основа стратегии развития городских транспортных систем (на примере Екатеринбурга) / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии — 2021: материалы III Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2021. — С. 38–49.
11. Лисененков А. И. Формирование расчетного графа на основе анализа транспортной системы городской агломерации / А. И. Лисененков, Л. А. Лосин // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов. Выпуск 45 / Под научной редакцией д-ра экон. наук С. В. Кузнецова. — ИПРЭ РАН. — СПб.: ГУАП, 2019. — С. 49–53.
12. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2022 года. — М.: Федеральная служба государственной статистики. — URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата доступа: 28.07.2023).
13. Булычева Н. В. Моделирование системы общественного транспорта на основе пассажиропотоков, сформированных на условной сети / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2021. — № 2(65). — С. 86–92.
14. Palma de A. Optimization formulations and static equilibrium in congested transportation networks / A. de Palma, Y. Nesterov // CORE Discussion Paper 9861, Universite Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 1998. — 34 p.
15. Питтель Б. Г. Математическая модель прогноза пассажиропотоков в городской транспортной сети / Б. Г. Питтель, В. П. Федоров // Экономика и математические методы. — 1969. — Вып. 5. — С. 744–757.
16. Ляпунова Г. П. Проблемы развития инфраструктуры городских агломераций / Г. П. Ляпунова // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2022. № 3(70). — С. 157–167.

Дата поступления: 23.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией; nipigrad@yandex.ru
БУЛЫЧЕВА Нэля Васильевна — ст. науч. сотр.; bul45@mail.ru

Comparative Analysis of Transport Demand and Offer in Models of Transport Systems of Urban Agglomerations

L. A. Losin^{1,2}, N. V. Bulycheva¹

¹Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya ul., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Losin L. A., Bulycheva N. V. Comparative Analysis of Transport Demand and Offer in Models of Transport Systems of Urban Agglomerations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 943–953. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-943-953

Summary

Purpose: To analyze the methods of mathematical modeling used to determine the demand for urban transportation and predict the intensity of flow distribution in the public transport network. To determine the zones of effective use of network and pre-network methods for the formation of transport models of urban agglomerations. To conduct a comparative analysis of the parameters of transport demand and offer in the network and pre-network variants of urban transport systems modeling. **Methods:** Mathematical modeling, processing large amounts of data, geoinformation analysis. **Results:** The methods of determining transport demand and offer used in modern transport models are analyzed. A comparative analysis of pre-network and network methods in transport modeling is carried out, the zone of their effective use is defined. The approbation of the problem solution of determining the transport demand and offer is carried out on the example of the urban transport system model of the St. Petersburg agglomeration. Based on the modeling results, the dependencies of transport demand and offer on the input data and model limitations are analyzed. It is concluded that it is necessary to calibrate the value of each parameter when using transport modeling. **Practical significance:** The results obtained can be the basis for improving mathematical modeling methods used in urban transport planning. The proposed approaches to modeling transport demand and offer can be used in the creation of forecast models used to justify project decisions in the documentation of territorial and transport planning.

Keywords: Transport modeling, agglomeration, transport demand, public transport, correspondence matrix, passenger traffic.

References

1. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport v planirovke gorodov. Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie* [Transport in urban planning. Transport planning: mathematical modeling]. Minsk: Belarusian National Technical University Publ., 2019, 94 p. (In Russian)
2. Beckmann M. J., McGuire C. B., Winsten C. B. *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven, Conn, 1956.
3. Losin L. A. Peterburgskiy opyt postroeniya informacionno-programmnogo kompleksa dlya resheniya transportno-gradostroitelnyh zadach [Designing of software complex for the solving of transport and urban problems in St. Petersburg]. *Sotsialno-ekonomicheskie problem razvitiya i funkcionirovaniya transportnyh sistem gorodov i zon ih vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Minsk: BNTU Publ., 2017, pp. 88–95. (In Russian)
4. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Matematicheskoe obespechenie gradostroitel'nogo proektirovaniya* [Mathematical support of urban planning]. Nauka, Leningradskoe otdelenie Publ., 1989, 144 p. (In Russian)
5. Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii [Economic and mathematical research: mathematical models and information technologies]. *Sbornik trudov Sankt-*

