

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.9

УДК 656, 004.8, 007.5 , 51-74, 510.67

Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов

ФОРМАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ЦЕПОЧЕК ТРАНСПОРТНОЙ АКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ

Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov

THE FORMAL DEVELOPMENT OF PATTERNS OF DAILY TRAVEL ACTIVITY CHAINS OF THE URBAN POPULATION

Разработана процедура построения цепочек транспортной активности городского населения посредством М-оператора. Впервые сформулирован принцип регулярности транспортной активности городского жителя и дано формальное разъяснение процедуры выделения матриц транспортных корреспонденций из цепочек суточной транспортной активности населения посредством оператора транспортных корреспонденций. Разработан метод расчета величины пешеходного и транспортного потоков между корреспондирующими объектами. Сформулировано условие наблюдаемости потоков, введен показатель эффективности работы системы городского транспортно-логистического мониторинга и дано его практическое пояснение. Впервые предложена «простая модель» прогноза цепочек транспортной активности, в которой выбираются наиболее вероятные цепочки на интервале один месяц, с учетом дня недели. Работоспособность модели продемонстрирована на практическом примере.

ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; ЦЕПОЧКИ ТРАНСПОРТНОЙ АКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ; МАТРИЦЫ ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ; ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК; ТРАНСПОРТНЫЙ МОНИТОРИНГ; ПРИНЦИП РЕГУЛЯРНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ АКТИВНОСТИ; УМНЫЙ ГОРОД.

Patterns of chains of daily travel activity of the urban population are developed in the paper by using the M-operator. The principle of the regularity of the travel activity of a city dweller is formulated here. A formal explanation of the calculation of the matrix of correspondence through the chains of daily travel activity of the population using the operator of transport correspondence is given. Values of pedestrian and traffic flows between corresponding objects are determined. The condition of the observability of transport flows is formulated in the article. The efficiency coefficient of the system of urban of transport of monitoring is introduced and its field of use is explained here. Simple patterns of forecast chains of daily travel activity are suggested for the first time and explained by a practical example.

TRANSPORT MODELING; INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS; DAILY ACTIVITY-TRAVEL PATTERNS; PATTERNS OF DAILY TRAVEL ACTIVITY CHAINS; MATRIX OF TRANSPORT CORRESPONDENCES; TRAFFIC FLOW; TRANSPORT MONITORING; PRINCIPLE OF THE REGULARITY OF TRAVEL ACTIVITY; SMART CITY.

С каждым годом в России, странах Европы и США возрастает интенсивность и сложность транспортно-логистических

процессов [1] в товаропроводящих и улично-дорожных сетях крупных городов. Следствием возрастающей интенсивности

транспортно-логистических процессов является рост дорожно-транспортных происшествий, увеличение времени поездок и ухудшение условий транспортной мобильности городского населения. Решать возникающие транспортные и логистические проблемы мегаполисов призваны интеллектуальные транспортные системы [2, 3].

Развитие интеллектуальных транспортных систем несет в себе принципиально новые методы и подходы к анализу процессов транспортной активности населения. Транспортная активность городского жителя уже не может рассматриваться в отрыве от его социально-экономической деятельности, а следовательно, от его потребительской и информационно-сетевой активностей [4]. Потребительская активность контролируется CRM¹ системами [5, 6], информационно-сетевая активность ISP² – системами [7, 8] и операторами сотовой связи [9, 10]. Как следствие, передовые системы управления транспортом должны быть тесно увязаны с потребительскими, информационно-сетевыми и расчетно-денежными системами.

Одним из таких интегрированных решений могла бы стать система городского транспортно-логистического мониторинга (СГТЛМ), представленная ранее в работе [11].

В инженерных транспортных расчетах также необходимы качественные преобразования. Одно из первых, по мнению авторов, преобразований – это отход от вероятностных простых, несвязанных поездок абстрактных жителей между парой районов при оценке прогнозной величины транспортных потоков [12] и переходе к персонифицированным целевым цепочкам суточной транспортной активности населения, опирающимся на реальные данные их социально-экономической активности [13] и субъективных предпочтений [14, 15]. Такой переход позволит производить не-

прерывную комплексную оценку работоспособности всей городской транспортной системы в процессе управления ею в режиме реального времени [16].

Процесс тотальной информатизации городского населения [17], обусловленный внедрением в повседневную жизнь мобильных средств связи и беспроводных информационных систем, позволил использовать последние для изучения транспортной и социально-экономической активности пользователей информационных услуг. В настоящее время данными исследованиями заняты многие российские и зарубежные научные коллективы. Среди последних работ можно отметить следующие. В работе [11] рассмотрены особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга, необходимой для информационного обеспечения взаимодействия между всеми объектами внутри городской транспортной системы; в [12, 18] представлен анализ методов и моделей построения матриц корреспонденций, причем в [12] с использованием модели EVA, а в [18] с использованием энтропийной модели проведена оценка перераспределения транспортных потоков в Санкт-Петербурге с вводом новых станций метрополитена; в [19] рассмотрены аспекты расчета спроса на транспорт с использованием однородных по действиям, дезагрегированных слоев (группы источник-цель); в [13] предложен подход построения автоматических систем классификации и структурной упорядоченности социально-экономической активности городского населения на основе информации, получаемой с систем транспортно-логистического мониторинга; в [20] предложено использовать gprs данные о передвижении городского населения для определения целей передвижения; в [21] раскрыт новый способ анализа поведения транспортного средства с использованием алгоритма Cam-Shift; в [22] регистрацию и прогноз транспортной активности жителей предложено производить по данным gprs-треков.

Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии отдельных теоретических и прикладных

¹ CRM (Customer Relationship Management) – системы управления взаимоотношениями с клиентами;

² ISP (Internet Service Provider) – системы предоставления услуг интернет-провайдера.



