

ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Ю. В. Федюкин¹, Е. И. Минаков², И. Е. Агуреев³, Н. И. Хазов⁴, В. М. Чайковский⁵

^{1, 2, 3, 4} Тульский государственный университет, Тула, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ aakhromeshin@yandex.ru, ² EMinakov@bk.ru, ³ agureev-igor@yandex.ru, ⁴ nikita.hazov511@yandex.ru, ⁵ rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Тема оценки эффективности интеллектуальных транспортных систем на сегодня актуальна и важна. Она оказывает управляющие воздействия на транспортную систему города (агломерации) и обеспечивает достижение необходимого уровня индикаторов в части пропускной способности, безопасности дорожного движения, уровня загруженности улично-дорожной сети и обслуживания дорожного движения. *Материалы и методы.* Сформулирована обобщенная математическая модель интеллектуальной транспортной системы, содержащая процесс управления в общем виде; представлены варианты и методика решения задачи определения эффективности внедрения интеллектуальной транспортной системы. Расширено описание модели процесса управления и интенсивностью операций для возможности рассматривать задачи равновесия транспортных систем с учетом функционирования информационных систем автомобильного транспорта. *Результаты и выводы.* Таким образом, сформулирована математическая модель эффективности интеллектуальных транспортных систем, которая позволяет выполнить постановку и решение задачи об изменении распределения элементов транспортной системы по подмножествам состояний за счет внедрения инструментальных подсистем интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: транспортная система, интеллектуальная транспортная система, математическая модель, транспортный процесс, эффективность интеллектуальной транспортной системы

Для цитирования: Федюкин Ю. В., Минаков Е. И., Агуреев И. Е., Хазов Н. И., Чайковский В. М. Построение и применение модели эффективности интеллектуальной транспортной системы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 77–87. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-7

ON THE ISSUE OF DEVELOPING A MODEL OF A TRANSPORT SYSTEM OF INDIVIDUAL MOVEMENTS WITH MANAGEMENT

Yu.V. Fedyukin¹, E.I. Minakov², I.E. Agureev³, N.I. Khazov⁴, V.M. Chaykovskiy⁵

^{1, 2, 3, 4} Tula State University, Tula, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ aakhromeshin@yandex.ru, ² EMinakov@bk.ru, ³ agureev-igor@yandex.ru, ⁴ nikita.hazov511@yandex.ru, ⁵ rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The topic of evaluating the effectiveness of intelligent transport systems is relevant and important today. It exerts control effects on the transport system of the city (agglomeration) and ensures the achievement of the necessary level of indicators in terms of capacity, road safety, traffic congestion and traffic maintenance. *Materials and methods.* A generalized mathematical model of an intellectual transport system is formulated, containing the management process in a general form; The variants and methods of solving the problem of determining the effectiveness of the implementation of an intelligent transport system are presented. The description of the model of the management process and the intensity of operations has been expanded to allow considering the tasks of balancing transport systems, taking into account the functioning of information systems of motor transport. *Results and conclusions.* Thus, a mathematical model of the efficiency of intelligent transport systems has been formulated, which allows us to formulate and solve the problem of changing the distribution of elements of a transport system across subsets of states through the introduction of instrumental subsystems of intelligent transport systems.

Keywords: transport system, intelligent transport system, mathematical model, transport process, efficiency of intelligent transport system

For citation: Fedyukin Yu.V., Minakov E.I., Agureev I.E., Khazov N.I., Chaykovskiy V.M. On the issue of developing a model of a transport system of individual movements with management. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):77–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-7

Введение

В последнее время набирает популярность тема оценки эффективности интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Известно несколько ключевых публикаций, в которых выполнены следующие исследования:

- 1) определен термин эффективности ИТС [1–7];
- 2) разработаны подходы к классификации методов оценки эффективности ИТС [8–10];
- 3) выполнены эксперименты и натурные обследования по теме эффективности ИТС [1, 11–14];
- 4) определены частные методы решения задач об эффективности ИТС [15–18];
- 5) разработаны подходы к построению теории ИТС [19–21].

Интеллектуальная транспортная система в рамках современных представлений – это сложный комплекс модулей, подсистем, периферийного оборудования, оснащенных программным обеспечением (с использованием искусственного интеллекта), который оказывает управляющие воздействия на транспортную систему города (агломерации) и обеспечивает достижение необходимого уровня индикаторов в части пропускной способности, безопасности дорожного движения, уровня загруженности улично-дорожной сети и обслуживания дорожного движения.

