

Н. В. БУЛЫЧЕВА, Д. В. КАПСКИЙ, Л. А. ЛОСИН

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ РОЛИ МЕТРОПОЛИТЕНА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ КРУПНЫХ ГОРОДОВ

*Институт проблем региональной экономики РАН  
Белорусский национальный технический университет*

*В настоящей работе с помощью модели формирования пассажиропотоков на условной транспортной сети, основанной на итерационном процессе изменения пассажиропотоков и скоростей, оценивается необходимость скоростных видов общественного транспорта, в частности, метрополитена. Модель предполагает формирование трассы потенциальных скоростных маршрутов на основе расчетных пассажиропотоков. Представлены результаты эксперимента на примере транспортной системы г. Краснодар для трех расчетных периодов – 2007 г., 2017 г., 2022 г.*

**Ключевые слова:** транспортная система; транспортное планирование; транспортный спрос; городской общественный транспорт; моделирование; корреспонденция.

### Введение

В течение последних 100 лет мир пережил быструю урбанизацию [1]. Начиная с 2007 года более половины населения мира живет в городах. Согласно докладу ООН, посвященному изучению перспектив урбанизации, к 2050 году около 70% жителей нашей планеты будут проживать в городах. Это создает новые вызовы в вопросах планирования городского пространства. Согласно данным Всемирного Банка, именно города генерируют 80% глобального ВВП и являются центрами экономического и социального взаимодействия, но, при этом, на них приходится и около 70% глобальных выбросов углерода и более 60% использования ресурсов [2].

Современный город представляет собой чрезвычайно сложный саморазвивающийся организм, основой устойчивого развития которого является транспортная система. По мере развития городов усложняется взаимодействие между отдельными составляющими их транспортными системами. Так, в современном транспортном планировании важное место занимает проблема определения наиболее рационального распределения видов транспорта в рамках единой транспортной системы города. Показателями такого распределения могут выступать доли пассажироперевозок (пассажирской работы) по видам городского пассажирского транспорта (ГПТ) или объемы капиталовложений и эксплуатационных затрат. Выбор номенклатуры видов транспорта для конкретного города или агломерации не всегда очевиден: города сопоставимой площади застройки и численности населения в силу разных причин, в том числе исторических, могут ориентироваться на разные виды транспорта. Например, приоритеты в развитии метрополитена, скоростного трамвая или городской железной дороги могут представлять конкурирующие направления

в развитии транспортной системы города. Особая актуальность проблемы выбора видов транспорта присуща городам, достигающим размеров, при которых невозможно обойтись только традиционными наземными уличными видами транспорта (трамвай, троллейбус, автобус), и необходимо выбирать приоритетный вид (виды) транспорта, на основе которых будут формироваться транспортные системы этих городов на протяжении последующих десятилетий. Как правило, актуальность такого выбора значительно возрастает при приближении численности населения города к значению, равному 1–1,5 млн. человек.

Настоящая статья посвящена подходам к решению данных проблем: в ней представлено описание разработанной и апробированной модели, ориентированной на обоснование выбора метрополитена как структурообразующего вида городского пассажирского транспорта. Известно, что строительство метрополитена в крупных и крупнейших городах приводит к увеличению скорости передвижения и повышению уровня транспортной доступности территории. Метрополитен характеризуется высокой провозной способностью, экологичностью и безопасностью. Вместе с тем, развитие метрополитена сопряжено с высоким уровнем капитальных и эксплуатационных затрат, а также длительными сроками строительства.

Во вновь проектируемом городе основными факторами, определяющими выбор номенклатуры видов ГПТ и соотношение их долей, являются:

- размер максимальных и минимальных часовых пассажиропотоков;
- средняя дальность поездки;
- объем единовременных капиталовложений.

В практике транспортного планирования применительно к уже существующим городам речь, как правило, идет о совершенствовании уже сложившейся структуры перевозок по

видам ГПТ с учетом имеющихся мощностей транспортных предприятий, доступности и дешевизны электроэнергии, климатических особенностей и т.д. Большую роль играют и традиционные предпочтения жителей конкретного города [3].

Результаты транспортно-градостроительных исследований предлагают различные подходы к решению задачи поиска эффективного соотношения видов городского транспорта, при этом универсальной методики, закрепленной на уровне нормативного или методического документа, не существует. Далее представлены несколько разработанных в России методик оптимизации структуры пассажироперевозок на ГПТ:

1. Методика Д.С.Самойлова [4]. Данная методика основана на распределении работы ГПТ по группам вместимости подвижного состава с учетом численности населения города.

2. Методика А.Э.Горева. В соответствии с данной методикой каждый вид общественного транспорта имеет свою зону эффективного использования в координатах «провозная возможность – эксплуатационная скорость» [5].

3. Методика на основе оценки напряженности пассажиропотока. В основе данной методики лежит ключевой показатель – напряженность пассажиропотока, измеряемый в пасс-км/км, при этом определение структуры систем ГПТ осуществляется на основе планировочных и социально-экономических факторов [6].

4. Методика распределения пассажирских корреспонденций по видам ГПТ на основе досетового моделирования [7]. Данный подход основан на использовании так называемых досетовых моделей расчета матриц межрайонных корреспонденций, позволяющий оптимизировать структуру передвижений по группам ГПТ при заданных параметрах размещения основных функциональных зон в городе без учета ограничений, задаваемых транспортной сетью.

### Методы исследований

Исследование закономерностей функционирования городских транспортных систем, в том числе, для решения поставленной нами задачи, невозможно без применения методов математического моделирования. В работе с транспортно-градостроительными моделями можно выделить следующие группы решаемых задач: выявление существенных особенностей действующей транспортной системы; оценка последствий принятия решений по развитию транспортной системы; определение параметров

объектов транспортной инфраструктуры на основе анализа спроса на передвижения [8].

Более полувека математические модели транспортных и пассажирских потоков разрабатываются в Петербурге (Ленинграде) в соавторстве математиков с проектировщиками-транспортниками. Такая организация работы обеспечивает результативность разрабатываемых моделей, которые адаптируются под решение конкретных задач в рамках разработки транспортно-градостроительной документации. В публикации [9] цитируются работы последних лет зарубежных авторов, в которых также рекомендуется разрабатывать и применять такие модели только в условиях сотрудничества математиков с инженерами-транспортниками и архитекторами-градостроителями. При этом отмечается, что модель прогноза транспортных потоков хорошо подходит для оценки требуемых планировочных и инфраструктурных изменений от реализации строительных проектов и широко используется для этих целей.

Важно, что современная практика применения методов моделирования зачастую обладает высокой «коррупционностью», когда результат прогнозирования становится зависимым от позиции заказчиков работы [10]. Также следует учитывать, что публикации многих исследователей демонстрируют критическое отношение к используемым в настоящее время моделям, основанным на упомянутой традиционной четырехэтапной схеме моделирования. В частности, выделяются теоретические, эксплуатационные и функциональные группы проблем современных транспортных моделей [11–13]. Особо следует отметить, что оценка эффективности модели должна быть сфокусирована на правильном учете поведенческих факторов, а не ограничиваться лишь формальным сравнением результатов с натурными показателями [11, 14].