Peterburgskogo ekonomiko-matematicheskogo instituta RAN. № 9. Matematicheskie modeli v issledovanii protsessov razvitiya gorodskoy sredy [Collection of proceedings of the St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics of the Russian Academy of Sciences. № 9. Mathematical models in the study of urban development processes]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2015, 84 p. (In Russian)

6. Sheleikhovski G. V. *Transportnye osnovaniya kompozicii gorodskogo plana* [Transport bases of the city plan composition]. Leningrad, 1936. (In Russian).

7. Dynkin A. G., Movchan E. G. *Metodologiya rascheta perspektivnykh passazhiropotokov* [Methodology for calculating prospective passenger flows]. *Primenenie matematicheskikh metodov i elektronno-vychislitel'noy tekhniki v gradostroitel'stve* [Application of mathematical methods and electronic computing in urban planning]. Kiev, 1966, pp. 74–92. (In Russian)

8. Alekseev V. E., Talanov V. A. *Grafy. Modeli vychisleniy. Struktury dannykh* [Graphs. Calculation models. Data structures]. Nizhni Novgorod: NNGU Publ., 2005, 307 p. (In Russian)

9. Fyodorov V. P., Losin L. A. *Metody matematicheskogo modelirovaniya dlya proektirovaniya gorodskoy transportnoy sistemy na dosetevom urovne* [Methods of mathematical modeling of the urban transport system designing at the pre-network level]. *Transport Rossiyskoy Federacii* [Transport of the Russian Federation]. 2012, Iss. 2(39), pp. 44–47. (In Russian)

10. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Dosetevaya model obschestvennogo transporta kak cifrovaya osnova strategii razvitiya gorodskikh transportnykh sistem (na primere Yekaterinburga)* [The pre-network model of public transport as a digital basis for the development strategy of urban transport systems (on the example of Yekaterinburg)]. *Cifrovaya transformatsiya promyshlennosti: tendentsii, upravlenie, strategii — 2021: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digital Transformation of Industry: trends, management, strategy, 2021. Materials of the III International scientific and practical conference]. Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN Publ., 2021, pp. 38–49. (In Russian).

11. Lisenenkov A. I., Losin L. A. *Formirovanie raschetnogo grafa na osnove analiza transportnoy sistemy gorodskoy aglomeratsii* [Creation of a calculated graph based on the analysis of the agglomeration transport system]. *Problemy*

preobrazovaniya i regulirovaniya regionalnykh socialno-ekonomicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2019, vol. 49, pp. 49–53. (In Russian)

12. *Chislennost naseleniya Rossiyskoy Federacii po municipal'nym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2022 goda* [The number of population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2022]. Moscow: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Publ. Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (accessed: July 28, 2023). (In Russian).

13. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Modelirovanie sistemy odschestvennogo transporta na osnove passazhiropotokov, sformirovannykh na uslovnoy seti* [Modeling of a municipal transport system on the basis of passenger flows formed on a conditional network]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2021, Iss. 2(65), pp. 86–92. (In Russian)

14. Palma de A., Nesterov Y. *Optimization formulations and static equilibrium in congested transportation networks*. CORE Discussion Paper 9861, Universite Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 1998, 34 p.

15. Pittel B. G., Fyodorov V. P. *Matematicheskaya model prognoza passazhiropotokov v gorodskoy transportnoy seti* [Mathematical model of passenger traffic forecast in the urban transport network]. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and mathematical methods]. 1969, vol. 5, pp. 744–757. (In Russian)

16. Lyapunova G. P. *Problemy razvitiya infrastruktury gorodskikh aglomeratsiy* [Problems of infrastructure development of urban agglomerations]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2022, Iss. 3(70), pp. 157–167. (In Russian)

Received: October 23, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Leonid A. LOSIN — PhD in Engineering,
Laboratory Head; nipigrad@yandex.ru

Nelya V. BULYCHEVA — Senior Researcher;
bul45@mail.ru