

УДК 656.078, 656.001, 621.39, 629, 654, 004.89, 510.67

**Я. А. Селиверстов**

## **О МЕТОДЕ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ СМЕШАННОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ГОРОДСКОЙ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

Дата поступления: 08.04.2015

Решение о публикации: 09.07.2015

**Цель:** Провести обзор существующих моделей и методов анализа транспортных потоков, выявить их достоинства и недостатки, разработать метод анализа структуры смешанного транспортного потока в городских улично-дорожных сетях, пригодный для использования в системах городского транспортного мониторинга. **Методы:** Используются графо-аналитический способ представления модели городской улично-дорожной сети; теоретико-множественный и алгебраический способ разбиения смешанного транспортного потока на классы; реляционный способ разметки графа модели улично-дорожной сети. **Результаты:** Разработан метод анализа структуры смешанного транспортного потока в городских улично-дорожных сетях, проверена его адекватность на практическом примере. **Практическая значимость:** Разработанный метод позволяет автоматизировать анализ структуры смешанного транспортного потока путем выявления и группировки однородных по классам и свойствам транспортных объектов на улично-дорожной сети города, стимулировать совершенствование систем городского транспортного мониторинга и расширение функциональных возможностей элементов интеллектуальных транспортных систем в части автоматической классификации и учета подвижных транспортных объектов.

Метод анализа, транспортный поток, классификация, матрица корреспонденций, интеллектуальные транспортные системы, модели управления, городская транспортная система, городской транспортный мониторинг.

**Yaroslav A. Seliverstov**, researcher, postgraduate student, maxwell\_8-8@mail.ru (Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences) ON THE METHOD OF ANALYSIS OF COMBINED TRAFFIC STREAM STRUCTURE IN URBAN STREET AND ROAD NETWORK

**Objective:** To provide an overview of existing models and methods of analysis of transport streams, to point out their benefits and drawbacks, to develop a method of analysing the combined traffic stream structure in urban street and road networks that can be used in urban transport monitoring systems. **Methods:** The study deployed graphic-analytical method for representing the model of urban street and road network, set-theoretical and algebraical method for breaking up the combined traffic stream into classes, and relational method for graph labelling of the street and road network model. **Results:** A method for analysing the combined traffic stream structure in urban street and road networks was developed, and its applicability was tested on a practical example. **Practical importance:** The method allows to computerise analysis of combined traffic stream structure through determining and grouping transport objects, homogenous in their classes and qualities, on the urban street and road network, to stimulate improvements to the urban transport monitoring systems and increasing functional capabilities of elements of intelligent transport systems in automated classification and registration of mobile transport objects.

Analysis method, transport stream, classification, mobility plan, intelligent transport systems, management models, urban transport system, urban transport monitoring.

Устойчивая работа городской транспортной системы (ГТС) имеет принципиальное значение для нормального функционирования экономики любого региона. Перегруженность городских дорожных сетей, несчастные случаи и аварии, дорожные заторы, загрязнение воздуха и ухудшение городской экологии являются следствием неэффективного управления городской транспортной мобильностью.

Проблемами управления дорожным движением в крупных городах занимаются ведущие отраслевые научно-исследовательские коллективы. Большинство из них разрабатывают новые теоретические и практические решения, которые улучшили бы транспортную мобильность, сократили время транспортных простоев на улично-дорожной сети, улучшили организацию и управляемость городской транспортной системы. Современные методы и подходы затрагивают вопросы организации ГТС [1, 6], ее структурно-функциональные характеристики [4], особенности систем управления [3, 12] и распределения городских транспортных потоков (ТП) [5, 10] улично-дорожной сети.

### **Анализ предметной области**

Методы интеллектуального анализа организации транспортной системы городов на основе кластеризации данных рассмотрены в [4, 7], при этом вопрос мобильности затронут незначительно. Более подробно проблемы развития городской мобильности исследованы в [3] по пяти основным направлениям: гибкое движение в городах, зеленые города, «умный» городской транспорт, доступный городской транспорт, безопасный городской транспорт. Позже в [17] предложена модель, позволяющая определить коэффициенты, влияющие на выбор пассажиром вида транспорта, установить причины, которые препятствуют пассажирам использовать городской общественный транспорт.