Отличительной особенностью петербургской (ленинградской) методики прогноза пассажиропотоков является то, что в ней учитываются закономерности массового поведения при свободном выборе маршрутов передвижения всеми его участниками [15]. Одним из способов оценки транспортного спроса является гравитационная модель, основанная на следующем положении: корреспонденция из района  $i$  в район  $j$  пропорциональна общему объему отправления из центра  $i$ , общему объему прибытия в центр  $j$  и некоторой функции, зависящей от транспортного расстояния между центрами  $i$  и  $j$ :

$$x_{ij} = kP_iQ_j/c_{ij}^2 \quad (1)$$

где  $x_{ij}$  – объем корреспонденций между районами  $i$  и  $j$ , тыс.чел.;  $P_i$  – объем отправок из района  $i$ , тыс.чел.;  $Q_j$  – объем прибытий в район  $j$ , тыс.чел.;  $c_{ij}$  – обобщенная стоимость передвижения между районами  $i$  и  $j$  (аналог расстояния);  $k$  – некоторая константа. На  $x_{ij}$  накладываются естественные ограничения:

$$\sum_i x_{ij} = P_i, \sum_j x_{ij} = Q_j \quad (2)$$

Также расчет транспортного спроса может базироваться на так называемом «энтропийном» подходе, основанном на решении задачи выпуклого программирования на максимизацию «взвешенной» энтропии. Данный подход насчитывает многолетнюю историю, основной вклад в ее развитие в отечественной науке в разные годы внесли И. В. Романовский, Б. Г. Питтель, Л. М. Брэгман, В. П. Федоров, В. Н. Мягков [16]. О современных подходах и развитии методов моделирования для решения таких задач можно ознакомиться в работах [17–22].

«Энтропийный» подход, применяемый при расчете матриц корреспонденций, удобен в тех случаях, когда формулируются достаточно «жесткие» ограничения, при которых допустимые размещения близки к реальным, но не удается выбрать «ведущий» критерий. Вычислительный алгоритм получения матрицы корреспонденций состоит из итеративного вычисления значений двойственных переменных, соответствующих ограничениям. Величину  $H(X)$  – энтропию, взвешенную относительно исходного предпочтения  $\{p(t_{ij})\}$ , можно рассматривать как естественную меру отклонения распределения  $X$  от «идеального» распределения, матрица корреспонденций в таком случае является решением задачи:

$$H(X) = \sum_{i,j} x_{ij} \ln \frac{p(t_{ij})}{x_{ij}} \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$\sum_j x_{ij} = A_i, i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ij} = B_j, j = 1, \dots, N, \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0,$$

где  $i, j$  – номера транспортных районов,  $x_{ij}$  – элементы искомого матрицы корреспонденций,  $N$  – число транспортных районов при ограничениях на численность работающих жителей  $A_i$  количества рабочих мест  $B_j$  в каждом районе.

Если функция тяготения  $p(t_{ij})$  является убывающей экспонентой:

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

то существует эквивалентная постановка задачи, при которой множество ограничений

должно содержать ограничение на средние по городу затраты времени на корреспонденцию, но тогда  $p(t_{ij}) \equiv 1$ ,

$$t_m = \sum_{i,j} t_{ij} x_{ij} / \sum_{i,j} x_{ij}, \quad (6)$$

Если решить задачу в такой постановке, и полученное значение переменной, двойственной этому добавленному ограничению, принять в качестве параметра  $\gamma$  в первой постановке, то решения обеих задач совпадут.

При заданной матрице времен и известными объемами перемещения между районами города при ограничениях (4, 5) и ограничением на среднее время решение задачи может быть получено методом множителей Лагранжа. Общий вид решения:

$$x_{ij} = \exp(-1 - \delta_i - \beta_j - \gamma * t_{ij}), \quad (7)$$

где  $\delta_i, \beta_j$  и  $\gamma$  – переменные, двойственные ограничениям (4–6).

Решение задачи (3–6) состоит из итеративного вычисления значений  $\delta_i, \beta_j$ , двойственным ограничениям (4, 5), и двойственной переменной  $\gamma$ , соответствующей ограничению (6), пересчет  $\gamma$  во внешнем итерационном процессе происходит по формуле:

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k - \partial(t_m - t_m^k), \quad (8)$$

где  $\partial$  – достаточно малое положительное число.

Такая постановка позволяет добавлять другие ограничения, например, на среднюю стоимость корреспонденции.

Моделирование равновесного пассажиропотока на сети, как считается, более точно отражает действительное потокораспределение. Равновесный метод приводит к отысканию ситуации равновесия между возможностями городских систем обслуживания и спросом со стороны жителей города на это обслуживание, при расчете потокораспределения он связан с выбором ведущего критерия и оценкой в его единицах параметров размещения, не вошедших в систему ограничений. В работе [23] представлен путь исследований потокового равновесия в транспортных сетях.

Наиболее полные подходы, реализованные в рамках Петербургской школы транспортного моделирования, представлены в сборнике [24]. В нем описаны два подхода к построению равновесного потокораспределения:

- в данном варианте каждый участник с вероятностью 1 в каждой промежуточной вершине направления дальнейшего движения выбирает кратчайший путь следования, причем этот выбор всякий раз производится без согласования с другими участниками движения,

но затраты времени на дугах пересчитываются в зависимости от суммарного потока на них;

- в данном варианте каждый участник с вероятностью, зависящей от некоторой стратегии поведения, может выбрать любой путь следования из района отправления  $l$  в район прибытия  $k$ , но ограничения на величины средних затрат являются достаточно жесткими, и вероятность выбора путей с большими затратами будет достаточно малой. В этом случае все участники движения будут распределяться по множеству путей, согласно естественному принципу прогнозирования «равные или близкие по затратам ситуации выбираются с равными или близкими вероятностями».

Основные особенности данных подходов:

- при построении распределения участников движения по путям следования для каждого элемента матрицы корреспонденций используется принцип максимизации энтропии;

- считается, что для каждой дуги пути следования известен вектор затрат (время передвижения по дуге, стоимость передвижения, наличие пересадки и т.п.). Известен вектор средних по городу затрат на передвижение – средняя продолжительность, средняя стоимость и т.п.;

- все возможные пути  $h$  для каждого элемента матрицы корреспонденций могут содержать циклы, и каждое такое множество представляет собой счетное множество путей  $R_{lk}$ :

$$\sum_{\{R_{lk}\}} x_h = m_{lk}, l, k \in H, l \neq k, x_h \geq 0; \quad (9)$$

- через  $a_{ij}(h)$  обозначается количество раз, которое дуга  $(i,j)$  встречается в пути  $h$ , что позволяет в дальнейшем перейти от потока пути к потоку на дуге;

- предполагается, что априорное распределение порождается стратегией поведения  $\{\pi_{ij}\}$ , и искомое распределение тоже может порождаться некоторой стратегией поведения, т.е. для каждого узла пути существует набор вероятностей использования дальнейшего пути следования;

- вычисление этих вероятностей  $\bar{p}_{ij}^k$  для каждой дуги путей следования для каждого элемента матрицы корреспонденций при распределении участников движения по путям следования производится путем решения систем уравнений, полученных с помощью построения функции Лагранжа в задаче максимизации энтропии;

- для построения равновесного потока вместо задачи построения потоков по кратчайшим путям решается задача, в которой в результате решения систем уравнений строится распределение корреспонденций по всевозможным

путям следования, соединяющим районы отправления и прибытия. Причем на формирование этого распределения могут влиять и затраты времени, и денежные затраты и пр. в соответствии с вектором затрат:

$$\bar{p}_{ij}^k = \pi_{ij} * \exp(-(\bar{y}, b_{ij})) * \exp(-v_{ik} - 1) / \exp(-v_{jk} - 1), \quad (10)$$

где  $k$  – район обслуживания;  $\pi_{ij}$  – априорные вероятности выбора путей следования;  $b_{ij}$  – вектор затрат на дуге  $(i,j)$ ;  $v_{jk}$  – переменные, двойственные ограничения на суммарное распределение потоков;  $\bar{Y}$  – вектор переменных, двойственных ограничениям на средние по городу затраты на передвижение (средняя продолжительность, средняя стоимость и т.п.).

