



DOI: 10.5862/JCSTCS.217-222.5

УДК 656, 004.8, 007.5, 51-74, 510.67

Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПОСТРОЕНИЯ МАТРИЦ ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov

METHODS AND MODELS OF THE CONSTRUCTION OF TRANSPORT CORRESPONDENCE MATRIX

Проведен анализ методов и моделей построения матриц корреспонденций применительно к городским транспортным процессам, выявлены недостатки и достоинства последних. В результате анализа выбран реляционный метод построения матриц корреспонденций, а наиболее практически пригодной признана трилинейная модель (EVA) матриц корреспонденций. Работоспособность модели показана на примере оценки изменения распределения транспортных потоков в Санкт-Петербурге, вызванных вводом новых станций метрополитена «Обводный канал», «Адмиралтейская», «Бухарестская» и «Международная». Проанализированы результаты транспортного моделирования. Обозначены практические ориентиры развития моделей построения матриц корреспонденций.

МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ; ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; МЕТОД ЕДИНСТВЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА РОСТА; МЕТОД СРЕДНИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РОСТА; ДЕТРОЙТСКИЙ МЕТОД; МЕТОД ФРАТАРА; ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; ЭНТРОПИЙНАЯ МОДЕЛЬ; МОДЕЛЬ КОНКУРИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ; ТРИЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ.

We have analyzed the methods and models how to construct correspondence matrix for urban transport processes. We have also identified the advantages and disadvantages of the models. Having analyzed these models, we chose the relational method of the construction of correspondence matrix. The EVA model of the construction of correspondence matrix was recognized as the most suitable. The article demonstrates how the distribution of traffic flows in St. Petersburg is changed due to the fact that new metro stations such as “Obvodny Kanal”, “Admiralteyskaya”, “Bukharetskaya” and “Mezhdunarodnaya” have been put into operation. We have also outlined technical prospects of the models of the construction of correspondence matrix.

CORRESPONDENCE MATRIX; TRANSPORT MODELLING; SINGLE FACTOR GROWTH METHOD; AVERSGE GROWTH RATE; DETROIT METHOD; FRATARA METHOD; GRAVITY MODEL; ENTROPY MODEL; COMPETING CENTERS MODEL; EVA MODEL.

Подходы к организации расселения населения в мегаполисах России с начала 2000 г. претерпевают значительные изменения [1]. В рыночных условиях хозяйствования, обусловленных интенсивным возведением жилой и коммерческой инфраструктуры, переносом предприятий и изменением мест приложения труда, изменяются объемы и направления транспортных корреспонденций. Построение матриц корреспонденций (МК) требует использования современных систем непрерывного транспортного мониторинга и применения современных методов для их восстановления и обновления.

Использование недостоверных данных, полученных посредством единичных опросов и локальных систем мониторинга транспортной мобильности, приводит к построению ложных транспортных моделей, сводит на нет эффективность принимаемых управленческих решений.

Таким образом, формирование МК является центральной и наиболее сложной задачей [2], с математической точки зрения во всех исследованиях, связанных с количественными, структурными и параметрическими изменениями транспортных потоков (ТП) в городской транспортной

системе (ГТС). Таковыми могут быть различные перемещения пассажиров, грузов или транспорта между любыми парами корреспондирующих пунктов транспортной сети с различными целями.

Анализ предметной области и постановка задачи. В настоящее время исследования проблем построения МК заняты многие российские и зарубежные научные коллективы. Среди последних работ отметим следующие: в [3] разработан алгоритм расчета матриц пассажирских корреспонденций пригородного сообщения на основании емкостей по отправлению и прибытию пассажиров на остановочные пункты; в [4] представлена методика определения сбалансированной емкости транспортных районов центральной части города по прибытию и отправлению автомобилей за счет включения в расчет количества автомобилей, осуществляющих движение по транспортной сети; в [5, 6] рассмотрены методы построения МК и алгоритмы калибровки; в [2] предложены методы робастного оценивания МК, сводящиеся к задачам линейного и квадратичного программирования со смешанными ограничениями; в [7, 8] описаны процедуры построения МК между районами отправления и прибытия с использованием информации, полученной от автоматизированных транспортных информационных системы; в [9–11] представлены алгоритмы статистической оценки и калибровки данных МК; в [12] рассмотрен подход классификации и упорядоченности социально-экономического поведения городского населения в границах информа-

ционных систем Федеральной службой государственной статистики.

Цель настоящей работы – проведение анализа существующих методов и моделей построения МК и выявление наиболее пригодных для оценки городских транспортных процессов и согласуемых с современными системами управления дорожным движением [13–16].

Анализ методов построения МК. При всем многообразии подходов к построению МК довольно четко прослеживается разделение их на три больших класса [17, 5]: экстраполяционные методы (ЭМ), вероятностные методы (ВМ) и реляционные методы (РМ).

Модели МК, построенные на основе ЭМ, носят наименование *модели коэффициентов роста* (по наименованию методов) или *линейные модели* (по форме записи). На рис. 1 представлен вид МК с принятыми ниже обозначениями.

Экстраполяционные методы формирования МК основаны на данных обследования существующего распределения пассажиропотоков и транспорта между корреспондирующими районами, а прогнозные расчеты МК осуществляются с использованием пропорциональных коэффициентов роста. К ЭМ относят следующие методы: единственного коэффициента роста; средних коэффициентов роста; детройтский; Фратара [6].

Метод единственного коэффициента роста (МЕКР) в качестве исходной информации использует фактические величины корреспонденций между транспортными районами города и прогноз их роста.



Рис. 1. Матрица корреспонденций

Коэффициент роста K определяется как отношение общих прогнозируемых корреспонденций P^* к общим фактическим корреспонденциям P^0 :

$$K = \frac{P^*}{P^0}, \quad (1)$$

где «*» – индекс прогнозируемой величины; «0» – индекс фактической величины.

Коэффициент роста K может зависеть от таких показателей, как количество населения P , величина дохода на душу населения I и уровень автомобилизации C :

$$K = \frac{f(P_i^d, I_i^d, C_i^d)}{f(P_i^c, I_i^c, C_i^c)}. \quad (2)$$

Объем прогнозируемых корреспонденций ρ_{ij}^* определяется согласно [13], как произведение количества фактических корреспонденций ρ_{ij}^0 , относящихся к i -му участку транспортной сети, на коэффициент роста K^0 , то есть

$$\rho_{ij}^* = K \rho_{ij}^0, \quad (3)$$

где ρ_{ij}^* – прогнозируемые корреспонденции; ρ_{ij}^0 – фактические корреспонденции.

Метод единственного коэффициента роста (рис. 2) не учитывает динамику развития между отдельными параметрами города и обладает низкой достоверностью.

На практике он используется для приближенных оценок транспортных потоков в условиях проектирования отдельных районов города на ближайшую перспективу.

Метод средних коэффициентов роста (МСКР) основывается на данных обследования фактических корреспонденций между районами.

Средние коэффициенты роста для i -го и j -го транспортных районов рассчитываются на основании общих фактических P_i^0, P_j^0 и общих прогнозируемых P_i^*, P_j^* корреспонденций для i -го и j -го транспортных районов и исчисляются следующим образом:

$$K_i = \frac{P_i^*}{P_i^0}; \quad K_j = \frac{P_j^*}{P_j^0}. \quad (4)$$

Объем прогнозируемых корреспонденций ρ_{ij}^1 определяется произведением количества фактических корреспонденций ρ_{ij}^0 и среднего арифметического между K_i и K_j , то есть

$$\rho_{ij}^1 = \rho_{ij}^0 \frac{(K_i^0 + K_j^0)}{2}, \quad (5)$$

где 1 – индекс прогнозируемой расчетной величины на первой итерации.