Реализованная модель эффективности ИТС может рассматриваться в двух пространственно-временных аспектах:

- 1) локальный транспортный процесс множества участников дорожного движения на отдельном участке улично-дорожной сети с течением короткого, ограниченного интервала времени; при этом имеет значение фактор конкуренции отдельных транспортных процессов участников дорожного движения;
- 2) нелокальные (макроскопические) эффекты функционирования транспортной системы, которые складываются из множества локальных транспортных процессов.

ИТС, таким образом, определяется управлением набором транспортных процессов, совершенных последовательно, с использованием транспортных средств различных видов транспорта. Множество транспортных процессов отдельных индивидов составляет картину транспортной подвижности всей транспортной системы. Учитывая циклический характер транспортных процессов (или циклический характер функционирования ТС), можно модель эффективности интеллектуальной транспортной системы представить в виде схемы (рис. 1).

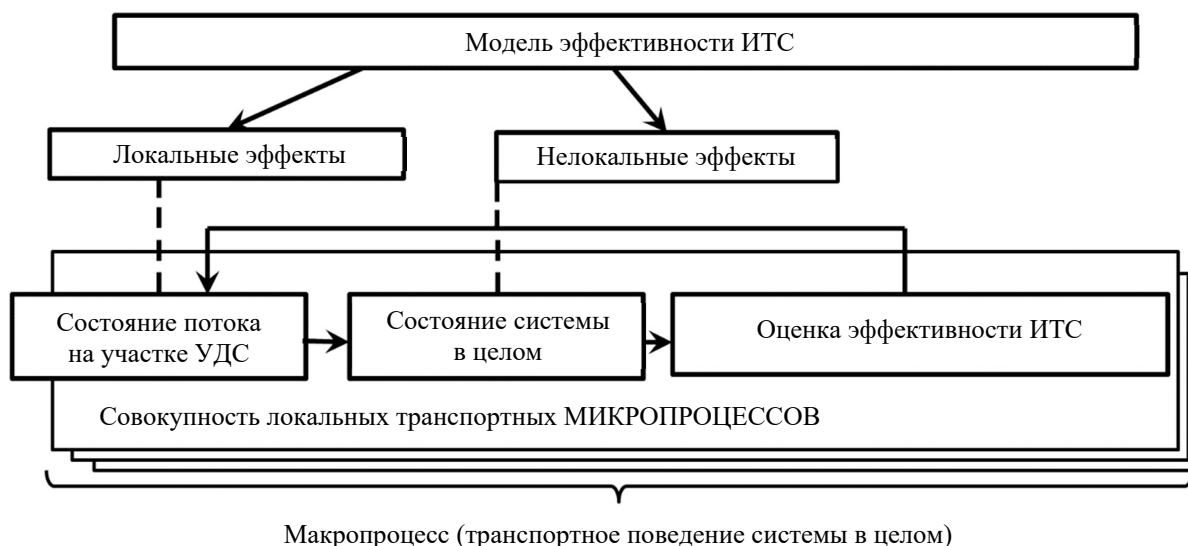


Рис. 1. Применение теории макросистем для оценки эффективности ИТС

На основании выводов, которые можно сделать из анализа источников, можно поставить вопрос о том, каким образом можно определять эффективность тех или иных мероприятий при внедрении подсистем ИТС. Для ответа на данный вопрос предполагается использование гипотезы о нелокальном характере эффективности ИТС.

Эта гипотеза звучит так: внедрение инструментальных подсистем ИТС, устанавливаемых на территории городских и/или агломерационных транспортных систем, приводит к множеству локальных изменений в движении транспортных средств. При этом на отдельных участках УДС показатели транспортного потока и уровня обслуживания дорожного движения могут меняться как в положительном, так и в отрицательном направлении. Общая эффективность ИТС может быть определена для транспортной системы в целом и имеет нелокальный характер.

Формулировка гипотезы в таком виде позволяет построить следующий научный подход при построении модели эффективности ИТС:

1) считается, что каждая инструментальная подсистема ИТС соответствует определенному множеству элементов транспортной системы и изменяет их поведение;

2) нелокальный характер оценки эффективности позволяет использовать известный научный подход – теорию транспортных макросистем;

3) тогда появляется возможность для каждой инструментальной подсистемы ИТС построить отдельную макроскопическую модель и рассчитать состояния равновесия (равновесные распределения элементов транспортной системы по состояниям) до и после внедрения мероприятий ИТС;

4) равновесные состояния транспортной макросистемы до и после внедрения мероприятий ИТС могут сравниваться между собой на уровне системы в целом и дать заключение по нескольким показателям: а) общий уровень обслуживания дорожного движения; б) степень загруженности УДС в целом; в) общий уровень расходования ресурсов в транспортной системе и др.

