

# Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

УДК 656, 004.8, 007.5, 51-7, 510.67

*Я.А. Селиверстов, А.Л. Стариченков*

## **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВНЕШНЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЫ**

*Ya.A. Seliverstov, A.L. Starichenkov*

### **CONSTRUCTION OF A MODEL OF URBAN TRAFFIC IN CONDITIONS OF INFORMATION UNCERTAINTY**

Построение формальной модели городской транспортной системы произведено в логико-алгебраической интерпретации, увязанной с графоаналитической моделью городской транспортной сети, введена модель функционально-полного операторного базиса системы управления городской транспортной системой, опирающаяся на ориентиры пользователя и целевые ориентиры городской транспортной системы. В целевые ориентиры пользователя уложены первый принцип Вардроп и принцип безопасного следования, в целевые ориентиры городской транспортной системы уложен второй принцип Вардроп и принцип надежного функционирования. Последовательно выстроена модель управления динамическими транспортными потоками мегаполиса. Произведена проверка адекватности предлагаемой модели.

**МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; УПРАВЛЕНИЕ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ; УПРАВЛЕНИЕ ГОРОДСКОЙ МОБИЛЬНОСТЬЮ НАСЕЛЕНИЯ; ГОРОДСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ.**

A formal model of the urban transport system is made with the logic-algebraic interpretation, it bound to the graph-analytical model of the urban transport network, after it a model of functionally complete operator basis of control of the urban transport system based on function of control of movement of the urban population is introduced here. Function of control of traffic consists of two principles Wardrop and two new principles, which are described here. The model for controlling the dynamic traffic of the metropolis is consistently built here. The adequacy of the models is demonstrated by numerical examples.

**MODEL CONTROL SYSTEMS OF DYNAMIC TRAFFIC; INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS; TRAFFIC CONTROL; CONTROL OF URBAN MOBILITY; URBAN TRANSPORT SYSTEMS; SELF-ORGANIZING MODEL TRANSPORT FLOWS.**

В основе систем управления (СУ) городскими транспортными потоками (ТП) лежат математические и программно-алгоритмические модели. К настоящему времени уже разработаны транспортные модели, которые с определенной степенью достоверности отображают реальные транспортные процессы [3]. С их исполь-

зованием вычисляются потоки и загрузка элементов сети, составляется расписание движений общественного пассажирского и грузового транспорта, выполняется локальное управление активными элементами транспортной сети с целью перераспределения транспортных потоков на особо загруженных участках.

Устойчивая тенденция последовательного внедрения отдельных составляющих информационных систем управления дорожным движением в практику организации городского транспортного процесса в мегаполисах России не сумела качественно повысить безопасность и управляемость дорожного движения [1, 2]. Поэтому в данной статье производится построение моделей управления городскими транспортными потоками, позволяющих устранить описанные выше недостатки.

**Анализ предметной области.** В настоящее время исследованиями моделей управления городскими транспортными потоками заняты многие российские и зарубежные научные коллективы. Среди последних работ можно отметить следующие. В [3–8] представлены различные подходы к исследованию ТП с помощью теории экономического равновесия, а также подробно изложены математические методы моделирования ТП на макро- и микроуровнях. В работе [9] изучена проблема нахождения оптимальных управленческих стратегий распределения ТП, равновесных по Вардропу, на сети из параллельных каналов с линейной BPR-функцией задержки. В [10] рассмотрены линейные, гравитационные, и энтропийные модели распределения ТП. В [11] предложен подход к управлению ТП на улично-дорожной сети (УДС) мегаполиса на основе равновесия по Штакельбергу в построенной двухуровневой конфликтной игре между провайдерами навигационных услуг и администрации мегаполиса. В [12] осуществлено построение комбинированной модели ТП на основе энтропийного равновесного расщепления и распределения ТП. В [13] рассмотрено построение графовой модели для решения задачи маршрутизации при распределении пассажирских и ТП, учитывающей специфику перемещений пассажиров в крупных городах. В [14] описаны математические модели оптимизации структуры системы управления транспортной компании.

**Постановка проблемы.** Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии теоретических и прикладных методов, а также подходов

в построении интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Многие проблемы управления ТП мегаполиса в модельной интерпретации ИТС [15] удалось разрешить программно-алгоритмически, но эффективность СУ в реальной городской транспортной системе (ГТС) остается предельно низкой. Именно поэтому задача построения моделей управления городской транспортной мобильностью населения, обеспечивающей снижение влияния неопределенности внешней информационной среды на устойчивость городского транспортного процесса, остается актуальной.

**Формальная модель городской транспортной системы.** Городскую транспортную систему ( $TS$ ) зададим согласно [16] множеством взаимосвязанных объектов различных классов, которые в общем виде будем называть элементами ГТС:

$$TS : \mathcal{E} = \{\varepsilon_i, i = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где  $TS$  – транспортная система;  $\varepsilon_i$  – элемент ГТС.

Классы на множестве объектов ГТС зададим процедурой разбиения  $f_\Psi^d$  множества  $TS$  на непересекающиеся совокупности подмножеств следующего вида:

$$f_\Psi^d : TS = \bigcup_{\psi} TS_\psi, \quad |TS_\psi| = d_\psi, \quad (2)$$

где  $\Psi = \{\psi_1, \dots, \psi_N\}$  – классы разбиения;  $d_\psi = 1, \dots, N$  – глубина классов разбиения (количество подклассов в каждом классе).

Классами объектов ГТС выступают функционально отличные совокупности элементов ГТС, такие как объекты транспортной инфраструктуры ( $To$ ), пользователи транспортной сети ( $H$ ), улично-дорожные транспортные сети ( $Ts$ ), транспортные средства ( $Tr$ ), грузы ( $Gr$ ), средства перевозки грузов ( $Tg$ ), средства управления транспортным процессом ( $Tc$ ), инфраструктурные объекты жизнедеятельности ( $O$ ).

Графическая интерпретация подобного классового разбиения представлена на рис. 1.

Для данной классификации  $\Psi = \psi_1, \dots, \psi_7$ , а выражение (2) примет следующий вид:

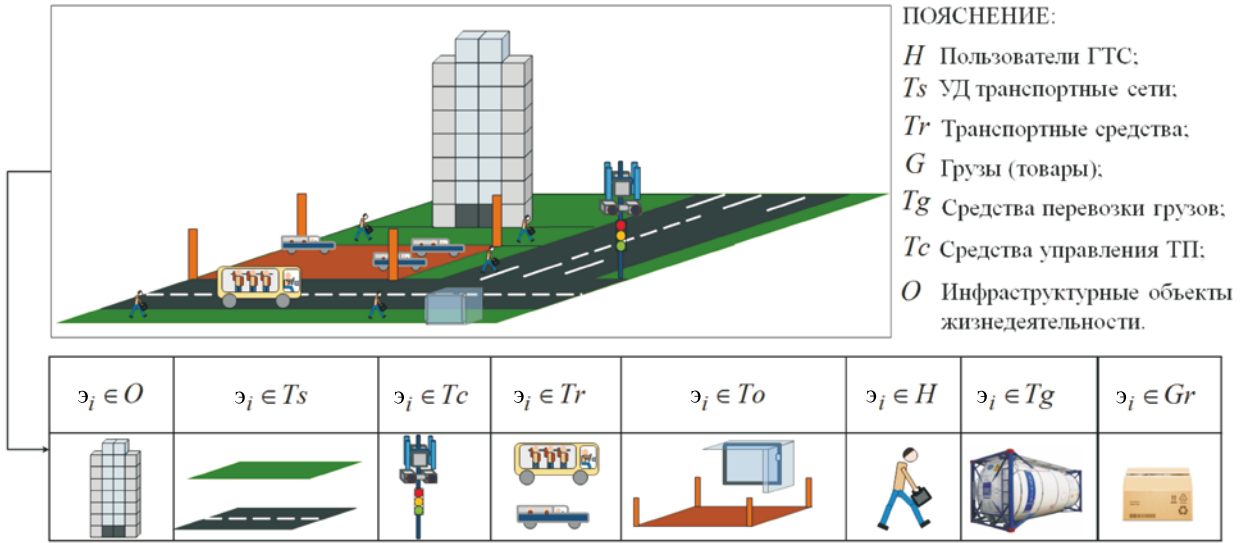


Рис. 1. Классы объектов ГТС

$$f_{\psi}^d : TS = \bigcup_{\psi_1}^{\psi_7} TS_{\psi} =$$

$$= H \cup O \cup To \cup Ts \cup Gr \cup Tg \cup Tc. \quad (3)$$

Реализация процесса управления транспортной мобильности в ГТС обуславливает процедуру идентификации ее элементов.

В общем виде идентификационной нумерацией элементного множества  $TS$  будем называть всюду определенное отображение  $f_N$ , которое каждому объекту из  $TS$  ставит уникальный номер из  $I$ , вида

$$f_N : TS \rightarrow I, \quad (4)$$

где  $I = \{id_{\eta}\}$  – множество уникальных номеров.

Параметризацию элементного множества  $TS$  зададим оператором  $f_{CH}$ , который каждому объекту в сети ставит в соответствие набор характеристик, присущих данному объекту. Процедура параметризации имеет вид:

$$f_{CH} : TS \rightarrow CH, \quad (5)$$

где  $CH = \{ch_{\pi}^{\vartheta_i}, \pi = 1, \dots, n; i = 1, \dots, N\}$  – множество характеристик элементов ГТС.

Характеристика  $ch_{\pi}^{\vartheta_i}$  задается кортежем  $ch_{\pi}^{\vartheta_i} = \langle \text{name}, \{\text{value}\} \rangle$ , где name – имя  $\pi$ -й характеристики,  $\{\text{value}\}$  – область допустимых значений. Область допустимых значений задается перечислением этих зна-

чений, интервалом или функционально, с помощью правил вычисления (измерения) и оценки.

Динамику процессов ГТС зададим временным оператором  $f_T$ , который каждому объекту из  $TS$  ставит в соответствие определенный момент или интервал времени из  $T$ , в следующем виде:

$$f_T : TS \rightarrow [\tau_T^{\text{def}} \vee (\tau_T; \tau_{T+1})], \quad (6)$$

где  $T$  – множество моментов или интервалов времени, на котором задано отношение строгого порядка, то есть  $\tau_1 < \tau_2, \dots, \tau_T < \tau_{T+1}$ ;  $\tau_T^{\text{def}} \in T$  – определенный момент времени;  $(\tau_T; \tau_{T+1}) \in T$  – определенный интервал времени.

Элементы реальной ГТС в информационном представлении модели будем называть агентами [15] вида  $A = \{a_i, i = 1, \dots, N\}$ .

Зададим отображение  $f^{TS-A}$ , которое каждому элементу из  $TS$  ставит в соответствие агента из  $A$ , т. е.

$$f^{TS-A} : TS = \{\vartheta_i, i = 1, \dots, N\} \rightarrow A =$$

$$= \{a_i, i = 1, \dots, N\}, \quad (7)$$

а условие элементного соответствия примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N \vartheta_i = \sum_{i=1}^N a_i. \quad (8)$$

Таким образом, множества  $|TS| = |A|$  равномощны.

Городская транспортная сеть задается графом  $\Gamma^T(V; E) \subset B_i(TS)$ , где  $TI = (To \cup Ts \cup O)$  с множеством вершин  $V = \{v\}$  и множеством дуг сети  $E = \{e\}$ .

Во множестве вершин  $V = \{v\} \subseteq A \subset B_i(TS)$  выделим два подмножества: зарождения ТП —  $S \subseteq V$  и поглощения транспортных потоков (стоки) —  $D \subseteq V$ , удовлетворяющие следующему условию:

$$D, S \subseteq [To \cup Ts \cup O] \subset TS. \quad (9)$$

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 следующего вида:

$$W = \{w = (\partial; \alpha) : \partial \in S, \alpha \in D\}. \quad (10)$$

Тогда матрица транспортных корреспонденций будет задаваться массивом  $\{\rho_w : w \in W\}$ , в котором каждой паре отправления-прибытия  $w = (\partial; \alpha) \in W$  будет поставлен в соответствие  $\rho_w$  определенный объем, пользователей (пассажиров, транспортных средств), которые из пункта  $\partial$  (отправления) должны прибыть в пункт  $\alpha$  (прибытия).

Маршрут (путь), соединяющий вершины  $\partial$  и  $\alpha$ , задается последовательностью дуг (перегонов УДС) 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:

$$P_w = \bigcup_{i=1}^N p_i = \bigcup_i \bigcup_l e_{il}. \quad (11)$$

Введем величину  $x_p$  потока, следуемого по пути  $p \in P$ , такую, что для каждой пары  $w$  потоки  $x_p$  удовлетворяют следующему условию:

$$X_w = \left\{ x_p \geq 0 : p \in P_w, \sum_{p \in P_w} x_p = \rho_w \right\}. \quad (12)$$

Введем количественную величину  $y_e$  потока, следуемого по дуге  $e \in E$  в момент времени  $t \in T$ . Тогда поток на пути вычисляется следующим образом:

$$x_p = \sum_{e \in P} \Theta_{ep} y_e, \quad (13)$$

где

$$\Theta_{ep} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } e \text{ проходит} \\ & \text{через путь } p; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Определим  $\Theta = (\Theta_{ep} : e \in E, p \in P)$  — матрицу инцидентности дуг и путей,  $y = (y_e : e \in E)$  — вектор, описывающий загрузку дуг сети. В матричной форме взаимосвязь потоков по путям и дугам описывается уравнением  $y = \Theta x$ , подробнее см. [3].

Обозначим через  $G_p = \{g_p\}$  удельные затраты пользователей на проезд по пути  $p$ . Поскольку на затраты по одному маршруту может влиять загрузка других путей, то последние  $G_p$  представляют собой функции от загрузки всей сети, то есть  $G_p = G_p(X)$ .