Общая генеалогия развития моделей ТП по четырем направлениям (фундаментальные связи, микро-, мезо- и макроскопическое) ис-

следована в [14]. Предложенный подход позволяет выявлять основные тенденции в моделировании ТП: сходимость многих ветвей (областей) к обобщенным моделям; адаптация модели LWR к реальным явлениям и ее расширение; формирование мультиклассовых версий многих моделей; развитие гибридных моделей, сочетающих в себе преимущества моделей разных типов. Однако без рассмотрения остались вопросы свойств и структуры ТП, его поведения в условиях внешней информационной среды. Позже модель управления городскими ТП в условиях неопределенности внешней информационной среды предложена в [12]. Построена модель классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления ТП мегаполиса, впервые позволяющая перейти к изучению его структурных свойств [8]. В [11] установлена связь с системами управления транспортно-логистического мониторинга, рассмотрены подсистемы идентификации, аутентификации, местоопределения и распознавания состояний подвижных и стационарных объектов ГТС. Проблемы их внедрения с учетом принципов самоорганизации предложены в [9]. В [15, 18] раскрыты аналитические подходы построения интеллектуальных транспортных планировщиков.

### **Постановка задачи**

Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии аппаратно-программных систем управления ТП мегаполиса. Представленные модели систем управления дорожным движением вырабатывают регулирующие воздействия без учета структуры потока. ТП рассматривается ими как однородный, хотя в действительности состоит из разнородных подвижных транспортных объектов с отчетливо выраженным индивидуальным поведением и свойствами. Понимание структуры потока и принципов его формирования откроет новые возможно-

сти в управлении процессами транспортной мобильности. Разработке подобного метода анализа структуры ТП с использованием графо-аналитической модели и посвящена настоящая работа. Изложение уместно начать с построения формальной модели исследуемого процесса.

### Основная часть

Городская транспортная сеть ( $TI$ ) задается графом  $\Gamma^{TI}(V; E)$  с множеством вершин  $V = \{v\}$  и множеством дуг сети  $E = \{e\}$ , где  $TI = (T_o \cup T_s \cup O)$  – транспортная сеть;  $T_o$  – объекты транспортной инфраструктуры;  $T_s$  – улично-дорожные транспортные сети;  $O$  – инфраструктурные объекты жизнедеятельности.

Дуга соответствует реальному участку автодорожного, пешеходного или иного улично-дорожного перегона без перекрестков. Вершина представляет узел, в котором перераспределяются ТП или изменяются характеристики некоторых элементов ГТС.

Для формального представления процессов городской транспортной мобильности из множества вершин  $V = \{v\}$  выделим два подмножества: зарождения ТП ( $S \subseteq V$ ) и ТП ( $D \subseteq V$ ), удовлетворяющих выражению

$$D, S \subseteq [T_o \cup T_s \cup O] \subset TS. \quad (1)$$

Подмножество  $S \subseteq V$  содержит элементы ГТС, порождающие ТП; подмножество  $D \subseteq V$  содержит элементы ГТС, поглощающие ТП.

Множество потокообразующих пар отправления-прибытия задается декартовым произведением в виде

$$W = \{w = (\partial; \alpha) : \partial \in S, \alpha \in D\}. \quad (2)$$

Тогда матрица транспортных корреспонденций будет задаваться массивом  $\{\rho_w : w \in W\}$ , в котором каждой паре отправление-прибытие  $w = (\partial; \alpha) \in W$  будет поставлен в соответствие определенный объем  $\rho_w$  пользователей (пас-

сажиров, транспортных средств), которые из пункта  $\partial$  (отправления) должны прибыть в пункт  $\alpha$  (прибытие). Объем пользователей  $\rho_w$  между пунктами отправления и прибытия регистрируется системой управления ГТС [11].

Маршрут на графе транспортной сети, соединяющий вершины  $\partial$  и  $\alpha$ , задается последовательностью дуг вида  $e_1 = (\partial = \pi_0 \rightarrow \pi_1)$ ,  $e_2 = (\pi_1 \rightarrow \pi_2), \dots, e_{L-1} = (\pi_{L-2} \rightarrow \pi_{L-1})$ ,  $e_L = (\pi_{L-1} \rightarrow \pi_L = \alpha)$ , где  $e_\gamma \in E$  при всех  $\gamma = 1, \dots, L+1$ .