Отметим, что локальные транспортные микропроцессы (см. рис. 1) представляют собой множество стохастически действующих элементов, поведение которых трудно прогнозируется, а их взаимодействие может влиять на эффективность каждого из них в противоположных направлениях. Однако на уровне макросистемы в целом эффективность транспортной системы в целом может увеличиться. Таким образом, с помощью макроскопического моделирования можно выявить наиболее рациональный вариант внедрения ИТС с точки зрения повышения эффективности транспортной системы в целом.

Транспортная система, как известно, по своей природе является сложной, так как налицо все признаки сложности. Напомним определение сложных систем по А. И. Олемскому [25]: «особую актуальность приобрели исследования коллективного поведения, проявляющегося в самоорганизации физических, биологических, социальных и других систем. Благодаря тому что их поведение может изменяться непредсказуемым образом в зависимости от состояния их составляющих и внешних условий, такие системы получили название сложных».

Таким образом, разрабатываемые методики должны учитывать сложность транспортных систем именно в том смысле, как это трактуется в теории сложных систем.

Следует отметить, что в научной литературе немного результатов, касающихся количественных оценок эффективности ИТС, а используемые методы не имеют достаточной методологической основы. В настоящей работе предлагается и обосновывается возможность использования теории макросистем к оценке эффективности мероприятий ИТС.

Таким образом, основные направления дальнейших исследований могут быть следующие:

- разработка теоретического аппарата для описания эффективности ИТС;
- разработка математической модели интеллектуальной транспортной системы;
- построение численных алгоритмов решения задач оценки эффективности ИТС.

В настоящей работе поставлена цель – сформулировать обобщенную математическую модель эффективности ИТС, а также указать численную схему решения поставленных задач.

Материалы и методы

В одной из работ, касающихся моделирования транспортных макросистем [22–24], приведена математическая модель, которую мы здесь будем использовать для достижения поставленной в статье цели. Указанная модель построена на основе использования подходов теории макросистем и описывает транспортную систему, состоящую из элементов (в данном случае транспортных средств, которые могут находиться в различных состояниях, относящихся к выбранному подмножеству состояний, например, распределение по парковочному пространству или по участкам улично-дорожной сети (УДС)):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\
 \mathbf{p} = \mathbf{p}(t); \\
 \mathbf{q} = \mathbf{q}(t); \\
 \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\
 V(t) = \{V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^{v_f} n_v(t) | v \in r_\alpha\}; \\
 v = 1, \dots, v_f(t); \\
 \pi_v = \pi_v(t); \\
 \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{v_f}(t)\}; \\
 G(t) = g_v \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\
 H(V^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m V_n \ln \frac{V_n}{a_n} - (G_n + V_n) \ln(G_n + V_n) \rightarrow \max,
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где k – индекс (номер) интервала времени $\Delta\tau_k$; K – число временных интервалов $\Delta\tau_k$; $\tilde{\Gamma}$ – граф УДС; \mathbf{p} – матрица транспортных связей; \mathbf{q} – матрица действующих провозных (пропускных) способностей; t – непрерывное время; $V(t)$ – множество, каждый из элементов которого равен числу автомобилей (транспортных средств), находящихся в момент времени t на парковочной зоне или на маршруте α ; v – индекс автомобиля (его уникальный идентификатор); $v_f = N_\alpha$ – наибольший индекс автомобиля, соответствующий количеству транспортных средств в текущий момент времени; r – общее число парковочных зон или маршрутов (корреспонденций); n_v – булева переменная, которая определяется соотношением и равна 1, если ТС находится в зоне или на маршруте r_α , и 0 в противном случае; r_α – α -й маршрут (парковочная зона); π_v – уравнение транспортного процесса для v -го автомобиля, определяющее долю выполненного транспортного процесса (или соответствующей операции транспортного процесса, включая паркование); $\Pi(t)$ – множество, состоящее из отдельных уравнений транспортного процесса; β – индекс транспортного процесса; $G(t)$ – векторная функция расходования ресурса(-ов); g_v – вектор удельных расходов ресурса для каждого автомобиля; H – информационная энтропия транспортной системы; G^* – вектор ограничений на расход ресурсов; a_n – априорные вероятности нахождения элемента в состоянии n ; G_n – емкость состояния n ; n – порядковый номер состояния элементов; m – общее число различных состояний.

Представленная здесь модель транспортной системы оперирует с множеством уравнений транспортного процесса. Поскольку имеется переменная времени, но на каждом относительно малом интервале времени реализуется гипотеза о равновесии системы, то модель можно отнести к классу квазидинамических.

В итоге будем считать, что модель (1) образует замкнутую систему уравнений и неравенств с учетом неуказанных здесь вспомогательных соотношений. Тогда соотношения (1) образуют постановку задачи оптимизации транспортного процесса, если в качестве критерия оптимальности выбрать минимум расходования ресурсов.