**Модель функционально-полного операторного базиса ГТС.** Функционально-полный операторный базис ГТС управления содержит операторы измерения  $f_M$ , регулирования  $f_R$  и планирования  $f_P$ :

$$f_C = \langle f_M; f_R; f_P \rangle, \quad (14)$$

Оператор измерения состояния  $f_M = \{f_M^{\partial_i}\} = f_N \cup f_{CH} \cup f_T \cup f^{TS-A}$  каждому объекту  $\partial_i \in TS$  ГТС в момент или интервал времени из  $T$  при воздействии  $e_{\partial_i}(t)$  ставит в соответствие регистрируемое состояние  $s_{\partial_i}(t)$  вида:

$$\forall \partial_i \in TS \exists f_M^{\partial_i} : [t; e_{\partial_i}(t); \partial_i] \rightarrow [t; e_{\partial_i}(t), s_{\partial_i}(t)], \quad (15)$$

где  $s_{\partial_i}(t) = t \times id_i \times a_i \times ch_{\pi}^{\partial_i}$  — состояние ОУ, которое задается декартовым произведением или кортежем на множествах  $TS, I, A, CH, T$  и отображает реальное состояние ОУ ГТС в модельной интерпретации;  $e_{\partial_i}(t) = t \times id_j \times a_j \times ch_{\pi}^{\partial_j}, j = 1, \dots, J$  — воздействие на ОУ задается декартовым произведением или кортежем на множествах  $TS, I, A, CH, T$  и отображает состоя-

ние  $j$ -х объектов и факторов ГТС, оказывающих воздействие на ОУ.

Оператор регулирования состояний ОУ ГТС  $f_R = \{f_R^{\varepsilon_i}\} = f_R^H \cup f_R^{TC}$  каждому объекту  $\varepsilon_i \in TS$  ГТС в момент или интервал времени из  $T$  ставит в соответствие регулирующее воздействие  $r_{\varepsilon_i}(t) \in U(TS)$ , вида

$$\forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_R^{\varepsilon_i} : R(TS) \rightarrow r_{\varepsilon_i}(t_R), (16)$$

где  $f_R^{\varepsilon_i}$  – оператор регулирования состояний ОУ ГТС;  $R(TS)$  – множество регулирующих воздействий доступных СУ ГТС;  $r_{\varepsilon_i}(t_R)$  – регулирующее воздействие, поданное на ОУ  $\varepsilon_i \in TS$  в момент  $t_R \in T$ ;  $f_R^H$  – оператор регулирования состояний для пользователя ГТС;  $f_R^{TC}$  – оператор регулирования состояний для ОУ ГТС.

Оператор планирования состояний ОУ ГТС  $f_{\Pi} = \{f_{\Pi}^{\varepsilon_i}\} = f_{\Pi}^H \cup f_{\Pi}^{TS/H}$  каждому объекту  $\varepsilon_i \in TS$  ГТС в момент или интервал времени из  $T$  в ситуации  $sit_0^{\varepsilon_i}(t) = s_{\varepsilon_i}(t) \cup e_{\varepsilon_i}(t)$  ставит в соответствие целевое состояние  $s_p^{\varepsilon_i}(t_p)$  в момент времени  $t_p \in T$ , то есть

$$\forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_{\Pi}^{\varepsilon_i} : sit_0^{\varepsilon_i}(t) \rightarrow s_p^{\varepsilon_i}(t_p), (17)$$

где  $f_{\Pi}^{\varepsilon_i}$  – оператор планирования состояний ОУ ГТС;  $sit_0^{\varepsilon_i}(t)$  – ситуация, в которой находится ОУ ГТС в момент времени  $t \in T$ ;  $s_p^{\varepsilon_i}(t_p)$  – целевое состояние ОУ ГТС в момент  $t_p \in T$ ;  $f_{\Pi}^H$  – оператор планирования состояний для пользователя ГТС;  $f_{\Pi}^{TS/H}$  – оператор планирования состояний для объектов ГТС, кроме пользователей.

Оценка соответствия состояния ГТС требуемому состоянию реализуется через оператор контроля состояний  $f_{CS}$  следующего вида:

$$f_{CS} = \langle f_M \cup f_{\psi}^d; E_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i}; r_{\varepsilon_i}(t_R) \rangle, (18)$$

где  $f_M$  – оператор измерения состояния ОУ;  $f_{\psi}^d$  – оператор классификации;  $r_{\varepsilon_i}(t_R)$  – регулирующее воздействие или величина отклонения текущего состояния от требуемого;  $E_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i} \in TS$  – множество элементов ГТС, оказывающих влияние на объект  $\varepsilon_i$ .

Оператор контроля  $f_{CS}$  содержит систему функций, обеспечивающих определение состояния ОУ (измерение, сбор, уточнение данных об объекте управления) и оценку степени отклонения текущего состояния от

требуемого по заданным критериям эффективности.

Тем самым оператор контроля  $f_{CS}$  для каждого  $\varepsilon_i$  объекта ГТС, находящегося в состоянии  $sit_0^{\varepsilon_i}(t)$  в момент времени из  $T$ , вычисляет величину отклонения  $r_{\varepsilon_i}(t_R)$  от требуемого состояния  $s_p^{\varepsilon_i}(t_p)$ , то есть

$$\forall \varepsilon_i \in TS, t \in T \exists f_{CS}^{\varepsilon_i} : |sit_0^{\varepsilon_i}(t) - s_p^{\varepsilon_i}(t_p)| \rightarrow r_{\varepsilon_i}(t_R). (19)$$

Тогда в зависимости от оператора контроля  $f_{CS}$  функционально-полный операторный базис ГТС способен реализовывать функционал управления на режимах оптимального управления, допустимого управления и потери управления, то есть

$$\forall \varepsilon_i \in TS, f_T, f_{CH}, t = def \exists f_C, U(TS) / \left\{ \begin{array}{l} f_C^{opt}, U(TS)_{opt} \rightarrow \{ch_{\pi}^{AL}\} < \{ch_{\pi}^{rand}\} < \{\overline{ch_{\pi}^{AL}}\} \\ f_C^{AL}, U(TS)_{AL} \rightarrow \{ch_{\pi}^{rand}\} \in CH_{\pi}^{AL} \\ f_C^F, U(TS)_F \rightarrow \{ch_{\pi}^{rand}\} \notin CH_{\pi}^{AL} \end{array} \right. , (20)$$

где  $f_C$  – оператор управления ГТС;  $f_C^{opt}$  – оператор оптимального управления;  $f_C^{AL}$  – оператор допустимого управления;  $f_C^F$  – оператор потери управления;  $\{ch_{\pi}^{AL}\}$  – значения нижней границы множества параметров оптимального управления;  $\{\overline{ch_{\pi}^{AL}}\}$  – значения верхней границы множества параметров оптимального управления;  $\{ch_{\pi}^{rand}\}$  – значения множества  $\pi$ -х параметров;  $CH_{\pi}^{AL}$  – область допустимого управления;  $U(TS)$  – вектор состояния ГТС;  $U(TS)_{opt}$  – ГТС в состоянии оптимального управления;  $U(TS)_{AL}$  – ГТС в состоянии допустимого управления;  $U(TS)_F$  – ГТС в состоянии потери управления.

**Целевая функция управления процессами мобильности в ГТС.** Построение модели управления динамическими ТП целесообразно осуществлять на принципах распределенной СУ, обеспечивающих рациональную самоорганизацию.

В основе модели управления городскими ТП лежит целевая функция управления процессами мобильности в ГТС, реализацию которой осуществляет функционально-полный операторный базис управления.