решений, направленных на получение информации о передвижении жителей и построение на их основе матриц транспортных корреспонденций. Часть рассмотренных работ сводится к способам классификации транспортной активности жителей, например, [13, 22]. К сожалению, сама процедура построения персонафицированных цепочек транспортной активности и восстановления из них матриц транспортных корреспонденций остается исследователями до сих пор формально не раскрытой. Цель настоящей работы заключается в том, чтобы устранить этот теоретический пробел и последовательно разъяснить процедуру построения цепочек транспортной активности городского населения.

Построение достоверных цепочек транспортной активности городского населения осуществляется с использованием системы городского транспортно-логистического мониторинга (СГТЛМ), рассмотренной в [11]. Данная система осуществляет комплексное наблюдение за транспортными объектами, их состоянием и обеспечивает информационное взаимодействие между всеми объектами внутри городской системы (рис. 1).

Функционал СГТЛМ в формальной интерпретации примет вид *оператора городского транспортно-логистического монито-*

ринга (ГТЛМ) или М-оператора. М-оператор включает операции идентификации (*I*), аутентификации (*A*), классификации (*K*), распознавания состояний (*R*), местоопределения (*P*), прямой и обратной связи (*C*) объектов мониторинга с СГТЛМ и между собой.

Формальное представление М-оператора имеет следующий вид:

$$F_T^{SULTM} : SULTM = I \cup A \cup R \cup P \cup C \cup K, \quad (1)$$

где $F_T^{SULTM} = \{f_M^{\exists_i}, f_{\psi}^d\}$ – оператор городского транспортно-логистического мониторинга или М-оператор; $f_M^{\exists_i} \approx I \cup A \cup R \cup P \cup C$ – оператор измерения состояний объектов ГТС; $f_{\psi}^d \approx K$ – оператор классификации объектов ГТС; $SULTM$ – система городского транспортно-логистического мониторинга.

Таким образом, каждому жителю h_{id} с номером $id_{\eta}^{h_{id}}$ на интервале один месяц М-оператор ставит в соответствие упорядоченные по времени его цепочки суточной транспортной активности $cta_{h_{id}}^{date}$, согласно:

$$\forall h_{id} \quad \exists f_M^{\exists_i}, f_{\psi}^d \quad id_{\eta}^{h_{id}} \xrightarrow{f_M^{\exists_i}, f_{\psi}^d} \{cta_{h_{id}}^{date} : date = 1, \dots, N_{month}\}_T, \quad (2)$$

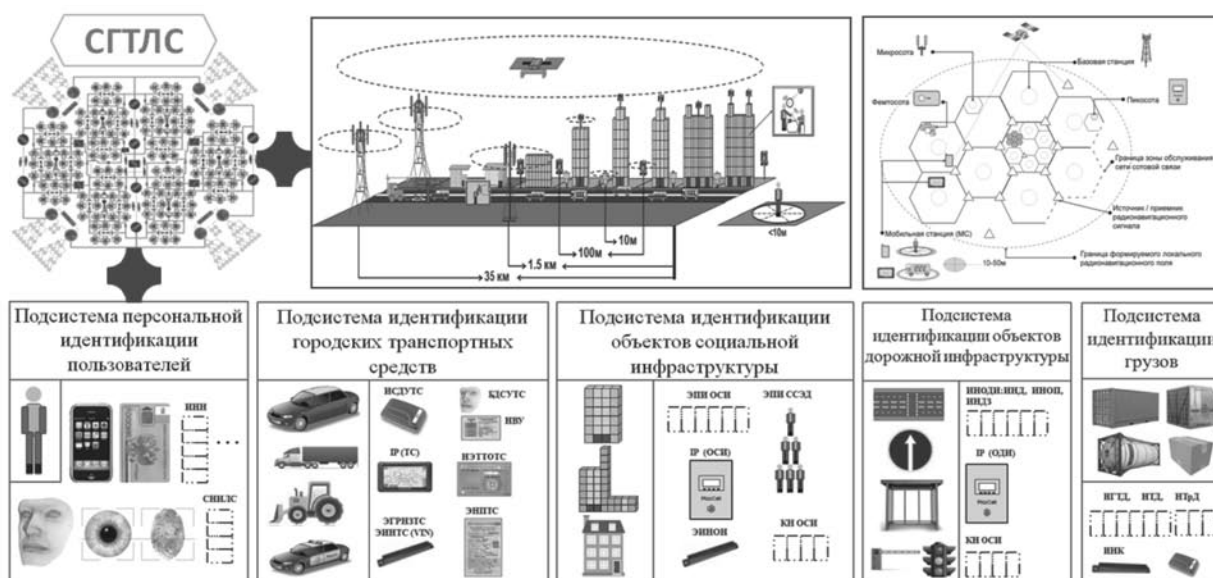


Рис. 1. Система городского транспортно-логистического мониторинга

где $date$ – указатель календарного дня регистрации цепочки суточной транспортной активности городского жителя, $date = 1, \dots, N_{month}$; N_{month} – количество дней в месяце; T – упорядоченное временное множество.

Переходя от одного жителя к городскому населению, выражение (2) примет вид:

$$(H)_T \xrightarrow{F_T^{SULTM}} : (CTA_H)_T, \quad (3)$$

где H – множество жителей города; $CTA_H = \{cta_{hid}^{date}\}$ – множество достоверных цепочек транспортной активности жителей.

Достоверная цепочка транспортной активности городского жителя представляет собой упорядоченную во времени последовательность взаимодействий жителя с объектами социальной инфраструктуры, транспортной инфраструктуры, транспортными средствами и участками улично-дорожной сети (рис. 2).

Транспортная активность городского жителя является частью его социально-экономической активности, которая согласно [19] носит регулярный характер.