Следует отметить, что в задаче (1) пока что недостаточно возможностей, чтобы описывать эффективность ИТС, поскольку данная постановка соответствует лишь квазидинамической задаче о равновесном распределении транспортных средств на сети (в парковочном пространстве). Расширим это представление за счет введения соотношений, позволяющих оценивать непосредственный результат внедрения инструментальных подсистем ИТС в рамках сформулированной выше гипотезы о нелокальном характере эффективности ИТС [26–28].

В качестве подмножеств состояний можно рассматривать отдельные виды транспорта (индивидуальный, каршеринг, такси, автобусы, ЛРТ, метро, трамвай, велосипеды и т.д.), а элементами будут индивиды, которые выбирают конкретную систему. Аналогично можно представить себе классифицированное множество парковочных зон, центров массового тяготения (ЦМТ), которые заполняются посетителями – теми же пассажирами, которые находятся в ЦМТ после совершения поездки и перед

началом новой поездки. Таких постановок задач можно сформулировать достаточно большое число, поэтому нам потребуется некоторая обобщенная математическая модель, которая была бы удобной для большинства таких постановок.

Отметим, что для предполагаемой модели необходимо ввести описания используемых ресурсов и условий их расходования по аналогии с зависимостями для транспортных процессов в системе (1). Традиционно в виде таких ресурсов используем время, материальные ресурсы, денежные средства и их различные виды.

Запишем обобщенную модель транспортной макросистемы для моделирования эффективности ИТС в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ \mathbf{q} = \mathbf{q}(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ E(t) = \{E_1, \dots, E_\alpha, \dots, E_p : E_\alpha = \sum_{e=1}^{e_f} n_e(t) | e \in s_\alpha\}; \\ e = 1, \dots, e_f(t); \\ \pi_e = \pi_e(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{e_f}(t)\}; \\ G(t) = g_e \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(E^*(\Delta\tau_k)) = -\sum_{n=1}^m E_n \ln \frac{E_n}{a_n} - (G_n + E_n) \ln(G_n + E_n) \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (2)$$

В системе (2) замена количества автомобилей (V) на количество элементов e (или множества состояний S) подразумевает то, что обобщенная система может быть записана в виде частного случая, где каждому элементу e может быть поставлен в соответствие конкретный вид элемента:

$$e \in E = \{v; r; p; \dots\}; \quad (3)$$

$$s \in S = \{r; v; z; \dots\}, \quad (4)$$

где v – автомобиль; r – маршрут; p – пассажир (пешеход); z – парковочная зона.

Кроме этого, в систему (2) обозначено $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t)$ как множество состояний элементов. В частности, если $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Gamma}$, то мы имеем граф УДС, состоящий из совокупности связей, каждая из которых заполняется элементами (транспортными средствами). В иной постановке $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t)$ может представлять собой одно из следующих множеств: совокупность парковочных зон; совокупность видов транспорта; множество целей поездок и т.д. Выражение $\rho = \rho(t)$ определяет теперь наличие связей между подмножествами состояний, определяющих возможные потоки, например, транспортно-пересадочные узлы (ТПУ) между различными видами транспортных систем и т.д. Соотношение $q = q(t)$ устанавливает пропускные способности, соответствующие интенсивностям обслуживания элементами подмножеств состояний (пропускная способность ТПУ, ЦМТ и т.д.).

На систему (2) накладывается требование, чтобы пары элементов, входящих в множества E и S , образовывали реалистичные постановки задач.

Приведенная формулировка модели эффективности ИТС может быть решена в рамках теории макросистем с помощью численных методов, позволяющих находить равновесные состояния систем, соответствующие максимуму энтропии в модели (2). Напомним, что выбор конкретного выражения для энтропии зависит от применяемой схемы заполнения состояний элементами [29, 30].

Рассмотрим вопрос численного решения описанной выше системы уравнений и неравенств. Записанное условие равновесия в транспортной макросистеме

$$H(E^*(\Delta\tau_k)) = -\sum_{n=1}^m e_n \ln \frac{e_n}{a_n} - (G_n + e_n) \ln(G_n + e_n) \rightarrow \max \quad (5)$$

сопровождается максимизацией функции энтропии для распределенных по определенному правилу элементов на множестве состояний. Здесь обозначено: m – количество макросостояний (количество связей на рис. 2); e_n – количество элементов (например, транспортных средств), находящихся в состоянии n .

