

ISSN 1561-2430 (Print)  
ISSN 2524-2415 (Online)

**ИНФОРМАТИКА**  
**INFORMATICS**

УДК 656.072  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-253-264>

Поступила в редакцию 13.02.2023  
Received 13.02.2023

**Н. В. Булычева<sup>1</sup>, Д. В. Капский<sup>2</sup>, Л. А. Лосин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем региональной экономики Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ  
НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАССАЖИРОПОТОКОВ  
(НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)**

**Аннотация.** Исследуются методы математического моделирования, применяемые в транспортном и градостроительном планировании. Разработана математическая модель совместного расчета интенсивности пассажирских и транспортных потоков в городских агломерациях с использованием транспортного графа, проведена оценка влияния ее ограничений на параметры функционирования подсистем индивидуального и общественного транспорта в масштабе города (городской агломерации). Для верификации модели проведен ряд экспериментальных расчетов на примере транспортной системы Санкт-Петербургской агломерации. Полученные результаты могут быть использованы при проведении исследований в сфере градостроительства и транспортного планирования, а также при обосновании проектных решений в городах.

**Ключевые слова:** транспортная система, агломерация, общественный транспорт, моделирование, матрица корреспонденций, пассажиропоток

**Для цитирования.** Булычева, Н. В. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Д. В. Капский, Л. А. Лосин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 253–264. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-253-264>

**Nelya V. Bulycheva, Denis V. Kapski, Leonid A. Losin**

<sup>1</sup>*Institute for Regional Economic Studies of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**STUDYING THE INFLUENCE OF TRANSPORT MODEL PARAMETERS  
ON THE RESULTS OF PASSENGER TRAFFIC CALCULATIONS  
(USING THE CASE OF ST. PETERSBURG)**

**Abstract.** This study focuses on the development of mathematical modelling methods for transport and urban planning. The current research focuses on an innovative mathematical model for simultaneous calculation of passenger and transport flow intensity in urban agglomerations using a common transport graph. An assessment of the model limitation impact on the parameters of individual and public transportation systems in a city (urban agglomeration) is conducted. To verify the model, several experimental calculations are performed for the transport system of the St. Petersburg agglomeration. The model presented by the authors can be used in scientific research in urban and transport planning and in the development of design solutions in cities.

**Keywords:** transport system, agglomeration, public transport, modelling, matrix of correspondences, passenger traffic

**For citation.** Bulycheva N. V., Kapski D. V., Losin L. A. Studying the influence of transport model parameters on the results of passenger traffic calculations (using the case of St. Petersburg). *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 253–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-253-264>

**Введение.** Исследования соотношения передвижений населения на индивидуальном (ИТ) и общественном транспорте (ОТ) в городах являются одними из важнейших при изучении городской мобильности. Параметры соотношения таких передвижений значительно варьируются по разным странам и городам и зависят от множества факторов, основные из которых можно представить в виде трех групп характеристик:

- пользователя транспортной сети: наличие автомобиля, уровень его дохода, потребность в автомобиле (в течение дня, в течение недели и пр.) и т. д.;
- передвижений: цель и тип (вид) передвижения (поездки), время совершения передвижения (поездки);
- (транспортного) предложения: время нахождения в пути, стоимость поездки, доступность (уличной) парковки, уровень безопасности, уровень комфортности и т. д.

Разные города в силу своей специфики, связанной с историей, национальными и культурными особенностями, могут характеризоваться разной структурой передвижений. Проводимые натурные и социологические обследования автомобильных и пассажирских потоков дают представление о такой структуре, при этом ситуация очень динамична и не всегда предсказуема. Кроме того, параметры данного распределения варьируются по территории: например, в 2004 г. в Санкт-Петербурге доля пассажиров, пользующихся индивидуальным транспортом на подходах к городу и на периферии центра, заметно различалась, составляя 33 и 20 % соответственно [1]. Согласно результатам комплексного обследования, проведенного в Санкт-Петербурге в 2016 г.<sup>1</sup>, в среднем по городу доля передвижений на личном автотранспорте из общего объема передвижений составила 45 % в утренний максимальный час рабочего дня. При этом значение данного показателя заметно варьировалось в зависимости от места расположения поста обследования.

Изучение распределения предпочтений жителей при выборе видов передвижений возможно на основе данных статистики, анализа опубликованных научных исследований, результатов обследований передвижений. При использовании данных таких обследований важно учитывать, что распределение передвижений в различных источниках может представляться в разных единицах – количестве поездок (параметры подвижности) или транспортной (пассажирской) работе.

Для учета распределения передвижений по видам при моделировании транспортных и пассажирских потоков традиционно используются расчетные процедуры, позволяющие «расслоить» матрицы межрайонных корреспонденций между видами передвижений (выбор режима, или *modal split*). Решение данной задачи, реализованное в составе программных комплексов транспортного моделирования, основывается, как правило, на использовании функции предпочтения [2]. Способы учета расщепления потоков по видам передвижений, как и моделирование матриц корреспонденций, а также формирование равновесных транспортных потоков, приводятся в [3]. Математическая модель системы управления свободным рынком городских пассажирских перевозок, обобщенная на случай выбора пассажирами способа передвижения, представлена в [4].

Цель настоящего исследования – оценка влияния ограничений модели на параметры функционирования систем индивидуального и общественного транспорта в масштабе города (городской агломерации). Представляемая работа, как и ряд других работ авторов данной публикации, посвящена исследованию реакции транспортной системы города (агломерации) на изменения ее различных характеристик. В рамках описываемого исследования задание долей ИТ и ОТ определяется во входном потоке (задается суммарное количество используемых автомобилей в единицу времени и коэффициент заполнения автомобиля), что позволяет выявить реакцию транспортной системы города на различные ситуации, обусловленные разными предпочтениями жителей.

