

Научная статья

УДК656.11

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

EDN: FJRONG



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ «О РАВНОВЕСИЯХ (РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЯХ)» ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ГОРОДА

И. Е. Агуреев*, А. В. Ахромешин, В. А. Пышный

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия
agureev-igor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>
aakhromeshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8016-9655>
vladislav.pyshnyi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0380-8147>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье сформулированы постановки задач о равновесных состояниях в модели обобщенной транспортной системы города, состоящей из улично-дорожной сети, центров массового тяготения, мест проживания людей, транспортных средств, а также самих участников дорожного движения, в том числе и пассажиров. Решение этих задач позволяет выявлять равновесные распределения элементов системы по различным подмножествам состояний (подмножество элементов улично-дорожной сети, подмножество центров массового тяготения, подмножество поездок определенного типа и т.д.), зависящие от типа транспортного средства, индивидуальных предпочтений, знаний о состоянии транспортной системы и других факторов.

При этом транспортная система рассматривается как объект исследований в рамках теории макросистем. Набор постановок задач о поиске равновесных состояний транспортной системы для различных объектов моделирования составлен для различных структурных уровней (масштабов) рассматриваемых объектов.

Материалы и методы. В настоящей работе применяется теория транспортных макросистем, которая вытекает из известной научной дисциплины – теории макросистем. Среди ее задач имеются постановки о распределении элементов по подмножествам состояний и задачи о равновесии системы в целом. В макроскопических системах по определению стохастическое поведение большого числа элементов преобразуется в детерминированное поведение системы в целом. Макросистема является динамическим преобразователем хаотического поведения элементов в некоторое множество параметров поведения (фазовых переменных), образующих пространство небольшой размерности. Поэтому в рамках теории макросистем используются базовые понятия максимизации энтропии при равновесных состояниях системы. При этом функция распределения макросостояний выбирается в зависимости от способа заполнения элементами некоторых состояний из соответствующих подмножеств; необходимые значения априорных вероятностей и доказательства параметрических свойств моделей макросистем с различными статистиками (ферми-, зейнштейн- и больцман-распределения). На основе теории макросистем решаются, например, задачи для поиска равновесия в таких системах, как: 1) мегаполис с его функциональной и пространственной структурами (вероятностные состояния иерархических систем); 2) транспортные сети городов, образованные перемещениями транспортных средств и жителей города между различными районами (распределение поездок по маршрутам в сети); 3) логистические системы при межрегиональном обмене продукцией (задачи экономического равновесия при обмене ресурсами).

Результаты. В работе представлены результаты исследований, касающиеся единообразного описания элементов улично-дорожной сети и центров массового тяготения как компонентов общей транспортной системы города (агломерации) в рамках теории транспортных макросистем. При этом в исследовании выделяются различные структурные уровни описания, которые могут использоваться для решения частных задач, например, о поиске равновесия в отдельных подмножествах транспортной системы, таких как группы центров массового тяготения определенного типа, или транспортные потоки на маршрутах, перегонах, участках сети и т.п.

Обсуждение и заключение. В рамках работы решены следующие задачи: разработано описание структурных уровней объектов улично-дорожной сети и центров массового тяготения как основных компонентов модели транспортных систем; разработаны постановки задач о равновесных состояниях

© Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

транспортных систем на соответствующих структурных уровнях; выполнен анализ полученной методики; установлена методическая аналогия между различными подмножествами состояний на одном и том же структурном уровне, например, между центрами массового тяготения и элементами улично-дорожной сети как объектов моделирования методами теории макросистем (эта аналогия может быть распространена и на другие подмножества состояний в транспортных системах, например, на виды транспортных систем, цели поездок, парковочные пространства, подсистемы интеллектуальной транспортной системы и многое другое).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория макросистем, улично-дорожная сеть, центр массового тяготения, транспортная система, подмножество состояний, равновесные состояния

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов выражает благодарность анонимным рецензентам и благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 09.12.2022; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Агуреев И. Е., Ахромешин А. В., Пышный В. А. Постановка задач «О равновесиях (равновесных состояниях)» транспортных систем города // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 52-75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

EDN: FJRONG

EQUILIBRIA (EQUILIBRIUM STATES) PROBLEM STATEMENT FOR CITY TRANSPORT SYSTEMS

Igor E. Agureev*, Andrey V. Akhromeshin, Vladislav A. Pyshnyi

Tula State University, Tula, Russia

agureev-igor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>

aakhromeshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8016-9655>

vladislav.pyshnyi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0380-8147>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The article formulates the problems statement about equilibrium states in the model of a generalized transport system of the city, consisting of a street and road network, centers of mass gravity, places of residence of people, vehicles, as well as road users themselves, including passengers. The solution of these problems makes it possible to identify the equilibrium distributions of the system elements over various subsets of states (a subset of the elements of the road network; a subset of the center of mass gravity; a subset of trips of a certain type, etc.), depending on the type of vehicle, individual preferences, knowledge about the state of the transport system and other factors.

At the same time, the transport system is considered as an object of research within the framework of the theory of macrosystems. A set of problems statements on the search for equilibrium states of the transport system for various modelling objects has been compiled for various structural levels (scales) of the objects under consideration.

Materials and methods. In this paper, the theory of transport macrosystems is applied, which follows from a well-known scientific discipline - the theory of macrosystems. Among its tasks there are statements about the distribution of elements over subsets of states and problems about the equilibrium of the system as a whole. In macroscopic systems, by definition, the stochastic behavior of a large number of elements transforms the deterministic behavior of the system as a whole. A macro system is thus a dynamic converter of the chaotic behavior of elements into a certain set of behavior parameters (phase variables) forming a space of small dimension. Therefore, within the framework of the theory of macrosystems, the basic concepts of entropy maximization at equilibrium states of the

© Agureev I. E., Akhromeshin A. V., Pyshnyi V. A., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

system are used. In this case, the distribution function of macrostates is selected depending on the method of filling some states with elements from the corresponding subsets; the necessary values of a priori probabilities and proofs of parametric properties of models of macrosystems with various statistics (Fermi-, Einstein- and Boltzmann-distributions). On the basis of the theory of macrosystems, for example, problems are solved to find equilibrium in such systems as: 1) megapolis with its functional and spatial structures (probabilistic states of hierarchical systems), 2) transport networks of cities formed by the movement of vehicles and residents of the city between different areas (distribution of trips along routes in the network); 3) logistics systems in the interregional exchange of products (problems of economic equilibrium in the exchange of resources).

Results. The paper presents the results of research concerning the uniform description of the elements of the road network and the centers of mass gravity as components of the general transport system of the city (agglomeration) in the framework of the theory of transport macrosystems. At the same time, the study identifies various structural levels of description that can be used to solve particular problems, for example, finding equilibrium in individual subsets of the transport system, such as groups of centers of mass gravity of a certain type, or traffic flows on routes, stretches, network sections, etc.