Целевая функция управления процес-

сами мобильности формируется под воздействием двух составляющих: целевых ориентиров пользователей  $P(H)$  и целевых ориентиров ГТС  $P(TS / H)$ .

Целевые ориентиры пользователей опираются на первый аксиоматический принцип Вардропа и аксиоматический принцип безопасного следования:

- пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты следования, соответствующие их минимальным транспортным расходам ГТС (первый аксиоматический принцип Вардропа), то есть

$$\forall h \in H, h \rightarrow w(\partial; \alpha), w(\partial; \alpha) \rightarrow p : p \in P_w, \\ x_p > 0, \Rightarrow G_p(x) = \min_{p \in P_w} G_p(x_p) = g_w(x_\Sigma), \quad (21)$$

где  $p = e_{1=n}, e_2, \dots, e_{t=k}$ ;  $g_w(x_\Sigma)$  – минимальные транспортные затраты по маршрутам, соединяющим пару  $w \in W$ , при загрузке сети, определяемой вектором  $x_\Sigma$ ;

- продвижение пользователя по пути с минимальными транспортными расходами осуществляется в динамической области безопасной транспортной мобильности.

Под динамической областью безопасной транспортной мобильности понимается область движения  $D_{h_i}^S$ , выбираемая пользователем самостоятельно, исходя из имеющейся информации  $I_{TS}^{h_i}$  об участни-

ках процесса транспортной мобильности, правилах дорожного движения и состоянии транспортной инфраструктуры, посредством функции информационного обеспечения, вида

$$\forall h_i \in H, w(\partial; \alpha), p = e_{1=n}, \dots, \\ e_{t=k} \exists f_{h_i}^S(I_{TS}^{h_i}) \Big|_{t=def} : h_i \rightarrow D_{h_i}^S(e_{def}). \quad (22)$$

Функция информационного обеспечения  $f_{h_i}^S(I_{TS}^{h_i})$  формируется СУ ГТС и предоставляет участникам транспортного процесса информацию о динамической области безопасной транспортной мобильности в следующем виде:

$$D_{h_i}^S \Big|_{t=def} = \left\langle \bigcup_{cl}^{CL} \bigcup_{\psi}^{\Psi} \Theta_{\psi cl} \right\rangle_{t=def} = \\ = \left\langle \frac{(\{\Theta_{11}\} \cup \dots \cup \{\Theta_{\psi 1}\}) \cup \dots}{color_{i=1}} \right\rangle_{t=def} \quad (23) \\ \dots \cup \frac{(\{\Theta_{1CL}\} \cup \dots \cup \{\Theta_{\psi CL}\})}{color_{i=Z}} \Big|_{t=def},$$

где  $D_{h_i}^S$  – динамическая область безопасной транспортной мобильности;  $\Theta = \{\Theta_i\}$  – эле-

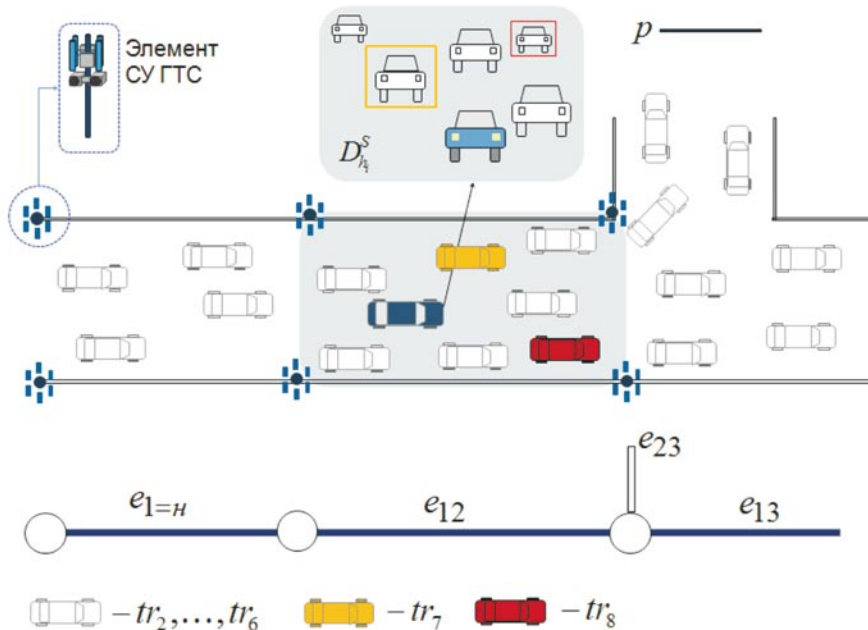


Рис. 2. Динамическая область безопасной транспортной мобильности

менты ГТС;  $CL = \{cl_i\}$  – классы опасности;  $\Psi = \{\psi_i\}$  – классы ГТС;  $t = def$  – определенный момент времени;  $U$  – индекс, указывающий на СУ ГТС.

Поясним выражение (23) на практическом примере 1.

**Пример 1.** Участник транспортного движения  $h_1$ , управляя ТС  $\varepsilon_{h_1} = tr$ , совершает продвижение по пути  $e_{def}$ . Руководствуясь рис. 2, необходимо определить динамическую область безопасной транспортной мобильности  $D_{h_1}^S$  в момент времени  $t = t_{def}$ . Для простоты будем считать, что СУ ГТС разбивает элементы ГТС на три класса опасности:  $CL = \{cl_i, i = 1, 2, 3\}$ ;  $|CL| = 3$  таких, что 1 = бесцветный; 2 = желтый; 3 = красный, а в динамической области безопасной транспортной мобильности (см. рис. 2) находятся подвижные транспортные объекты одного класса  $\psi$  – «легковые автомобили» в количестве  $tr_2, \dots, tr_8$ .

**Решение.** Подставим в выражение (23) исходные данные, в итоге получим:

$$D_{h_1}^S \Big|_{t=def}^U = \left\langle \bigcup_{cl} \bigcup_{\psi} \varepsilon_{\psi cl} \right\rangle_{t=def}^U = \left\langle \frac{(\{tr_2; tr_3; tr_4; tr_5; tr_6\})}{color_{i=1}} \cup \frac{(\{tr_7\})}{color_{i=2}} \cup \frac{(\{tr_8\})}{color_{i=3}} \right\rangle_{t=def}^U.$$

Таким образом, участник транспортного процесса  $h_1$  посредством СУ ГТС, располагая необходимой информацией о потенциальной опасности, исходящей от других участников транспортного процесса, самостоятельно выбирает траекторию движения в ТП в границах участка УДС.

*Целевые ориентиры ГТС* опираются на второй аксиоматический принцип Вардропы и аксиоматический принцип надежного функционирования ГТС:

- пользователи сети выбирают маршруты следования исходя из минимизации общих транспортных расходов (ОТР) ГТС (второй аксиоматический принцип Вардропы);

- ГТС в процессе движения пользователей функционирует в области допустимой надежности.

Покажем, что первый и второй прин-

ципы Вардропы имеют общий системный оптимум, представляющий собой функционал, минимизирующий время ожидания участников транспортного процесса на городской УДС, т. е. чем быстрее пользователь прибудет из пункта отправления в пункт назначения, тем меньше будет величина ОТР.