Поскольку величины корреспонденций, определяемые из соотношения (5), как пра-



Рис. 2. Метод единственного коэффициента роста

вило, не удовлетворяют следующему равенству

$$P_i^* = \frac{(K_i^0 + K_j^0)}{2} \sum_i^n \rho_{ij}^1, \quad (6)$$

то для его выполнения необходимо использовать приближенные методы решения. Тогда итерационная форма соотношения (6) примет вид:

$$\rho_{ij(i)}^k = \rho_{ij}^{k-1} \frac{(K_i^{k-1} + K_j^{k-1})}{2}, \quad (7)$$

где $k, k-1$ – шаги итераций.

Метод средних коэффициентов роста (рис. 3) учитывает различные темпы развития тех или иных районов города, однако, согласно [6, 5] при значительном росте подвижности населения, появлении новых жилых массивов или крупных промышленных зон этот метод приводит к большим погрешностям, поэтому в проектной практике почти не применяется.

Детройтский метод (ДМ) в отличие от МСКР, помимо коэффициентов роста отдельных районов учитывает также и коэффициент роста для всего города.

Величина прогнозных корреспонденций определяется как

$$\rho_{ij}^1 = \rho_{ij}^0 \frac{K_i^0 K_j^0}{K^0}; \quad K^0 = \frac{P^*}{P^0}. \quad (8)$$

Для соблюдения соответствия между прогнозируемыми и расчетными корреспонденциями прибегают к приближенным методам решения, тогда соотношение (8) примет вид:

$$\rho_{ij}^k = \rho_{ij}^{k-1} \frac{K_i^{k-1} K_j^{k-1}}{K^0}. \quad (9)$$

Детройтский метод (рис. 4) не сложен для расчетов и позволяет получить более высокую точность прогноза, чем МСКР, однако, такой прогноз может значительно отличаться от окончательных корреспонденций, и, как отмечается в [6], это отличие будет тем больше, чем больше отличаются темпы роста отдельного района от города в целом.

Метод Фратара (МФ) состоит в том, что объем корреспонденций из i -й зоны в j -ю для некоторого будущего момента времени пропорционален фактическому объему корреспонденций из i -й зоны, умноженному на коэффициент развития j -й зоны:

$$\rho_{ij(i)}^1 = \rho_{ij}^0 K_i^0 K_j^0 \left(\frac{L_i^0 + L_j^0}{2} \right), \quad (10)$$

где L_i^0, L_j^0 – коэффициенты роста корреспонденций в зоне m , обусловленных развитием i -й и j -й зон соответственно,

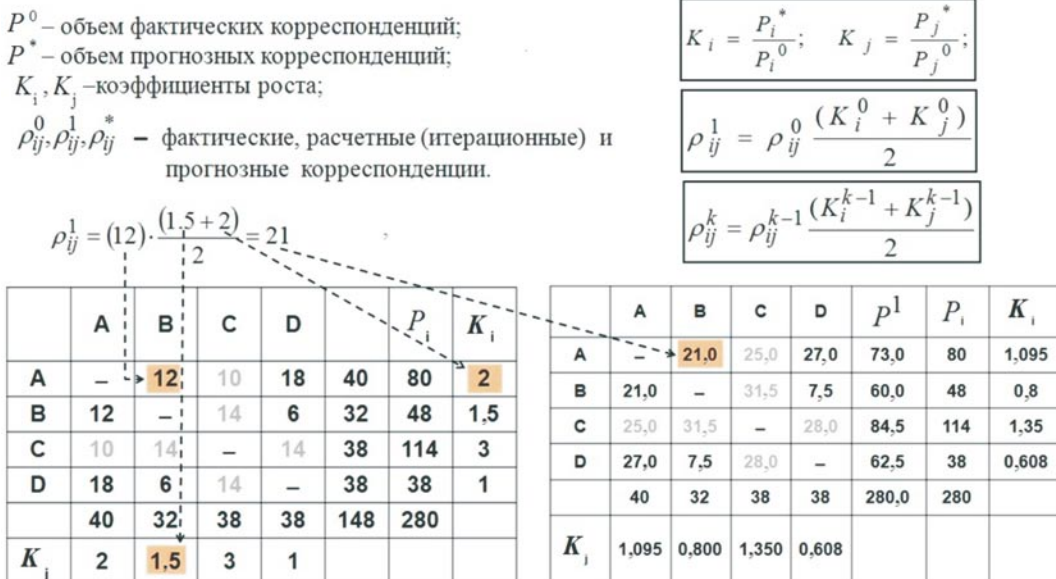


Рис. 3. Метод средних коэффициентов роста

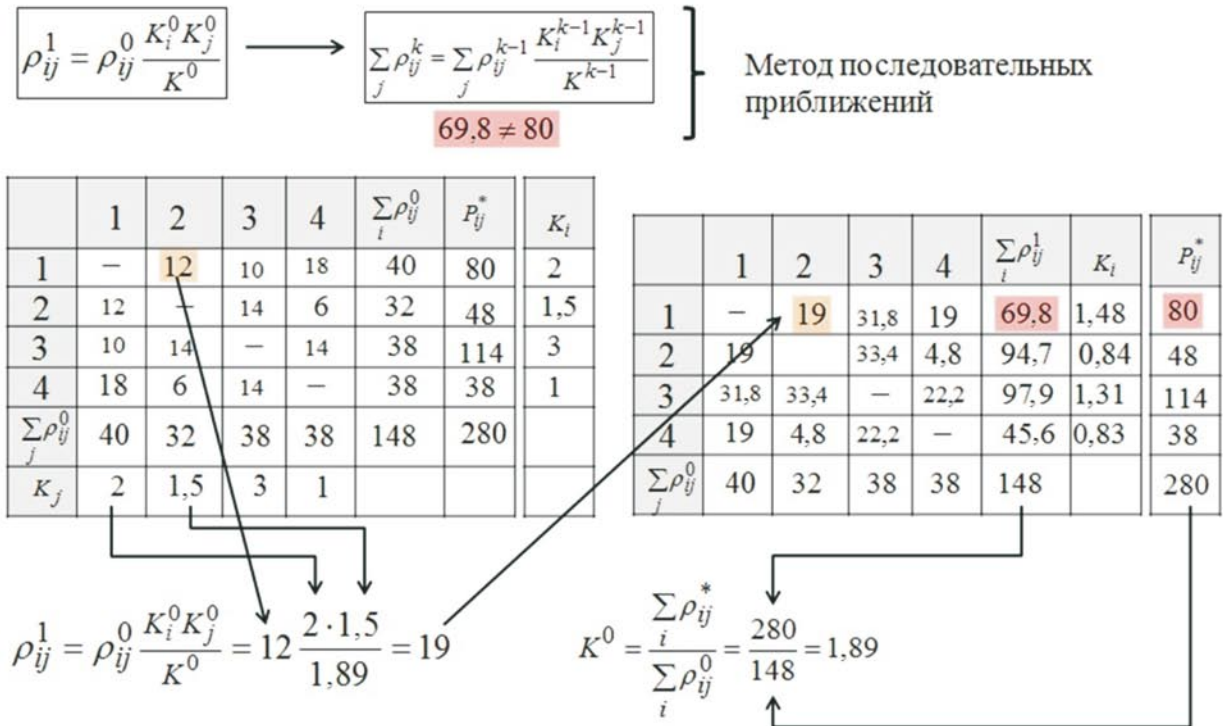


Рис. 4. Детройтский метод

$$L_i^0 = \frac{\sum_{m=1} \rho_{im}}{\sum_m \rho_{im} K_m}; \quad L_j^0 = \frac{\sum_{m=1} \rho_{jm}}{\sum_m \rho_{jm} K_m}, \quad (11)$$

где K_m – коэффициент развития для зоны с номером m , при этом m принимает множество значений, соответствующих всем рассматриваемым зонам.