Discussion and conclusions. Within the framework of the work, the following tasks were solved: a description of the structural levels of the objects of the road network and the centers of mass gravity as the main components of the model of transport systems was developed; the formulation of problems about the equilibrium states of transport systems at the corresponding structural levels was developed; the analysis of the obtained methodology was performed; a methodological analogy is established between different subsets of states at the same structural level, for example, between the centers of mass gravity and elements of the road network as objects of modeling by methods of the theory of macrosystems (this analogy can be extended to other subsets of states in transport systems, for example, types of transport systems, travel purposes, parking spaces, subsystems of the intelligent transport system and much more).

KEYWORDS: theory of macrosystems, street and road network, center of mass gravity, transport system, subset of states, equilibrium states

ACKNOWLEDGMENTS: The team of authors expresses gratitude to the anonymous reviewers and thanks the editors of the journal for processing the article and the opportunity to publish it.

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 09.12.2022; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Agureev I. E., Akhromeshin A. V., Pyshnyi V. A. Equilibria (equilibrium states) problem statement for city transport systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 52-75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-52-75>

ВВЕДЕНИЕ

В статье сформулированы постановки задач о равновесных состояниях в модели обобщенной транспортной системы города, состоящей из улично-дорожной сети (УДС), центров массового тяготения (ЦМТ), мест проживания людей, транспортных средств, а также самих участников дорожного движения, в том числе и пассажиров. Решение этих задач позволяет выявлять равновесные распределения элементов системы по различным подмножествам состояний (подмножество элементов улично-дорожной сети; подмножество центров массового тяготения; подмножество поездок определенного типа и т.д.), зависящие от типа транспортного средства (ТС), индивидуаль-

ных предпочтений, знаний о состоянии транспортной системы и других факторов.

В настоящей работе транспортная система последовательно рассматривается как объект исследований в рамках теории макросистем.

Целью данной работы является формулировка набора постановок задач о поиске равновесных состояний транспортной системы для различных объектов моделирования, таких как УДС и ЦМТ на различных структурных уровнях (СУ) детализации (масштаба) рассматриваемых объектов.

Равновесие в транспортной системе, например, равновесное распределение потоков (матрица корреспонденций и графы УДС), изучают такие авторы, как А.Дж. Вильсон¹ [1, 2],

¹ Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем: пер. с англ. / А. Дж. Вильсон. М.: Наука, 1978. 247 с.

В.И. Швецов² [3, 4, 5], А.В. Гасников [6] и др. Из зарубежных источников дополнительно стоит отметить работы [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Задача транспортного равновесия сводится к решению задачи оптимизации, при этом обычно используются гравитационные или энтропийные методы расчета. В настоящей статье последовательно реализуются принципы энтропийного подхода и выбор соответствующей схемы заполнения элементов по подмножествам состояний как наиболее общий подход, основанный на аналогии между большими системами различной физической природы (в данном случае между физическими системами и городскими системами).

В рамках работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать описания структурных уровней объектов УДС и ЦМТ как основных компонентов (множеств состояний) в модели транспортных систем.

2. Записать постановки задач о равновесных состояниях транспортных систем на соответствующих СУ.

3. Выполнить анализ полученной методики.

4. Установить аналогию между ЦМТ и УДС в смысле объектов моделирования методами теории макросистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе применяется теория транспортных макросистем, которая вытекает из известной научной дисциплины – теории макросистем. Среди ее задач имеются постановки о распределении элементов по подмножествам состояний и задачи о равновесии системы в целом [17, 18].

Напомним основные положения теории макросистем, которые являются традиционными (по Ю. С. Попкову):

«- макросистема представляет собой динамическую систему, содержащую большое количество элементов со стохастическим поведением, состояния которых трансформируются в квази-детерминированное состояние системы как целого;

- основными понятиями и методами теории макросистем является функция распределения макросостояний; априорные вероятности состояний; методы моделирования равновесных макросостояний, основанные на принципе максимизации энтропии; исследования параметрических свойств моделей макросистем;

- в качестве моделей распределения элементов по подмножествам состояний теория макросистем использует следующие схемы, взятые из статистической физики: F-состояния (ферми-состояния, когда в каждом состоянии может находиться только один элемент); E-состояния (эйнштейн-состояния, когда в каждом состоянии может находиться любое количество элементов); В-состояния (больцман-состояния, когда в каждом состоянии может находиться некоторое количество элементов) и соответствующие методы статистик Больцмана, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна;

- теория применяется для изучения таких классов систем, как экономический обмен, распределение и обмен ресурсами (например, межрегиональный обмен продукцией); транспортные потоки (перемещение транспортных средств и пассажиров между различными транспортными районами, соединенными в транспортную сеть); вероятностные иерархические структуры (функционально-пространственная структура города); восстановление изображений по проекциям; многокомпонентные смеси (химические технологии). Что касается последних двух систем, то они также могут найти применение при моделировании транспортных систем, например, при расчете взаимодействия видов транспорта или при выявлении характерных образцов транспортного поведения».

Для того чтобы корректно формулировать и решать задачи теории транспортных макросистем, воспользуемся представлением транспортной системы в виде необходимого модельного описания.

В наиболее общем случае транспортная система распределенных в системе элементов (например, транспортных средств) может быть выражена в виде совокупности уравнений и неравенств в соответствии с работой [19]:

² Швецов В. И., Алиев А. С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. М.: УРСС, 2003. 61 с.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^{v_f=N_a} \Delta\tau_k; \\ V(t) = \{V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^l n_v(t) | v \in p_\alpha\}; \\ v = 1, \dots, v_f(t); \\ \pi_v = \pi_v(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{v_f}(t)\}; \\ G(t) = g_v \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(V^*(\Delta\tau_k)) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\tilde{\Gamma}$ – граф УДС; ρ – транспортные связи; q – действующие провозные (пропускные) способности; t – непрерывное время; $v_f=N_a$ – наибольший индекс ТС, соответствующий количеству ТС на сети в данный момент времени; V_α – общее число маршрутов (корреспонденций); v – индекс ТС (его постоянный идентификатор); n_v – булева переменная, которая определяется соотношением (2); p_α – α -й маршрут; π_v – уравнение транспортного процесса для v -ого ТС; Π – основное уравнение транспортного процесса; β – индекс транспортного процесса; G_p – функция затрат ресурсов (расход ресурсов); g_v – удельный расход ресурса для каждого ТС; H – информационная энтропия транспортной системы; G^* – ограничения на расход ресурсов. Звездочкой обозначено равновесное состояние.

$$n_v(t) = f(x) = \begin{cases} 1, & v \in p_\alpha \\ 0, & v \notin p_\alpha \end{cases}. \quad (2)$$

Предполагается, что в результате решения задачи каждый маршрут становится однозначно определенным, и тогда уравнения $\pi_\beta(t)$ тоже становятся определены.