Натурные исследования также показали [22], что структура цепочек транспортной активности городского населения на протяжении определенных временных интерва-

лов носит циклический характер. Изучение структуры последних позволило перейти от простых маятниковых поездок [23], отражающих характер перемещений из мест проживания к местам приложения труда, к дезагрегированным группам «Источник»-«Сток». Последние позволяют характеризовать перемещения пользователей через 17 транспортных классов [12, 19]. Факт такого транспортного поведения необходимо ввести в свод [24] аксиоматически устойчивых научных утверждений.

Сформулируем принцип регулярности транспортной активности городского жителя (пользователя) в условиях ресурсных (финансовых и временных) ограничений: *транспортная активность городского жителя в условиях ресурсных ограничений имеет регулярную структуру.*

Сохраняя общность рассуждений, перейдем к формальному построению модели транспортного поведения городских жителей.

Формально цепь суточной транспортной активности задается временным графом согласно:

$$cta_{hid}^{date} = \Gamma_{hid}^{date}(ID_{TA}; T_{TA}), \quad (3)$$

где cta_{hid}^{date} – цепь транспортной активно-

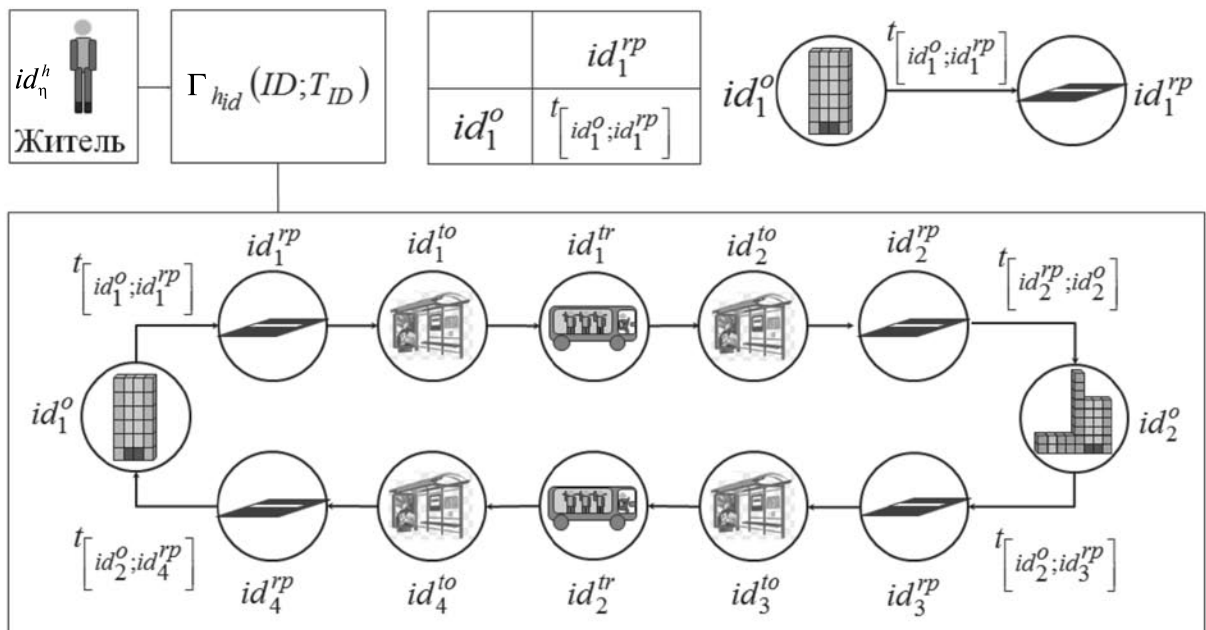


Рис. 2. Цепь суточной транспортной активности городского жителя с id_{η}^h

сти городского жителя с id_n^h ; h – индекс жителя; $id(ID)$ – указатель уникального номера (множества номеров) идентификации; TA – индекс множества объектов, идентифицирующих транспортную активность жителя, вида $TA = Tr \cup To \cup O \cup Ts$, в котором Tr – множество транспортных средств, To – множество объектов транспортной инфраструктуры, O – множество объектов социальной инфраструктуры, Ts – множество участков городской транспортной сети; $\Gamma_{id}^{date}(ID_{TA}; T_{TA})$ – временной граф транспортной активности пользователя; T_{TA} – множество времени регистрации взаимодействия городского жителя с объектами множества TA .

Из цепи суточной транспортной активности жителей посредством оператора транспортных корреспонденций f_T^{MC} происходит восстановление матриц достоверных транспортных корреспонденций³ согласно:

$$\Gamma_H^T(ID_{TA}; T_{TA}) \xrightarrow{f_T^{MC}} MC_{TA}^T(P_{[ID_S; ID_D]}); \quad (4)$$

$$\rho_H^{(ID_S; ID_D)} \Big|_{def},$$

где $MC_{TA}^T((ID_S; ID_D); P_{[ID_S; ID_D]}) \Big|_{def}$ – временная матрица корреспонденций, которая показывает величину потока $\rho_H^{(ID_S; ID_D)}$ на пути $P_{[ID_S; ID_D]}$ между определенным местом отправления с ID_S и определенным местом прибытия с ID_D из множества TA в определенный момент времени; S – индекс, указывающий на место отправления (south – источник); D – индекс, указывающий на место прибытия (departure – прибытие); $P_{[ID_S; ID_D]}$ – путь между местом отправления с ID_S и местом прибытия с ID_D , вычисляется согласно следующей формуле:

$$P_{[ID_S; ID_D]} = \bigcup_{\substack{ID_D = id_{p=end}^{rp} \\ ID_S = id_{p=sr}^{rp}}} id_p^{rp}, \quad (5)$$

³ Под достоверной матрицей транспортных корреспонденций понимается матрица корреспонденций, построенная по реальным персонифицированным данным транспортной мобильности городского жителя.