Множество альтернативных маршрутов, следуя которым, для каждой пары  $w = (\partial; \alpha) \in W$  выходящий из пункта отправления  $\partial$  поток достигает пункта прибытия  $\alpha$  определяется следующим образом:

$$P_w = \bigcup_{i=1}^N P_i = \bigcup_{i=1}^N \bigcup_{l=1}^L e_{il}. \quad (3)$$

Совокупность всех путей в графе транспортной сети обозначим через  $P = \bigcup_{w \in W} P_w$ .

Графическое представление маршрута представлено на рис. 1.

Введем такую величину потока  $x_p$ , следующего по пути  $p \in P$ , чтобы для каждой пары  $w$  потоки  $x_p$  удовлетворяли условию

$$X_w = \left\{ x_p \geq 0 : p \in P_w, \sum_{p \in P_w} x_p = \rho_w \right\}. \quad (4)$$

Определить поток по пути  $x_p$  через поток по дуге  $y_e$  в момент времени  $t \in T$  можно следующим образом:

$$x_p = \sum_{e \in P} \Theta_{ep} y_e, \quad \Theta_{ep} = \begin{cases} 1 & \text{если дуга } e \text{ проходит} \\ & \text{через путь } p; \\ 0 & \text{(в противном случае),} \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Theta = (\Theta_{ep} : e \in E, p \in P)$  – матрица инцидентности дуг и путей;  $y = (y_e : e \in E)$  – вектор, описывающий загрузку дуг сети.

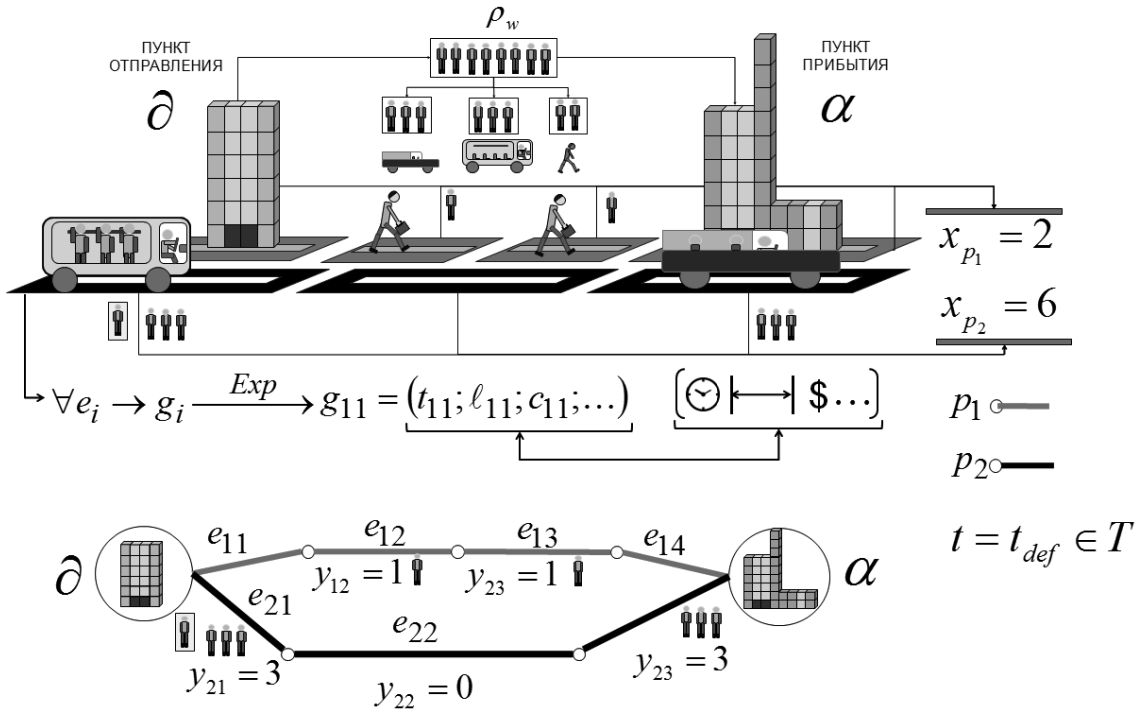


Рис. 1. Процесс городской транспортной мобильности

Процедуру разбиения  $f_r^{CH}$  потока на элементы запишем в теоретико-множественной и алгебраической интерпретациях:

$$Y_{e_\Sigma} \Big|_{t = def} = \left. \begin{matrix} f_r^{CH} \\ \bigcup_{CH_p^r} Tr_{CH_p^r} \cup \dots \cup \bigcup_{CH_p^h} H_{CH_p^h} \end{matrix} \right|_{t = def}; \quad (6)$$

$$\forall Tr_{CH_p^r}, Tr_{CH_j^r} : Tr_{CH_p^r} \cap Tr_{CH_j^r} = \emptyset;$$

$$\forall H_{CH_i^h}, H_{CH_i^h} : H_{CH_i^h} \cap H_{CH_i^h} = \emptyset$$

$$y_{e_\Sigma} \Big|_{t = def} = \left. \left( \sum_k \sum_i^{K} tr_{ki} + \sum_\lambda \sum_i^{\hat{\Lambda}} h_i \right) \right|_{t = def}, \quad (7)$$

где  $Y_{e_\Sigma} = \left\{ \begin{matrix} \mathfrak{a}_q \Big| \mathfrak{a}_q \in Tr \cup H \cup Tg \cup Gr, \\ q = 1, \dots, Q \end{matrix} \right\}$  – по-

токовое множество подвижных объектов  $\mathfrak{a}_q$  на дуге «e»;  $y_{e_\Sigma} = \left| Y_{e_\Sigma} \right|$  – мощность потокового

множества на дуге «e»;  $Tr_{CH_p^r}$  – подмножество транспортных средств  $Tr$  вида  $CH_p^h \sim k \dots \hat{K}$  (классы или виды транспортных средств);  $H_{CH_p^h}$  – подмножество пользователей  $H$  вида  $CH_p^h \sim \lambda \dots \hat{\Lambda}$  (классы пользователей);  $\sum_k \sum_i^{K} tr_{ki}$  – общее количество транспортных средств на дуге, классифицированных по классам  $k$ ;  $\sum_\lambda \sum_i^{\hat{\Lambda}} h_i$  – общее количество пользователей на дуге, классифицированных по классам  $\lambda$ .

Разбиения (6), (7) позволяют изучать структуру и свойства элементов ТП. Принадлежность элементов потокового множества к определенной корреспонденции запишем в теоретико-множественном и алгебраическом виде:

$$Y_{e_\Sigma} \Big|_{t = def} = (Y_e^w \cup \bar{Y}_e^w) \Big|_{t = def}; \quad (8)$$

$$y_{e_\Sigma} \Big|_{t = def} = (y_e^w + \bar{y}_e^w) \Big|_{t = def}, \quad (9)$$

где  $y_e^w$  – количество пользователей, находящихся на дуге  $e \in E$  в момент времени  $t = def$ , принадлежащих корреспонденции  $w \in W$ , т.е.  $y_e^w = y_e$ ;  $\bar{y}_e^w$  – количество пользователей, находящихся на дуге  $e \in E$  в момент времени  $t = def$ , не принадлежащих корреспонденции  $w \in W$ .

Преодоление любого участка пути сопровождается количественными затратами  $g_{e_i}$  в виде

$$\forall e_i \quad \exists g_{e_i} = g_{e_i}^{\nabla} \cup g_{e_i}^{\Delta}; \quad (10)$$