Обозначим через  $G_{ГТС}$  общие транспортные расходы за период  $T$ , выделим в них переменную часть  $G_{VAR}^{ГТС}$ , которая зависит от динамических характеристик транспортного потока, и постоянную часть  $G_{CONST}^{ГТС}$ , которая зависит только от внешних факторов:

$$G_{ГТС} \Big|_T = [G_{ГТС}^{\Delta} + G_{ГТС}^{\nabla}] \Big|_T = [G_{TF} + G_{EF}^{ГТС}] \Big|_T \rightarrow \min, \quad (24)$$

где  $G_{ГТС}$  – ОТР;  $G_{ГТС}^{\Delta}$  – переменная составляющих ОТР;  $G_{ГТС}^{\nabla} = G_{EF}^{ГТС}$  – постоянная составляющих ОТР, эквивалентная расходам, связанным с влиянием внешних факторов;  $G_{TF}$  – ОТР, зависящие от динамических характеристик транспортного потока;  $TF$  – индекс транспортного потока.

Множество ПТО в обозначениях (3) представляет собой выражение  $TF = TR \cup H \cup Gr \cup Tg$ .

Отбросим постоянную часть ОТР, тогда:

$$G_{ГТС} \Big|_T \sim G_{TF} \Big|_T. \quad (25)$$

Рассмотрим подробнее характеристики, от которых зависит  $G_{TF}$ . Таковыми, согласно [11], являются: величина потока –  $X$ , интенсивность движения потока –  $M$ , время движения потока –  $TM$ , добротность перемещения потока по сети ГТС –  $QM$ ; пропускная способность сети –  $CM$ . Таким образом,  $G_{TF}$  примет следующий вид:

$$G_{TF} = G_{TF}(X; M; TM; QM; CM). \quad (26)$$

Согласно [11] множеству показателей  $[X; M; TM; QM; CM]$  соответствует интегральный показатель  $TM(X)$  – время движения ТП, следовательно, возможен переход следующего вида:

$$G_{TF}(X; M; TM; QM; CM) \sim G_{TF}(TM(X)), \quad (27)$$

где  $X$  – величина ТП;  $M$  – интенсивность ТП;  $TM$  – время движения ТП;  $QM$  – добротность перемещения ТП;  $CM$  – пропускная способность ГТС.

Тогда зависимость (27) может быть выражена через функцию ограничений движения по времени [18, 19] вида:

$$tm_i = \tau_i^0 \left[ 1 + a \left( \frac{fx_i}{cm_i} \right)^b \right], \quad (28)$$

где  $\tau_i^0$  – время свободного движения по  $i$ -му пути;  $fx_i$  – ТП на  $i$ -м пути;  $cm_i > 0$  – пропускная способность  $i$ -го пути;  $tm_i > 0$  – время прохождения ТП по  $i$ -му пути;  $a, b$  – калибровочные коэффициенты.

Переходя от одного пути к целостной ГТС, второй принцип Вардропа становится достижимым при оптимизации с ограничениями, параметрическое решение которой выглядит как

$$TM = \min_{fx} \sum_{i=1}^N \tau_i^0 \left[ 1 + a \left( \frac{fx_i}{cm_i} \right)^b \right], \quad (29)$$

$$X = \sum_i^N fx_i, \quad fx_i \geq 0,$$

где  $fx = (fx_1, \dots, fx_i, \dots, fx_n)$  – вектор распределения ТП  $X$  по путям.

Следовательно, сопоставляя (21) и (29), получим условие оптимума по времени следующего вида:

$$g_w(x_\Sigma) \sim \min[tm_w(x_\Sigma)], \quad (30)$$

т. е. временные затраты  $g_w$  на прохождение транспортного потока  $x_\Sigma$  по маршруту, соединяющему пару  $w \in W$ , должны быть минимальны.

В условиях реального времени соблюдение участником дорожного движения (ДД) целевых ориентиров пользователя и ГТС идет через принятие решения о выборе кратчайшего по времени маршрута движения из пункта отправления в пункт назначения. Кратчайший по времени маршрут вычисляется бортовым навигатором ТС или персональным планировщиком участника ТП с использованием информации, полученной от городской системы транспортно-

логистического мониторинга.

Городская система транспортно-логистического мониторинга предоставляет оперативную информацию о средней скорости на участках УДС в интересующий пользователя интервал времени, а бортовая система вычисляет кратчайший по времени путь с использованием алгоритмов Форда-Беллмана или Дейкстры [20].

В условиях реального времени выражение (28) имеет следующий вид:

$$tm_i \Big|_{\tau=def} = \frac{S_i}{V_i^{cp}} \Big|_{\tau=def} =$$

$$= \begin{cases} n_i \leq n_i^{lim} & V_i^{cp} \Big|_{\tau=def} = V_i^{измер} \Big|_{\tau=def} \leq V_i^{доп} \\ n_i > n_i^{lim} & V_i^{cp} \Big|_{\tau=def} = V_i^{измер} \Big|_{\tau=def} \end{cases}, \quad (31)$$

а задача оптимизации (29) имеет вид:

$$U_h^{cy ГТС} \Big|_{\tau=def} : \left[ \{tm_i(p_i)\}_i^N \rightarrow \min_{\{p_i\}} tm_i(p_i), \quad (32)$$

$$P_{w=(\partial;\alpha)} = \{p_i\} \Big|_{\tau=def},$$

где  $U_h^{cy ГТС}$  – функционал БС ТС;  $\{tm_i(p_i)\}$  – временное множество прохождения пути из точки отправления  $\partial$  в точку назначения  $\alpha$  маршрутами  $\{p_i\}$ ;  $\tau = def$  – время обращения пользователя  $h_i$  к бортовой системе (БС) транспортного средства.

Поясним выполнение первого целевого ориентира ГТС на примере нахождения кратчайшего по времени маршрута для пользователя, планирующего из точки отправления  $\partial$  прибыть в пункт назначения  $\alpha$ .

Пример 2. Участник ДД  $h_i$  на ТС, находясь на перекрестке ул. Орджоникидзе и пр. Гагарина, планирует прибыть в район встречи, находящийся в Парке Победы (рис. 3 а). Технические характеристики УДС, ТС и транспортная обстановка известна (рис. 3 б). Необходимо определить путь, который будет рекомендован СУ ГТС участнику ДД, и его расчетные характеристики.