**Методы исследования.** Для решения представленной задачи был использован информационно-программный комплекс Citraf, поскольку он применялся для решения большого числа задач в сфере транспортно-градостроительного планирования в Санкт-Петербурге и других городах. Описание его функционирования и алгоритмические подходы представлены в публикациях [5–7].

<sup>1</sup> Натурное обследование транспортных и пассажирских потоков в выбранных сечениях улично-дорожной сети: отчет о научно-исследовательской работе. ЗАО «Петербургский НИПИГрад», 2016. 290 с.

Работы по созданию данного комплекса велись достаточно давно. Для практических расчетов транспортных и пассажирских потоков, проводимых в Ленинграде (Санкт-Петербурге) еще с конца 1960-х – начала 1970-х гг. [8] были созданы модели для формирования матриц корреспонденций и построения потокораспределения. Реализованный расчетный алгоритм соответствует традиционной 4-этапной схеме моделирования, основными этапами которой являются расчет транспортного спроса (матриц межрайонных корреспонденций) и расчет потокораспределения в сети индивидуального и общественного транспорта.

На этапе моделирования межрайонных целевых передвижений (корреспонденций) формируются две матрицы: одна – для индивидуального транспорта, другая – для общественного. Наиболее распространенным методом расчета межрайонных корреспонденций, в том числе реализованным в составе комплекса Citraf и позволяющим учитывать различные факторы, влияющие на транспортный спрос, считается «энтропийный» подход [9]. В данном случае решение поставленной задачи максимизации энтропии размещения можно рассматривать как наиболее вероятное среди всех размещений, возникающих в процессе реализации массового поведения пользователей транспортной сети, с учетом ограничений и предпочтений. Механизм такого «дележа в стесненных условиях» приводит к формулировке принципа максимума взвешенной энтропии. О развитии моделирования для решения таких задач можно узнать из обзора [10].

На последнем этапе моделирования формируются автомобильные и пассажирские потоки, реализующие полученные ранее межрайонные целевые корреспонденции. При формировании потоков элементы каждой из матриц корреспонденций распределяются по орграфу соответствующего вида транспорта (каждому виду сопоставляется связный ориентированный граф).

В качестве основных объектов обслуживания (тяготения) при проведении расчетов с помощью транспортной модели чаще всего рассматриваются рабочие места, при этом в качестве основного вида целевых передвижений можно использовать трудовые корреспонденции между расчетными транспортными районами. Традиционно основным фактором, влияющим на формирование матрицы межрайонных передвижений и потокораспределение в сети, являются затраты времени участников передвижений. Другие факторы, такие как стоимость проезда, не всегда принимались во внимание в практических и экспериментальных расчетах, хотя в модели предполагается возможность их учета, а также и других факторов, например, уровня комфортности. В рамках представленного исследования в модели задаются ограничения на время доступности и стоимость проезда как для передвижений на индивидуальном транспорте, так и на общественном.

В ходе проведенных исследований для получения целевой матрицы трудовых корреспонденций были рассчитаны параметры пассажиропотоков и транспортных потоков, т. е. количество участников движения на определенных участках транспортной сети в единицу времени (как правило, в «расчетный час»). Данные передвижения характеризуют определенную долю суточных передвижений, которая зависит от нагруженности «расчетного часа» (т. е. какая часть всего периода целевых передвижений приходится на принятый расчетный час). В исследованиях в качестве «расчетного часа» принят утренний среднемаксимальный час, учитывающий территориальную неравномерность максимальных потоков утреннего периода.

Таким образом, как было указано выше, моделируются трудовые передвижения в утренний период максимальных перевозок. Такой подход оправдан тем, что именно трудовые передвижения в утренний период считаются наиболее устойчивыми и в наибольшей степени поддаются формальному описанию в модели. Кроме того, затраты времени именно на трудовые передвижения являются нормируемыми<sup>1</sup>.

При расчете матриц корреспонденций время и стоимость проезда не зависят от величины потока, но при решении задачи формирования потокораспределения учитывается зависимость скоростей передвижения по дугам орграфа (участкам сети) от нагрузки. Расчеты показывают, что, помимо временных, существуют и стоимостные границы доступности систем обслуживания [11].

<sup>1</sup> Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Свод правил: СП 42.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89. Москва: Стандартинформ, 2017. 86 с.

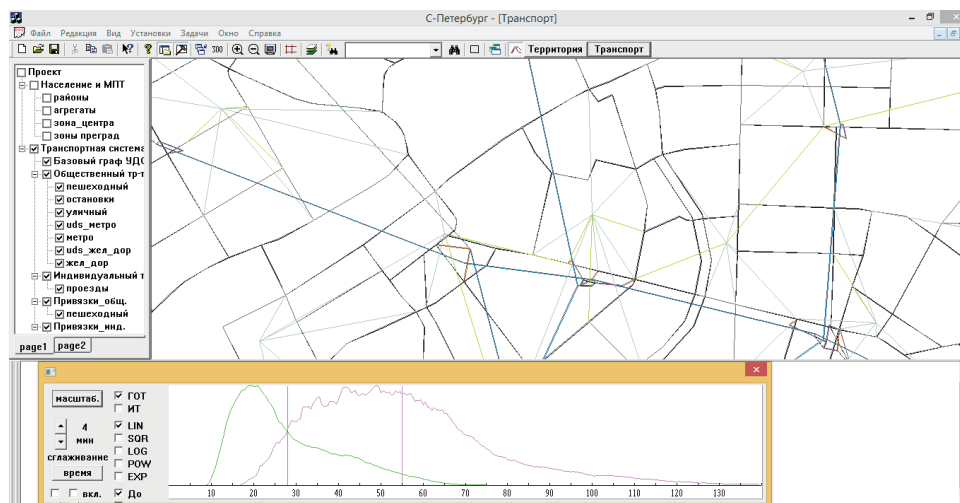


Рис. 1. Модель транспортной системы Санкт-Петербургской агломерации (фрагмент)