В работе [25] показано, что для ряда задач, не требующих подробных результатов в части потокораспределения в сети ГПТ, целесообразно использовать прогнозирование объема пассажиропотоков на основе условного транспортного графа, представленного в виде регулярной сетки – так называемый «досетевой» подход к формированию модели. При этом наиболее востребованные направления передвижений в городе могут стать основой (каркасом) сети ГПТ. При использовании описываемого метода территория рассмотрения покрывается регулярной прямоугольной сеткой с некоторым шагом; каждый узел этой сетки связан дугами с 8-ю соседними узлами (с учетом диагоналей).

Предлагаемый в настоящей работе досетевой вариант модели формирования пассажиропотоков на условной транспортной сети является развитием модели В.П.Федорова. На дугах условного транспортного графа на первом шаге задается одинаковая начальная скорость, и далее она увеличивается или уменьшается на основе заданной функции, зависящей, в основном, от величины пассажиропотока (в традиционном сетевом расчете скорость на дуге зависит от вида транспорта и может только уменьшаться в зависимости от величины пассажиропотока). На основе сложившихся на дугах графа в ходе итерационного процесса пассажиропотоков и скоростей могут проявиться скоростные трассы как результат анализа спроса на транспортные передвижения, зависящего, в первую очередь, от системы расселения и размещения мест приложения труда. Методика досетевого моделирования и результаты соответствующих экспериментов представлены в ряде работ [26–29].

Досетевое моделирование на основе регулярной сетки позволяет получать прогнозный результат при минимальных трудозатратах. Отдельно следует отметить, что при формировании таких моделей ключевым параметром ста-

новится параметр  $\gamma$ , соответствующий средним затратам времени на передвижения (в энтропийной модели расчета транспортного спроса убывание вероятности совершения корреспонденции с ростом затрат времени описывают так называемой функцией тяготения, в качестве которой используется функция вида  $\exp(-\gamma t)$  [8, 30]).

Нормативной документацией задано предельное значение времени на передвижения пассажиров по трудовым целям: например, для городов с населением от 1 до 2 млн. человек для 90% населения не должно превышать 45 минут в одном направлении [31]. Развитие скоростного транспорта должно планироваться в соответствии с этими ограничениями, тем более, что в настоящее время такой показатель используется как один из основных при формировании рейтингов крупных городов мира.

Принятие среднего времени передвижения в качестве ориентира для формирования транспортных систем в транспортном и градостроительном планировании возникло достаточно давно. Впервые вопрос о переводе в экономические категории основных параметров работы ГПТ, а именно затрат времени на передвижения и удобства пассажиров, был поставлен еще в 1932 году А.Х.Зильберталем [32]. Важность этого показателя для оценки транспортных систем отмечается многими авторами. Так, в издании [33] даны транспортно-планировочные критерии для оценки вариантов генплана города; первым из числа основных транспортно-планировочных критериев, используемых при оценке вариантов развития города, по мнению авторов, являются затраты времени населением на передвижения внутри города и в его пригородной зоне с трудовыми, культурно-бытовыми целями и на передвижения к основным фокусам тяготе-

ния населения.

Как отмечает Э.А.Сафронов [34], структура социально-экономической значимости проекта предполагает непосредственный и сопутствующий эффекты, при этом доля сопутствующего эффекта составляет от 70 до 90%. Экономия времени на передвижения и снижение транспортной усталости являются основными факторами сопутствующего эффекта и составляют около 70% от него [35]. Данная оценка подтверждает значительную роль затрат времени (экономии времени). Роль стоимостной оценки времени, затраченного на перемещения, при определении эффективности, отмечается и в работе Е.Ю.Мулеева [36] на основе анализа отечественных и зарубежных научных публикаций.

Представленная в настоящей статье модель является развитием подхода, примененного для оценки необходимости строительства метрополитена на примере пяти российских городов (агломераций) – Новосибирск, Нижний Новгород, Екатеринбург, Пермь, Тюмень [37]. В исследовании предварительно для каждого города был проведен расчет пассажиропотоков на условной сети без учета метрополитена. Далее наиболее нагруженные дуги рассматривались как потенциальные (экспертные) трассы метрополитена для следующего расчета, в рамках которого к регулярной сетке добавлялись линии метрополитена и определялись параметры интенсивности пассажиропотоков на них. Результатом проведенного эксперимента стали расчетные показатели, позволяющие оценить целесообразность развития сети метрополитена или его нового строительства в тех городах, где в настоящее время метрополитен отсутствует (Пермь, Тюмень). В таблице 1 представлены основные расчетные показатели, полученные в результате моделирования.

Таблица 1 – Основные расчетные параметры с экспертными линиями метрополитена для ряда городов

	Новосибирск	Н.Новгород	Екатеринбург	Пермь	Тюмень
Коэффициент корреляции между системами размещения населения и мест приложения труда	0,27	0,29	0,60	0,81	0,63
Фактическая протяженность линий метро, км (2021)	15,9	22,2	12,7	-	-

Таблица 1 – Основные расчетные параметры с экспертными линиями метрополитена для ряда городов (продолжение)

Затраты времени на передвижения, мин (расчет)	48,91	21,72	30,56	45,16	41,02
Средняя дальность поездки, км (расчет)	11,5	8,2	7,1	7,6	8,0
Пассажирская работа, тыс. пасс-км в час пик (расчет)	1323	1050	1133	737	1096
Пассажирская работа метро, тыс. пасс-км в час пик (расчет)	631	547	214	11,9	112,3
Суммарная длина линий метро, км (расчет)	28,8	17,3	17,0	17,1	9,1
Суммарный вход в метро в час пик, пасс. (расчет)	80696	76315	40876	27531	25032

### Информационная база

В настоящей работе досетевой вариант модели формирования пассажиропотоков на условной транспортной сети использован для оценки спроса на скоростной транспорт в г.Краснодар. Эксперимент состоял в том, что для Краснодара сравнивалась нагрузка на экспертно-назначенную трассу метрополитена в условиях систем расселения и систем мест приложения труда, принятых по состоянию на 2007, 2017 и 2022 годы (трасса линии метро была получена досетевым методом на информации о расселении и системе мест приложения труда на 2017 год). Отличие данной модели от описываемой выше состоит в том, что здесь на основе ретроспективного анализа транспортного спроса для одного и того же города показаны изменения в оценке необходимости строительства метрополитена, что создает дополнительную доказательную базу для его обоснования. Следует отметить, что целью настоящего эксперимента является проверка возможности использования предлагаемой модели для оценки необходимости организации скоростного транспорта в городах.