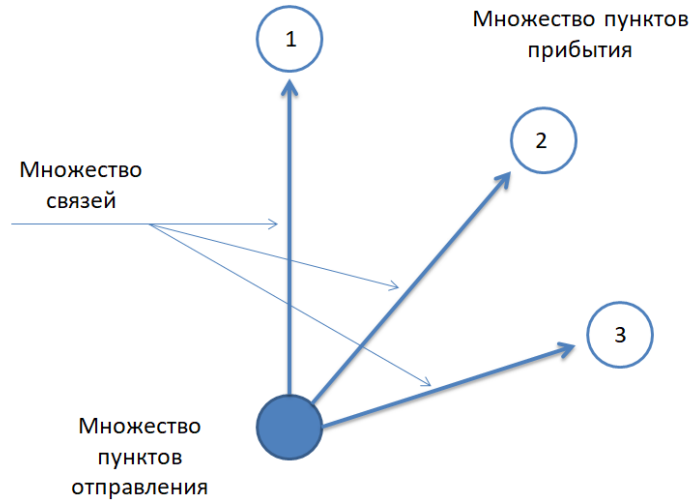


Рис. 2. Множество связей и пунктов отправлений

Количество неизвестных e_n равно m , что соответствует количеству состояний. Уравнения – нелинейные алгебраические.

Особенностью модели является то, что в ней в явном виде отсутствуют: 1) расщепление по виду транспорта; 2) расщепление по цели поездки, т.е. модель соответствует наиболее общему случаю.

Как множество связей, так и множество пунктов отправлений.

Рассмотрим выражение $\Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{e_j}(t)\}$, которое представляет собой вектор величин $\pi_\beta(t)$ – уравнений процесса для элемента с индексом $e = \beta$. Здесь $\pi_\beta(t)$ численно представляет собой долю выполненной работы к моменту времени $\tau = t$.

С точки зрения макроподхода мы не выделяем конкретный элемент, а можем получить распределение $\pi_i(t)$ для тех элементов, которые находятся в состоянии i в момент t .

Предположим, что в модели рассматривается частный случай:

- 1) цель поездки – работа;
- 2) вид транспорта – индивидуальный транспорт.

Тогда возникает необходимость в уравнении (1) задать емкости состояний G_1, G_2 и т.д.

Пусть емкость каждого состояния можно выразить отношением

$$G_i = \frac{L_i}{l_a}, \quad (6)$$

где i – произвольный номер состояния; L_i – длина связи i ; l_a – динамический габарит автомобиля (приведенного транспортного средства).

Рассмотрим способ расчета априорных вероятностей a_i .

Если $\sum_{i=1}^m D_i$ – общий объем прибытий, то

$$a_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i}. \quad (7)$$

Для решения задачи необходимо знать (задать) элементы вектора удельных расходов ресурса для конкретной группы (подмножества) автомобилей, находящихся на связи i .

Рассмотрим численную схему решения задачи о равновесии транспортной макросистемы, основанную на теории макросистем [18]. При этом будем считать, что расходование ресурсов является линейным и неполным, что является наиболее вероятным случаем в большинстве транспортных систем.

Тогда рассматривается следующая функция Лагранжа, для которой ставится задача поиска неизвестных множителей:

$$L(E, \lambda) = H(E) + \sum_{k=1}^r \lambda_k \left(1 - \sum_{n=1}^m \tilde{t}_{kn} E_n \right), \quad (8)$$

где E – общее число элементов в транспортной системе; λ_k – неопределенные множители Лагранжа, подлежащие определению; m – общее число подмножеств состояний в системе; r – общее число ресурсов (в частном случае $r=1$); $\tilde{t}_{kn} = t_{kn} / q_k$ – нормированный параметр линейного расходования ресурсов; q_k – запас k -го ресурса.

Согласно теории макросистем [18] условие существования стационарного состояния сводится к формулировке

$$\lambda_k^* \left(1 - \sum_{n=1}^m \tilde{t}_{kn} E_n^*(\lambda) \right) = 0, \quad (9)$$

$$1 - \sum_{n=1}^m \tilde{t}_{kn} E_n^*(\lambda) \geq 0, \lambda_k \geq 0, k \in \overline{1, r}, \quad (10)$$

которая может быть разрешена с помощью мультипликативного алгоритма:

$$\lambda_k^{s+1} = \lambda_k^s \left(1 - \gamma \nabla_{\lambda_k} \tilde{L}(\lambda^*) \right), k \in \overline{1, r}, \quad (11)$$

где

$$\tilde{L}(\lambda) = L(E^*(\lambda), \lambda). \quad (12)$$

В настоящей статье представление ресурсов g_e не конкретизируется. В принципе, это может быть любой из ресурсов, который расходуется при осуществлении поездок: время; денежные средства; стоимость транспортных средств; горюче-смазочные материалы и т.п.