Решение. Располагая информацией





Рис. 3. Выбор маршрута – а; регистрация скорости потока ТС на УДС – б

о местонахождении пункта прибытия участника ДД, скорости движения ТП на участках УДС в реальном времени, а также технических характеристиках УДС, бортовая система транспортного средства участника ДД – навигатор – построит оптимальный путь следования. Граф возможного пути следования участника ДД представлен на рис. 4. Участник ДД должен из вершины 4 прибыть в вершину 7. Оптимизация

маршрута следования может быть выполнена СУ ГТС по параметру расстояния или по параметру времени. Для объективности выполним оптимизацию маршрута по обоим параметрам. Кратчайший маршрут вычислим с помощью алгоритма Форда–Беллмана и Дейкстры [19]. Обратим внимание на тот факт, что в случае оптимизации маршрута по одному из параметров, например, расстоянию, СУ ГТС может

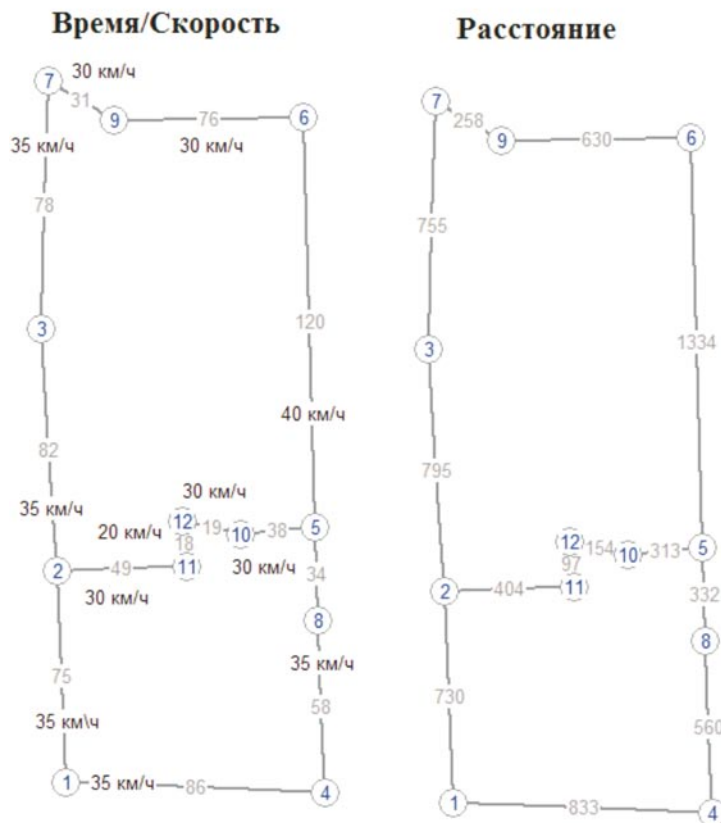


Рис. 4. Граф маршрута ТС

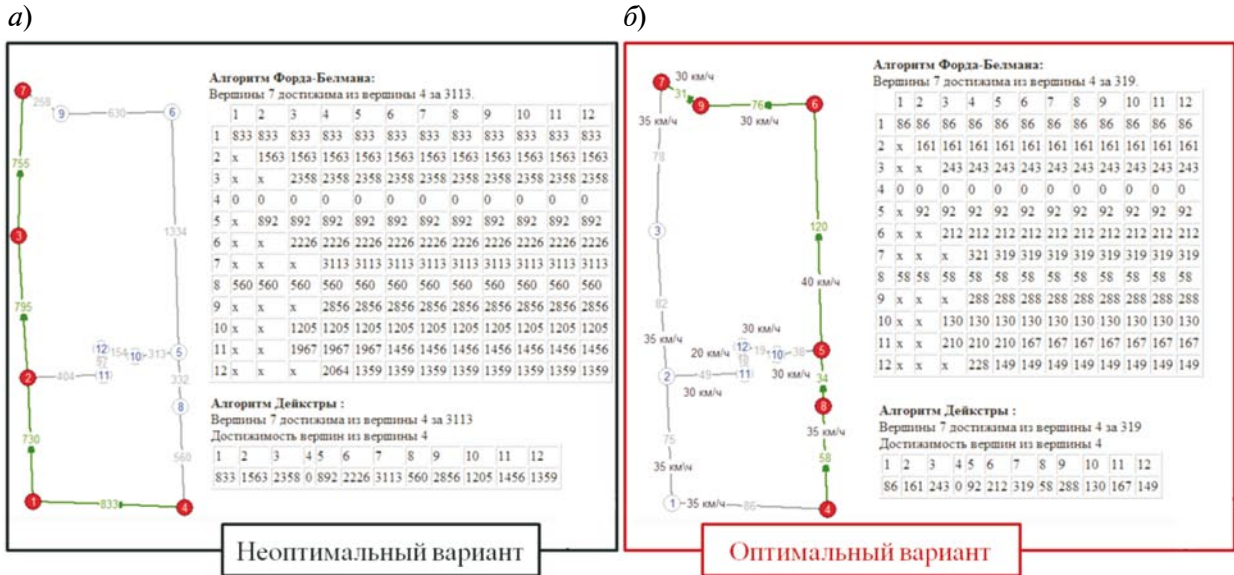


Рис. 5. Кратчайший путь по расстоянию – а; кратчайший путь по времени – б

предложить участнику ДД маршрут 4-1-2-3-7 протяженностью 3133 м (рис. 5 а). Однако, руководствуясь первым целевым ориентиром ГТС и первым целевым ориентиром пользователя, система произведет расчет с учетом (30)–(32), выбрав в качестве критерия оптимизации «время следования», и, таким образом, предложит участнику ДД оптимальный маршрут следования 4-8-5-6-9-7 длительностью 319 с (рис. 5 б).

Рассмотрев первый целевой ориентир СУ ГТС, перейдем к рассмотрению второго целевого ориентира СУ ГТС.

Множество значений характеристик  $CH^{\gamma_i}$  объекта  $\gamma_i$  разбивается на допустимые и недопустимые, в соответствии со следующим выражением:

$$CH^{\gamma_i} = CH_{\gamma_i}^{AL} \cup CH_{\gamma_i}^{IR}, \quad (33)$$

где  $\gamma_i$  – объекты ГТС такие, что  $\gamma_i \in (Ts \cup To \cup Tc)$ ;  $CH_{\gamma_i}^{AL}$  – множество допустимых значений характеристик  $CH^{\gamma_i}$  (AL – allowable – допустимый);  $CH_{\gamma_i}^{IR}$  – множество недопустимых значений характеристик  $CH^{\gamma_i}$  (IR – irremissible – недопустимый).

Таким образом, формируется область допустимых и предельных значений параметров объектов ГТС, отклонение от которых влечет к ухудшению работы и потере

управляемости ГТС.

Условие работоспособности ГТС в области допустимой надежности запишем в следующем виде:

$$\forall \gamma_i \in (Ts \cup To \cup Tc), f_M; f_R; f_{\Pi}; f_{CS}; f_{\Psi}^d, \forall t, \quad (34)$$

$$\exists f_C : u_{\gamma_i} \xrightarrow{r_{\gamma_i}^p(t)} \{ch_{\pi}^{\gamma_i}, \pi = 1, n\} \in CH_{\pi}^{AL},$$

где  $f_{CS}$  – оператор контроля состояния ГТС;  $u_{\gamma_i}$  – вектор состояния объекта  $\gamma_i$ ;  $r_{\gamma_i}^p(t_s)$  – регулирующее воздействие в момент времени  $t_s$ , удерживающее объект  $\gamma_i$  в области допустимой надежности средствами  $P$ .

Выражение (34) говорит о том, что для любого объекта  $\gamma_i$  из множества  $(Ts \cup To \cup Tc)$ , который находится в поле действия операторов ГТС (оператора изменения состояний  $f_M$ , оператора регулирования состояний  $f_R$ , оператора планирования изменения состояний  $f_{\Pi}$ , оператора контроля состояний  $f_{CS}$ , оператора классификации состояний  $f_{\Psi}^d$ ), существует оператор управления объектом  $\gamma_i$ , который удерживает характеристики объекта  $\gamma_i$  в области допустимой надежности при помощи регулирующих воздействий  $r_{\gamma_i}^E(t)$ . Поясним выполнение второго целевого ориентира ГТС на примере работы системы управления эксплуатационным состоянием городской УДС.