Выбор Краснодара для проведения эксперимента связан с тем, что этот город удовлетворяет критерию достижения миллионного рубежа численности населения, о котором упоминается выше. Кроме того, Краснодар является бурно развивающимся городом, для которого выбор приоритетных направлений формирования

системы общественного транспорта является определяющим на современном этапе его развития. В том же время, необходимость строительства метрополитена в г.Краснодар является спорной: по мнению заслуженного архитектора России Олега Кобзаря, «сегодня построить метро в Краснодаре совершенно нереально. Это очень дорогостоящий проект. Хотя этот вид транспорта действительно разгрузил бы транспортную систему нашего города. ... Я думаю, этот вопрос надо обсуждать с сообществом архитекторов, которые на профессиональном уровне выскажут свое мнение с учетом особенностей нашего города» [38].

Как и для других, представленных выше городов [37], в рамках эксперимента предварительно проведен расчет пассажиропотоков на условной сети (регулярной сетке) без учета метрополитена; наиболее нагруженные дуги при этом рассматривались как потенциальные трассы метрополитена для следующего расчета (рис.1). Допущением является то, что отраслевые различия мест приложения труда в этих экспериментальных расчетах не учтены, коэффициент корреляции отображает усредненное соотношение для всех видов мест приложения труда. Также следует отметить, что внутрирайонные пассажирские корреспонденции, величина которых зависит, главным образом, от размеров расчетных транспортных районов, не учитываются в транспортном потоке.

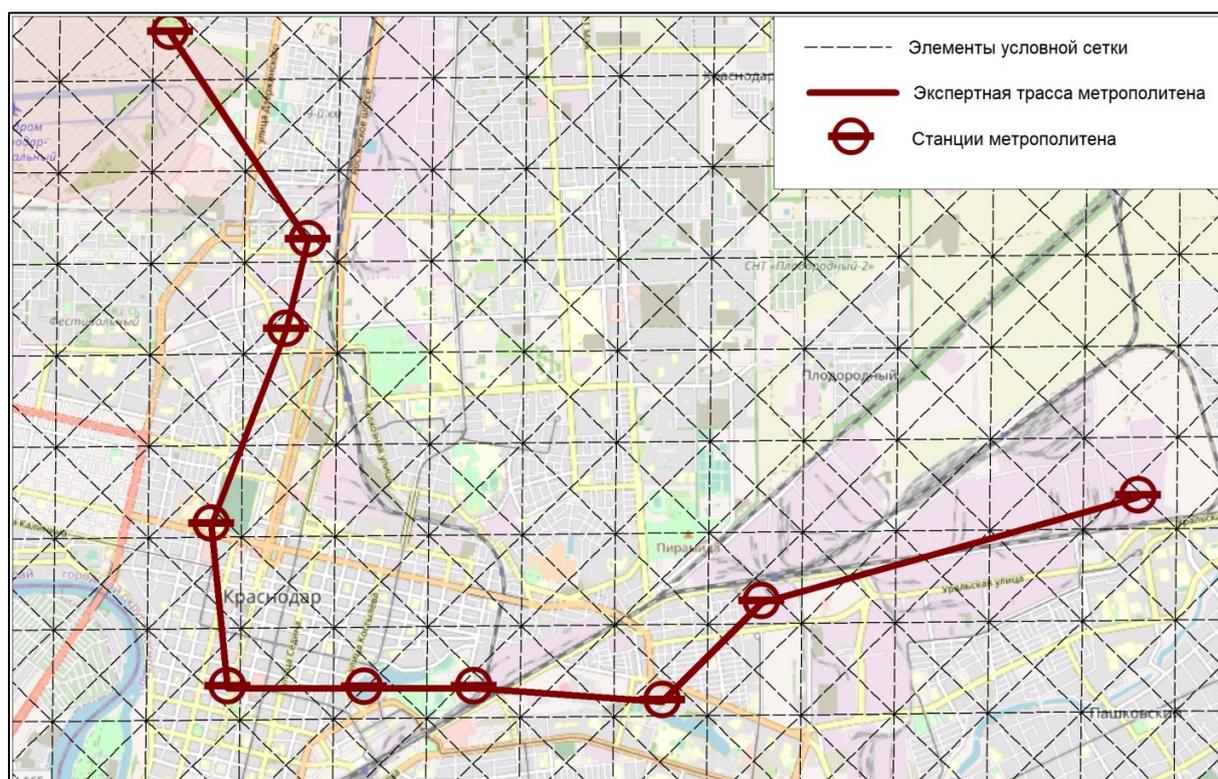


Рисунок 1 – Экспертная трасса метрополитена г. Краснодар

В качестве исходных данных в эксперименте использовались данные по населению и местам приложения труда за три расчетных периода (2007, 2017, 2022 годы), определенные для каждого транспортного района (всего в расчете 72 транспортных района). Для формирования информационной базы численности населения и количества мест приложения труда на 2007 год по 72 транспортным районам использовалась информация, полученная в ходе выполнения транспортных расчетов в рамках проекта [39]. Для расчетов на 2017 и 2022 годы использовалась информационная база по тем же транспортным районам в соответствии с учетом социально-экономического развития города.

При этом авторы использовали данные переписи населения для корректировки полученных показателей [40].

### Результаты исследований

Описываемые расчеты реализованы на базе программно-информационного комплекса Citraf<sup>1</sup> [8, 41]. В таблице 2 для каждого расчетного периода представлены три варианта расчета с разными ограничениями на дальность поездки (при одинаковой скорости), задаваемой в модели с помощью параметра  $\gamma$  (см. выше). Важный показатель необходимости метрополитена – это величина пассажирской работы.

Таблица 2 – Результаты расчетов по годам для различных ограничений на дальность поездки

	Параметр Гамма ( $\gamma$ )	0,063	0,060	0,053
2007 г.	Средняя дальность поездки, км	7,5	7,7	8,0
	Пассажирская работа, тыс. пасс-км в час пик	224	232	251
	Суммарный вход в метро в час пик, пасс. (расчет)	41762	42797	45321

<sup>1</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс для прогнозирования потоков пассажиров и транспорта в городах Citraf / заявитель и правообладатель Федоров В.П. (RU). № 2018611770. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 06.02.2018 г.

Таблица 2 – Результаты расчетов по годам для различных ограничений на дальность поездки (продолжение)

2017 г.	Средняя дальность поездки, км	8,56	8,68	8,98
	Пассажирская работа, тыс. пасс-км в час пик	387	398	427
	Суммарный вход в метро в час пик, пасс. (расчет)	68218	69719	73318
2022 г.	Средняя дальность поездки, км	8,54	8,65	8,95
	Пассажирская работа, тыс. пасс-км в час пик	439	452	484
	Суммарный вход в метро в час пик, пасс. (расчет)	76609	78248	82212

На рисунках 2–4 представлены картограммы пассажиропотоков на перегонах экспертно-назначенной трассы метрополитена для трех расчетных периодов ( $\gamma = -0.053$ ).