Fig. 1. Model of the transport system of the St. Petersburg agglomeration (fragment)

В модели учитываются различия в организации оплаты проезда для разных видов общественного транспорта. Так, принято, что на посадке в наземный общественный транспорт и метрополитен размер оплаты не зависит от расстояния (единый тариф). Для поездок по железной дороге учитывается зонный тариф, при котором стоимость проезда зависит от расстояния; взимание одинаковой оплаты возможно только внутри одной зоны. В модели также учитывается и тот факт, что при осуществлении поездок значительная часть участников дорожного движения пользуется несколькими видами маршрутного (рельсового, безрельсового, велосипедного и т. п.) пассажирского транспорта. Для учета затрат пользователей индивидуальных автомобилей стоимость проезда увеличивается пропорционально пройденному расстоянию; отдельно в модели учитывается размер оплаты на платных автодорогах в соответствии с действующими тарифами.

**Информационная база.** В качестве эмпирической базы описываемого исследования использована транспортная система Санкт-Петербургской агломерации. Включение в рассмотрение территории агломерации, значительно превышающей площадь города в административных границах, позволяет сформировать в модели систему замкнутого цикла ежедневных целевых передвижений. Используемая транспортная модель (рис. 1) включает 246 расчетных транспортных районов; транспортный оргграф описывается почти 5000 дугами, из которых более 1000 относятся к системе скоростного рельсового транспорта (метрополитен и пригородная железная дорога). Параметры системы расселения нормированы на основе статистической информации о населении по административным районам Санкт-Петербурга на 1 января 2022 г.<sup>1</sup>

**Модель совместного расчета интенсивности пассажирских и транспортных потоков на единой сети.** Используемый для настоящего исследования информационно-программный комплекс Citraf позволяет производить совместный расчет интенсивности пассажирских и транспортных потоков. Транспортная сеть в модели представляется в виде связанного ориентированного графа, включающего, помимо элементов улично-дорожной сети (УДС), сеть внеуличного транспорта (метрополитен, железная дорога). Также в модели задаются условия движения, включающие скоростные характеристики каждого вида общественного транспорта. Таким образом, объединение оргграфов УДС и городского пассажирского транспорта (ГПТ) описывает всю транспортную систему города (агломерации).

В качестве оргграфа индивидуального транспорта используется агрегированный оргграф УДС, вершины которого соответствуют перекресткам и примыканиям, а дуги (ребра) – участкам улиц и дорог. Пересечение оргграфов УДС и ГПТ описывает те участки улично-дорожной сети, кото-

<sup>1</sup> Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2022 года / Федерал. служба гос. статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения: 05.02.2023).

рые используются для движения наземных видов общественного транспорта. Аналогично легковому транспорту в модели можно рассчитывать потоки грузового автомобильного транспорта, в этом случае требуется учет реальных ограничений на пропуск грузового автотранспорта, которые установлены для тех или иных участков УДС (в представленном исследовании грузовой автотранспорт не учитывается).

Моделирование пассажирских и транспортных потоков, как было указано выше, осуществляется с учетом важного фактора – ограниченной пропускной способности соответствующих элементов сети. Эти ограничения фактически приводят к ухудшению условий пользования элементами сети за счет увеличения затрат времени при росте нагрузки на них, причем ухудшение условий движения становится заметным уже при нагрузках, меньших максимально возможных.

Как указывалось выше, в рамках модели одновременно формируются две матрицы корреспонденций – для транспортных и пассажирских потоков. Таким образом, участники передвижений распределяются не только по местам обслуживания, т. е. рабочим местам, но и по виду передвижений – на индивидуальном или общественном транспорте:

$$M = \{m_{lk}\}, \quad M_a = \{m_{lk}^a\}, \quad (1)$$

где  $m_{lk}$  – объем передвижения из района  $l$  в район  $k$  на общественном транспорте;  $m_{lk}^a$  – объем передвижения из района  $l$  в район  $k$  на индивидуальном транспорте.

Формирование матриц производится на основе задания суммарного объема корреспонденций на индивидуальном транспорте  $V$ .

Анализ работ [6, 7] показывает, что обе матрицы являются решением экстремальной задачи:

$$\sum_{l,k \in H} m_{lk} \ln(p(t_{lk}) / m_{lk}) + \sum_{l,k \in H} m_{lk}^a \ln(p(t_{lk}^a) / m_{lk}^a) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in H} (m_{lk} + m_{lk}^a) = a_l, \quad l \in H, \quad (3)$$

$$\sum_{l \in H} (m_{lk} + m_{lk}^a) = b_k, \quad k \in H, \quad (4)$$

$$\sum_{l,k \in H} m_{lk}^a = V, \quad (5)$$

$$m_{lk} \geq 0, \quad m_{lk}^a \geq 0, \quad l, k \in H,$$

где  $H$  – множество транспортных районов, для которых определяются две матрицы затрат времени на межрайонные передвижения:  $T = \{t_{lk}\}$  и  $T^a = \{t_{lk}^a\}$ ,  $l, k \in H$ , соответствующие сетям общественного и индивидуального транспорта,  $a_l$  – сумма отправок из района  $l$ ,  $b_k$  – сумма прибытий в район  $k$ ,  $p(t)$  – функция тяготения [7, 12, 13].

Соотношение

$$m_{lk} / m_{lk}^a = p(t_{lk}) / (\delta^* p(t_{lk}^a))$$

с положительным параметром  $\delta$ , определяемым в процессе решения задачи, отражает соотношение распределения поездок между индивидуальным и общественным транспортом в каждом транспортном районе.