где \equiv – знак тяготения места отправления/прибытия к транспортной коммуникации, на которой он расположен (например, если местом отправления и прибытия являются объекты социальной инфраструктуры); p – нижний индекс участка пути в выражении id_p^{rp} ; str – начальный участок пути, соответствующий месту отправления; end – конечный участок пути, соответствующий месту прибытия.

Таким образом, оператор транспортных корреспонденций f_T^{MC} каждой паре корреспондирующих объектов $(ID_S; ID_D)$ из множества $TSD = \{ID_S \times ID_D\}$ ставит в соответствие величину транспортного или пешеходного потока $\rho_{H,Tr}(ID_S; ID_D)$ между этими корреспондирующими объектами в рассматриваемый момент времени.

Величина пешеходного потока между корреспондирующими районами в рассматриваемый промежуток времени вычисляется согласно

$$\rho_H(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N_\alpha} h_\alpha^{id_n^h}, \quad (6)$$

а транспортного согласно:

$$\rho_{Tr}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \sum_{k=1}^{k=N_k} tr_k^{id_n^r}. \quad (7)$$

Рассмотрим пример, поясняющий описываемый процесс.

Пример 1. Городской транспортный процесс в момент времени $t = 09:30$ представлен на рис. 3. Определите величину транспортного потока на пути $P(ID_S; ID_D)$ между жилым домом с id_1^o и остановочным пунктом с id_1^o и постройте матрицу корреспонденций.

Решение. Корреспондирующий путь $P(ID_S; ID_D)$ между местом отправления с номером id_1^o и местом прибытия с номером id_1^o определим из выражения (5):

$$P(ID_S = id_1^o; ID_D = id_1^o) = \bigcup_{\substack{ID_D = id_1^o \\ ID_S = id_1^o}} id_p^{rp} = id_1^{rp} \cup id_2^{rp} \cup id_3^{rp} \cup id_4^{rp}.$$

Величину транспортного потока на пути определим из выражения (6):

$$\rho_H(id_1^o; id_1^o) \Big|_{T = 9:30} = \sum_{\alpha} h_\alpha^{id_n^h} = 4 \text{ (чел.)}$$

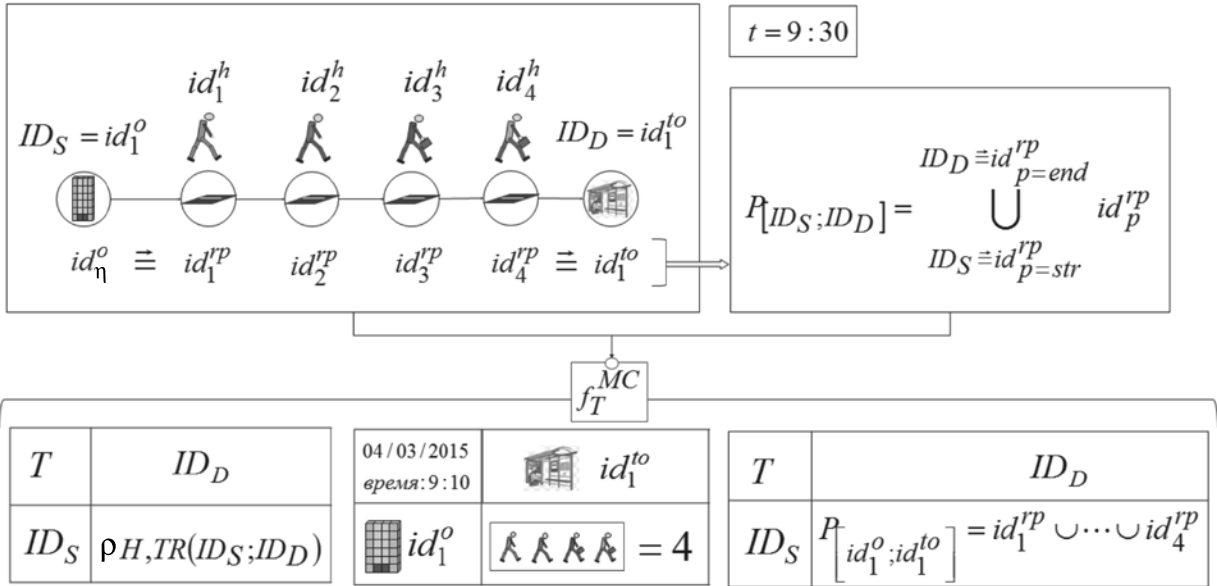


Рис. 3. Городской транспортный процесс

Величина идентифицированного пешеходного потока на участках корреспондирующего пути между корреспондирующими районами в рассматриваемый промежуток времени вычисляется согласно:

$$\rho_H^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \frac{\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}} h_{\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}}}}{\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}} \alpha_{id_p^{rp}}}, \quad (8)$$

а транспортного согласно:

$$\rho_{TR}^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \frac{\sum_{k_{id_p^{rr}}} tr_{\sum_k}}{\sum_{k_{id_p^{rr}}} k_{id_p^{rr}}}, \quad (9)$$

где $\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}} (\sum_{k_{id_p^{rr}}})$ – общее количество идентифицированных жителей (транспортных средств) на p -ом идентифицированном участке пути.

Сформулируем *балансовое условие наблюдаемости потоков*: мощность множества идентифицированного пешеходного (транспортного) потока между корреспондирующими районами численно равна величине пешеходного (транспортного) потока между соответствующими корреспондирующими районами. Таким образом, балансовое условие наблюдаемости пешеходного и транспортного потоков можно записать соответственно:

$$\left| \rho_H^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} \right| = \rho_H(ID_S; ID_D), \quad (10)$$

$$\left| \rho_{TR}^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} \right| = \rho_{TR}(ID_S; ID_D). \quad (11)$$

Выполнение балансового условия наблюдаемости обуславливает работоспособность системы городского транспортно-логистического мониторинга и говорит о том, что весь транспортный поток идентифицирован. Несоблюдение балансового условия наблюдаемости (9) говорит о том, что система транспортно-логистического мониторинга работает не полностью эффективно.