Метод Фратара также использует итерационный процесс для приближения к окончательному решению:

$$\rho_{ij}^k = \rho_{ij}^{k-1} K_i^{k-1} K_j^{k-1} \left(\frac{L_i^{k-1} + L_j^{k-1}}{2} \right). \quad (12)$$

Результаты расчета каждого промежуточного шага являются исходными данными для последующего. Этот процесс ведется до тех пор, пока не будет достигнуто равенство между заранее определенной величиной транспортного оборота района и суммой корреспонденций, полученной в результате расчета для этого района, то есть

$$P_i^* = K_j \sum_i \rho_{ij}^1. \quad (13)$$

Метод Фратара (рис. 5) получил наибольшее распространение среди всех экстраполяционных методов формирования МК.

В практике транспортного моделирования ЭМ широкого распространения не получили по следующим причинам:

- для проведения расчетов ЭМ необходимо иметь информацию о фактических корреспонденциях между транспортными районами города;

- динамика развития структуры города учитывается не адекватно.

Экстраполяционные методы преимущественно используются при низких темпах роста городов и небольших сроках прогноза – не более 5-7 лет.

Вероятностные методы формирования МК получили наибольшее распространение в перспективном городском транспортном планировании. Корреспонденции в этом случае определяются на основании эмпирических или теоретических зависимостей двух районов от численности их населения, количества мест приложения труда, условий поездок, размещения районов в

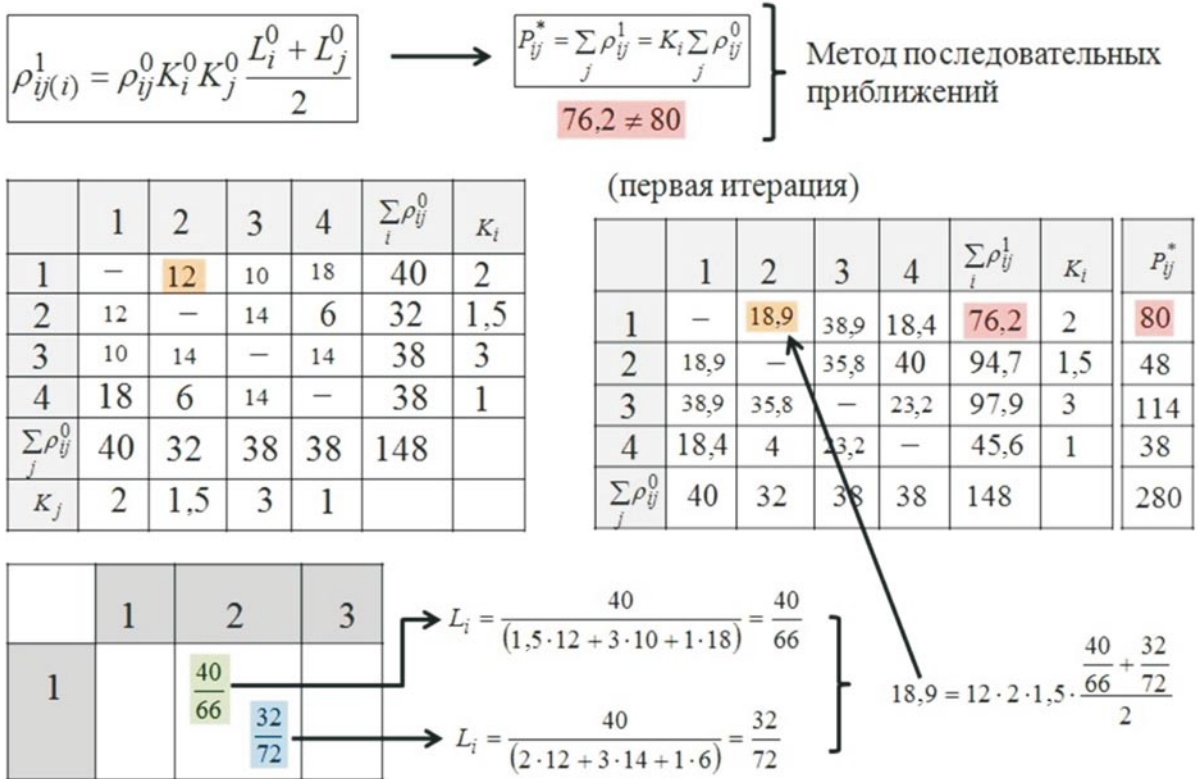


Рис. 5. Метод Фратара

плане города и других, подобных факторов. Эти методы более глубоко и полно учитывают изменения в размещении жилищных и промышленных образований, транспортной сети, в системе культурно-бытового обслуживания населения и т. д.

К ВМ, согласно [5, 2], относят гравитационные модели, энтропийные, конкурирующих центров и др.

Гравитационная модель (ГМ) основана на следующем положении: корреспонденция из района i в район j пропорциональна общему объему отправления из центра i , общему объему прибытия в центр j и обратно пропорциональна функции тяготения $f(c_{i,j})$, зависящей от удельных расходов $c_{i,j}$ на передвижение из источника i в сток j :

$$\rho_{ij}^* = k \frac{s_i d_j}{f(c_{i,j})}, \quad (14)$$

где ρ_{ij}^* – потенциальные корреспонденции между районами i и j ; k – калибровочный коэффициент; s_i – общий объем пользователей, выезжающих из источника i , $i \in S$;

d_j – общий объем пользователей, въезжающих в сток j , $d_j \in S$; $f(c_{i,j})$ – функция тяготения, зависящая от удельных расходов $c_{i,j}$ на передвижение из источника i в сток j .

При этом предполагается выполненным условие баланса общего прибытия и отправления:

$$\sum_{j=1}^n \rho_{i,j} = s_i, \quad \sum_{i=1}^m \rho_{i,j} = d_j, \quad (15)$$

$$\rho_{i,j} \geq 0, \quad i \in S, \quad j \in D,$$

где $\rho_{i,j}$ – расчетные корреспонденции между районами i и j .

Перепишем выражение (14) в виде:

$$\rho_{ij}^* = \alpha_i \beta_j s_i d_j f(c_{i,j}), \quad i \in S, \quad j \in D, \quad (16)$$

где α_i, β_j – калибровочные коэффициенты, которые определяются из системы:

$$\alpha_{i,j} = \left[\sum_{j \in D} \beta_j d_j f(c_{i,j}) \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\beta_{i,j} = \left[\sum_{j \in D} \alpha_j s_j f(c_{i,j}) \right]^{-1}.$$

Система (17) является совместной в случае равенства суммарных потоков по въезду и выезду, то есть

$$\sum_{i \in S} s_i = \sum_{j \in D} d_j.$$

Функция тяготения $f(c_{i,j})$ подбирается на основе расчетных данных и данных транспортной статистики. Коэффициенты α_i, β_j определяются методом балансировки Шацкого–Шелейховского [2].

Модель (15)–(17) программно разрешима с использованием итерационной процедуры расчета МК [2]. Итерационная процедура начинается с матрицы вида:

$$\rho_{ij}^{k+1} = \rho_{ij}^k + q_i r_j f(c_{ij}) \left[\sum_{l \in D} r_l f(c_{il}) \right]^{-1}. \quad (18)$$

Каждая итерация метода состоит из последовательности операций:

$$\rho_{ij}^k = \begin{cases} \rho_{ij}^k d_j \left[\sum_{l \in S} \rho_{il}^k \right]^{-1}, & \text{если } \sum_{i \in S} \rho_{ij}^k > d_j \\ \rho_{ij}^k, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$q_i = s_i - \sum_{j \in D} \rho_{ij}^k, \quad r_j = d_j - \sum_{i \in S} \rho_{ij}^k, \quad (19)$$

$$\rho_{ij}^{k+1} = \rho_{ij}^k + q_i r_j f(c_{ij}) \left[\sum_{l \in D} r_l f(c_{il}) \right]^{-1}.$$

Вычислительные эксперименты по расчету МК согласно [5] показали высокую скорость сходимости процесса (18), (19) к искомой МК.

К преимуществам традиционной гравитационной модели можно отнести доступность исходной информации и простоту выполнения расчетов.