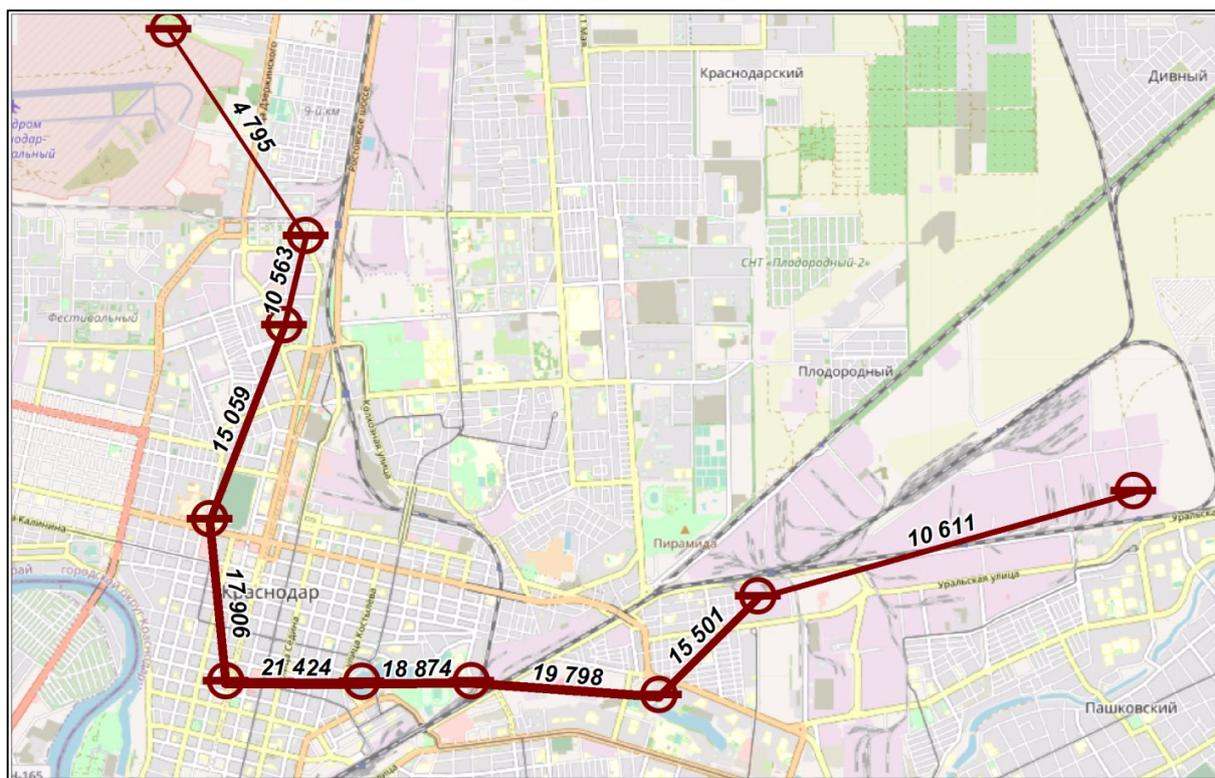


Рисунок 2 – Расчетная картограмма пассажиропотоков на экспертной трассе метрополитена, 2007 год (пассажиров в час в двух направлениях)

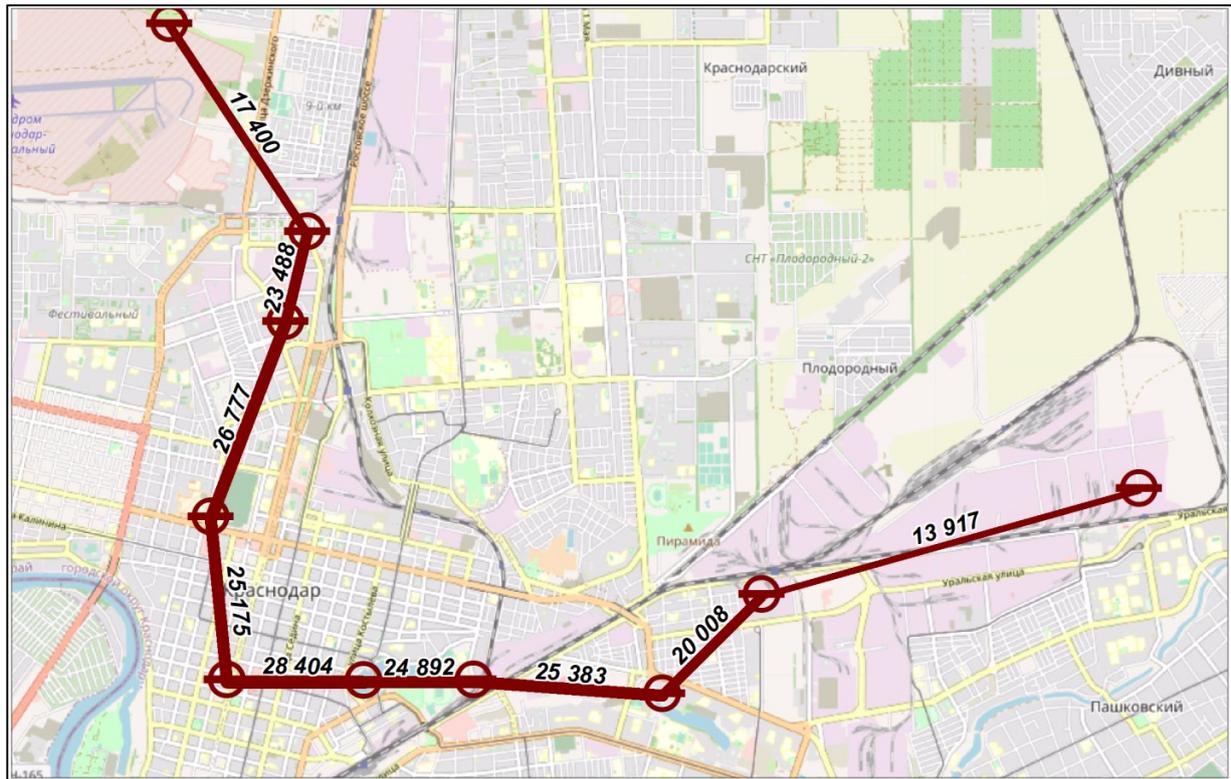


Рисунок 3 – Расчетная картограмма пассажиропотоков на экспертной трассе метрополитена, 2017 год (пассажиров в час в двух направлениях)