$$g_{e_i}^{\nabla} \cup g_{e_i}^{\Delta} = \left\{ \begin{array}{l} ch_{\nabla}^{g_{e_i}} \cup ch_{\Delta}^{g_{e_i}} \mid ch_{\nabla}^{g_{e_i}} = \text{const}, \\ ch_{\Delta}^{g_{e_i}} = f(e_i; y_{e_i}), \hat{r} = 1, \dots, C, \\ \Delta = 1, \dots, \Lambda \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Совокупные затраты  $g_{e_i}$  (10) включают постоянную  $g_{e_i}^{\nabla}$  и переменную  $g_{e_i}^{\Delta}$  составляющие. Рассмотрим структуру совокупных затрат (11). Постоянная составляющая затрат  $g_{e_i}^{\nabla}$  представляет собой характеристики ( $ch_{\nabla}^{g_{e_i}}$ ) участка пути, не изменяющиеся во времени, например, протяженность пути или стоимость проезда. Переменная составляющая совокупных затрат  $g_{e_i}^{\Delta}$  представляет собой характеристики пути ( $ch_{\Delta}^{g_{e_i}}$ ), изменяющиеся во времени и, как правило, зависимые от ТП на пути, например, время прохождения пути.

В реляционной модели затраты  $g_{e_i}$  задаются отношением в виде

$$g_{e_i} : \left\{ \begin{array}{l} \langle name, \{value\} \rangle, \langle name, \{value\} \rangle \dots; \\ \frac{\quad}{g_{e_i}^{\nabla}} \\ \langle name, \{value\} \rangle, \langle name, \{value\} \rangle \dots \\ \frac{\quad}{g_{e_i}^{\Delta}} \end{array} \right\}, \quad (12)$$

где name – имя  $\nabla, \Delta$ -й характеристики; {value} – значение или область допустимых значений. Область допустимых значений задается перечислением этих значений, интервалом или функционально с помощью правил вычисления (измерения) и оценки.

Обозначим через  $G_p = \{g_p\}$  удельные затраты пользователей на проезд по пути  $p$ , тогда в алгебраической и реляционной интерпретациях последние представимы в виде

$$G_p = G_p^{\nabla} + G_p^{\Delta} = \sum_{e_i \in p} (g_{e_i}^{\nabla} + g_{e_i}^{\Delta}), \quad (13)$$

$$G_p : \left\{ \begin{array}{l} \frac{\langle name, \{\Sigma value\} \rangle, \langle name, \{\Sigma value\} \rangle \dots;}{G_p^{\nabla}} \\ \frac{\langle name, \{\Sigma value\} \rangle, \langle name, \{\Sigma value\} \rangle \dots}{G_p^{\Delta}} \end{array} \right\}. \quad (14)$$

Поскольку на затраты по одному маршруту может влиять загрузка других путей, то последние  $G_p$  представляют собой функции от загрузки всей сети, т.е.  $G_p = G_p(X)$ .

Тогда в матричной форме взаимосвязь потоков по путям и дугам в обобщенном виде может описываться уравнением  $X = \Theta Y$  [2].

Формальная интерпретация затрат (10)–(14) широко используется при построении автоматических систем оплаты проезда [16].

## Пример

Рассчитаем поток по дугам и путям для транспортного процесса, исходные данные для которого представлены на рис. 1.

## Решение

Структура маршрута в соответствии с (3) примет вид

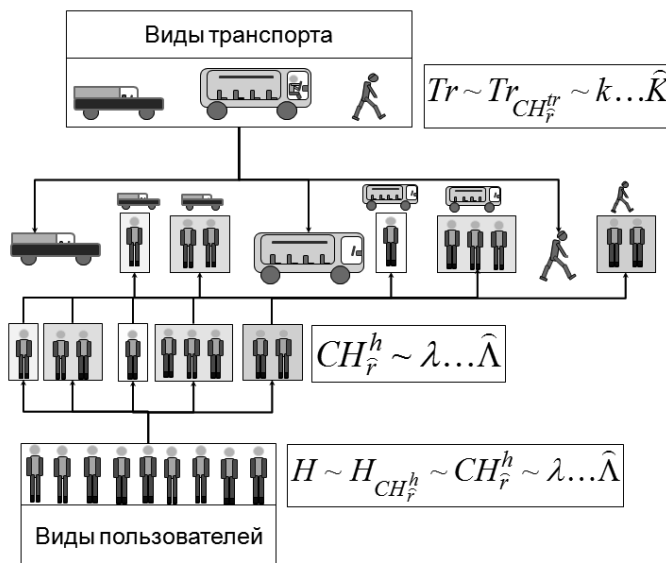


Рис. 2. Структура транспортного потока

$$P_{w=(\partial;\alpha)} = \bigcup_{i=1}^N p_i = \bigcup_i^N \bigcup_l^L e_{il} =$$