Введем показатель эффективности работы системы транспортно-логистического мониторинга – *коэффициент полезности системы городского транспортно-логистического мониторинга*, η^{SULTM} :

$$\eta^{SULTM} = \frac{\rho_H^{ID}(ID_S; ID_D)}{\rho_H(ID_S; ID_D)} 100 \%. \quad (12)$$

Коэффициент полезности системы городского транспортно-логистического мониторинга показывает, какой процент транспортных средств распознает система.

Рассмотрим пример, поясняющий пред-

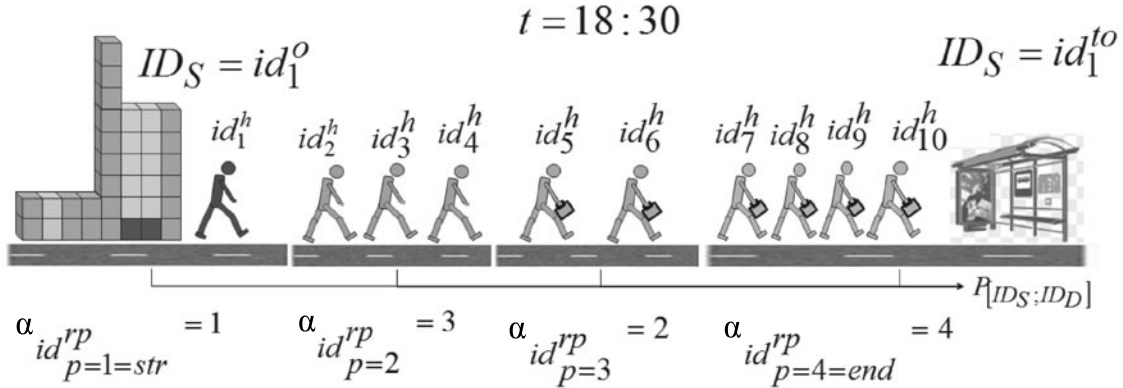


Рис. 4. Идентифицированный пешеходный поток на идентифицированных участках корреспондирующего пути

ставленные выражения.

Пример 2. Городской транспортный процесс в момент времени $t = 18:30$ представлен на рис. 4. Определите величину пешеходного потока между местом отправления с номером id_1^o и местом назначения id_1^{to} на участках корреспондирующего пути $P(ID_S; ID_D)$. Проверьте выполнение балансового условия идентификации потока и рассчитайте коэффициент полезного действия системы городского транспортно-логистического мониторинга.

Решение. Расчет пешеходного потока на участках корреспондирующего пути $P(ID_S; ID_D)$ между местом отправления с номером id_1^o и местом назначения id_1^{to} определим из выражения (8):

$$\rho_H^{ID}(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} = \sum_{\alpha_{id^{rp}_{p=1}}}^{\alpha_{id^{rp}_{p=4}}} \left(h_{\sum_{id^{rp}_p}^{\alpha_{id^{rp}_p}}} \right)_{id^{rp}_p} =$$

$$= (id_1^h)_{id^{rp}_1} \cup (id_2^h id_3^h id_4^h)_{id^{rp}_2} \cup$$

$$\cup (id_5^h id_6^h)_{id^{rp}_3} \cup (id_7^h id_8^h id_9^h id_{10}^h)_{id^{rp}_4}.$$

Мощность множества идентифицированного транспортного потока при этом составит:

$$\left| \rho_H^{ID}(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} \right| = 10.$$

Для проверки условия (9), вычислим величину потока согласно (6).

Очевидно, что

$$\rho_H(id_1^o; id_1^{to}) = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=10} h_{\alpha}^{id_1^h} = 10 \text{ (чел.)}$$

Таким образом, балансовое условие (9) примет следующий вид:

$$\left| \rho_H^{ID}(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} \right| =$$

$$= \rho_H(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} = 10.$$

Далее рассчитаем коэффициент полезного действия системы городского транспортно-логистического мониторинга, согласно (12):

$$\eta^{SULTM} = \frac{\rho_H^{ID}(ID_S; ID_D)}{\rho_H(ID_S; ID_D)} 100 \% =$$

$$= \frac{10}{10} 100 \% = 100 \%.$$

Выполнение балансового условия наблюдаемости потока позволяет сделать вывод о том, что система транспортно-логистического мониторинга на данном участке городской сети максимально работоспособна.

Опираясь на выведенные процедуры построения цепочек транспортной активности, матриц корреспонденций и анализа структуры транспортного потока, перейдем к моделям прогноза цепочек транспортной активности.

Рассмотрим простую модель прогноза цепочек транспортной активности, опираю-

щуюся на нормальный закон распределе-
ния [25].

Для построения прогнозной цепочки
суточной транспортной активности город-
ского жителя с номером id_{η}^h на прогнозную
дату cta_{pred} , необходимо осуществить:

1) сбор данных о транспортной актив-
ности пользователя с номером id_{η}^h в виде
его цепочек транспортной активности:

$$CTA_{id_{\eta}^h}^{date} = \{cta_{hid}^{date}; date = 1, \dots, N_{month}\};$$

2) формирование набора цепочек
транспортной активности в течение меся-
ца в день недели, соответствующий прог-
нозному:

$$CTA_{id_{\eta}^h}^{date=date_{pred}} = \{cta_{hid}^{date_{pred}}; date_{pred} = 1, \dots, N_{date_{pred}}^{month}\}; \quad (13)$$

3) подсчет вероятности появления це-
почек транспортной активности в данный
день на протяжении месяца:

$$p(cta_i^{id_{\eta}^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = date_{pred}} = \frac{\sum_{d=1}^{d=N_{date_{pred}}^{month}} n_d^{cta_i}}{N_{date_{pred}}^{month}}; \quad (14)$$

выбор наиболее вероятной цепочки транс-
портной активности:

$$cta_{date_{pred}}^{id_{\eta}^h} = cta_i^{id_{\eta}^h} \left(\max p \times \left(CTA_{id_i^h}^{date}; P_{CTA_{id_i^h}^{date}} \right) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = date_{pred}} \right). \quad (15)$$

Таким образом, *простая модель прогно-
за цепочек транспортной активности* форми-
руется последовательностью действий
(1–4).