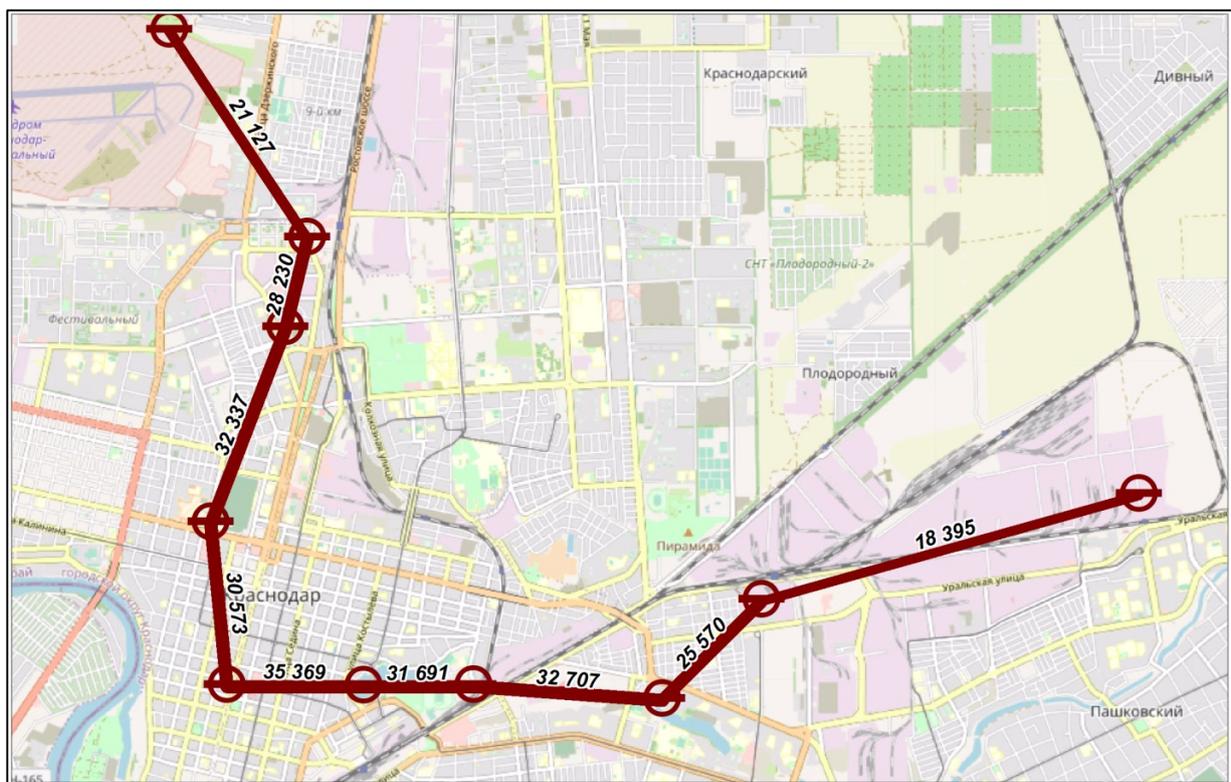


Рисунок 4 – Расчетная картограмма пассажиропотоков на экспертной трассе метрополитена, 2022 год (пассажиров в час в двух направлениях)

### Выводы

Необходимо различать модели для поиска оптимальных планировочных решений на основе сценариев развития транспортной ситуации с большим количеством параметров и исходных данных на краткосрочную перспективу с моделями для подготовки документации территориального и транспортного планирования (генеральные планы, комплексные транспортные схемы, иные проектные документы) на средне- и долгосрочную перспективу. Моделирование потоков при разработке этих документов можно осуществлять, как правило, только при наличии общегородской (агломерационной) транспортной модели. Каждый уровень моделирования следует рассматривать отдельно, и результаты моделирования на вышележащем уровне могут служить исходными данными для моделирования на нижележащем уровне. Перспективный спрос зависит от сетевых ограничений тем меньше, чем больше прогнозный срок, поэтому применение досетевого подхода, описываемого в настоящей статье, возможно как

на этапе построения матрицы корреспонденций, так и при построении пассажиропотоков.

В данной работе на примере экспериментальных расчетов пассажиропотоков на метрополитене в г.Краснодар можно проследить значительный рост числа потенциальных пользователей метрополитена при экспертно заданной трассировке линии. Модель формирования пассажиропотоков на условной транспортной сети, основанной на итерационном процессе изменения пассажиропотоков и скоростей, позволяет оценить необходимость создания в городе скоростных трасс и определить их направления. Представленный подход не требует большого объема исходной информации, в частности, вариантов линий различных видов транспорта, и может быть использован в проектной деятельности на уровне проектирования каркаса транспортной сети. Модель может использоваться при разработке мастер-планов городов, генеральных планов, программ комплексного развития транспортной инфраструктуры, иных проектных документов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: The 2014 revision, (ST/ESA/SER.A/366). New York: Author. 2015
2. Цель 11: Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов / Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/cities/> – Дата доступа: 10.10.2021
3. **Капский Д. В., Лосин Л. А.** Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения», 1-44 01 06 «Эксплуатация интеллектуальных транспортных систем на автомобильном и городском транспорте»: в 10 частях. – Минск: БНТУ, 2021. – Ч.2: Транспортное планирование: проектирование сети городского пассажирского транспорта. – 85 с.
4. **Самойлов Д. С.** Городской транспорт. Учебник для вузов – 2-е издание, переработанное и дополненное – М. Стройиздат, 1983 – 384 с.
5. **Горев А. Э.** К вопросу об экономической эффективности городского пассажирского транспорта // Транспорт Российской Федерации, 2012, №3–4 (40–41). – с.34–36
6. **Дудкин Е. П.,** Черняева В.А., Дороничева С.А. Основные аспекты проектирования систем рельсового транспорта в городах // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. Т.6. №1. – с.38–43
7. **Федоров В. П.,** Лосин Л.А. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне // Транспорт Российской Федерации, 2012, №2 (39). – с.42–45
8. **Капский Д. В., Лосин Л. А.** Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях. – Минск: БНТУ, 2019. – Ч.1: Транспортное планирование: математическое моделирование. – 94 с.
9. **Мягков В. Н.** Петербургская (ленинградская) школа анализа пассажирских транспортных потоков и проблемы ее современного развития // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – №2 (65), 2021. – с.113–122
10. **R. Binder, Z. Lancaster, M. Tobey, P. Jitrapitrom, Yoshiki Yamagata.** Transport modeling with a purpose: how urban systems design can bridge the gaps between modeling, planning and design. WIT press, 2019, pp 85–96
11. **Davidson, Peter.** A new approach to transport modelling – the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications // Australasian Transport Research Forum, Proceedings 28–30 September 2011. – Adelaide. – 2011
12. **McNally, Michael G.** The Four Step Model. – Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A. – 2007
13. **U. Pesch, P. Vermaas.** The Wickedness of Rittel and Webber’s Dilemmas. July 3, 2020
14. **Ben-Akiva, M.** et al. Behavioural realism in urban transportation planning models // Transportation Models in the Policy-Making Process. A Symposium in Memory of Greig Harvey. – 1998
15. **Питтель Б. Г., Федоров В. П.** Математическая модель прогноза пассажиропотоков в городской транспортной сети // Экономика и мат. методы, 1969, 5, вып. 5. – с.744–757