Заключение

В настоящей работе сформулирована математическая модель эффективности ИТС, которая позволяет выполнить постановку и решение задачи об изменении распределения элементов транспортной системы по подмножествам состояний за счет внедрения инструментальных подсистем ИТС. Эта модель отличается традиционным подходом теории макросистем, в то же время она позволяет составлять множество постановок задач для самых разных ситуаций. Например, может представлять интерес задача о распределении пассажиров по различным типам транспортных систем, каждая из которых отличается своим набором потребительских свойств (задача о расщеплении по видам транспорта) и т.д.

Другим результатом данной работы является получение уравнений, необходимых для численной реализации конкретной задачи в модели (2).

Таким образом, дальнейшее направление работ могло бы здесь заключаться в формулировке конкретных постановок задач и их численной реализации.

Список литературы

1. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 60–70. doi: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
2. Мулеев Е. Ю. Транспортное поведение населения России: краткий отчет о социологическом исследовании. М. : Институт экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ, 2015. 37 с.
3. Савельева Е. О. Факторы формирования транспортного поведения в крупнейших городах России // Градостроительство. 2018. № 5. С. 54–63.
4. Федоров В. А. Транспортное поведение индивидуумов – основной источник городских транспортных проблем // Молодой ученый. 2015. № 18. С. 309–316. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=35781211&selid=35781220> (дата обращения: 05.10.2022).
5. Bhattacharya S., Kumar R. V. Modeling Tourists' Opinions Using RIDIT Analysis // IGI Global. 2017. URL: <https://www.igiglobal.com/chapter/modeling-tourists-opinions-using-ridit-analysis/170970> (дата обращения: 01.10.2022).
6. Privitera D. Towards a Competitive Sustainable City: Cycling as an Opportunity // Handbook of Research on Sustainable Development and Economics. IGI Global, 2015. P. 20–36.
7. Wang Y., Zeng Z. Data-Driven Solutions to Transportation Problems. 1st ed. Elsevier Inc., 2019. 299 p.
8. Бутузова А. Б., Потылицын Е. А. Современные методы исследования транспортной подвижности населения на основе данных мобильных операторов // Молодой ученый. 2019. № 50. С. 87–90. URL: <https://moluch.ru/archive/288/65157/> (дата обращения: 05.10.2022).
9. Савельева Е. О., Лоренс П. Сравнительный анализ моделей городской мобильности в России и за рубежом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 3. С. 79–94. doi: 10.15593/2409-5125/2019.03.06
10. Комаров В., Акимова В. Стратегии устойчивой мобильности: лучшие мировые практики // Экономическая политика. 2021. Т. 16, № 1. С. 82–103. doi: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103
11. Блянкинштейн И. М., Фадеев А. И., Федоров А. В. [и др.] Обоснование целесообразности изучения транспортной подвижности населения на основе мониторинга абонентов мобильной связи // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. 2015. Т. 8, № 2. С. 254–263.
12. Тиньков С. А. Подходы к оценке транспортной доступности точек притяжения в мегаполисе // Экология промышленного производства. 2021. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-transportnoy-dostupnosti-tochek-prityazheniya-v-megapolise> (дата обращения: 10.09.2022).
13. Madhuwanthi R. A. M., Marasinghe A., Janaka Rajapakse R. P. C. [et al.]. Factors Influencing to Travel Behavior on Transport Mode Choice // International Journal of Affective Engineering. 2015. Vol. 15. doi: 10.5057/ijae.IJAE-D-15-00044
14. Liang Q., Weng J., Zhou W. [et al.]. Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. 2018. doi: 10.1155/2018/3859830
15. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обзор сервисов для обеспечения транспортной подвижности населения // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике : сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, 29 апреля 2022 г.) / отв. ред. М. С. Разумов. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 22–27.
16. Головин О. К., Пупынин К. В. Повышение эффективности использования аппаратных ресурсов браузерными программными средствами моделирования транспортного потока // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019) : тр. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. С. А. Прохорова [и др.]. Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2019. С. 433–434.
17. Khabibullina E., Sysoev A. Forming production rules in intelligent transportation system to control traffic flow // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2020. № 4. С. 317–322.
18. Кузяшев А. Н., Черных А. А. Концепция умного городского транспорта // Экономика и бизнес: теория и практика. 2020. № 12-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-umnogo-gorodskogo-transporta> (дата обращения: 26.09.2022).
19. Крушель Е. Г., Огар Т. П., Панфилов А. Э. [и др.]. Оценка пригодности модели перемещения пассажиров между остановками городского пассажирского общественного транспорта для выявления скрытых закономерностей поведения пассажиропотока // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6936
20. Пищикова О. В. Механизм управления транспортным поведением жителей мегаполиса // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1. doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.113. URL: <https://research-journal.org/archive/1-115-2022-january/mexanizm-upravleniya-transportnym-povedeniem-zhitelej-megapolisa> (дата обращения: 06.10.2022).
21. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Information support of transport mobility of the population // Information Innovative Technologies : International Scientific-Practical Conference (Prague, 25–29 April 2022). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. P. 342–349.
22. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 6. С. 13–18. doi: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2

23. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Модельное представление транспортной системы города (агломерации) с позиций теории макросистем // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2021) : сб. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, 20 ноября 2021 года / отв. ред. Е. В. Агеев. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 20–23.
24. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Транспортное поведение населения с позиций феноменологической теории самоорганизации сложных систем // Современные материалы, техника и технология : сб. науч. ст. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. (г. Курск, 30 декабря 2021 г.). Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 13–18.
25. Олемской А. И. Синергетика сложных систем: феноменология и статистическая теория. М. : Кранд, 2009. 379 с.
26. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обоснование выбора теоретического аппарата для описания транспортного поведения жителей города (мегаполиса) // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18, № 6. С. 746–758. doi: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758
27. Попков Ю. С. Теория макросистем: Равновесные модели. М. : Эдиториал УРСС, 1999. 320 с.
28. Хакен Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам : пер. с англ. / предисл. Ю. Л. Климонтовича. Изд. 3-е, испр. и доп. М. : УРСС: ЛЕНАРД, 2014. 320 с.
29. Пафилов Е. А., Годунов А. И., Юрков Н. К., Николаев О. В. Алгоритмы адаптивного обнаружения сигнала, отраженного от малоразмерных наземных целей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 42–43. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4
30. Вологов Е. М., Вологова Т. А., Митрофанов И. В., Митрофанов Е. И. Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеочамер общего назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 29–37. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4

References

1. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Approaches to the formalization of the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Intelligence. Innovation. Investment*. 2021;(2):60–70. (In Russ.). doi: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
2. Muleev E.Yu. *Transportnoe povedenie naseleniya Rossii: kratkiy otchet o sotsiologicheskoy issledovaniy = Transport behavior of the Russian population: a brief report on a sociological study*. Moscow: Institut ekonomiki transporta i transportnoy politiki NIU VShE, 2015:37. (In Russ.)
3. Savel'eva E.O. Factors of formation of transport behavior in the largest cities of Russia. *Gradostroitel'stvo = Urban planning*. 2018;(5):54–63. (In Russ.)
4. Fedorov V.A. Transport behavior of individuals – the main source of urban transport problems. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2015;(18):309–316. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=35781211&selid=35781220> (accessed 05.10.2022).
5. Bhattacharya S., Kumar R.V. Modeling Tourists' Opinions Using RIDIT Analysis. *IGI Global*. 2017. Available at: <https://www.igi-global.com/chapter/modeling-tourists-opinions-using-ridit-analysis/170970> (accessed 01.10.2022).
6. Privitera D. Towards a Competitive Sustainable City: Cycling as an Opportunity. *Handbook of Research on Sustainable Development and Economics*. IGI Global, 2015:20–36.
7. Wang Y., Zeng Z. *Data-Driven Solutions to Transportation Problems*. 1st ed. Elsevier Inc., 2019:299.
8. Butuzova A.B., Potylitsyn E.A. Modern methods of studying the transport mobility of the population based on data from mobile operators. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2019;(50):87–90. (In Russ.). Available at: <https://moluch.ru/archive/288/65157/> (accessed 05.10.2022).
9. Savel'eva E.O., Lorens P. Comparative analysis of urban mobility models in Russia and abroad. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics*. 2019;(3):79–94. (In Russ.). doi: 10.15593/2409-5125/2019.03.06
10. Komarov V., Akimova V. Strategies for sustainable mobility: world's best practices. *Ekonomicheskaya politika = Economic policy*. 2021;16(1):82–103. (In Russ.). (In Russ.). doi: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103
11. Blyankinshteyn I.M., Fadeev A.I., Fedorov A.V. et al. Substantiation of the expediency of studying the transport mobility of the population based on monitoring of mobile subscribers. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Ser.: Technique and Technology*. 2015;8(2):254–263. (In Russ.)
12. Tin'kov S.A. Approaches to assessing the transport accessibility of points of attraction in a megalopolis. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva = Ecology of industrial production*. 2021;(2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-otsenke-transportnoy-dostupnosti-tochek-prityazheniya-v-megalopolise> (accessed 10.09.2022).
13. Madhuwanthi R.A.M., Marasinghe A., Janaka Rajapakse R.P.C. et al. Factors Influencing to Travel Behavior on Transport Mode Choice. *International Journal of Affective Engineering*. 2015;15. doi: 10.5057/ijae.IJAE-D-15-00044