Рассмотрим пример, поясняющий по-

строение простой модели прогнозной це-
почки транспортной активности городского
жителя с номером id_{η}^h на прогнозную дату
 cta_{pred} в соответствии с (13)–(15).

Пример 3. Известно, что система го-
родского транспортно-логистического
мониторинга в течение марта 2015 г. за-
регистрировала набор цепочек транспорт-
ной активности $CTA_{id_i^h}^{March}$ пользователя с
номером id_1^h . Требуется построить це-
почку транспортной активности на среду
8 апреля 2015 г. – $cta_{wedn_{pred}}$. Данные
по средам в течение марта имеют вид
 $CTA_{id_1^h}^{date=Wedn} = \{cta_1; cta_2; cta_3\}$, представлены в
таблице и отображены на рис. 5.

Решение. Произведем подсчет веро-
ятности появления определенных цепочек
транспортной активности в соответствии с
(14):

$$p(cta_1^{id_1^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = w} = \frac{\sum_{d=1}^{d=5} n_d^{cta_1}}{N_d} = \frac{3}{5} = 0,6 \text{ или } 60 \%;$$

$$p(cta_2^{id_1^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = w} = \frac{\sum_{d=1}^{d=5} n_d^{cta_2}}{N_d} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ или } 20 \%;$$

$$p(cta_3^{id_1^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = w} = \frac{\sum_{d=1}^{d=5} n_d^{cta_3}}{N_d} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ или } 20 \%.$$

Выберем наиболее вероятную цепочку
транспортной активности, согласно (15):

Данные по транспортной активности пользователя с номером id_1^h по средам в марте 2015 г.

Date Цепь транспортной активности	04.03	11.03	18.03	25.04	01.04	08.04
$cta_{(03/w/2015-04/w/2015)}^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_2^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_3^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$

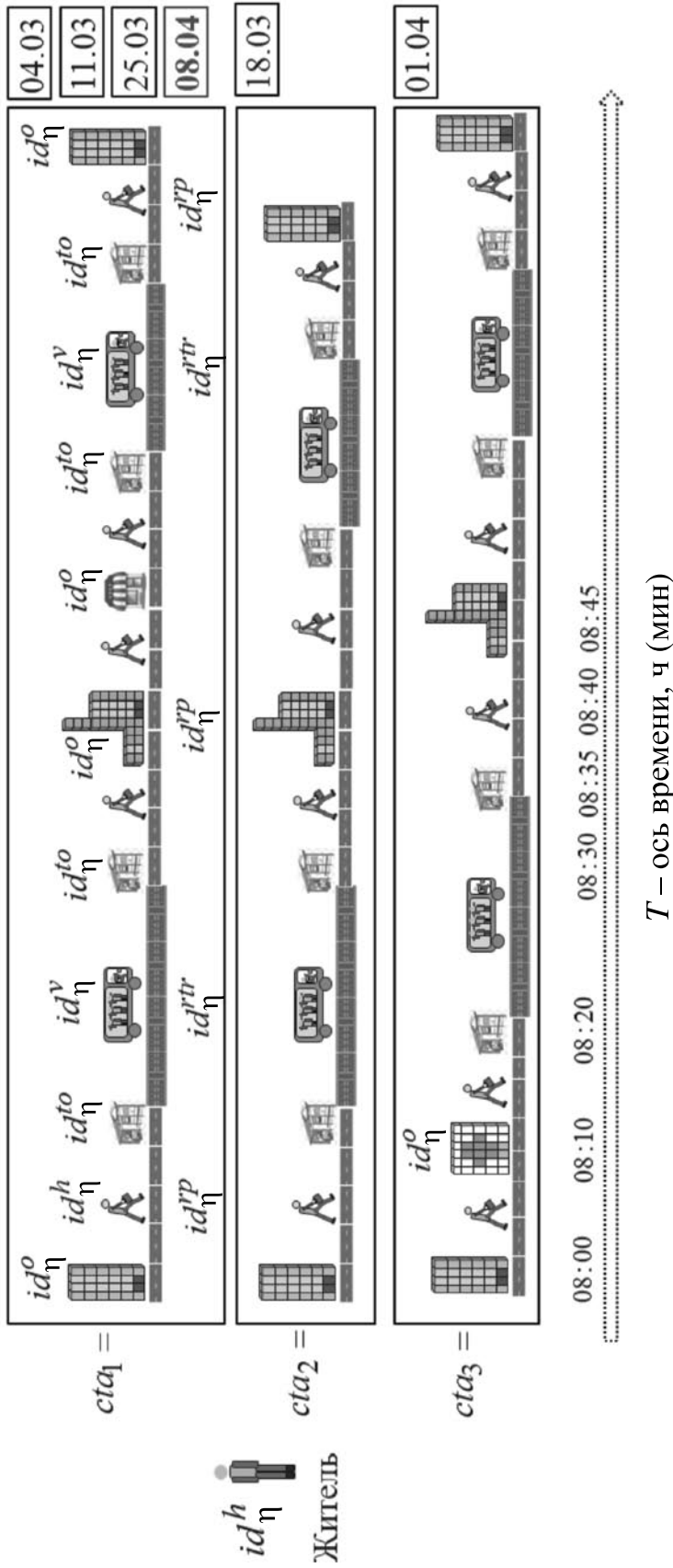


Рис. 5. Транспортные цепочки поведенческой активности пользователя с номером id_{η}^h по средам в марте 2015 г.

$$\begin{aligned}
 cta_{pred} &= cta_i \left(\max p \left(CTA_{id_i^h}^{date=Wedn}; P_{CTA_{id_i^h}^{date=Wedn}} \right) \right) = \\
 &= cta_i (\max p((cta_1; 0, 6); (cta_2; 0, 2); \\
 &\quad (cta_3; 0, 2))) = (cta_1; 0, 6) = cta_1^{id_i^h}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, пользователь с номером id_i^h вероятнее всего будет реализовывать 8 апреля 2015 г. цепочку транспортной активности $cta_1^{id_i^h}$.