Представленная система содержит равновесное решение $V^*(\Delta\tau_k)$, которое достигается в транспортной системе к концу отрезка времени $\Delta\tau_k$ за счет наиболее вероятного распределения ТС по маршрутам (корреспонденциям), обеспечивающего выполнение ограничения по расходу ресурсов $G(t)$ и максимизацию информационной энтропии $H(V^*(\Delta\tau_k))$ на том же отрезке времени. Используется гипотеза о достижимости равновесия на интервале $\Delta\tau_k$.

Отметим, что для модели (1) – (2) необходимо ввести описания используемых ресурсов и условий их расходования. Традиционно в виде таких ресурсов используем время, материальные ресурсы, денежные средства и их различные виды.

Однако для наших целей в настоящей статье недостаточно иметь формулировку транспортной системы в виде (1). Причина заключается в том, что необходимо иметь более широкий класс элементов транспортной системы, не только транспортные средства, но и пассажиров, пешеходов, водителей, которые могут находиться в иных состояниях, отличных от принадлежности к участку УДС.

Поэтому запишем обобщенную модель макросистемы в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{S} = \tilde{S}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ E(t) = \{E_1, \dots, E_\alpha, \dots, E_p : E_\alpha = \sum_{e=1}^{e_f} n_e(t) | e \in s_\alpha\}; \\ e = 1, \dots, e_f(t); \\ \pi_e = \pi_e(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{e_f}(t)\}; \\ G(t) = g_e \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(E^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m E_n \ln \frac{E_n}{a_n} - (G_n + E_n) \ln(G_n + E_n) \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (3)$$

В системе (3) замена количества ТС (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:

$$\begin{aligned} e \in E &= \{v; r; p; \dots\}; \\ s \in S &= \{r; c; v; \dots\}, \end{aligned}$$

где v – ТС; r – маршрут; p – пассажир (пешеход); c – корреспонденция. Кроме этого, в (2) обозначено $\tilde{S} = \tilde{S}(t)$ как множество состояний элементов. В частности, если $\tilde{S} = \tilde{F}$, то мы имеем граф УДС, состоящий из совокупности связей, каждая из которых заполняется элементами (транспортными средствами). В иной постановке $\tilde{S} = \tilde{S}(t)$ может представлять собой одно из следующих множеств: совокупность ЦМТ; совокупность видов транспорта; множество целей поездок и т.д. Выражение $\rho = \rho(t)$ определяет теперь наличие связей между подмножествами состояний, определяющих возможные потоки, например, транс-

портно-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 парковочных зон, ТПУ, ЦМТ и т.д.).

На (3) накладывается требование, чтобы пары элементов, входящих в множества E и S , образовывали реалистичные постановки задач.

Дальнейшие методики получения постановки задачи о равновесии транспортной системы проводятся в следующем порядке:

1) для каждого выбранного СУ дается лингвистическое описание системы;

2) описываются элементы и их состояния (в рамках соответствующего СУ), а также способ заполнения подмножеств состояний элементами (так называемых статистик в рамках теории макросистем, см. выше);

3) делается вывод о возможности применения теории макросистем на рассматриваемых СУ.

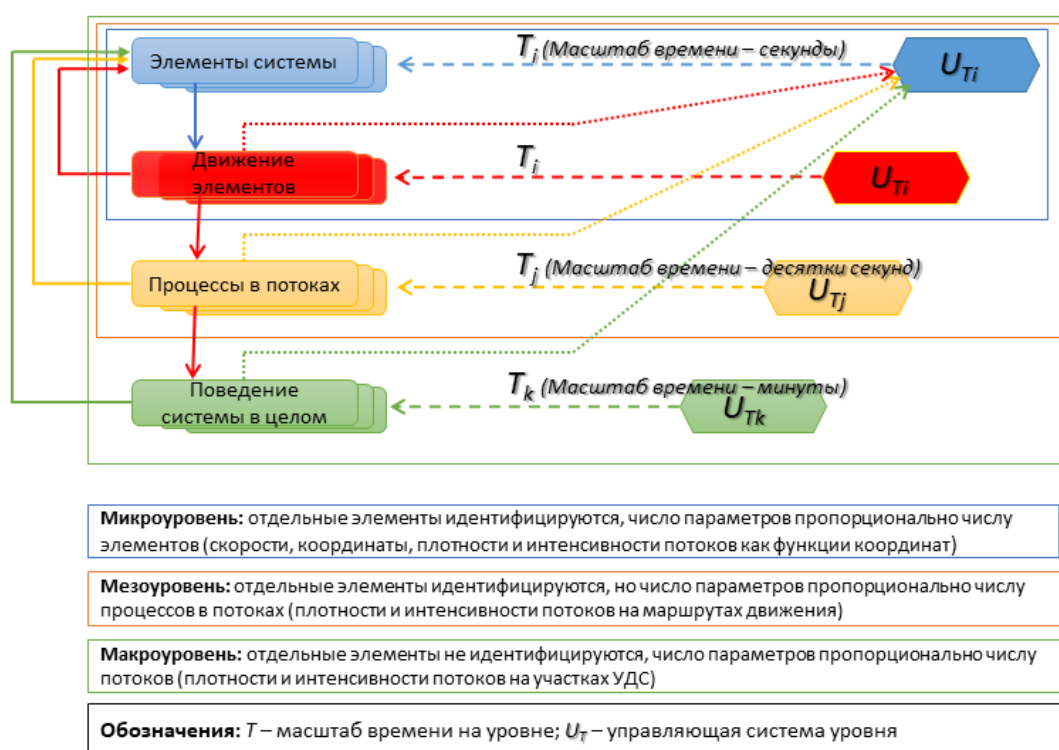


Рисунок 1 – Феноменологическая схема транспортной системы города
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Phenomenological diagram of the transport system in a city
Source: compiled by the authors.

МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ МАКРОСИСТЕМ

Согласно идеям Ю. С. Попкова^{3, 4, 5} транспортную систему города можно представить как сложную систему, феноменологически состоящую из трех уровней: макроуровень (показатели состояния системы); микроуровень (показатели состояния элементов); мезоуровень (формирование показателей состояния системы).

Графически данную структуру можно показать следующим образом (рисунок 1).

Поясим данный рисунок на примере перемещений пассажиров: транспортная система множества индивидуальных перемещений [20, 21, 22] на микроуровне (с набором состояний и параметров индивидуального ТС) образует пассажиропотоки, объединенные на-

мезоуровне (со своим набором состояний и параметров, относящихся уже к транспортным процессам на каждом выделенном маршруте), что, в свою очередь, приводит к образованию на верхнем уровне транспортной системы (макроуровне) корреспонденций между транспортными районами города (агломерации) (с набором состояний и параметров потоков на отдельных участках УДС, при этом информация о том, из каких маршрутов складываются эти потоки, может теряться).