Рис. 6. Участок городской УДС с элементами СУ ГТС

Пример 3. На участке № 1 четырехполосной автомобильной дороги группы А протяженностью 70 м и шириной 15 м СУ ГТС зарегистрировала следующие характеристики: повреждения покрытия общей площадью  $S = 36 \text{ м}^2$ ; уровень яркости и освещенности, соответственно  $L = 0,2 \text{ кл/м}^2$  и  $E = 1,2 \text{ Лм}$  от систем дорожного освещения Л1 и Л2 на площади  $450 \text{ м}^2$  (рис. 6). Техническое обслуживание участка УДС № 1 осуществляет организация ООО ДЭС-1. Необходимо определить регулирующее воздействие, которое окажет СУ ГТС для того, чтобы восстановить работоспособность участка городской УДС.

Решение. Элементы СУ ГТС регистрируют повреждения дорожного покрытия, превышающие допустимые нормы в 24 раза ( $36/1,5 = 24$ ), а снижение требуемого уровня освещенности – в 8 раз ( $1,6/0,2 = 8$ ).

Регулирующим воздействием СУ ГТС будет выдача предписания дорожно-эксплу-

атационной службе о необходимости:

проведения срочных ремонтных работ на участке № 1 по восстановлению должного уровня яркости до  $1,6 \text{ кл/м}^2$  и освещенности до  $20 \text{ Лм}$ ;

восстановления дорожного покрытия с требуемыми нормативами – не более  $1,5 \text{ м}^2$  повреждений на  $1000 \text{ м}^2$ ;

выдачи предупредительных предписаний участникам транспортного процесса.

Формальная запись предписаний показана на рис. 7.

Таким образом, выполнение второго целевого ориентира СУ ГТС позволяет удерживать объекты ГТС в состоянии требуемой надежности и оперативно реагировать на возникновение аварийных ситуаций.

Модели управления городскими транспортными потоками, построенные на основе целевой функции управления (целевые ориентиры пользователя и ГТС), отражают принцип рациональной самоорганизации.

$$\begin{aligned}
 U_{[\text{участок } \#1]} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{яркость } L=0,02 \text{ кл/м}^2 \\ \text{освещенность } E=1,2 \text{ Лк} \\ \text{ПДП } S=36 \text{ м}^2 \text{ на } 1000 \text{ м}^2 \end{array} \right\} \xrightarrow{r_{[\text{ООО ДЭС-1}]}^{[\text{участок } \#1]}(t_{\text{отпр}})} \left\{ \begin{array}{l} L=1,6 \text{ кл/м}^2 \\ E=20 \text{ Лк} \\ S=0,3 \text{ м}^2 \text{ на } 1000 \text{ м}^2 \end{array} \right\} \\
 r_{[\text{участок } \#1]}^{[\text{ООО ДЭС-1}]}(t_{\text{отпр}}) &= \left[ \begin{array}{l} L=0,02 \text{ кл/м}^2 \xrightarrow{\uparrow} L=1,6 \text{ кл/м}^2 \\ E=1,2 \text{ Лк} \xrightarrow{\uparrow} E=20 \text{ Лк} \end{array} \right] \xrightarrow{\text{ремонт } \rightarrow \text{Л1, Л2}} \left[ \begin{array}{l} S=36 \text{ м}^2 \xrightarrow{\downarrow} S=0,3 \text{ м}^2 \\ T=5 \text{ сут} \end{array} \right] \\
 r_{[\text{участок } \#1]}^{[\text{Участники ТП}]}(t_{\text{отпр}}) &= \left[ \begin{array}{l} \text{Внимание: на участке } \#1 \text{ нарушена освещенность } \rightarrow L=0,02 \text{ кл/м}^2 \\ E=1,2 \text{ Лк} \\ \text{Внимание: на участке } \#1 \text{ повреждено дорожное покрытие } \rightarrow S=36 \text{ м}^2 \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Рис. 7. Формальная запись предписаний

↑, ↓ – снизить и увеличить; → – знак импликации; ∧ – знак конъюнкции

Информационное наполнение моделей может осуществляться на основе достоверной информации, поступающей с системы городского транспортно-логистического мониторинга. Функциональная структура моделей позволяет учитывать динамические состояния и параметры подвижных и стационарных транспортных объектов.

Внедрение предложенных моделей на принципах [21] способно повысить пропускную способность транспортной системы мегаполиса [22] за счет устранения нерационального распределения ТП, а также надежность [23] и управляемость – за счет информирования участников транспортного процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. European Union and IRU. A Scientific Study European Truck Accident Causation. The International Road Transport Union. 2007. P. 19 [электронный ресурс]/ URL: [http://ec.europa.eu/transport/roadsafety\\_library/publications/](http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/)
2. **Кривова В.Д.** Аналитический доклад. К IV междунар. конгрессу Безопасность на дорогах ради безопасности жизни // Аналитический вестник. 2012. № 26(469). 150 с. [электронный ресурс]/ URL: [http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/2012/26\\_469/VSF\\_NEW\\_26\\_469.pdf](http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/2012/26_469/VSF_NEW_26_469.pdf)
3. **Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.** Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 360 с.
4. **Семенов В.В.** Математические методы моделирования транспортных потоков // Новое в синергетике. Новая реальность, новые проблемы, новое поколение. М.: Наука, 2007. С. 102–133.
5. **Семенов В.В.** Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. М.: ИПМ РАН, 2004. 44 с.
6. **Семенов В.В.** Смена парадигмы в теории транспортных потоков. М.: ИПМ РАН, 2006. 32 с.
7. **Смирнов Н.Н., Киселев А.Б., Никитин В.Ф., Юмашев М.В.** Математическое моделирование автомобильных потоков на магистралях // Вестник Московского университета. Математика и механика. 2000. № 4. С. 39–44.
8. **Швецов В.И.** Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
9. **Крылатов А.Ю.** Оптимальные стратегии управления транспортными потоками на сети из параллельных каналов // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2014. № 2. С. 121–130.
10. **Селиверстов Я.А.** Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 1. С.43–49.
11. **Захаров В.В., Крылатов А.Ю.** Системное равновесие транспортных потоков в мегаполисе и стратегии навигаторов: теоретико-игровой подход // Математическая теория игр и ее приложения. 2012. Т. 4. № 4. С. 23–44.
12. **Гасников А.В., Дорн Ю.В., Нестеров Ю.Е., Шпирко С.В.** О трехстадийной версии модели стационарной динамики транспортных потоков // Математическое моделирование. 2014. № 6 (26). С. 34–70.
13. **Султанахмедов М.А.** Управление городскими пассажиропотоками на основе графовых моделей // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2. С. 55–60.
14. **Белый О.В., Малыгин И.Г., Цыганов В.В., Еналеев А.К., Савушкин С.А.** Математические модели оптимизации структуры системы управления крупномасштабной транспортной корпорации // Транспорт: наука, техника, управление. 2014. № 1. С. 7–16.
15. **Селиверстов С.А.** Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 2 (24). С. 92–100.
16. **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.
17. **Селиверстов Я.А.** О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса // Наукосведение. 2014. № 5(24) [электронный ресурс]/ URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/159TVN514.pdf>
18. **Lohse D.** Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice// Working Paper. Dresden: Technical University of Dresden, 2004. Pp. 1–15.
19. **Лозе Д.** Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для лично-

го и служебного автотранспорта. Обзор теорий моделирования. Дрезден: Дрезденский технический ун-т, 2007. 15 с.