При моделировании потокораспределения и для ИТ, и для ОТ предполагается, что выбор каждым участником движения пути следования определяется как условием минимизации затрат времени на передвижение, так и условием минимизации стоимости проезда, и осуществляется последовательным выбором в каждой промежуточной вершине направления дальнейшего движения, обеспечивающего данные условия. При этом такой выбор всякий раз производится без согласования с другими участниками движения – т. е. применяется так называемая пользовательская оптимизация (пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты следования, соответствующие их минимальным транспортным расходам) [14, 15].

Исследования потокового равновесия в транспортных сетях ведутся достаточно давно. В предисловии к работе [16] приведен путь таких исследований, первым из которых признается статья [17]. Экономическое равновесие иллюстрируется в данной публикации на примере с потоками на двух дорогах, когда достигается чистый выигрыш для транспорта в целом. В [18] авторы впервые сформулировали математическую модель равновесия в транспортной сети и свели ее к задаче математического программирования – «возможность формулирования равновесия с точки зрения максимизации является полезной частью математической информации».

Определение равновесного потока дано в [19]: поток  $\{\bar{x}_{ij}^k\}$  называется равновесным при выполнении следующего условия: если при некоторых индексах  $i, j, k$   $\bar{x}_{ij}^k > 0$ , то  $T_i^k(\bar{X}) = \tau_{ij}(\bar{X}) + T_j^k(\bar{X})$  означает, что если некоторая дуга  $(i, j)$  нагружена потоком, имеющим пунктом назначения район  $k$ , то для каждого отдельного пассажира, следующего в район  $k$ , эта дуга является оптимальным направлением для такого потока. Здесь  $x_{ij}^k$  – поток вдоль дуги  $(i, j)$ , следующий в направлении района  $k$ ,  $\tau_{ij}$  – время передвижения вдоль дуги  $(i, j)$ . Там же доказана теорема существования равновесного в смысле этого определения потока.

Известно, что при этом соответствующий поток  $\{x_{ij}^k\}$  является решением следующей задачи линейного программирования.

Требуется найти

$$\min_X \sum_{(i,j)} \tau_{ij} x_{ij},$$

где  $x_{ij} = \sum_{i \neq k} x_{ij}^k$ , а  $\sum_{(i,j)} \tau_{ij} x_{ij}$  – общие затраты времени за единицу времени работы сети при ограничениях, заданных уравнениями неразрывности

$$\sum_{j \in \Gamma_i} x_{ij}^k = \sum_{j \neq k, j \in \Gamma_i^{-1}} x_{ji}^k + m_{ik}, \quad (6)$$

и условиях  $x_{ij}^k \geq 0$ ,  $i \neq k$ , где  $\Gamma_i^{-1}$ ,  $\Gamma_i$  – множества вершин орграфа, предшествующих и последующих по отношению к вершине  $i$ .

Обобщением этой модели является модель, в которой время проезда по дуге  $(i, j)$  вследствие ограниченной емкости транспортных единиц (или пропускной способности дуг) зависит от потока  $X = \{x_{ij}^k\}$ , в простейшем случае это время зависит лишь от интенсивности  $x_{ij}$ ,  $\tau_{ij} = \tau_{ij}(x_{ij})$ . В случае, когда  $\tau_{ij} = \tau_{ij}(x_{ij})$  являются монотонно возрастающими функциями, равновесный поток минимизирует следующий функционал:

$$F = \sum_{(i,j)} \int_0^{x_{ij}} \tau_{ij}(x) dx, \quad x_{ij} = \sum_{i \neq k} x_{ij}^k. \quad (7)$$

В описанном методе построения равновесного потокораспределения применяется гипотеза о том, что каждый участник движения с вероятностью 1 выбирает путь следования, обеспечивающий ему минимальные затраты времени.

Другая гипотеза [8] состоит в 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. При этом вводятся ограничения на величины средних значений каждого вида затрат. Эти ограничения являются достаточно жесткими, и вероятность выбора путей с большими затратами будет ничтожно малой.

В результате совместного расчета интенсивности транспортных и пассажирских потоков формируется равновесное потокораспределение для обоих видов транспорта [20, 21], что является решением задачи линейного программирования:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} t_{ij}(\bar{X}, \bar{Y}) + \sum_{(i,j) \in D_0} y_{ij} t_{ij}^a(\bar{X}, \bar{Y}) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $X = \{x_{ij}\}$  – поток пассажиров по дугам орграфа общественного транспорта  $A$ ,  $Y = \{y_{ij}\}$  – поток индивидуального транспорта по дугам орграфа УДС  $D_0$ ,  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  – равновесный поток на общественном и индивидуальном транспорте,  $t_{ij}$ ,  $t_{ij}^a$  – время передвижения на общественном и индивидуальном транспорте вдоль дуги  $(i, j)$ .

Для поиска равновесных потоков используется итеративный алгоритм формирования частичного равновесия, состоящего в поочередном определении условно-равновесного потока  $\bar{X}(Y)$  при фиксированном и неизменном потоке  $Y$  и условно-равновесного потока  $\bar{Y}(X)$  при фиксированном потоке  $X$ . Так, поочередно «уравновешиваются» потоки  $X$  и  $Y$ , приближаясь к ситуации совместного равновесия.

Зависимость затрат времени на передвижение по дугам от величины потока  $(X, Y)$  может быть представлена формулами

$$\begin{aligned} t_{ij} &= t_{ij}(x_{ij}, y_{ij}), & (i, j) \in A, \\ t_{ij}^a &= t_{ij}^a(x_{ij}, y_{ij}), & (i, j) \in D_0. \end{aligned} \quad (9)$$

При решении перечисленных задач интегральные параметры, задаваемые во входном массиве модели, как правило зависят от особенностей конкретного города с его системами расселения, распределения рабочих мест, транспортной системой, и отлаживаются в ходе калибровки модели. В рассматриваемом исследовании для калибровки модели Санкт-Петербургской агломерации информация о размере входного потока в утренний час пик в метрополитене является одним из главных показателей.