Ниже, для иллюстрации того, как решается задача о разработке описаний структурных уровней объектов УДС и ЦМТ как основных компонентов (множеств состояний) в модели транспортных систем, приведено описание УДС и ЦМТ на различных структурных уровнях.

³ Попков Ю. С. Макро системные модели пространственной экономики. М.: КомКнига/URSS, 2007. 2013.

⁴ Попков Ю. С. Теория макросистем: равновесные модели / Ю.С. Попков. М.: Эдиториал УРСС. 1999. 320 с.

⁵ Развитие больших городов в условиях переходной экономики (системный подход) / В. И. Ресин, Ю.С. Попков. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 326 с.

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ УДС

1. Корреспонденции

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя корреспонденции на УДС, по которым идет перемещение транспортных средств между разными районами города по различным целям [3, 4].

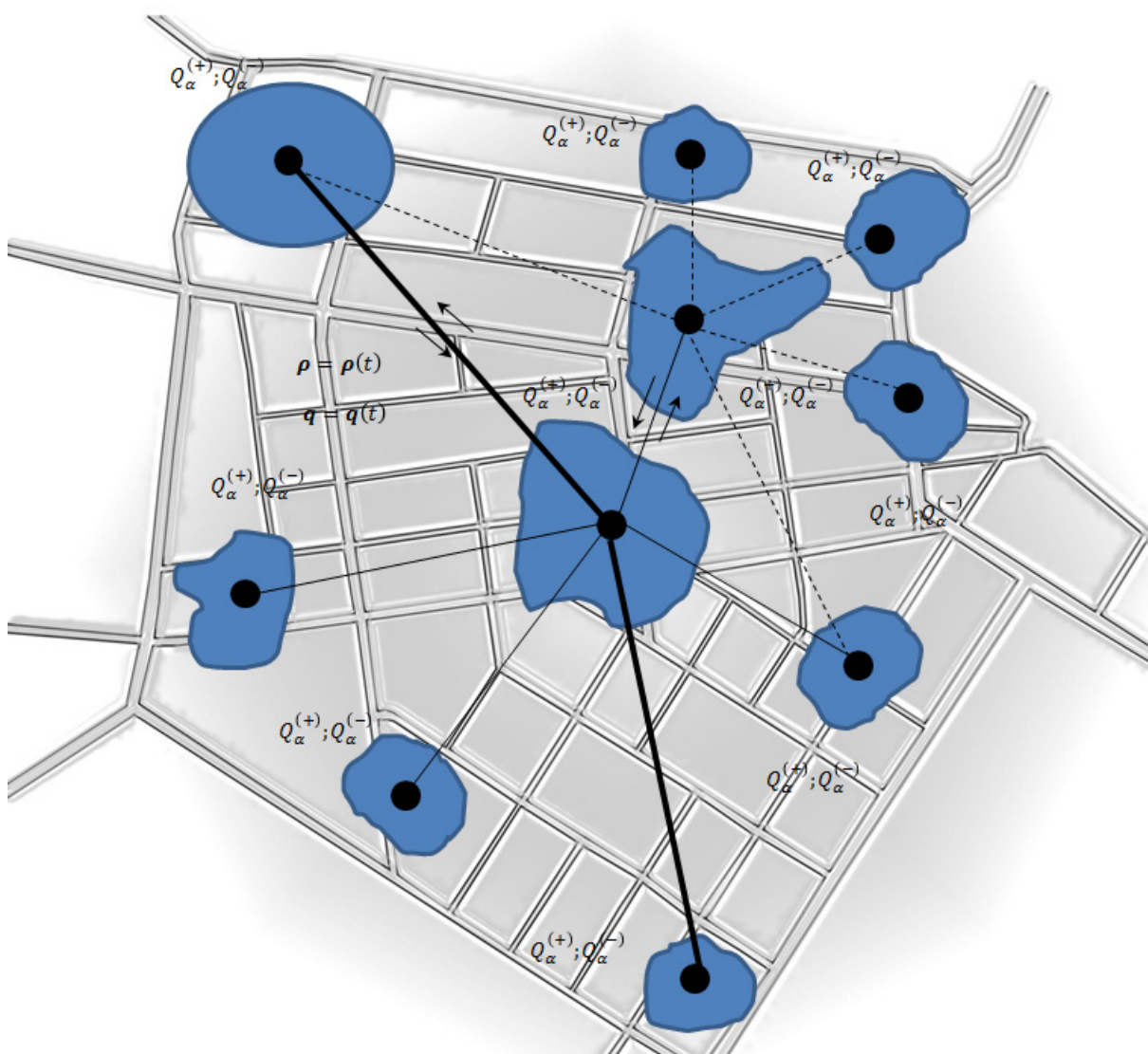


Рисунок 2 – Схема транспортных связей (корреспонденций) между районами
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagram of transport links (correspondence) between districts
Source: compiled by the authors.

Множество состояний – множество корреспонденций.

Подмножество состояний – корреспонденция с конкретной целью.

Таблица 1

Описание элементов структурного уровня «Корреспонденция»

Источник: составлено авторами.

Table 1

Description of the elements of the Correspondence structural level

Source: compiled by the authors.

Элементы	Состояния
1. ТС	1. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «место жительства – место приложения труда»
2. Водитель ТС	
3. Пассажир	
4. Корреспонденция	2. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «место жительства – место культурно-бытового обслуживания»
	3. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «передвижения между местами приложения труда»
	4. Элемент i совершает корреспонденцию j с целью «передвижения между местами культурно-бытового обслуживания»
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Можно построить аналогичные описания для различных транспортных систем. Этобудет ото-бражением расщепления по видам транспорта.

- Для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:
- 1) о распределении корреспонденций между транспортными районами города;
 - 2) о распределении корреспонденций по целям поездок.

В соответствии со временем суток и характерным днем элементы множества J имеют разную ёмкость, в том числе и нулевую.

2. Корреспонденция

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя единственную корреспонденцию на всей УДС, по которой идет перемещение транспортных средств между начальной и конечной точкой корреспонденции (в прямом и обратном направлениях).