$$= (e_{11} \cup e_{12} \cup e_{13} \cup e_{14}) \cup$$

$$\cup (e_{21} \cup e_{22} \cup e_{23}) = p_1 \cup p_2.$$

$$x_2 = y_{21}^w + y_{23}^w = 3 + 3 = 6;$$

$$X_w = x_1 + x_2 = 2 + 6 = 8.$$

Структура потока по дугам в соответствии с (4)–(9) примет вид

$$y_{11} \Big|_{t=def} = y_{14} \Big|_{t=def} = 0;$$

$$y_{12} \Big|_{t=def} = 1_{(\lambda=1)}$$

$$y_{13} \Big|_{t=def} = 1_{(\lambda=1)}$$

$$y_{21} \Big|_{t=def} = (1_{(k=1)})_K + (3_{(\lambda=1)} + 1_{(\lambda=2)})_{\hat{\Lambda}};$$

$$y_{22} \Big|_{t=def} = 0$$

$$y_{23} \Big|_{t=def} = (1_{(k=2)})_K + (3_{(\lambda=1)})_{\hat{\Lambda}}$$

$$y_{12}^w = 1; y_{13}^w = 1; y_{13}^w = 1; y_{21}^w = 3; y_{23}^w = 3;$$

$$x_1 = y_{12}^w + y_{13}^w = 1 + 1 = 2;$$

Аналитическое решение представлено на рис. 2.

Данная модель может получать информационное наполнение от системы городского транспортно-логистического мониторинга [11].

### Заключение

Предложенный метод позволяет автоматизировать анализ структуры транспортного потока путем выявления и группировки однородных по классам транспортных объектов на улично-дорожной сети.

Практическое применение рассмотренного подхода к модели классификации межобъектных отношений открывает возможность построения городских интеллектуальных анализаторов транспортно-логистической и социально-экономической мобильности. Сращивание последних с программно-аппаратными элементами интеллектуальных транспортных систем может лечь в основу конструирования распределенных интеллек-

туальных городских логистических управляющих систем.

Развитие транспортных систем на принципах интеллектуализации с учетом предложенного метода способно рационализировать и функционально расширить способы управления транспортными потоками мегаполиса.

### Библиографический список

1. Белый О. В. Архитектура и методология транспортных систем / О. В. Белый, О. Г. Кокаев, С. А. Попов. – СПб. : Элмор, 2002. – 256 с.

2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / под ред. А. В. Гасникова. – М. : Изд-во МФТИ, 2010. – 360 с.

3. Каримов Т. Н. Интеллектуальная система поддержки принятия решения для оперативного управления транспортными потоками / Т. Н. Каримов, Л. А. Симонова // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 1 (115). – С. 37–41.

4. Селиверстов С. А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы / С. А. Селиверстов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адм. С. О. Макарова. – 2014. – № 2 (24). – С. 92–100.

5. Селиверстов С. А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта / С. А. Селиверстов, Я. А. Селиверстов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адм. С. О. Макарова. – 2015. – № 2 (30). – С. 69–80.

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

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

8. Селиверстов Я. А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-

экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса / Я. А. Селиверстов // Науковедение. – 2014. – № 5. – С. 188.

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

10. Селиверстов Я. А. Применение метода имитационного моделирования для оценки эффективности новых видов городского пассажирского транспорта / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адм. С. О. Макарова. – 2015. – № 3 (31). – С. 83–92.

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

12. Стариченков А. Л. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды / А. Л. Стариченков // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – № 6 (210). – С. 81–94.

13. European Commission Green Paper : Towards a new culture for urban mobility. – 551 final. – Brussels : Publ. European Commission, 2007.

14. Lint H. van. Multi-Class First Order Traffic Flow Modeling / H. van Lint, S. P. Hoogendoorn, M. Schreude // Traffic and Granular Flow. 07.2009. – P. 421–426.