В качестве недостатка следует отметить то, что существующий вариант реализации не является строго обоснованным с математической точки зрения, поскольку расчетная формула только отражает общие связи между параметрами модели, но не гарантирует полной аналогии корреспонденций между транспортными районами города. Центры прибытия ТП рассматриваются изолированно от возможных альтернативных центров.

Энтропийный метод (ЭнМ) моделирования городских систем можно назвать одним

из главных направлений «школы математического моделирования». В основе алгоритмов, реализующих энтропийную модель, лежит принцип достижения равновесия в исследуемой системе [2].

ЭнМ является своеобразным аналогом второго закона термодинамики и исходит из вероятностного описания поведения пользователей сети.

Руководствуясь принципом максимизации энтропии, наиболее вероятное состояние транспортной системы будет соответствовать МК вида

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{i,j} \frac{v_{i,j}^{\rho_{i,j}}}{\rho_{i,j}} \rightarrow \max, \quad (20)$$

где $v_{i,j}^{\rho_{i,j}}$ – вероятность выбора индивидуумом коммуникации $\rho_{i,j}$.

Условие сбалансированности МК имеет вид (15), а ограничение на общие затраты при проезде представимо в следующей форме:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j} \cdot \rho_{i,j} = C, \quad (21)$$

где $c_{i,j}$ – удельные затраты на передвижение из источника i в сток j ; C – полные затраты в транспортной системе.

Разрешения модели (20), (21) осуществляются с использованием итерационной схемы [2], начиная с матрицы $\rho^0 = (\rho_{ij}^0 = v_{ij} : i \in S, j \in D)$, на каждой итерации метода попеременно достигается выполнение балансовых ограничений для выездов и въездов:

$$\rho_{i,j}^k = \rho_{i,j}^{k-1} s_i \left[\sum_{j \in D} \rho_{i,j}^{k-1} \right]^{-1};$$

$$\rho_{i,j}^k = \rho_{i,j}^{k-1} d_j \left[\sum_{i \in S} \rho_{i,j}^{k-1} \right]^{-1}. \quad (22)$$

В [2, 6] доказана сходимость процесса (22) к оптимальному решению задачи (20), (21).

Энтропийно-гравитационная модель (ЭГМ) позволяет вывести условия эквивалентности ГМ и ЭнМ. Руководствуясь сведениями [2, 5], запишем функцию Лагранжа, учитывая ограничения (21), (22) в следующем виде:

$$L(\rho, \lambda, \mu, \gamma) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\rho_{i,j} \ln \frac{v_{i,j}}{\rho_{i,j}} + \lambda_i (S_i - \rho_{i,j}) + \mu_j (d_j - \rho_{i,j}) + \gamma (C - c_{i,j} \rho_{i,j}) \right] \rightarrow \max, \quad (23)$$

где $\lambda = \{\lambda_i : i \in S\}$ – вектор двойственных переменных, удовлетворяющий балансовым ограничениям (21) для источников; $\mu = \{\mu_j : j \in D\}$ – вектор двойственных переменных, удовлетворяющий балансовым ограничениям (21) для стоков; γ – двойственная переменная, удовлетворяющая ограничению по затратам (22).

Точка максимума функции (23) должна соответствовать условиям (21), (22) и следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \rho_{i,j} = \alpha_i \beta_j s_i d_j v_{i,j} \exp(-\gamma c_{i,j}) \\ \alpha_i = \left[\sum_{j \in D} \beta_j d_j v_{i,j} \exp(-\gamma c_{i,j}) \right]^{-1} \\ \beta_j = \left[\sum_{i \in S} \alpha_i s_i v_{i,j} \exp(-\gamma c_{i,j}) \right]^{-1} \end{cases}, \quad (24)$$

где параметры α_i и β_j – калибровочные коэффициенты; параметр γ определяется в процессе калибровки модели согласно [2, 6].

Достоинством ЭНМ (24) является нахождение наиболее вероятного устойчивого состояния системы при независимом поведении пользователей.

Основной недостаток ЭНМ – замкнутость ТП внутри рассматриваемой сети, тем самым учет в модели транзитных потоков сопряжен с вводом дополнительных ограничений, что приводит к росту размерности модели.

Модель конкурирующих центров. Модели данного вида можно рассматривать как обобщения гравитационной модели, где в выражение (16) включаются дополнительные факторы, например индекс посещаемости района прибытия, определяемый формулой

$$I_{ij} = \sum_{l \in R, l \neq i, j} \frac{d_l}{tr_{lj}}. \quad (25)$$

Индекс посещаемости увеличивается по

мере приближения рассматриваемого района к альтернативным районам отправления. Введение этого фактора в модель позволяет моделировать агломерационные эффекты в структуре корреспонденций [6, 18, 19].

Реляционные методы формирования МК основаны на данных обследования существующего распределения пассажиропотоков и транспорта между корреспондирующими районами, в привязке к персональным характеристикам пассажиропотока, транспортных средств и объектов городской инфраструктуры. Как правило, сбор данных в этом случае осуществляется с использованием средств транспортного мониторинга.

Трилинейная модель (EVA), рассмотренная в [20, 21], одновременно дает формальное представление о процессах создания, распределения и разделения ТП. В трилинейной модели объем ТП из мест района отправления в места района прибытия рассчитывается на основе демографических и структурных показателей, а также степени подвижности, известной в результате статистических исследований передвижений населения. Расчет производится отдельно для каждого слоя спроса. В слой входят группы транспортных классов.

Группы «место отправления – место прибытия» – это дезагрегированные, однородные по поведению транспортные классы (табл. 1), выведенные из цепочки активностей (последовательности перемещений).

Каждое перемещение, направленное на определенное действие, относится к определенным категориям источников (Д – дом) и целей (Р – работа) и, таким образом, к соответствующей группе «место отправления – место прибытия» (Д-Р).

С «создаваемой стороны» к группе «источник–цель» относится как минимум одна базовая группа населения и со «сторон притяжения» как минимум одна величина структуры. Например, к группе «источник–цель» Д-Р со стороны источника относится основная базовая группа населения «Трудящиеся».

Указанные в табл. 2 группы могут быть разделены на подгруппы по дополнительным признакам и использованы для созда-

Таблица 1

Группы транспортных классов [20]

Цель Источник	К	Р	Д	У	С	Т	До	П
Квартира (К)		КР(1)	КД(1)	КУ(1)	КС(1)	КТ(1)	КДо(1)	КП(1)
Работа (Р)	РК	–	РП(1)					
Детское учреждение (Д)	ДК	ПР(2)	ПП(3)					
Учебное заведение (У)	УК							
Службное заведение (С)	СК							
Торговое учреждение (Т)	ТК							
Учреждение досуговой деятельности (До)	ДоК							
Прочее учреждение (П)	КП							

ния транспортного спроса. Таким образом, процесс классификации городского населения по слоям спроса задается следующим образом: каждой паре «место отправления (*i*) – место прибытия (*j*)», отражающей определенный слой спроса $DStr_c$ из множества $DStr_c \in DStr$, оператор классификации f_{ψ}^d ставит в соответствие свойство структуры $SG_{i(j)}s$ из множества $SG_{i(j)}$, от-

ражающее этот слой спроса:

$$f_{\psi}^d : DStr_c \rightarrow SG_{i(j)}s. \quad (26)$$

Для каждого слоя спроса и для каждой группы людей, которая используется в данном слое, должны быть определены степени подвижности (MR). Степень подвижности группы определяется как среднее количество перемещений в день на человека:

$$MR_{pc} = \frac{\text{Количество произведенных в СлСпр передвижений в группе } p}{\text{Количество людей в группе } p}. \quad (27)$$

На этапе создания транспортного движения из приведенных данных социальной структуры населения и характеристик для всех слоев спроса рассчитывается объем ТП из источника Q_{ic} и объем ТП в цель Z_{jc} или верхние границы Q_{ic}^{\max} и Z_{jc}^{\max} для этих объемов. Метод расчета зависит от того, к какому типу источника-цели относится

данная пара действий слоя спроса. Возможны три типа: 1) действие источника = действию на месте зарождения; 2) действие цели = действию на месте зарождения; 3) действие источника и действие цели \neq действию на месте зарождения.