14. Liang Q., Weng J., Zhou W. et al. *Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction*. 2018. doi: 10.1155/2018/3859830
15. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Overview of services for ensuring transport mobility of the population. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii, avtomatizatsii i mekhatronike: sb. nauch. st. 4-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Kursk, 29 aprelya 2022 g.) = Information technologies in management, automation and mechatronics: collection of scientific articles of the 4th International scientific and technical conf. (Kursk, April 29, 2022)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2022:22–27. (In Russ.)
16. Golovnin O.K., Pupyin K.V. Improving the efficiency of using hardware resources by browser-based software for modeling traffic flow. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii (PIT 2019): tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Promising Information Technologies (PIT 2019): proceedings of the International scientific and technical conf.* Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2019:433–434. (In Russ.)
17. Khabibullina E., Sysoev A. Forming production rules in intelligent transportation system to control traffic flow. *Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system = Open semantic technologies for designing intelligent systems*. 2020;(4):317–322.
18. Kuzyashev A.N., Chernykh A.A. The concept of smart urban transport. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika = Economics and Business: theory and practice*. 2020;(12-2). (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-umnogo-gorodskogo-transporta> (accessed 26.09.2022).
19. Krushel' E.G., Ogar T.P., Panfilov A.E. et al. Assessment of the suitability of the model of passenger movement between stops of urban passenger public transport to identify hidden patterns of passenger traffic behavior. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2021;(4). (In Russ.). Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6936
20. Pishchikova O.V. The mechanism of managing the transport behavior of megalopolis residents. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2022;(1). (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.113. Available at: <https://research-journal.org/archive/1-115-2022-january/mexanizm-upravleniya-transportnym-povedeniem-zhitelej-megapolisa> (accessed 06.10.2022).
21. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Information support of transport mobility of the population. *Information Innovations Technologies: International Scientific-Practical Conference (Prague, 25–29 April 2022)*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022:342–349.
22. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Mathematical model of transport behavior based on the theory of transport macrosystems. *Mir transporta = The world of transport*. 2021;19(6):13–18. (In Russ.). doi: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2
23. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Model representation of the city's transport system (agglomeration) from the standpoint of the theory of macrosystems. *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT-2021): sb. st. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Kursk, 20 noyabrya 2021 goda) = Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2021): collection of Articles XIII International scientific and technical conf. (Kursk, November 20, 2021)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2021:20–23. (In Russ.)
24. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Transport behavior of the population from the standpoint of the phenomenological theory of self-organization of complex systems. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. st. 11-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Kursk, 30 dekabrya 2021 g.) = Modern materials, equipment and technology: collection of scientific articles of the 11th International scientific and practical conf. (Kursk, December 30, 2021)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2021:13–18. (In Russ.)
25. Olemskoy A.I. *Sinergetika slozhnykh sistem: fenomenologiya i statisticheskaya teoriya = Synergetics of complex systems: phenomenology and statistical theory*. Moscow: Krasand, 2009:379. (In Russ.)
26. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Substantiation of the choice of a theoretical apparatus for describing the transport behavior of residents of a city (megapolis). *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2021;18(6):746–758. (In Russ.). doi: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758
27. Popkov Yu.S. *Teoriya makrosistem: Ravnovesnye modeli = Theory of macrosystems: Equilibrium models*. Moscow: Editorial URSS, 1999:320. (In Russ.)
28. Khaken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya: makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam: per. s angl. = Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems: translated from English*. 3rd edition, corr. and add. Moscow: URSS: LENARD, 2014:320. (In Russ.)
29. Pafikov E.A., Godunov A.I., Yurkov N.K., Nikolaev O.V. Algorithms for adaptive detection of a signal reflected from small-sized ground targets. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2)32–43. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-4
30. Volotov E.M., Volotova T.A., Mitrofanov I.V., Mitrofanov E.I. Model of the error in determining trajectory parameters when using a registration system based on general-purpose video cameras. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):29–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-4

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Владимирович Федюкин

| Yuri V. Fedyukin

кандидат технических наук, докторант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: aakhromeshin@yandex.ru

Евгений Иванович Минаков

доктор технических наук,
профессор кафедры радиоэлектроники,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: EMinakov@bk.ru

Игорь Евгеньевич Агуреев

доктор технических наук, профессор кафедры
транспортно-технологических машин и процессов,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: agureev-igor@yandex.ru

Никита Ильич Хазов

аспирант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-кт Ленина, 92)
E-mail: nikita.hazov511@yandex.ru

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Candidate of technical sciences, doctoral student,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Evgeniy I. Minakov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of radioelectronics,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Igor E. Agureev

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of transport
and technological machines and processes,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Nikita I. Khazov

Postgraduate student,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Viktor M. Chaykovskiy

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio engineering and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 08.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2023

Принята к публикации/Accepted 25.10.2023