15. Nowacki G. Development and Standardization of Intelligent Transport Systems // TransNav, the Int. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2012. – Vol. 6, N 3. – P. 403–411.

16. Sadeghi A. R. User Privacy in Transport Systems Based on RFID E-Tickets / A. R. Sadeghi, I. Visconti, C. Wachsmann ; ed. C. Bettini, S. Jajodia, P. Samarati, X. S. Wang. – PiLBA. CEUR Workshop Proc., 2008. – Vol. 397.

17. Train K. Discrete choice models with simulation / K. Train. Univ. of California, Berkeley, Cambridge Univ. Press, 2002. – 388 p.

18. Yokota T. ITS Technical Note For Developing Countries / T. Yokota, R. J. Weiland. – World Bank, 2014. – 16 p.

## References

1. Bely O. V., Kokayev O. G. & Popov S. A. *Arkhitektura i metodologiya transportnykh sistem* [Architecture and Methodology of Transport Systems]. St. Petersburg, Elmor, 2002. 256 p.
2. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov* [An Introduction to Mathematical Simulation of Transport Streams], ed. A. V. Gasnikov. Moscow, Izdatelstvo MFTI, 2010. 360 p.
3. Karimov T. N. & Simonova L. A. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye.* – *Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St Petersburg Polytechnic Univ. Informatics. Telecommunications. Management*, 2011, no. 1 (115), pp. 37–41.
4. Seliverstov S. A. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni Admirala S. O. Makarova – Bull. of the Admiral Makarov State Univ. of Maritime and Inland Shipping*, 2014, no. 2 (24), pp. 92–100.
5. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni Admirala S. O. Makarova – Bull. of the Admiral Makarov State Univ. of Maritime and Inland Shipping*, 2015, no. 2 (30), pp. 69–80.
6. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Transp. Bull.*, 2015, no. 2 (50), pp. 91–96.
7. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye.* – *Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St Petersburg Polytechnic Univ. Informatics. Telecommunications. Management*, 2015, no. 2/3 (217/222), pp. 139–161.
8. Seliverstov Ya. A. *Naukovedeniye – Sci. Studies*, 2014, no. 5, pp. 188.
9. Seliverstov Ya. A. *Naukovedeniye – Sci. Studies*, 2014, no. 4, p. 90.
10. Seliverstov Ya. A. & Seliverstov S. A. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni Admirala S. O. Makarova – Bull. of the Admiral Makarov State Univ. of Maritime and Inland Shipping*, 2015, no. 3 (31), pp. 83–92.
11. Starichenkov A. L. *Izvestiya SPbGETU “LETI” – Bull. of the Saint Petersburg Electrotechnical Univ. “LETI”*, 2015, Vol. 1, pp. 29–36.
12. Starichenkov A. L. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye.* – *Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St Petersburg Polytechnic Univ. Informatics. Telecommunications. Management*, 2014, no. 6 (210), pp. 81–94.
13. European Commission Green Paper: Towards a new culture for urban mobility. 551 final. Brussels, Publ. European Commission, 2007.
14. Lint H. van, Hoogendoorn S. P. & Schreude M. Multi-Class First Order Traffic Flow Modeling (Traffic and Granular Flow), 07.2009, pp. 421–426.
15. Nowacki G. Development and Standardization of Intelligent Transport Systems. *TransNav, the Int. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2012, Vol. 6, no. 3, pp. 403–411.
16. Sadeghi A. R., Visconti I. & Wachsmann C. User Privacy in Transport Systems Based on RFID E-Tickets, ed. C. Bettini, S. Jajodia, P. Samarati, X. S. Wang. PiLBA. *CEUR Workshop Proc.*, 2008, Vol. 397.
17. Train K. Discrete choice models with simulation. Univ. of California, Berkeley, Cambridge Univ. Press, 2002. 388 p.
18. Yokota T. & Weiland R. J. ITS Technical Note For Developing. World Bank, 2014. 16 p.

СЕЛИВЕРСТОВ Ярослав Александрович – научный сотрудник, аспирант, maxwell\_8-8@mail.ru (Институт проблем транспорта им. Н. С. Соколова Российской академии наук).