Правила проведения расчета представлены в табл. 3. Данная модель опирается

Таблица 2

Свойства структуры и группы людей в слоях спроса [20]

Слой спроса	Свойство структуры /Группа района источника <i>i</i>	
$DStr_c$	$SG_{i(j)}s$	
ДР (WA)	Т(ЕТ)	Трудящиеся
ДДет (WK)	МД(КК)	Маленькие дети
ДШ (WB)	Ш(SCH)	Школьники, обучающиеся в ПТУ, студенты
ДС (WD)	Т(ЕТ)	Трудящиеся
ДМ (WE)	Ж(EW)	Жители
ДСвоб (WF)	Ж(EW)	Жители
.....

Таблица 3

Создание транспортного движения в модели EVA [20]

Этап	1. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 1
1	Объем транспортного потока на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2	Объем транспортного потока из источника Q , Q_{max} : $Q_{ic} = H_{ic}$
3	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{i=1}^m Q_{ic}; f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{ls} v_{isc}}$
4	Объем транспортного потока в месте назначения Z , Z_{max} : $Z_{jc} = f_c \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} v_{jsc}; Z_{jc} \leq Z_{jc}^{max} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} v_{jsc};$ $\widehat{Z}_{jc} = \sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} v_{jsc}; \underline{Z}_{jc} \widehat{Z}_{jc} \leq Z_{jc} \leq \overline{Z}_{jc} \widehat{Z}_{jc};$ $Z_{jc}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{jsc} SG_{js} v_{jsc}$
Этап	2. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 2
1	Объем транспортного потока на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2	Объем транспортного потока в месте назначения Z , Z_{max} : $Z_{jc} = H_{jc}$
3	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{j=1}^m Z_{jc}; f_c = \frac{V_c}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{ls} v_{isc}}$
4	Объем транспортного потока из источника Q , Q_{max} : $Q_{ic} = f_c \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}; Q_{ic} \leq Q_{ic}^{max} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{max} SG_{is} v_{isc};$ $\widehat{Q}_{ic} = \sum_{s \in S} ER_{isc}^{max} SG_{is} v_{isc}; \underline{Q}_{ic} \widehat{Q}_{ic} \leq Q_{ic} \leq \overline{Q}_{ic} \widehat{Q}_{ic};$ $Q_{ic}^{pot} = \sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}$
Этап	3. Модель создания транспортного движения в модели EVA: тип источник – цель 3
1	Объем транспортного потока на месте зарождения H : $H_{epc} = MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}; H_{ec} = \sum_{p \in P} MR_{epc} BP_{ep} u_{epc}$
2	Общий объем потоков V : $V_c = \sum_{e=1}^m H_{ec};$

Таблица 3. Окончание

3	<p>Объем транспортного потока из источника Q, Q_{\max}:</p> $Q_{ic} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{isc} SG_{is} v_{isc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}} V_c.$ <p>Объем транспортного потока в месте назначения Z, Z_{\max}:</p> $Z_{jc} = \frac{\sum_{s \in S} ER_{jsc}^{max} SG_{js} v_{jsc}}{\sum_{l=1}^n \sum_{s \in S} ER_{lsc} SG_{ls} v_{lsc}} V_c.$
---	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

на байесовскую вероятность. Постулируется принцип формирования потока: перемещение пользователя h начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j и при этом используется транспортное средство k .

В табл. 3 приняты следующие обозначения: e – индекс района причины перемещений (район места зарождения); i – индекс района источника перемещений; j – индекс района цели перемещений; s – индекс свойства структуры; p – индекс группы; c – индекс слоя спроса; m – количество районов в области исследования; MR_{epc} – степень подвижности группы p за единицу времени; ER_{isc} – степень создания свойства структуры s за единицу времени; BP_{ep} – количество людей в группе p ; SG – свойство структуры; u_{epc} – доля перемещений, реализованных в области исследования как внутреннее транспортное движение; v_{isc} – доля свойств структуры, действительная для внутреннего транспортного движения в области исследования; H_{epc} – объем транспортных потоков на месте зарождения для группы p ; H_{ec} – общий объем транспортных потоков на месте зарождения; Q_{ic} – объем транспортных потоков из источника; Z_{jc} – объем транспортных потоков в цель; Q_{ic}^{max} – максимально возможный объем транспортных потоков из источника; Z_{jc}^{max} – максимально возможный объем транспортных потоков в цель; $\underline{Q}_{ic}, \bar{Q}_{ic}$ – фактор нижней или верхней границы объема транспортного потока из источника; $\underline{Z}_{jc}, \bar{Z}_{jc}$ – фактор нижней или верхней границы объема транспортного потока в цель; Q_{ic}^{pot} – потенциально

возможный объем транспортного потока в источнике; Z_{jc}^{pot} – потенциально возможный объем транспортного потока в цели; V_c – общий объем потока; фактор, учитывающий соблюдение балансового условия $V = \sum_i Q_i = \sum_j Z_j$ при расчете объемов транспортных потоков районов.

С помощью A_i , E_j , M_k обозначаются события, информирующие о том, что перемещение начинается в транспортном районе i , заканчивается в транспортном районе j , при этом используется транспортное средство k .

Предполагается, что эти события происходят независимо друг от друга, тогда безусловные вероятности $P(A_i)$, $P(E_j)$, $P(M_k)$ можно представить как

$$P(A_i) = \frac{s_i}{P} \phi_{s_i}; \quad P(E_j) = \frac{d_j}{P} \phi_{d_j}; \quad (28)$$

$$P(M_k) = \frac{tr_k}{P} \phi_{tr_k}.$$

Условные вероятности из создания ТП примут вид

$$P(A_i|W) = \frac{s_i}{P}; \quad P(E_j|W) = \frac{d_j}{P}; \quad (29)$$

$$P(M_k|W) = \frac{tr_k}{P},$$

где $P = \sum_i s_i$ – общий поток транспорта

Таким образом, для всех i, j, k определены условные вероятности наступления события W в виде:

$$L_{ijk} = P(W|(A_i \cap E_j \cap M_k)), \quad (30)$$

или ненаступления события \bar{W} в виде:

$$\bar{L}_{ijk} = P(\bar{W} | (A_i \cap E_j \cap M_k)) = 1 - L_{ijk}. \quad (31)$$

Из предположения о том, что ТП

$\rho_{i,j,k}$ пропорциональны к условным вероятностям $P(\bar{W} | (A_i \cap E_j \cap M_k))$, следует, что

$$\rho_{i,j,k} = P((A_i \cap E_j \cap M_k) | W)P = \frac{P(A_i)P(E_j)P(M_k)P(W | (A_i \cap E_j \cap M_k))}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} P(A_{i'})P(E_{j'})P(M_{k'})P(W | (A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}))} P. \quad (32)$$

Вероятность может быть квантифицирована с помощью установок, которые можно проверить эмпирическим путем. Базовая трilinearная модель с условиями контрольных сумм транспортных корреспонденций задается в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} &= s_i, & \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \rho_{i,j,k} &= d_j, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{i,j,k} &= tr_k, & \rho_{i,j,k} &= L_{i,j,k} \phi_{s_i} \phi_{d_j} \phi_{tr_k}, \end{aligned} \quad (33)$$

где $L_{i,j,k}$ – вероятность оценки; $\phi_{s_i}, \phi_{d_j}, \phi_{tr_k}$ – калибровочные коэффициенты, определяемые эмпирическим или расчетным путем, содержащие информацию о предпочтении перемещений.

Данная модель позволяет с высокой степенью достоверности оценить величину транспортного предложения и транспортного спроса. Достоинством модели является возможность учитывать некоторые данные с геоинформационных систем и систем учета статистических данных.