16. 50 лет лаборатории математических моделей массового обслуживания ЛО ЦЭМИ – лаборатории математического моделирования функционально-пространственного развития городов СПб ЭМИ РАН. Материалы к библиографии ученых и специалистов транспортных систем городов и организации городского движения. Выпуск 27. – СПб: Нестор-История, 2018. – 100 с.
17. **Erlander, Sven; Stewart Neil F.** (1990). The gravity model in transportation analysis: theory and extensions. Topics in transportation, 99-0624974-9. Utrecht: VSP
18. **Wilson, A.G.** Entropy in Urban and Regional Modelling. – Pion, London, 1970. – 166 p.
19. **Wilson, A. G.** (2009). The ‘Thermodynamics’ of the City. In Complexity and Spatial Networks, 11–31, edited by A. Reggiani and P. Nijkamp. Berlin: Springer
20. **Webber, M. J.** Information Theory and Urban Spatial Structure. – London, Croom Helm, 1980. – 394 p.
21. **Капский Д. В., Скиркоцкий С. В., Лосин Л. А.** Принципы построения транспортной модели // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – Гомель: 2021. №2 (43). – с.7–10
22. **Скиркоцкий С. В., Капский Д. В., Лосин Л. А.** Моделирование функционально-планировочной структуры города // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – Гомель: 2021. №2 (43)
23. **Wardrop equilibria JOS’E R. CORREA** (Industrial Engineering Department, universidad de Chile, Santiago, Chile) **NICOLA’ S E. STIER-MOSES** (Graduate School of Business, Columbia university, New York, New York). In book: Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, edited by James J. Cochran Copyright 2010 John Wiley & Sons, Inc.
24. 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.
25. **Федоров В. П.** Формирование вариантов развития городских транспортных сетей: разработка метода // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – №3–4 (40–41). – с.17–21
26. **Булычева Н. В., Лосин Л. А.** Возможности досетевого подхода в транспортном планировании (на примере г.Перми) // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов. Выпуск 49 / под научной ред. д.э.н., проф. С.В. Кузнецова. ИПРЭ РАН. – СПб.: ГУАП, 2021. – с.4–11
27. **Булычева Н. В., Лосин Л. А.** Моделирование системы общественного транспорта на основе пассажиропотоков, сформированных на условной сети // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. №2 (65), 2021. с.86–92
28. **Булычева Н. В., Лосин Л. А.** Досетевая модель общественного транспорта как цифровая основа стратегии развития городских транспортных систем (на примере Екатеринбурга) // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии – 2021: материалы III Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2021. – с.38–49
29. **Лосин Л. А., Булычева Н. В.** Исследование влияния стоимости проезда на транспортный спрос методом математического моделирования // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып.2. – с.179–194
30. **Мягков В. Н., Пальчиков Н. С., Федоров В.П.** Математическое обеспечение градостроительного проектирования (под ред. Б.Л.Овсиевича). – Л.: Наука, 1989. – 145 с.
31. СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений»
32. **Зильберталь А. Х.** Трамвайное хозяйство. – М.-Л.: ОГИЗ–Гострансиздат, 1932. – 303 с.
33. **Авдоткин Л. Н., Лежава И. Г., Смоляр И. М.** Градостроительное проектирование. – М.: Стройиздат, 1989. – 436 с.
34. **Сафронов Э. А.** Комплексная оценка эффективности систем городского пассажирского транспорта // Проблемы больших городов: выпуск 3. – М.: МГЦНТИ, 1990. – 22 с.
35. **Лосин Л. А.** Моделирование транспортных систем городов на основе досетевого расчета матриц межрайонных передвижений: дис. ... канд.техн.наук: 05.22.01. – СПб.: 2015. – 173 с.
36. **Мулеев Е. Ю.** Оценка социально-экономического эффекта от транспорта: краткий обзор методик // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XX международной научно-практ.конф. – Екатеринбург: АМБ, 2014. – с.179–186
37. **Булычева Н. В., Лосин Л. А.** Оценка роли метрополитена в структуре системы пассажирского транспорта в крупном городе // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. №3 (70), 2022
38. Тьма в конце тоннеля: в чем причина, что метро Краснодару не дано? Краснодарские известия, 29 января 2022 г. / Режим доступа: <https://ki-news.ru/2022/01/29/tma-v-kontse-tonnelya-v-chem-prichina-hto-metro-krasnodaru-ne-dano> // – Дата доступа: 27.08.2022
39. Проект планировки центральной части МО г.Краснодар. Раздел «Транспортная инфраструктура». СПб: – ЗАО «Петербургский НИПИГрад», 2007
40. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2022 года. Федеральная служба государственной статистики / Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> // – Дата доступа: 27.08.2022
41. **Лосин Л. А.** Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XXIII международной научно-практ.конф. – Минск: БНТУ, 2017. – с.88–95