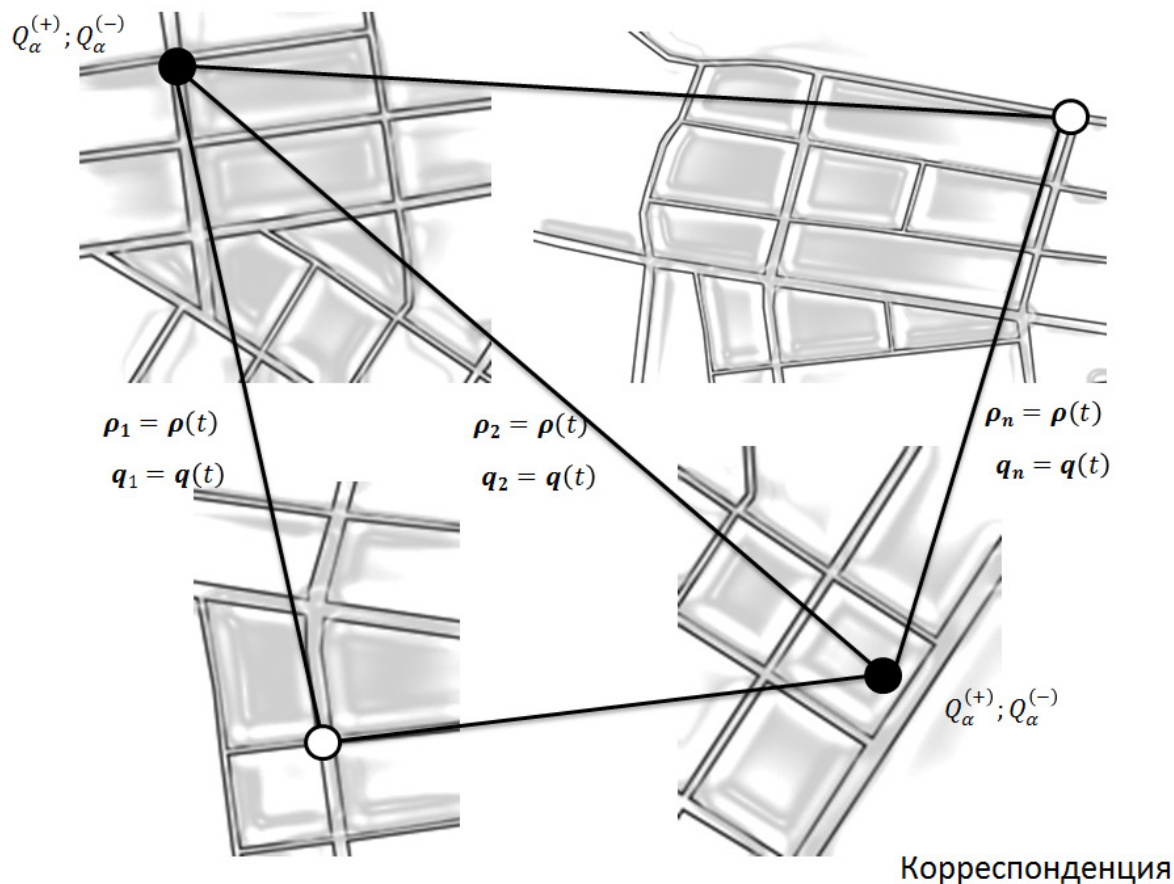


Рисунок 3 – Схема транспортной связи с маршрутами (корреспонденция)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagram of transport communication with routes (correspondence)
Source: compiled by the authors.

Множество состояний – корреспонденция с конкретной целью поездки.

Подмножество состояний – маршруты, которые образуют корреспонденцию.

Таблица 2

Описание элементов структурного уровня «Корреспонденция»

Источник: составлено авторами.

Table 2

Description of the elements of the Correspondence structural level

Source: compiled by the authors.

Элементы	Состояния
1. ТС	1. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место приложения труда»
2. Водитель ТС	
3. Пассажир	
4. Маршрут	2. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место культурно-бытового обслуживания»
	3. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами приложения труда»
	4. Элемент i находится на маршруте m (как предельные состояния – в начальной или конечной точке маршрута) корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами культурно-бытового обслуживания»
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении поездок по корреспонденции в прямом и обратном направлениях;
- 2) о распределении по корреспонденции различных видов грузов и целям поездок (трудовые, социальные и т.д.);
- 3) расчет предельной емкости одной корреспонденции в одном или разных направлениях.

3. Маршрут

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя одну корреспонденцию на всей УДС, по которой идет перемещение транспортных средств между начальной и конечной точкой корреспонденции (в прямом и обратном направлениях).