К недостаткам данной модели можно отнести невозможность учета неподвижного транспорта. Абстрактная система классификации транспортной активности городского населения, принятая в модели EVA, не позволяет производить анализ транспортной активности в границах системы государственной статистики РФ. В модели также затруднена реализация обратной связи с участниками транспортного процесса.

Приведем сравнение рассмотренных выше моделей матриц корреспонденций в табл. 4.

В табл. 4 приняты следующие обозначения: ВД – вероятностные данные; ДНР – достоверные нерегулярные данные; Н – низкая степень детализации (район, автомобильные дороги); С – средняя степень детализации (Н + автомобильные перекрестки, виды транспортных средств); В –

высокая степень детализации (С + микрорайон, объекты инфраструктуры, транспортные средства и жители дифференцированы по примитивным классам, участки автомобильных и пешеходных дорог).

Из результатов сравнения очевидно, что трilinearная модель на порядок превосходит представленные нами модели МК. Использование трilinearной модели рассмотрим на примере моделирования процесса распределения ТП на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена с вводом новых станций: «Адмиралтейская», «Обводный канал», «Бухарестская» и «Международная».

Решение практической задачи. Разработка моделей распределения ТП на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена осуществлена в программе PTV Vision® VISUM.

Мы рассмотрим четыре модели: первая отражает ситуацию до ввода новых станций метро (2010 г.); вторая включает в себя две новые станции метро «Адмиралтейская» и «Обводный канал» (2011 г.); третья включает в себя еще две новые станции метро «Международная» и «Бухарестская» (2012 г.); четвертая включает в себя сравнение исходной модели с моделью, в которой введены все четыре станции метрополитена.

В качестве исходных данных использовались:

1) городская базовая транспортная модель Санкт-Петербурга (380 транспортных районов, 4 400 примыканий, 32 000 узлов, население 4 650 тыс. чел.);

2) план Фрунзенского и Центрального районов;

3) общие сведения об исследуемых районах (жилые, торговые, учебные, промышленные и иные общественные здания и сооружения);

4) данные статистики (сведения о насе-

Таблица 4

Сравнения методов и моделей построения МК

Параметры сравнения	Экстраполяционные методы				Вероятностные методы			Реляционные методы
	МЕКР	МСК	ДМ	МФ	ГМ	ЭГМ	МКЦ	EVA
Моделирование ГТС	-	-	-	-	-	-	-	Да
Классификация объектов	-	-	-	-	-	-	-	Частично
Данные для построения МК	ВД	ВД	ВД	ВД	ВД	ВД	ВД	ДнРД(ВД)
Степень детализации	Н	Н	Н	Н	С	С	С	В
Учет развития города	-	-	-	-	-	-	Частично	Да
Учет неподвижных транспортных объектов	-	-	-	-	-	-	-	-
Учет строительства новых транспортных и инфраструктурных объектов	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет новых видов транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет расписаний пассажирского транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет расписаний пассажирского транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет стоимости проезда	-	-	-	-	-	-	-	Да
Учет специальных видов транспорта	-	-	-	-	-	-	-	Частично
Учет альтернативных маршрутов	-	-	-	-	-	-	-	Частично
Учет характеристик транспортных объектов	-	-	-	-	-	-	-	Частично

лении, о рабочих местах);

5) данные транспортных структур (типы дорог, среднегодовая суточная интенсивность, пропускная способность в час);

6) транспортная статистика (расписания и маршруты общественного транспорта).

Построение информационно-логической модели транспортного процесса разберем на примере ввода станций метро «Бухарестская» и «Международная».

Связь района с сетью осуществляется через примыкания его центра тяжести к узлам транспортной сети. Через примыкания осуществляется генерация и поглощение ТП данным районом.

Схема транспортных районов с примыканиями для сценария с вводом станций «Бухарестская» и «Международная» при-

ведена на рис. 6, а промежуточная модель взаимодействия транспортного спроса и предложения для Фрунзенского района представлена на рис. 7.

На следующем этапе в модель заносятся маршруты городского пассажирского транспорта: автобусные, троллейбусные и трамвайные. Для каждого варианта маршрута задается расписание движения.

Разработка информационно-логической модели для сценария ввода станций метро «Адмиралтейская» и «Обводный канал» осуществляется аналогично.

На этом создание транспортной модели заканчивается и можно приступить к процедурам прогнозного моделирования ТП.

Данные спроса заносятся в матрицу пассажирских корреспонденций. Матрица



Рис. 6. Транспортные районы с примыканиями для сценария с вводом станций «Бухарестская» и «Международная»



Рис. 7. Промежуточная модель взаимодействия транспортного спроса и предложения во Фрунзенском районе для сценария 2012 г., пас./сут.

сетевых корреспонденций строится после расчета нагрузки на транспортную сеть, согласно табл. 3. В этой матрице отмечается корреспонденция пассажиров от одного микрорайона до другого. Вычисления осуществляются согласно (28)–(33)

Таким образом, на основе рассчитанных моделей нами была получена модель взаимодействия транспортного спроса и предложения, рассчитывающая перераспределение ТП.

Основные результаты прогноза распределения ТП на УДС Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена по рассмотренным выше сценариям получим в результате моделирования всей транспортной модели Санкт-Петербурга.

Для наглядности результаты расчета представим в виде укрупненных картограмм: транспортная модель 1 (рис. 8); транспортная модель 2 (рис. 9); транспортная модель 3 (рис. 10); транспортная модель 4 (рис. 11).

1. Ввод станций «Адмиралтейская» и «Обводный канал» вызовет следующие изменения.

На внутренней сети метрополитена:

- минимальный пассажиропоток на станции «Адмиралтейская» после ее ввода составит не менее 22 000 пас./сут., а на станции «Обводный канал» – не менее 27 000 пас./сут.;

- на величину более 2000 пас./сут. снизится нагрузка на станции «Василеостровская» (2160), «Пионерская» (2047), «Садовая» (2145), «Маяковская» (2239);

- на величину более 5000 пас./сут. снизится нагрузка на станции «Невский проспект-1» (7770), «Лиговский проспект» (8284), «Площадь Восстания-1» (5950);

- вследствие перераспределения пассажиропотоков на величину более 2000 пас./сут. возрастет нагрузка на станции «Комендантский проспект» (2978), «Спортивная» (4117), «Сенная площадь»



Рис. 8. Транспортная модель 1



Рис. 9. Транспортная модель 2



Рис. 10. Транспортная модель 3



Рис. 11. Транспортная модель 4

(2040), «Волковская» (3651);

- на величину более 5000 пас./сут. возрастет нагрузка на станции «Звенигородская» (5916), «Спасская» (7872).

На улично-дорожной сети Санкт-Петербурга:

- на величину более 1000 пас./сут. снизится нагрузка на следующие улицы: Салова (1300), Лиговский проспект (1100), Витебский проспект (2300), наб. Обводного канала (1000), Заневский проспект (1000), Большой проспект В.О. и Наличную улицу (900);

- на величину более 2000 пас./сут. снизится нагрузка на следующие улицы: Дворцовую наб., Троицкий мост (в обоих направлениях) и Каменноостровский проспект (2100), наб. Робеспьера, Литейный проспект и Литейный мост (в обоих направлениях) и Лесной проспект (2000).

- на величину более 1000 пас./сут. возрастет нагрузка по всему Витебскому проспекту до железнодорожного переезда (1000), по Невскому проспекту в сторо-

ну моста Александра Невского (1100), на Малый проспект В.О. (1100), по Невскому проспекту от пересечения с Лиговским проспектом до улицы Садовой (1800);

- на величину более 2000 пас./сут. возрастет нагрузка на Бухарестскую ул, Дворцовый мост, Биржевой мост, набережную Макарова и проспект Добролюбова (от 2000).

2. Ввод станций «Международная» и «Бухарестская» вызовет следующие изменения.

Пассажиропоток на внутренней сети метрополитена:

- минимальный пассажиропоток на станции «Международная» после ее ввода составит не менее 52 000 пас./сут., а на станции «Бухарестская» – не менее 20 000 пас./сут.