## REFERENCES

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: The 2014 revision, (ST/ESA/SER.A/366). New York: Author. 2015
2. Goal 11: Ensuring open, safe, resilient and environmentally sustainable cities and communities / Access mode: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/en/cities/> – Access date: 10.10.2021
3. **Kapsky D.V., Losin L.A.** Transport in the planning of cities: a teaching aid for students of the specialty 1-44 01 02 «Organization of traffic», 1-44 01 06 «Operation of intelligent transport systems in road and urban transport»: in 10 parts. - Minsk: BNTU, 2021. - Part 2: Transport planning: designing a network of urban passenger transport. – 85 s.
4. **Samoilov D.S.** Urban transport. Textbook for universities - 2nd edition, revised and supplemented - M. Stroyizdat, 1983 - 384 p.
5. **Gorev A.E.** On the issue of the economic efficiency of urban passenger transport // Transport of the Russian Federation, 2012, No. 3–4 (40–41). – p.34–36
6. **Dudkin E.P., Chernyaeva V.A., Doronicheva S.A.** The main aspects of the design of rail transport systems in cities // Modern problems of the transport complex of Russia. 2016. V.6. No. 1. – p.38–43
7. **Fedorov V.P., Losin L.A.** Mathematical modeling methods for designing an urban transport system at the pre-network level // Transport of the Russian Federation, 2012, No. 2 (39). – p.42–45
8. **Kapsky D.V., Losin L.A.** Transport in the planning of cities: a teaching aid for students of the specialty 1-44 01 02 «Organization of traffic»: in 10 parts. - Minsk: BNTU, 2019. - Part 1: Transport planning: mathematical modeling. – 94 p.
9. **Myagkov V.N.** Petersburg (Leningrad) School of Analysis of Passenger Transport Flows and Problems of Its Modern Development // Economics of the North-West: problems and development prospects. - No. 2 (65), 2021. - p.113–122
10. **R. Binder, Z. Lancaster, M. Tobey, P. Jittrapirom, Yoshiki Yamagata.** Transport modeling with a purpose: how urban systems design can bridge the gaps between modeling, planning and design. WIT press, 2019, pp. 85–96
- 11 **Davidson, Peter.** A new approach to transport modeling – the Stochastic Segmented Slice Simulation (4S) model and its recent applications // Australasian Transport Research Forum, Proceedings 28–30 September 2011. – Adelaide. – 2011
12. **McNally, Michael G.** The Four Step Model. – Department of Civil and Environmental Engineering and Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, U.S.A. – 2007
13. **U. Pesch, P. Vermaas.** The Wickedness of Rittel and Webber’s Dilemmas. Jul 3, 2020
14. **Ben-Akiva, M.** et al. Behavioral realism in urban transportation planning models // Transportation Models in the Policy-Making Process. A Symposium in Memory of Greig Harvey. – 1998
15. **Pittel B.G., Fedorov V.P.** Mathematical model for predicting passenger traffic in the urban transport network // Economics and Math. methods, 1969, 5, no. 5. – p.744–757
16. 50th Anniversary of the Laboratory of Mathematical Models of Queuing LO CEMI - Laboratory of Mathematical Modeling of the Functional-Spatial Development of Cities of St. Petersburg EMI RAS. Materials for the bio-bibliography of scientists and specialists of the transport systems of cities and the organization of urban traffic. Issue 27. - St. Petersburg: Nestor-History, 2018. - 100 p.
17. **Erlander, Sven; Stewart Neil F.** (1990). The gravity model in transportation analysis: theory and extensions. Topics in transportation, 99-0624974-9. Utrecht: VSP
18. **Wilson, A.G.** Entropy in Urban and Regional Modelling. - Pion, London, 1970. - 166 rubles.
19. **Wilson, A.G.** (2009). The ‘Thermodynamics’ of the City. In Complexity and Spatial Networks, 11–31, edited by A. Reggiani and P. Nijkamp. Berlin: Springer
20. **Webber, M.J.** Information Theory and Urban Spatial Structure. - London, Croom Helm, 1980. - 394 rubles.
21. **Kapsky D.V., Skirkovsky S.V., Losin L.A.** Principles of building a transport model // Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. - Gomel: 2021. No. 2 (43). – p.7–10
22. **Skirkovsky S.V., Kapsky D.V., Losin L.A.** Modeling the functional and planning structure of the city // Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. - Gomel: 2021. No. 2 (43)
23. **Wardrop equilibria JOS’E R. CORREA** (Industrial Engineering Department, universidad de Chile, Santiago, Chile) NICOLA’ S E. STIER-MOSES (Graduate School of Business, Columbia university, New York, New York). In book: Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, edited by James J. Cochran Copyright 2010 John Wiley & Sons, Inc.
24. Economic and mathematical research: mathematical models and information technology. Collection of works of the St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics of the Russian Academy of Sciences. No. 9. Mathematical models in the study of urban environment development processes. - St. Petersburg: Nestor-History, 2015. - 84 p.
25. **Fedorov V.P.** Varianto formation in the development of urban transport networks: development of a method // Transport of the Russian Federation. - 2012. - No. 3-4 (40-41). – p.17–21
26. **Bulycheva N.V. Losin L.A.** Possibilities of the pre-network approach in transport planning (on the example of Perm) // Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems: a collection of scientific papers. Issue 49 / ed. Doctor of Economics, prof. S.V. Kuznetsova. IPRE RAS. - St. Petersburg: GUAP, 2021. - p.4-11
27. **Bulycheva N.V., Losin L.A.** Modeling the public transport system based on passenger flows formed on a conditional network // Economics of the North-West: problems and development prospects. No. 2 (65), 2021. pp.86–92

28. **Bulycheva N.V., Losin L.A.** Pre-network model of public transport as a digital basis for the development strategy of urban transport systems (on the example of Yekaterinburg) // Digital transformation of industry: trends, management, strategies - 2021: materials of the III International scientific and practical conference. - Yekaterinburg: Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. - p.38–49
29. **Losin L.A., Bulycheva N.V.** Study of the impact of fare on transport demand by mathematical modeling // Bulletin of the results of scientific research. - 2022. - Issue 2. – pp.179–194
30. **Myagkov V.N., Palchikov N.S., Fedorov V.P.** Mathematical support of urban planning (under the editorship of B.L. Ovsievich). - L.: Nauka, 1989. - 145 p.
31. SP 42.13330.2016 “Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements»
32. **Zilbertal A.Kh.** Tram business. - M.-L.: OGIZ-Gostransizdat, 1932. - 303 p.
33. **Avdot'in L.N., Lezhava I.G., Smolyar I.M.** Urban design. – M.: Stroyizdat, 1989. – 436 p.
34. **Safronov E.A.** Comprehensive assessment of the efficiency of urban passenger transport systems // Problems of large cities: issue 3. - M.: MGTSNTI, 1990. - 22 p.
35. **Losin L.A.** Modeling of transport systems of cities based on pre-network calculation of matrices of inter-district movements: dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.22.01. - St. Petersburg: 2015. - 173 p.
36. **Muleev E.Yu.** Assessment of the socio-economic effect of transport: a brief review of methods // Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities and zones of their influence: materials of the XX international scientific and practical conference. - Yekaterinburg: AMB, 2014. - p.179–186
37. **Bulycheva N.V., Losin L.A.** Assessment of the role of the subway in the structure of the passenger transport system in a large city // Economics of the North-West: problems and development prospects. №3 (70), 2022
38. Darkness at the end of the tunnel: what is the reason that the metro is not given to Krasnodar? Krasnodar News, January 29, 2022 / Access mode: <https://ki-news.ru/2022/01/29/tma-v-kontse-tonnelya-v-chem-prichina-chto-metro-krasnodaru-ne-dano> // – Access date: 08/27/2022
39. Planning project for the central part of the municipality of Krasnodar. Section «Transport infrastructure». St. Petersburg: - CJSC «Petersburg NIPIgrad», 2007
40. Permanent population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2022. Federal State Statistics Service / Access mode: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> // – Access date: 08/27/2022
41. **Losin L.A.** Petersburg experience of building an information-software complex for solving transport and urban planning problems // Socio-economic problems of development and functioning of transport systems of cities and zones of their influence: materials of the XXIII international scientific and practical conference. - Minsk: BNTU, 2017. - p.88–95

*N. V. BULYCHEVA, D. V. KAPSKI, L. A. LOSIN*

## MATHEMATICAL MODELING FOR ASSESSING THE ROLE OF THE SUBWAY IN THE TRANSPORT SYSTEMS OF LARGE CITIES

*Institute for Problems of Regional Economics RAS*

*Belarusian National Technical University*

*In this study, using the model of passenger flow formation on a conditional transport network based on the iterative process of changes in the passenger flows and velocities, the need for high-speed public transport, in particular, the subway, is estimated. The model allows the formation of the route of potential high-speed transport based on the calculated passenger flows. The results of the experiment are presented for the example of the Krasnodar transport system for three periods – 2007, 2017, 2022.*

**Keywords:** *transport system; transport planning; transport demand; urban public transport; modeling; correspondence.*



**Бульчева Нэля Васильевна**, старший научный сотрудник, Институт проблем региональной экономики РАН, Санкт-Петербург.

**Nelya V. Bulycheva**, senior researcher, Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia.



**Капский Денис Васильевич**, д.т.н., декан автотракторного факультета, Белорусский национальный технический университет, г. Минск.

**Denis V. Kapski**, dean of Automotive and Tractor Faculty, Doctor of Engineering Science, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus.

Email: [d.kapsky@bntu.by](mailto:d.kapsky@bntu.by)



**Лосин Леонид Андреевич**, к.т.н., заведующий лабораторией, Институт проблем региональной экономики РАН, Санкт-Петербург;

доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург.

**Leonid A. Losin**, PhD in Sci.Tech., laboratory head, Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, St.Petersburg, Russia;

Associate professor, Emperor Alexander I State Transport University, St.Petersburg, Russia.