**Исследование параметров функционирования транспортной системы в зависимости от соотношения индивидуального и общественного транспорта.** В этом разделе исследования варьируемым параметром является доля использования индивидуального транспорта в утренний «расчетный» час, от которого зависит величина спроса на передвижения на том или ином виде транспорта.

Нужно отметить, что в опубликованной еще в 1956 г. работе [18] была исследована проблема загруженности дорог с точки зрения экономики, при этом спрос на передвижение между местами отправления и прибытия представлялся в виде функции от средней стоимости поездки между ними. Там же авторы связали функции спроса и пропускной способности в зависимости от стоимости и величины транспортного потока. С экономической точки зрения пропускная способность и транспортный спрос оказываются двумя противоположностями, аналогично классическому соотношению предложения и спроса. Пропускная способность – это предложение транспортных услуг по различным ценам. Спрос уменьшается по мере увеличения издержек, в то время как стоимость издержек по кривой пропускной способности увеличивается или остается постоянной при росте потока. Спрос определяется применительно к любой паре мест (отправлений и прибытий), в то время как пропускная способность относится только к отдельным участкам УДС.

В целях изучения этих закономерностей для Санкт-Петербургской агломерации был проведен ряд расчетов на модели. В табл. 1 приведены основные результаты для следующих вариантов расчетов для утреннего часа пик:

- вариант 1: все участники передвижения используют только общественный транспорт;
- вариант 2: 30 % используют индивидуальный транспорт, 70 % – общественный;
- вариант 3: 60 % используют индивидуальный транспорт, 40 % – общественный;
- вариант 4: 90 % используют индивидуальный транспорт, 10 % – общественный.

В табл. 2 представлены результаты моделирования по вариантам для различных видов передвижений. На рис. 2 показано распределение передвижений по видам транспорта для различных вариантов расчетов.

Анализ результатов показывает, что распределение долей использования видов общественного транспорта при реализации передвижений слабо зависит от соотношения индивидуального и общественного транспорта. Обращает на себя внимание и тот факт, что средние параметры

Таблица 1. Основные результаты моделирования для различных вариантов расчетов

Table 1. Basic results of modeling for various calculation options

Вариант	Среднее время передвижения на ОТ, мин	Средняя дальность передвижения на ОТ, км	Средняя скорость передвижения на ОТ, км/ч	Объем передвижений на ОТ, пассажиров	Объем передвижений на ИТ, чел.
1	63,33	14,07	17,89	1 039 025	–
2	62,28	13,95	18,62	727 317	311 708
3	60,31	14,05	19,53	415 610	623 415
4	59,49	14,39	20,29	103 903	935 122

Таблица 2. Результаты расчетов по вариантам для различных видов передвижений

Table 2. The results of calculations on options for different types of movements

Вид передвижения	Пассажирская работа, пассажиро-километров / % пассажиров / % пассажирской работы	Средний пассажиропоток, пассажиров в час / объем входа, пассажиров в час	Среднее время передвижения, мин	Средняя дальность передвижения, км	Средняя скорость передвижения, км/ч
<i>Вариант 1</i>					
Метрополитен	5027,0 / 42,9 / 37,9	42,2 / 415506	25,7	12,1	28,3
Пригородная железная дорога	2289,8 / 13,1 / 17,3	4,0 / 127215	30,3	18,0	35,7
Трамвай	341,7 / 5,9 / 2,6	1,6 / 57401	23,6	6,0	15,1
Прочие виды ГПТ	5592,0 / 38,1 / 42,2	1,4	43,4	11,4	15,8
Индивидуальный транспорт	–	–	–	–	–
<i>Вариант 2</i>					
Метрополитен	3527,5 / 45,2 / 40,0	29,6 / 294333	23,0	12,0	31,2
Пригородная железная дорога	1487,1 / 13,0 / 16,9	2,6 / 84363	28,3	17,6	37,3
Трамвай	209,1 / 5,6 / 2,4	1,0 / 36679	22,2	5,7	15,4
Прочие виды ГПТ	3593,9 / 36,2 / 40,8	0,9	41,9	11,3	16,1
Индивидуальный транспорт	–	–	30,3	22,3	44,3
<i>Вариант 3</i>					
Метрополитен	2070,0 / 47,9 / 40,8	17,4 / 178326	20,3	11,6	34,3
Пригородная железная дорога	806,6 / 12,3 / 15,9	1,4 / 45913	27,4	17,6	38,5
Трамвай	115,7 / 6,7 / 2,3	0,6 / 25078	17,2	4,6	16,1
Прочие виды ГПТ	2080,8 / 33,0 / 41,0	0,5	42,2	12,0	17,1
Индивидуальный транспорт	–	–	39,9	20,0	30,0
<i>Вариант 4</i>					
Метрополитен	527,4 / 48,7 / 40,4	4,4 / 45524	19,0	11,6	36,6
Пригородная железная дорога	214,4 / 12,9 / 16,4	0,4 / 12052	27,0	17,8	39,5
Трамвай	29,7 / 7,4 / 2,3	0,6 / 6882	16,1	4,3	16,1
Прочие виды ГПТ	532,7 / 31,1 / 40,8	0,1	42,3	12,7	17,9
Индивидуальный транспорт	–	–	44,6	18,5	25,0