- на величину более 5000 пас./сут. снизится нагрузка на станции «Московская» (10 544), «Московские Ворота» (6001), «Технологический институт» (5861), «Электросила» (8148), «Садовая» (2145), «Невский проспект» (17 066), «Гостиный двор» (5600), «Василеостровская» (6424), «Маяковская»

Таблица 5

Обобщенные суточные транспортные показатели

Обобщенные суточные транспортные показатели	2010	2010	2012	2010-2011	2010-2012
Общее время поездки, ч/сут.	2024422	2022672	2016413	1750	8009
Общее время перевозки, ч/сут.	1430860	1429109	1422851	1751	8009
Общее время поездки в ТС ОТ, ч/сут.	1115960	1115109	1109998	851	5962
Общее время пересадки ОТ, ч/сут.	49025	48702	48275	323	750
Общее время, затрачиваемое пешеходом при пересадке ОТ, ч/сут.	265873	265297	264577	576	1296
Общее воспринимаемое время поездки ОТ, ч/сут.	9758316	9739724	9709115	18592	49201
Общая длина поездки ОТ, км/сут.	43538652	43522220	43506314	16432	32338
Общие пассажирКм ОТ, км/сут.	38181932	38170821	38138312	11111	43620
Общая частота пересадок ОТ, шт./сут.	2687788	2681747	2668782	6041	19006
Перевозки по маршрутам ОТ	5231626	5225585	5212620	6041	19006
ПассПоездкиОТ 0 Пересадок, шт.	610370	612518	617653	-2148	-7283
ПассПоездкиОТ 1 Пересадка, шт.	1179147	1180892	1183586	-1745	-4439
ПассПоездкиОТ 2 Пересадки, шт.	754321	750428	742598	3893	11723

(2239), «Лиговский проспект» (12 059), «Площадь Восстания-1» (10 083), «Волковская» (14 256).

• вследствие перераспределения пассажиропотоков на величину более 5000 пас./сут. возрастет нагрузка на станции «Комендантский проспект» (5907), «Спортивная» (12 050), «Сенная площадь» (9748), «Пушкинская» (5821), «Звенигородская» (14 711), «Спасская» (26 820).

Пассажиропоток на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга:

• на величину более 1000 пас./сут. снизится нагрузка на следующие улицы: Салова (1300), проспект Славы (2400), проспект Обуховской обороны (1600), Лиговский проспект (1100), Витебский проспект после железнодорожного переезда (2300), наб. Обводного канала (1000), Дунайский проспект (1100), Невский проспект (2300).

Обобщенные суточные транспортные показатели для рассматриваемых транспортных моделей представлены в табл. 5.

Транспортные модели продемонстрировали высокую скорость сходимости при работе с матрицами большой размерности 1000×1000 .

Таким образом, в ходе проведенного исследования нами было осуществлено следующее: проведен анализ методов и моделей построения матриц корреспонденций

и произведен выбор реляционного метода построения МК, т. к. он наиболее детально отображает взаимосвязи между объектами; выбрана трилинейная модель, поскольку она позволяет учитывать данные с геоинформационных систем; на базе предложенной модели осуществлен прогноз распределения ТП на улично-дорожной сети Санкт-Петербурга и внутренней сети метрополитена с вводом новых станций метрополитена («Адмиралтейская», «Обводный канал», «Бухарестская» и «Международная»).

Рассмотренная модель распределения городских ТП хорошо согласуется с логико-алгоритмическими моделями систем управления ГТС [12, 13], логико-алгебраическими моделями систем управления логистикой [22, 23] и моделями пространственной организации ГТС [24]. Ее интеграция на принципах [25, 26] в программно-аппаратные системы управления городским транспортом [27] позволит качественно повысить эффективность транспортного обслуживания [28, 29] за счет точности прогноза дорожно-транспортной обстановки на улично-дорожной сети города.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и технической поддержке компании A+S.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белый О.В.** Фундаментальные проблемы развития транспортного комплекса // Экономика качества. 2013. №3. С. 23–28.
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. Под ред. А.В. Гасникова. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 360 с.
3. **Горбачев П.Ф., Крикун В.И.** Моделирование спроса на перевозку пассажиров в пригородном сообщении // ВЕЖПТ. 2013. № 3(62), С. 12–15.
4. **Горбачев П.Ф., Колий А.С.** Методика расчета емкостей транспортных районов с учетом динамических процессов в транспортной системе // Автомобильный транспорт. 2012. № 30. С. 139–143.
5. **Селиверстов Я.А.** Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // Известия СПбГЭТУ

«ЛЭТИ». 2013. № 1. С. 43–49.

6. **Швецов В.И.** Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автомат. и телемех. 2009. № 10. С. 148–157.

7. **Xinwei W., Ning Z.** GLS Estimation of OD matrix with traffic counts and information from ATIS // Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005. Vol. 5, Pp. 1188–1196.

8. **Zhou X., Mahmassani H.S.** Dynamic OD Estimation Using Automatic Vehicle Identification Data // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2006. Vol. 7. No. 1. Pp. 105–114.

9. **Lo H.P., Zhang N., Lam W.H.K.** Decomposition algorithm for statistical estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts // Transportation Research. Part B. 1999. No. 33. Pp. 369–385.

10. Wang J.M. The study and analysis of model algorithm for dynamic origin-destination matrix estimation and prediction // *Ningxia Engineering Technology*. 2002. Vol. 1. No. 4. Pp. 362–365.
11. Zhou X., Mahmassani H.S. A Structural State Space Model for Real-Time Traffic Origin-Destination Demand Estimation and Prediction in A Day-to-Day Learning Framework // *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2007. Vol. 41B. Pp. 823–840.
12. Селиверстов Я.А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса // *Науковедение*. 2014. № 5. С. 188.
13. Селиверстов Я.А., Стариченков А.Л. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2014. № 6(210). С. 81–94.
14. Малыгин И.Г., Сиек Ю.Л., Яковлева М.В. Принцип сложности при прогностическом моделировании транспортных объектов // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2014. № 3. С. 3–7.
15. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Стариченков А.Л. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. № 1. С. 29–36.
16. Селиверстов С.А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2014. Вып. 2(24). С. 92–100.
17. Гасников А.В., Гасникова Е.В., Фелько О.С. О возможной динамике в модели ранжирования web-страниц PageRank и модернизированной модели расчета матрицы корреспонденций // *Труды Московского физико-технического ин.* 2012. Т. 4. № 2(14). С. 101–120.
18. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Применение метода имитационного моделирования для оценки эффективности новых видов городского пассажирского транспорта // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. № 3 (31). С. 83–92.
19. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. Вып. 2(30). С. 69–80.
20. Lohse D. Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice. Dresden: Technical University of Dresden, 2004. Pp. 1–15.
21. Traffic. Mobility. Logistics. PTV Vision. Visum 11.0. Basics. PTV AG. Karlsruhe, 2009. 692 p.
22. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 4(200). С. 57–68.
23. Селиверстов Я.А. Использование правила резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. № 1(20). С. 145–152.
24. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // *Науковедение*. 2014. № 3. С. 122.
25. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 4(199). С. 34–48.
26. Селиверстов Я.А. Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора // *Науковедение*. 2014. № 4. С. 90.
27. Кокаев О.Г., Лукомская О.Ю., Селиверстов С.А. О технологии анализа транспортных процессов в современных условиях хозяйствования // *Транспорт РФ*. 2012. № 2(39). С. 32–36.
28. Куватов В.И., Шагалова Н.В., Онов В.А. Пути ускорения перевозок и повышения безопасности автомобильного транспорта // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2013. № 2(26). С. 26–33.
29. Бахарев Т.С., Гадышев В.А., Плотников Ю.А. Применение геоинформационных систем для решения прикладных задач предупреждения чрезвычайных ситуаций // *Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России*. 2010. Т. 6. № 2. С. 12–17.