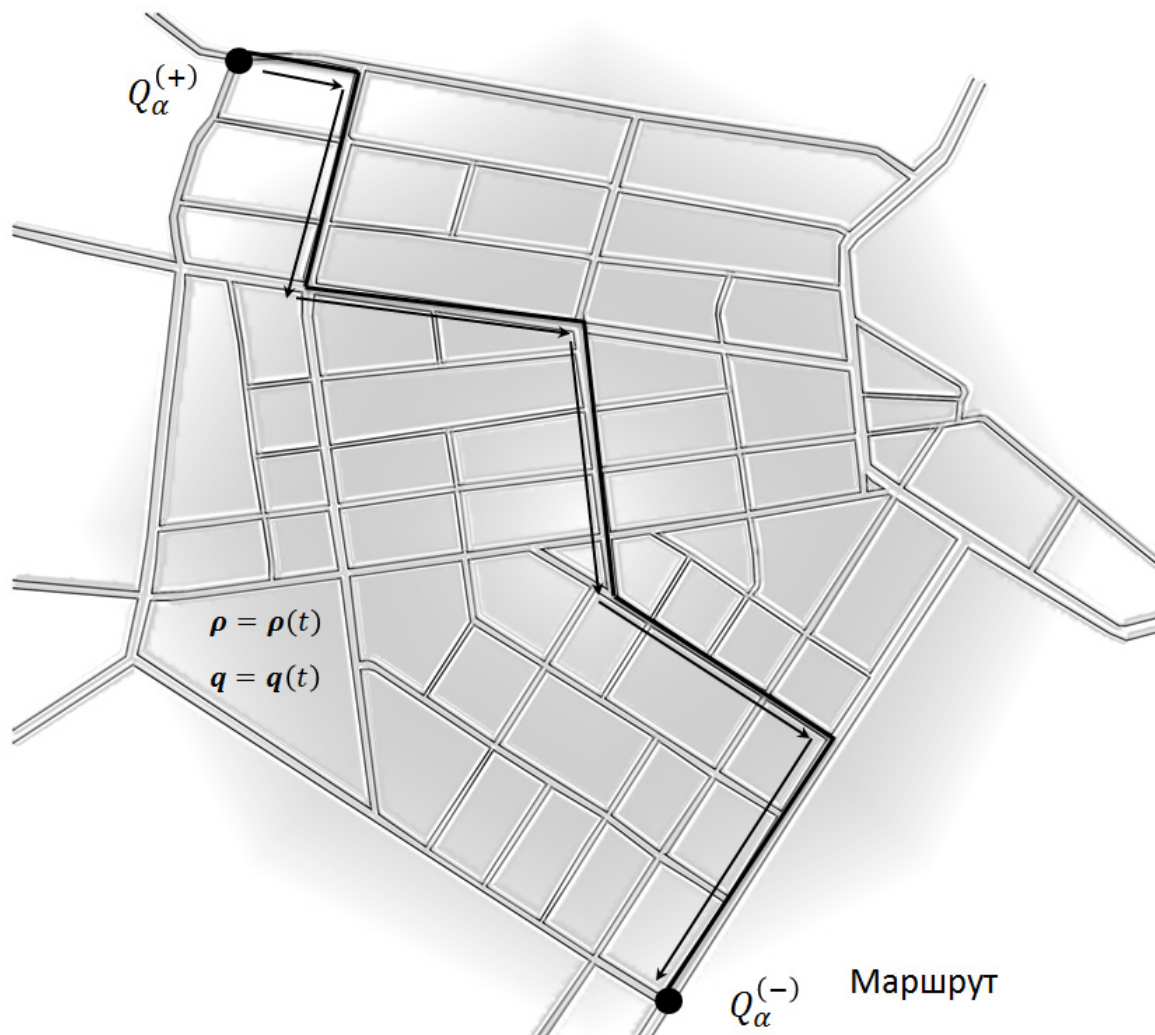


Рисунок 4 – Схема маршрута
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Route diagram
Source: compiled by the authors.

Множество состояний – маршруты, которые образуют корреспонденцию.

Подмножество состояний – маршрут с конкретной целью.

Таблица 3

Описание элементов структурного уровня «Маршрут»

Источник: составлено авторами.

Table 3

Description of the elements of the Route structural level

Source: compiled by the authors.

Элементы	Состояния
1. ТС	1. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место приложения труда»
2. Водитель ТС	
3. Пассажир	
4. Маршрут	2. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «место жительства – место культурно-бытового обслуживания»
5. Перегон	3. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами приложения труда»
	4. Элемент i находится на перегоне p маршрута m корреспонденции j , совершаемой с целью «передвижения между местами культурно-бытового обслуживания»
Используемый тип статистик*	1) В-система 2) Р-система

Для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении поездок по маршруту в целом и каждому перегону в частности;
- 2) о распределении по маршруту поездок с различными целями (трудовые, социальные и т.д.);
- 3) расчет предельной емкости одного перегона и маршрута.

Примечание: на рисунках 2, 3, 4 индексы величин $Q_{\alpha}^{(+)}$; $Q_{\alpha}^{(-)}$ опущены для улучшения восприятия представленных схем различных структурных уровней УДС.

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ЦМТ

1. ЦМТ в целом

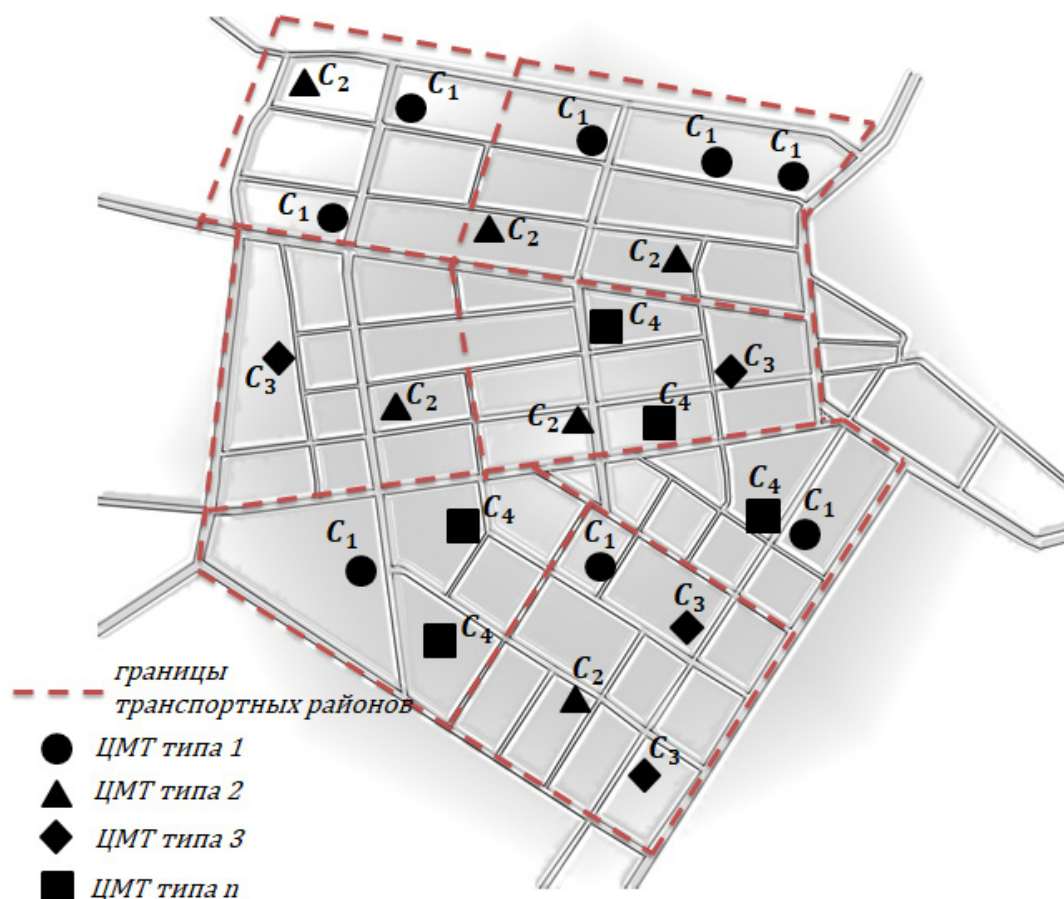


Рисунок 5 – Схема расположения ЦМТ различных типов
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Arrangement of ITC of different types
Source: compiled by the authors.

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя УДС и все ЦМТ с их парковочными пространствами (рис. 5), которые учитываются на рассматриваемой территории и относятся к любой городской функции (за исключением жилого сектора). Таким образом, для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи [4, 20, 23, 24]:

- 1) о распределении элементов (таблица 4) на территориях ЦМТ (во время получения услуг операция транспортного процесса – ожидание);
- 2) о распределении движущихся элементов к ЦМТ (операция транспортного процесса – транспортировка) и их разновидности⁶.

В соответствии с рассматриваемым временем суток и характерным днем элементы множества S имеют разную ёмкость, в том числе и нулевую.

Множество состояний

ЦМТ всех типов (кроме жилого сектора) для получения услуг

Подмножество состояний

ЦМТ конкретного типа

⁶ Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников и др. М.: МЦНМО, 2013. 427 с.

Таблица 4
Описание элементов структурного уровня «ЦМТ в целом»
Источник: составлено авторами.

Table 4
Description of the elements of the ITC as a whole structural level
Source: compiled by the authors.