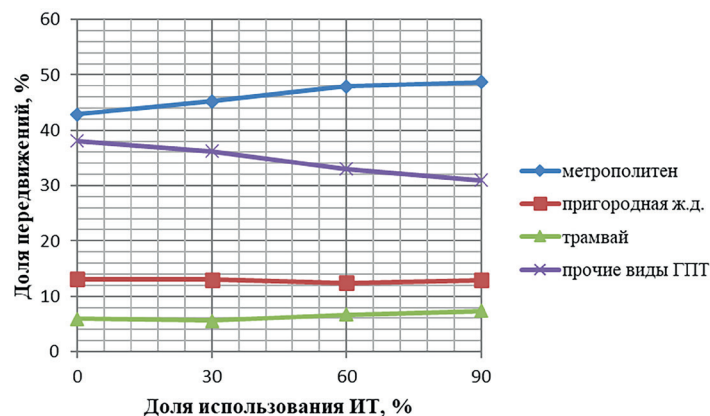


Рис. 2. Распределение передвижений по видам транспорта для различных вариантов расчетов

Fig. 2. Distribution of movements by types of transport for various calculation options



дальностей, скоростей и затрат времени на передвижения на городском пассажирском транспорте также мало зависят от данного соотношения. При этом изменения скорости передвижения и затрат времени от доли использования ИТ достаточно значительны. Особенно заметно увеличение скорости передвижения на метрополитене. При этом показатель скорости передвижения на ГПТ фиксирует не скорость движения подвижного состава, а скорость потока пассажиров, связанную в том числе с задержками времени ожидания транспорта на остановках (станциях).

В варианте 1 (использование только ОТ) наблюдается снижение скорости пассажиропотока на метрополитене с 38 до 28 км/ч при суммарном объеме входа в метро 415 506 чел. В результате увеличенного спроса на передвижения на ГПТ в данном варианте формируются увеличенные пассажиропотоки почти на всех линиях метро (максимум наблюдается на участках Площадь Александра Невского – Новочеркасская и Горьковская – Петроградская: более 50 000 пассажиров в час в одном направлении); средний пассажиропоток по сети метрополитена составляет 23 000 пассажиров в час. На наземном ГПТ в варианте 1 максимальные потоки фиксируются на Невском проспекте, проспекте Испытателей и особенно на Большой Конюшенной улице – более 19 000 пассажиров в час.

В варианте 2 максимальный пассажиропоток также наблюдается на участках метрополитена Площадь Александра Невского – Новочеркасская и Горьковская – Петроградская: более 37 000 пассажиров в час в одном направлении; средний пассажиропоток по сети метрополитена составляет 16 000 пассажиров в час. На наземном ГПТ в варианте 2 максимальные потоки также фиксируются на Невском проспекте, проспекте Испытателей и Большой Конюшенной улице.

В варианте 4 наблюдается падение средней скорости на индивидуальном транспорте до 25 км/ч (см. табл. 2) за счет значительной доли потока, приходящегося на индивидуальный транспорт. Максимальные потоки фиксируются на основных автодорогах скоростного движения: на кольцевой автомобильной дороге (КАД) – 24 150 автомобилей в час, на Западном скоростном диаметре (ЗСД) – 16 500 автомобилей в час.

**Исследование влияния стоимости парковки на функционирование транспортной системы.** В представленных далее расчетах исследуется зависимость распределения пассажирских и транспортных потоков от размера платы за парковку. Следует сразу отметить, что размер платы парковки и распределение зон такой оплаты не соответствуют реализуемому в Санкт-Петербурге проекту организации платного парковочного пространства на автомобильных дорогах общего пользования регионального значения (к моменту написания данной статьи проект частично реализован в Адмиралтейском и Центральном районах Санкт-Петербурга).

В проведенном исследовании для двух административных районов – Василеостровского и Петроградского (рис. 3) – при прибытии в район установлены разные размеры платы за парковку. По итогам расчетов (табл. 3) получены значения потоков индивидуального и общественного транспорта. Естественно, что введение платы способствует уменьшению потоков на индивидуальном транспорте и увеличению потоков на общественном. При этом, поскольку в Петроградском районе расположено 5 станций метрополитена, роль общественного транспорта здесь значительна и без влияния дополнительной платы за парковку.

Результаты показывают, что введение платы влияет на величину потоков как на индивидуальном, так и общественном транспорте. Можно сде-

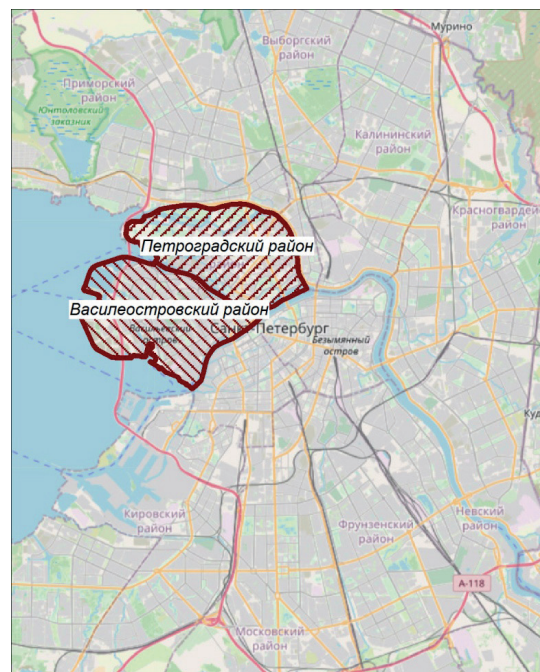


Рис. 3. Василеостровский и Петроградский районы Санкт-Петербурга

Fig. 3. St. Petersburg. Vasileostrovski and Petrogradski districts

лать вывод, что размер платы за парковку должен быть согласован со стоимостью всего передвижения. В целом плата за парковку призвана уменьшить поток автомобилей в ряде районов города, но при этом, как показывают расчеты, увеличивается нагрузка на общественный транспорт, особенно на метрополитен. Транспортная система Василеостровского района, на территории которого пока расположены только две станции метрополитена, каждая из которых имеет лишь по одному входу, испытывает перегрузки на обоих видах транспорта.