Рассмотренный пример наглядно разъясняет определение прогнозной цепочки транспортной активности пользователя.

Разработана процедура построения достоверных цепочек транспортной активности городского населения посредством функционала системы городского транспортно-логистического мониторинга, выраженного М-оператором. Сформулирован принцип регулярности транспортной активности городского жителя на основе эмпирических исследований. Описана процедура восстановления матриц достоверных транспортных корреспонденций из цепочек суточной транспортной активности жителей посредством оператора транспортных корреспонденций. Эффективность работы системы городского транспортно-логистического мониторинга предложено оценивать с по-

мощью специально разработанного «коэффициента полезности» и «балансового условия наблюдаемости потоков». Для оценки прогноза транспортной активности жителей разработана простая модель прогноза цепочек транспортной активности.

Предложенная модель обладает рядом достоинств: во-первых, она позволяет оценивать поведение городской транспортной системы на протяжении всего суточного интервала; во-вторых, применима в пакетах имитационного моделирования [26–28]; в-третьих, обладает открытой архитектурой и может быть дополнена разнородными данными; в-четвертых, хорошо согласуется с разработанными ранее в [13] моделью классификации межагентных отношений в ГТС, моделями систем управления ГТС, представленными в [12, 13], логико-алгебраическими моделями систем управления логистикой [22, 23] и интеллектуальными моделями пространственной организации ГТС [29].

Агрегирование представленных выше моделей в программно-аппаратном исполнении с учетом вычислительного аппарата, изложенного в работах [30–32], позволит перейти к построению интеллектуальных распределенных систем управления городскими транспортными потоками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 4(200). С. 57–68.
2. Белый О.В. Проблемы построения и развития транспортных систем: Монография. СПб.: Элмор, 2012. 192 с.
3. Малыгин И.Г. Интеллектуальные системы в городском транспортном комплексе // Экономика качества. 2013. № 3. С. 81–91.
4. Amjad Umar. IT Infrastructure to Enable Next Generation Enterprises // Information Systems Frontiers. 2005. Vol. 7. Iss. 3. Pp. 217–256.
5. Гетманова А.В. Эффективность и перспективы развития CRM-систем в экономике // ФЭН-наука. 2014. № 4 (31). С. 9–11.
6. Бабурин В.А., Яненко М.Б., Яненко М.Е. Маркетинговые технологии инновационного развития в торговом сервисе // ТТПС. 2011. № 16. С. 89–94.
7. Buliung R.N., Kanaroglou P.S. On design and implementation of an object-relational spatial database for activity/travel behaviour research // J. of Geographical Systems. 2004. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 237–262.
8. Fragos S., Stergioulas L.K., Xydeas C.S. Classification of Decision-Behavior Patterns in Multivariate Computer Log Data Using Independent Component Analysis // Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2774. Pp. 73–79.
9. Wiehe S.E., Carroll A.E., Liu G.C., Haberkorn K.L., Hoch Sh.C., Wilson J.S., Fortenberry J.D. Using GPS-enabled cell phones to track the travel patterns of adolescents. 2008. Pp. 1–11.
10. Yan-Tao Zheng, Yiqun Li, Zheng-Jun Zha, Tat-Seng Chua. Mining Travel Patterns from



GPS-Tagged Photos // *Advances in Multimedia Modeling. Lecture Notes in Computer Science*. 2011. Vol. 6523. Pp. 262–272.

11. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Стариченков А.Л. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. Т. 1. С. 29–36.

12. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 2-3 (217-222). С. 49–70.

13. 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.

14. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2014. № 4 (199). С. 34–48.

15. Селиверстов Я.А. Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора // *Науковедение*. 2014. № 4. С. 90.

16. 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.

17. Martínez-López F.G., Gázquez-Abad J.C., Sousa C.M.P., Lengler J. The Internet as a Context for the Generation and Dissemination of the Future's Transnational/Global Culture: A Cultural Constructivist-Based Analysis // *Cultural Perspectives in a Global Marketplace Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science*. 2016. Pp. 36–42.

18. Селиверстов Я.А. Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2013. № 1. С. 43–50.

19. 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.

20. Wang D., Sun B. Detecting Activity Types and Trip Purposes from Passive GPS Data: A Data

Mining Approach // *Space-Time Integration in Geography and GIScience*. 2015, Pp. 211–234.

21. Nie X., Xiong Z., Liu C., Yuan X., Bai Y. A New Method on Vehicle Behavior Analysis of Intelligent Transportation Monitoring // *LISS 2014*. 2015. Pp. 741–746.

22. Jun Wu, Chengsheng Jiang, Houston D., Baker D., Delfino R. Automated time activity classification based on global positioning system (GPS) tracking data // *Environmental Health*. 2011. Pp. 1–13.

23. Habib Khandker M.N., Miller Eric J. Modeling daily activity program generation considering within-day and day-to-day dynamics in activity-travel behavior // *Transportation*. 2008. Vol. 35. Iss. 4. Pp. 467–484.

24. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // *Науковедение*. 2014. № 3 (22). С. 122.