REFERENCES

1. **Belyy O.V.** Fundamentalnyye problemy razvitiya transportnogo kompleksa [The fundamental problems of the transport sector]. *Ekonomika kachestva [The economics of quality]*, 2013, No. 3, Pp. 23–28. (rus)
2. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov [Introduction to the mathematical modeling of traffic flows]*. Moscow: MFTI Publ., 2010, 360 p. (rus)
3. **Gorbachev P.F., Krikun V.I.** Modelirovaniye sprosa na perevozku passazhirov v prigorodnom soobshchenii [Modeling the demand for the transport of passengers in suburban]. *VEZhPT*, 2013, No. 3 (62), Pp. 12–15. (rus)
4. **Gorbachev P.F., Koliy A.S.** Metodika rascheta yemkostey transportnykh rayonov s uchetom dinamicheskikh protsessov v transportnoy sisteme [Methods of calculating areas of transport containers with the dynamic processes in the transport system]. *Avtomobilnyy transport [Automobile transport]*, 2012, No. 30, Pp. 139–143. (rus)
5. **Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye protsessov raspredeleniya i razvitiya transportnykh potokov v megapolisakh [Modelling of processes of distribution and development of traffic in big cities]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, No. 1, Pp. 43–49. (rus)
6. **Shvetsov V.I.** Algoritmy raspredeleniya transportnykh potokov [Algorithms for distributing traffic flows]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 2009, No. 10, Pp. 148–157. (rus)
7. **Xinwei W., Ning Z.** GLS Estimation of OD matrix with traffic counts and information from ATIS, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, Vol. 5, Pp. 1188–1196.
8. **Zhou X., Mahmassani H.S.** Dynamic OD Estimation Using Automatic Vehicle Identification Data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, Vol. 7, No. 1, Pp. 105–114.
9. **Lo H.P., Zhang N., Lam W.H.K.** Decomposition algorithm for statistical estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts, *Transportation Research, Part B*, 1999, No. 33, Pp. 369–385.
10. **Wang J.M.** The study and analysis of model algorithm for dynamic origin-destination matrix estimation and prediction, *Ningxia Engineering Technology*, 2002, Vol. 1, No. 4, Pp. 362–365.
11. **Zhou X., Mahmassani H.S.** A Structural State Space Model for Real-Time Traffic Origin-Destination Demand Estimation and Prediction in A Day-to-Day Learning Framework, *Transportation Research, Part B: Methodological*, 2007, Vol. 41B, Pp. 823–840.
12. **Seliverstov Ya.A.** O postroyenii modeli klassifikatsii mezhagentykh otnosheniy sotsialno-ekonomicheskogo povedeniya gorodskogo naseleniya v sistemakh upravleniya transportnymi potokami megapolisa [On the construction of classification models mezhagentykh relations of social and economic behavior of the urban population in traffic management systems metropolis]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*, 2014, No. 5, Pp. 188. (rus)
13. **Seliverstov Ya.A.** Postroyeniye modeley upravleniya gorodskimi transportnymi potokami v usloviyakh neopredelennosti vneshney informatsionnoy sredy [Construction of an Urban Traffic Control Model Under the Conditions of Information Uncertainty]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 6 (210), Pp. 81–94. (rus)
14. **Malygin I.G., Siyek Yu.L., Yakovleva M.V.** Printsip slozhnosti pri prognosticheskom modelirovaniy transportnykh obyektov [The principle difficulty in predictive modeling of transport facilities]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye [Transport: science, technology, management]*, 2014, No. 3, Pp. 3–7. (rus)
15. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A., Starichenkov A.L.** Osobennosti postroyeniya sistemy gorodskogo transportno-logisticheskogo monitoringa [Features of construction of urban transport and logistics monitoring]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2015, No. 1, Pp. 29–36. (rus)
16. **Seliverstov S.A.** Metody i algoritmy intellektualnogo analiza protsessa organizatsii transportnoy sistemy [Methods and algorithms for intellectual analysis of the organization of the transport system]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2014, No. 2(24), Pp. 92–100. (rus)
17. **Gasnikov A.V., Gasnikova Ye.V., Fedko O.S.** O vozmozhnoy dinamike v modeli ranzhirovaniya web-stranits PageRank i modernizirovannoy modeli rascheta matritsy korrespondentsiy [On the possible dynamics in the model ranking of web-pages

PageRank and the upgraded model of calculation of the matrix of correspondence]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta [Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology]*, 2012, Vol. 4, No. 2 (14), Pp. 101–120. (rus)

18. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Primeneniye metoda imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki effektivnosti novykh vidov gorodskogo passazhirskego transporta [Application of the simulation to evaluate the effectiveness of new types of urban passenger transport], *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2015, No. 3(31), Pp. 83–92. (rus)

19. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye transportnykh potokov megapolisa s vvodom novykh vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskego transporta [Simulation of traffic metropolis with the introduction of new types of water intercity passenger transport]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2015, No. 2(30), Pp. 69–80. (rus)

20. **Lohse D.** *Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice*. Dresden, Technical University of Dresden, 2004, Pp. 1–15

21. *Traffic. Mobility. Logistics. PTV Vision. Visum 11.0. Basics*. PTV AG. Karlsruhe, 2009, 692 p.

22. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** O logiko-algebraicheskom predstavlenii transportno-logisticheskogo protsessa [About logical-algebraic description of the transport logistic process]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(200), Pp. 57–68. (rus)

23. **Seliverstov Ya.A.** Ispolzovaniye pravila rezolyutsiy v voprosno-otvetnoy protsedure transportnogo planirovshchika [Using the rule of resolutions in question-answer procedure transport planner]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral*

Makarov]. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2013, No. 1(20), Pp. 145–152. (rus)

24. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii beskonfliktnogo nepreryvnogo transportnogo protsessa dvizheniya [Fundamentals of the theory of continuous conflict-free movement of the transport process]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 3, P. 122. (rus)

25. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Formalnaya aksiomatika teorii funktsionalnogo subyektivnogo potrebitelskego povedeniya [Formal axiomatic of subjective «functional» theory of consumer]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskkiye nauki [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics]*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(199), Pp. 34–48. (rus)

26. **Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii subyektivnykh funktsionalnykh vozmozhnostey ratsionalnogo vybora [Fundamentals of the theory of subjective functionality of rational choice]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*, 2014, No. 4, P. 90. (rus)

27. **Kokayev O.G., Lukomskaya O.Yu., Seliverstov S.A.** O tekhnologii analiza transportnykh protsessov v sovremennykh usloviyakh khozyaystvovaniya [On the technology of the analysis of transport processes in the contemporary economy]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2012, No. 2 (39), Pp. 32–36. (rus)

28. **Kuvatov V.I., Shatalova N.V., Onov V.A.** Puti uskoreniya perevozok i povysheniya bezopasnosti avtomobilnogo transporta [Ways to speed up traffic and increase the safety of road transport]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere [Problems of risk management in the technosphere]*, 2013, No. 2(26), Pp. 26–33. (rus)

29. **Bakharev T.S., Gadyshev V.A., Plotnikov Yu.A.** Primeneniye geoinformatsionnykh sistem dlya resheniya prikladnykh zadach preduprezhdeniya chrezvychaynykh situatsiy [The use of geographic information systems for applications Emergency Prevention]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii [Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia]*, 2010, Vol. 6, No. 2, Pp. 12–17. (rus)

СЕЛИВЕРСТОВ Ярослав Александрович – научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д. 13.

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

SELIVERSTOV Yaroslav A. IPT RAS.

199178, 12th line of Vasilievsky Island, 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: maxwell_8-8@mail.ru

СЕЛИВЕРСТОВ Святослав Александрович – *научный сотрудник Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.*

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д. 13.

E-mail: amuanator@rambler.ru

SELIVERSTOV Sviatoslav A. IPT RAS.

199178, 12th line of Vasilievsky Island, 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: amuanator@rambler.ru