Таблица 3. Результаты расчетов параметров транспортной системы в зависимости от платы за парковку

Table 3. The results of calculations of the transport system parameters depending on the parking fee

Стоимость парковки в час (Василеостровский и Петроградский районы), руб.	0	20	50	80	110	140	170
<i>Василеостровский район</i>							
Прибытие в Василеостровский район на ОТ, пассажиров в час	35 644	35 877	36 196	36 440	36 824	37 134	37 445
Прибытие в Василеостровский район на ИТ, автомобилей в час	13 440	13 285	13 060	12 830	12 601	12 379	12 154
Объем выхода со станции метро Василеостровская, пассажиров в час	11 693	11 739	11 808	11 881	11 931	11 981	12 034
<i>Петроградский район</i>							
Прибытие в Петроградский район на ОТ, пассажиров в час	38 140	38 345	38 655	38 970	39 266	39 565	39 865
Прибытие в Петроградский район на ИТ, автомобилей в час	11 897	11 754	11 542	11 329	11 120	10 911	10 706
Объем выхода со станции метро Петроградская, пассажиров в час	10 553	10 607	10 692	10 775	10 858	10 940	11 020

**Заключение.** В описываемых экспериментальных расчетах исследуются зависимости распределения транспортных и пассажирских потоков от различных параметров, в частности, от стоимости парковки на УДС. В качестве результатов расчета сформированы интегральные параметры, практически не измеряемые напрямую. Среди них средние затраты времени передвижения, средняя стоимость поездки, расстояние доступности объектов обслуживания. При моделировании транспортных и пассажирских потоков именно эти показатели зависят от задаваемых ограничений, параметров систем расселения и распределения мест обслуживания, скоростных характеристик транспортной системы.

Практические расчеты должны проводиться с учетом функциональных особенностей городской транспортной системы с целью минимизации социальных, экологических и экономических издержек в процессе ее функционирования, а также прогнозирования последствий при принятии и обосновании организационно-управленческих и проектных решений по развитию транспортной системы города. Именно такие задачи решаются при разработке документации стратегического, территориального и транспортного планирования городов и населенных пунктов различного уровня.

### Список использованных источников

1. Комплексное моделирование потоков общественного и индивидуального транспорта / В. П. Федоров [и др.] // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2005. – С. 19–22.
2. Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 188 с.
3. Гасников, А. В. О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков / А. В. Гасников [и др.] // Мат. моделирование. – 2014. – Т. 26, № 6. – С. 34–70.
4. Корягин, М. Е. Оптимальное соотношение общественного и легкового транспорта при перевозках населения в городах / М. Е. Корягин // Информационные технологии и математическое моделирование: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. – Томск, 2008. – Ч. 2. – С. 27–30.
5. Лосин, Л. А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач / Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функциониро-

вания транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2017. – С. 88–95.

6. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии: сб. тр. Санкт-Петербургского экон.-мат. ин-та РАН. – СПб.: Нестор-История, 2015. – Вып. 9: Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. – 84 с.

7. Мягков, В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров. – Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1989. – 145 с.

8. Федоров, В. П. Математическая модель формирования пассажиропотоков / В. П. Федоров // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1974. – №4. – С. 17–26.

9. Питтель, Б. Г. Одна простейшая вероятностная модель коллективного поведения / Б. Г. Питтель // Проблемы передачи информации – 1967. – Т. 3, вып. 3. – С. 37–52.

10. Erlander, S. The Gravity Model in Transportation Analysis: theory and extensions / S. Erlander, N. F. Stewart. – Utrecht: VSP, 1990. – 226 p.

11. Лосин, Л. А. Исследование влияния стоимости проезда на транспортный спрос методом математического моделирования / Л. А. Лосин, Н. В. Булычева // Бюл. результатов науч. исслед. – 2022. – Вып. 2. – С. 179–194. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-2-179-194>

12. Шелейховский, Г. В. Транспортные основания композиции городского плана / Г. В. Шелейховский. – Л.: Гипрогор, 1936. – 150 с.

13. Шестеров, Е. А. Актуальность научного наследия М. С. Фишелясона для решения задач транспортного планирования / Е. А. Шестеров, Н. А. Калужный, Л. А. Лосин // Вестн. гражд. инженеров. – 2020. – Вып. 2 (79). – С. 45–50. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-2-45-50>

14. Капский, Д. В. Транспорт в планировке городов: учеб.-метод. пособие: в 10 ч. / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. – Минск: БНТУ, 2019. – Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. – 94 с.

15. Wardrop, J. Road Paper. Some theoretical aspects of road traffic research / J. Wardrop // Proceedings of the Institute of Civil Engineers. – 1952. – Vol. 1, iss. 3. – P. 325–362. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>

16. Palma, A. de Optimization formulations and static equilibrium in congested transportation networks / A. de Palma, Y. Nesterov. – Louvain-la-Neuve, 1998. – 34 p.

17. Knight, F. H. Some Fallacies in the Interpretation of Social Costs / F. H. Knight // Q. J. Econ. – 1924. – Vol. 38, № 4. – P. 582–606. <https://doi.org/10.2307/1884592>

18. Beckmann, M. J. Studies in the Economics of Transportation / M. J. Beckmann, C. B. McGuire, C. B. Winsten. – New Haven: Yale University Press, 1956. – 232 p.

19. Питтель, Б. Г. Математическая модель прогноза пассажиропотоков в городской транспортной сети / Б. Г. Питтель, В. П. Федоров // Экономика и мат. методы. – 1969. – Т. 5, № 5. – С. 744–757.