Элемент	Состояние
ТС	Элемент i находится на парковке ЦМТ j -го типа
Маршрутное ТС	Элемент i находится на остановочном пункте s , находящимся в пешей доступности к ЦМТ j -го типа
Участник дорожного движения (водитель индивидуального транспортного средства, пассажир, пешеход)	Элемент i посещает ЦМТ j -го типа с целью получения услуги
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Примечания:

*Могут быть использованы и другие типы статистик в зависимости от размера населенного пункта и времени суток.

**Описанные у Ромма⁷ городские функции, по мнению авторов, не полностью охватывают все стороны жизнедеятельности социума, с этой позиции в таблицу 5 были добавлены 4 дополнительные функции.

$J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ множество типов ЦМТ для получения услуг, выделенных по городским функциям** [8, 25, 26, 27, 28].

Таблица 5
Описание элементов структурного уровня «Наименование типа ЦМТ для получения услуг»
Источник: составлено авторами.

Table 5
Description of the elements of the Name of the type of ITC for receiving services structural level
Source: compiled by the authors.

№	Наименование типа ЦМТ для получения услуг
1	Промышленность различных видов
2	Коммунально-складское хозяйство
3	Общественно-торговые центры
4	Медицинские, спортивные, детские и другие специализированные центры
5	Торговля различных иерархических уровней и различной специализации
6	Объекты здравоохранения различных видов
7	Объекты образования различных видов
8	Административно-офисные комплексы
9	Рекреации и естественные ландшафты
10	Территории специального назначения (захоронений)
11	Объекты транспорта
12	Культурные
13	Объекты военного назначения

⁷ Ромм А. П. Комплексная оценка и функциональное зонирование территории в градостроительном проектировании: дис. ... д-ра архитектуры: 18.00.04. Москва, 2002. 206 с.

В некоторых работах по географии городов вместо термина «макрофункция» используется термин «группа видов деятельности», причем выделяется три группы видов деятельности [26, 27]: группа первичных (жилье), вторичных (производство) и третичных (торговля, транспорт, управление) видов деятельности.

Понятие городской функции обладает внутренней сложностью. Большинство городских

2. ЦМТ конкретного типа

функций являются представителями не одной, а двух или трех макрофункций. Так, функция «жилье» в любом российском городе содержит в себе жилье как таковое (жилые дома), обслуживание и места приложения труда (магазины, комбинаты бытового обслуживания (КБО), школы, детские сады и т.д.). Во многих случаях приходится иметь дело с функциями, представляющими собой конгломераты других городских функций.

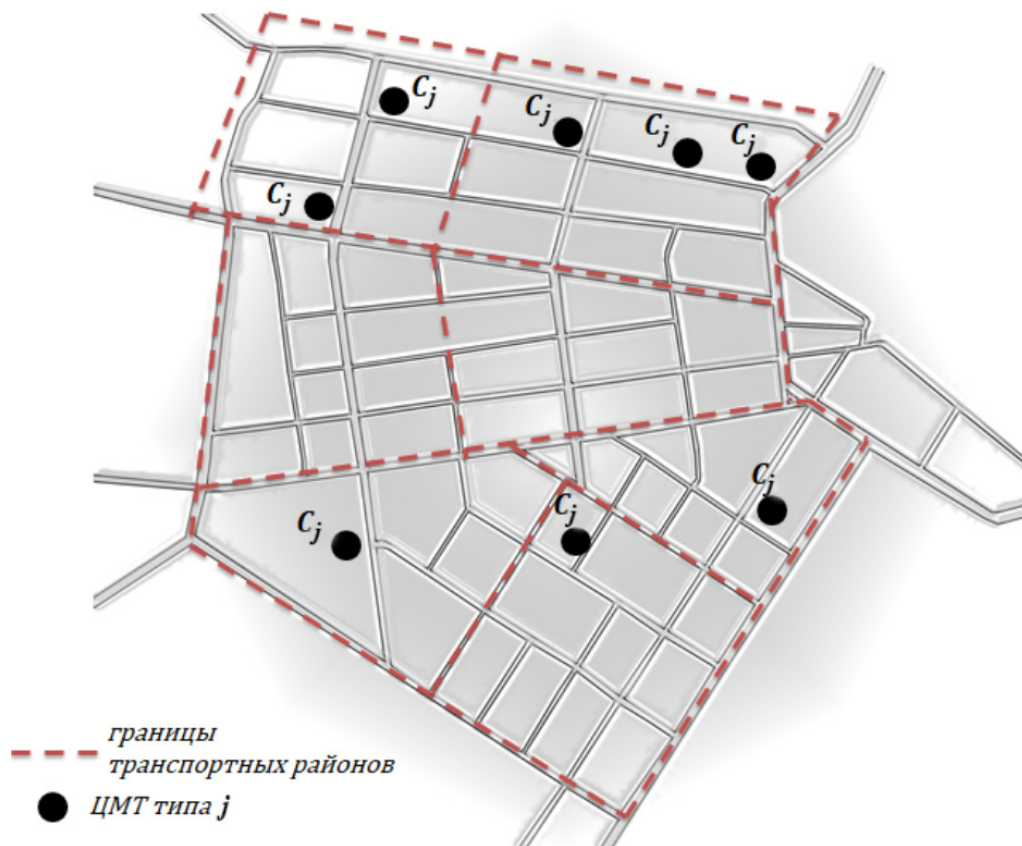


Рисунок 6 – Схема расположения ЦМТ одного типа
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – ITC layout of one type
Source: compiled by the authors.

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя УДС и ЦМТ с их парковочными пространствами, которые учитываются на рассматриваемой территории и относятся к определенной городской функции (за исключением жилого сектора), представлена на рисунке 6.

Е, В-система – вводится классификация ЦМТ, которая справедлива для уровня 2 и 3.

Таким образом, для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи о распределении элементов (таблица 6) на территориях ЦМТ конкретного типа (во время получения услуг операция транспортного процесса: ожидание).

Множество состояний

ЦМТ типа ТЦ (пример)

Подмножество состояний

Конкретные ТЦ (или страта: микрорайонные, районные, окружные, региональные ТЦ)

Таблица 6

Описание элементов структурного уровня «ЦМТ конкретного типа»

Источник: составлено авторами.

Table 6

Description of the elements of the ITC of a specific type structural level

Source: compiled by the authors.

Элемент	Состояние
ТС	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ микрорайонного значения
	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ районного значения
	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ окружного значения
	Элемент <i>i</i> находится на парковке ЦМТ регионального значения
Маршрутное ТС	Элемент <i>i</i> находится на остановочном пункте <i>s</i> , находящимся в пешей доступности к ЦМТ микрорайонного значения
	Элемент <i>i</i> на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к ЦМТ районного значения
	Элемент <i>i</i> на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к ЦМТ окружного значения
	Элемент <i>i</i> на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к ЦМТ регионального значения
УДД (водитель индивидуального транспортного средства, пассажир, пешеход)	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ микрорайонного значения с целью получения услуги
	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ районного значения с целью получения услуги
	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ окружного значения с целью получения услуги
	Элемент <i>i</i> посещает ЦМТ регионального значения с целью получения услуги
Используемый тип статистик*	1) Е-система 2) Р-система

Примечание.