20. **Седжвик Р.** Фундаментальные алгоритмы на C++. Алгоритмы на графах. Пер. с англ. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. 496 с.

21. **Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А.** Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // *Наукоедение*. 2014. № 3(22). С. 1–33. [электронный ресурс]/ URL: [http://naukovedenie.ru/](http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN314.pdf)

[PDF/74TVN314.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN314.pdf)

22. **Селиверстов Я.А.** Основы теории субъ-ективных функциональных возможностей рационального выбора // *Наукоедение*. 2014. № 4(23). С. 1–39. [электронный ресурс]/ URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/90EVN414.pdf>

23. **Куватов В.И., Шаталова Н.В., Онов В.А.** Пути ускорения перевозок и повышения безопасности автомобильного транспорта // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2013. № 2 (26). С. 26–33.

## REFERENCES

1. *European Union and IRU. A Scientific Study European Truck Accident Causation*, The International Road Transport Union, 2007, P. 19. Available: [http://ec.europa.eu/transport/roadsafety\\_library/publications/](http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/)

2. **Krivova V.D.** Analiticheskiy doklad. K IV mezhdunarodnomu kongressu Bezopasnost na dorogah radi bezopasnosti zhizni, *Analiticheskiy vestnik*, 2012, No. 26(469), 150 p. Available: [http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/2012/26\\_469/VSF\\_NEW\\_26\\_469.pdf](http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/2012/26_469/VSF_NEW_26_469.pdf)

3. **Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskiy Ye.A., Kholodov Ya.A., Shamray N.B.** *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov*. Moscow: MFTI Publ., 2010, 360 p. (rus)

4. **Semenov V.V.** Matematicheskiye metody modelirovaniya transportnykh potokov, *Novoye v sinergetike. Novaya realnost, novyye problemy, novoye pokoleniye*. Moscow: Nauka Publ., 2007, Pp. 102–133. (rus)

5. **Semenov V.V.** *Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki transportnykh potokov megapolisa*. Moscow: IPM RAN Publ., 2004, 44 p. (rus)

6. **Semenov V.V.** *Smena paradigmy v teorii transportnykh potokov*. Moscow: IPM RAN Publ., 2006, 32 p. (rus)

7. **Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nikitin V.F., Yumashev M.V.** Matematicheskoye modelirovaniye avtomobilnykh potokov na magistralyakh, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2000, No. 4, Pp. 39–44. (rus)

8. **Shvetsov V.I.** Matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov, *Avtomatika i telemekhanika*, 2003, No. 11, Pp. 3–46. (rus)

9. **Krylatov A.Yu.** Optimalnyye strategii upravleniya transportnymi potokami na seti iz parallelnykh kanalov, *Vestnik SPbGU. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessyi upravleniya*, 2014, No. 2, Pp. 121–130. (rus)

10. **Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye protsessov raspredeleniya i razvitiya transportnykh potokov v megapolisakh, *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, No. 1, Pp. 43–49. (rus)

11. **Zakharov V.V., Krylatov A.Yu.** Sistemnoye ravnovesiye transportnykh potokov v megapolise i strategii navigatorov: teoretiko-igrovoy podkhod, *Matematicheskaya teoriya igr i yeye prilozheniya*, 2012, Vol. 4, No. 4, Pp. 23–44. (rus)

12. **Gasnikov A.V., Dorn Yu.V., Nesterov Yu.Ye., Shpirko S.V.** O trekhstadiynoy versii modeli statsionarnoy dinamiki transportnykh potokov, *Matematicheskoe modelirovanie*, 2014, No. 6(26), Pp. 34–70. (rus)

13. **Sultanakhmedov M.A.** Upravleniye gorodskimi passazhiropotokami na osnove grafovyykh modeley, *Vestnik AGTU. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2010, No. 2, Pp. 55–60. (rus)

14. **Belyy O.V., Malygin I.G., Tsyganov V.V., Yenaleyev A.K., Savushkin S.A.** Matematicheskiye modeli optimizatsii struktury sistemy upravleniya krupnomasshtabnoy transportnoy korporatsii, *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye*. 2014, No. 1, Pp. 7–16. (rus)

15. **Seliverstov S.A.** Metody i algoritmy intellektualnogo analiza protsessa organizatsii transportnoy sistemy. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2014, No. 2 (24), Pp. 92–100. (rus)

16. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** O logiko-algebraicheskom predstavlenii transportno-logisticheskogo protsessa. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 4(200), Pp. 57–68. (rus)

17. **Seliverstov Ya.A.** O postroyenii modeli klassifikatsii mezhagentnykh otnosheniy sotsialno-ekonomicheskogo povedeniya gorodskogo naseleniya v sistemakh upravleniya transportnymi potokami megapolisa, *Naukovedeniye*, 2014, No. 5(24), Pp. 1–39. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/159TVN514.pdf>

18. **Lohse D.** Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice, *Working Paper*. Dresden: Technical University of

Dresden, 2004, Pp. 1–15.

19. **Loze D.** *Modelirovaniye transportnogo predlozheniya i sprosa na transport dlya lichnogo i sluzhebного avtotransporta. Obzor teoriy modelirovaniya.* Drezden: Drezdenskiy Tekhnicheskiy Universitet, 2007, 15 p. (rus)

20. **Sedzhvik R.** *Fundamentalnyye algoritmy na S++.* *Algoritmy na grafakh.* St. Petersburg: ООО «DiaSoftYuP» Publ., 2002, 496 p. (rus)

21. **Seliverstov C.A., Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii beskonfliktного nepreryvnogo transportnogo protsessа dvizheniya, *Naukovedeniye*, 2014,

No. 3(22), Pp. 1–33. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN314.pdf>

22. **Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii subyektivnykh funktsionalnykh vozmozhnostey ratsionalnogo vybora, *Naukovedeniye*, 2014, No. 4(23), Pp. 1–39. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/90EVN414.pdf>

23. **Kuvatov V.I., Shatalova N.V., Onov V.A.** Puti uskoreniya perevozok i povysheniya bezopasnosti avtomobilnogo transporta, *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2013, No. 2 (26), Pp. 26–33. (rus)

---

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

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

E-mail: maxwell\_8-8@mail.ru

**SELIVERSTOV, Yaroslav A.** *Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences.*

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

E-mail: maxwell\_8-8@mail.ru

**СТАРИЧЕНКОВ Алексей Леонидович** – заведующий лабораторией проблем безопасности транспортных систем Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН, доктор технических наук.

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

E-mail: allstar72@mail.ru

**STARICHENKOV, Aleksey L.** *Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences.*

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

E-mail: allstar72@mail.ru