25. Таранцев А.А. Случайные величины и работа с ними: Учеб.-метод. пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ИД «Петрополис», 2011. 160 с.

26. Yeboah G., Alvanides S., Thompson E.M. Computational Approaches for Urban Environments. Springer International Publishing. Chapter 8. Pp. 185–210.

27. 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.

28. 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. № 2 (30). С. 69–80.

29. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О построении интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 2-3 (217–222). С. 139–161.

30. 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. № 2 (24). С. 92–100.

31. 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.

32. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О методе оценки эффективности организации процесса дорожного движения мегаполиса // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 2 (50). С. 91–96.

REFERENCES

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

2. Belyi O.V. *Problemy postroyeniya i razvitiya transportnykh system* [Problems of construction and development of transport systems]. St. Petersburg: Elmor Publ., 2012, 192 p. (rus)

3. Malygin I.G. Intellektualnyye sistemy v gorodskom transportnom komplekse [Intelligent systems in the urban transport sector]. *Ekonomika kachestva* [Economics of quality], 2013, No. 3, Pp. 81–91. (rus)

4. Amjad Umar. IT Infrastructure to Enable Next Generation Enterprises. *Information Systems Frontiers*, 2005, Vol. 7, Iss. 3, Pp. 217–256.

5. Getmanova A.V. Effektivnost i perspektivy razvitiya CRM-sistem v ekonomike [Effectiveness and prospects for the development of CRM-systems in the economy]. *FoN-nauka*, 2014, No. 4 (31), Pp. 9–11. (rus)

6. Baburin V.A., Yanenko M.B., Yanenko M.Ye. Marketingovyte tekhnologii innovatsionnogo razvitiya v torgovom servise [Marketing technology innovation development in the commercial service]. *TTPS*, 2011, No. 16, Pp. 89–94. (rus)

7. Buliung R.N., Kanaroglou P.S. On design and implementation of an object-relational spatial database for activity/travel behaviour research. *Journal of Geographical Systems*, 2004, Vol. 6, Iss. 3, Pp. 237–262.

8. Fragos S., Stergioulas L.K., Xydeas C.S. Classification of Decision-Behavior Patterns in Multivariate Computer Log Data Using Independent Component Analysis. *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Lecture Notes in Computer Science*, 2003, Vol. 2774, Pp. 73–79.

9. Wiehe S.E., Carroll A.E., Liu G.C., Haberkorn K.L., Hoch Sh.C., Wilson J.S., Fortenberry J.D. *Using GPS-enabled cell phones to track the travel patterns of adolescents*, 2008, Pp. 1–11.

10. Yan-Tao Zheng, Yiqun Li, Zheng-Jun Zha,

Tat-Seng Chua. Mining Travel Patterns from GPS-Tagged Photos. *Advances in Multimedia Modeling. Lecture Notes in Computer Science*, 2011, Vol. 6523, Pp. 262–272.

11. 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)

12. Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A. Metody i modeli postroyeniya matrits transportnykh korrespondentsiy [Methods and models of the construction of transport correspondence matrix]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2015, No. 2-3 (217-222), Pp. 49–70. (rus)

13. 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, P. 188. (rus)

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

15. 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)

16. Seliverstov Ya.A., Starichenkov A.L. 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-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2014, No. 6 (210), Pp. 81–94. (rus)

17. **Martínez-López F.G., Gázquez-Abad J.C., Sousa C.M.P., Lengler J.** The Internet as a Context for the Generation and Dissemination of the Future's Transnational/Global Culture: A Cultural Constructivist-Based Analysis. *Cultural Perspectives in a Global Marketplace Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science*, 2016, Pp. 36–42.

18. **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)

19. **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.

20. **Wang D., Sun B.** Detecting Activity Types and Trip Purposes from Passive GPS Data: A Data Mining Approach. *Space-Time Integration in Geography and GIScience*, 2015, Pp. 211–234.

21. **Nie X., Xiong Z., Liu C., Yuan X., Bai Y.** A New Method on Vehicle Behavior Analysis of Intelligent Transportation Monitoring. *LISS 2014*, 2015, Pp. 741–746.

22. **Jun Wu, Chengsheng Jiang, Douglas Houston, Dean Baker, Ralph Delfino.** Automated time activity classification based on global positioning system (GPS) tracking data. *Environmental Health*, 2011, Pp. 1–13.

23. **Khandker M.N. Habib, Eric J. Miller.** Modeling daily activity program generation considering within-day and day-to-day dynamics in activity-travel behavior. *Transportation*. 2008, Vol. 35, Iss. 4, Pp. 467–484.

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

25. **Tarantsev A.A.** *Sluchaynyye velichiny i rabota s nimi [Random variables and work with them]*. St. Petersburg: Petropolis Publ., 2011, 160 p. (rus)

26. **Yeboah G., Alvanides S., Thompson E.M.** *Computational Approaches for Urban Environments*. Springer International Publishing, Chapter 8,

Pp. 185–210.

27. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Prime-neniye metoda imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki effektivnosti novykh vidov gorodskogo passazhirskogo 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)

28. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye transportnykh potokov megapolisa s vvidom novykh vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskogo 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)

29. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** O postroyenii intellektualnoy sistemy organizatsii i razvitiya transportnoy sistemy megapolisa [Construction of Intelligent System for the Organization and Development of Transport System Metropolis]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2015, No. 2-3 (217–222), Pp. 139–161. (rus)

30. **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)

31. **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)

32. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** O metode otsenki effektivnosti organizatsii protsessa dorozhnogo dvizheniya megapolisa [A method of evaluating the effectiveness of the organization of traffic metropolis]. *Vestnik transporta Povolzhya [The Bulletin of Volga region transportation]*, 2015, No. 2 (50), Pp. 91–96. (rus)

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

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., 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 В.О., 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