20. Мовшович, С. М. Последовательное проектирование и покоординатная минимизация при решении задач выпуклого программирования / С. М. Мовшович // Экономика и мат. методы. – 1976. – Т. 12, № 3. – С. 551–557.

21. Эрроу, К. Исследования по линейному и нелинейному программированию: пер. с англ. / К. Эрроу, Л. Гурвиц, Х. Удзава. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 334 с.

## References

1. Fyodorov V. P., Pahomova O. M., Losin L. A., Bulycheva N. V. Comprehensive modelling of the public and individual transport flows. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: materialy XI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Social and economic problems of city transport systems and their influence development. Materials of the XI international scientific and practical conference]. Yekaterinburg, 2005, pp. 19–22 (in Russian).

2. Yakimov M. R. *Transport Planning: creating transport models of cities*. Moscow, Logos Publ., 2013. 188 p. (in Russian).

3. Gasnikov A. V., Dorn Yu. V., Nesterov Yu. E., Shpirko S. V. On the three-stage version of stable dynamic model. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Modeling*, 2014, vol. 26, no. 6, pp. 34–70 (in Russian).

4. Koryagin M. E. Optimal ratio of public and individual transport for transportation of the population in cities. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie: materialy VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ch. 2* [Information technologies and mathematical modeling. Materials of the VII All-Russian scientific and practical conference. Part 2]. Tomsk, 2008, pp. 27–30 (in Russian).

5. Losin L. A. Designing of software complex for the solving of transport and urban problems in St. Petersburg. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: materialy XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Social and Economic Problems of City Transport Systems and Their Influence Areas Development and Functioning]. Minsk, 2017, pp. 88–95 (in Russian).

6. *Economic and mathematical research: mathematical models and information technologies. Proceedings of the St. Petersburg Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences. Iss. 9. Mathematical models in the study of urban environment development processes*. St. Petersburg, Nestor-istoriya Publ., 2015. 84 p. (in Russian).

7. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Mathematical Support of Urban Planning*. Leningrad, Nauka Publ., 1989. 145 p. (in Russian).

8. Fyodorov V. P. Mathematical model of passenger traffic formation. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya Tekhnicheskaya kibernetika* [Technical Cybernetics of the USSR. Izvestiya], 1974, no. 4, pp. 17–26 (in Russian).

9. Pittel B. G. One simple probabilistic model of collective behavior. *Problemy peredachi informatsii = Problems of Information Transmission*, 1967, vol. 3, no. 3, pp. 37–52 (in Russian).
10. Erlander S., Stewart N. F. *The Gravity Model in Transportation Analysis: theory and extensions*. Utrecht, VSP, 1990. 226 p.
11. Losin L. A., Bulycheva N. V. The Research of Fare Impact on Transport Demand by Mathematical Modeling. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy = Bulletin of Scientific Research Results*, 2022, iss. 2, pp. 179–194 (in Russian). <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-2-179-194>
12. Sheleikhovski G. V. *Transport Bases of the City Plan Composition*. Leningrad, Giprogor Publ., 1936. 150 p. (in Russian).
13. Shesterov E. A., Kalyuzhny N. A., Losin L. A. The relevance of the scientific heritage of M. S. Fishelson for solving problems of transport planning. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 45–50 (in Russian). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-2-45-50>
14. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport in Urban Planning. Part 1. Transport Planning: Mathematical Modeling*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2019. 94 p. (in Russian).
15. Wardrop J. Road Paper. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 1952, vol. 1, iss. 3, pp. 325–362. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>
16. Palma A. de, Nesterov Y. *Optimization Formulations and Static Equilibrium in Congested Transportation Networks*. Louvain-la-Neuve, Belgium, 1998. 34 p.
17. Knight F. H. Some Fallacies in the Interpretation of Social Costs. *Quarterly Journal of Economics*, 1924, vol. 38, no. 4, pp. 582–606. <https://doi.org/10.2307/1884592>
18. Beckmann M. J., McGuire C. B., Winsten C. B. *Studies in the Economics of Transportation*. New Haven, Yale University Press, 1956. 232 p.
19. Pittel B. G., Fyodorov V. P. Mathematical model of passenger traffic forecast in the urban transport network. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods*, 1969, vol. 5, no. 5, pp. 744–757 (in Russian).
20. Movshovich S. M. Coherent design and coordinate minimization in solving convex programming problems. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods*, 1976, vol. 12, no. 3, pp. 551–557 (in Russian).
21. Arrow K., Gurfvitz L., Uzava H. *Studies of Linear and Nonlinear Programming*. Palo Alto, Stanford University Press, 1958.

### Информация об авторах

**Булычева Нэля Васильевна** – старший научный сотрудник, Институт проблем региональной экономики Российской академии наук (ул. Серпуховская, 38, 190013, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: bul45@mail.ru

**Капский Денис Васильевич** – доктор технических наук, доцент, заместитель председателя, Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kapskii@vak.gov.by

**Лосин Леонид Андреевич** – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем региональной экономики Российской академии наук (ул. Серпуховская, 38, 190013, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: nipigrad@yandex.ru

### Information about the authors

**Nelya V. Bulycheva** – Senior Researcher, Institute for Regional Economic Studies of the Russian Academy of Sciences (38, Serpukhovskaya Str., 190013, St. Petersburg, Russian Federation). E-mail: bul45@mail.ru

**Denis V. Kapski** – Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Vice-Chairman, Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kapskii@vak.gov.by

**Leonid A. Losin** – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Institute for Regional Economic Studies of the Russian Academy of Sciences (38, Serpukhovskaya Str., 190013, St. Petersburg, Russian Federation). E-mail: nipigrad@yandex.ru