*Могут быть использованы и другие типы статистик в зависимости от размера населенного пункта, времени суток, объема парковочного пространства, ёмкости ЦМТ, характера конкретной городской функции рассматриваемого ЦМТ.

3. Конкретный ЦМТ

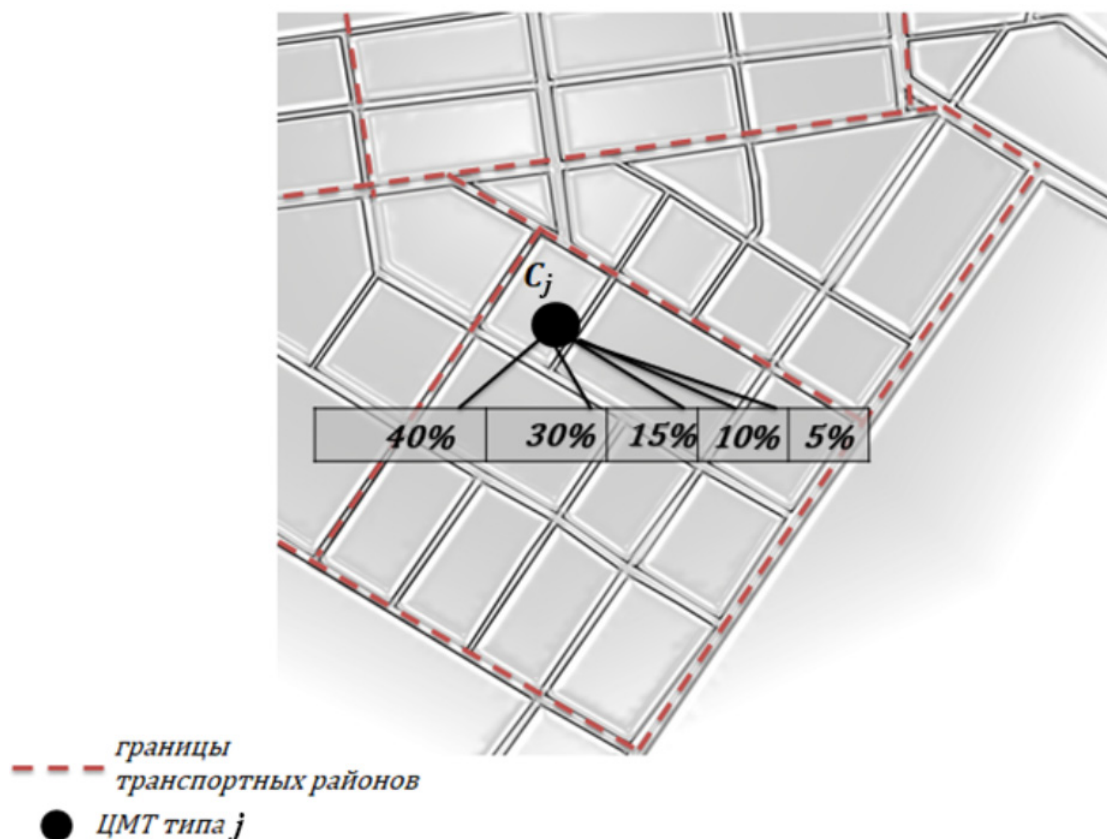


Рисунок 7– Схема долевого распределения целей поездок для ЦМТ
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Shared distribution of travel objectives for ITC
Source: compiled by the authors.

Описание транспортной системы

Транспортная система включает в себя территорию ЦМТ с её парковочными пространствами, которые учитываются на рассматриваемой территории и относятся к определенной городской функции (за исключением жилого сектора), представлена на рисунке 7.

Е, В-система – вводится классификация ЦМТ, которая справедлива для уровня 2 и 3.

Таким образом, для транспортной системы можно ставить и решать следующие задачи:

- 1) о распределении элементов (таблица 7) на территориях ЦМТ конкретного типа (во время получения услуг операция транспортного процесса – ожидание);
- 2) о распределении движущихся элементов к ЦМТ конкретного типа (операция транспортного процесса – транспортировка) и их разновидности.

Множество состояний

«Посетители» («места»)

Подмножество состояний

«Места» посетителей, прибывающих различными способами (по типам ТС)

Таблица 7

Описание элементов структурного уровня «Конкретный ЦМТ»

Источник: составлено авторами.

Table 7

Description of the elements of the Specific WTC structural level

Source: compiled by the authors.

Элемент	Состояние
УДД (водитель, пассажир, пешеход)	Элемент <i>i</i> прибывает пешком в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на общественном транспорте в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на личном транспорте в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на такси в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> прибывает на каршеринге в исследуемый ТЦ
	Элемент <i>i</i> находится в исследуемом ТЦ
	Местоположение элемента <i>i</i> и цели его передвижений не связаны с исследуемым ТЦ
ТС	Элемент <i>i</i> находится на парковке конкретного ЦМТ
Маршрутное ТС	Элемент <i>i</i> находится на остановочном пункте <i>s</i> , находящемся в пешей доступности к конкретному ЦМТ

Анализ методики постановки задач о равновесных состояниях транспортных систем на соответствующих СУ заключается в следующем:

- 1) выбирается подмножество состояний для соответствующих элементов исходя из практического задания на проектирование;
- 2) выбирается необходимый структурный уровень описания транспортной системы;
- 3) составляется соответствующая система уравнений и неравенств типа (3);
- 4) выполняется описание этой системы и делается схема численного расчета.

Приведем пример использования этой методики. Предположим, задача заключается в поиске равновесного состояния распределения посетителей ЦМТ конкретного типа (мезоуровень). Решается задача типа: элемент i посещает ЦМТ регионального значения с целью получения услуги (см. таблицу 6). Тогда система типа (3) выглядит следующим образом:

запишем модель системы для мезоуровня в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ P(t) = \{P_1, \dots, P_\alpha, \dots, P_p : P_\alpha = \sum_{p=1}^{p_f} n_p(t) | p \in T_\alpha\}; \\ p = 1, \dots, p_f(t); \\ \pi_p = \pi_p(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{p_f}(t)\}; \\ G(t) = g_p \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(P^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m P_n \ln \frac{P_n}{a_n} - (G_n + P_n) \ln(G_n + P_n) \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (4)$$

где p – пассажир (пешеход), прибывший в ЦМТ; T – территория конкретного ЦМТ. Кроме этого, в (4) обозначено $\tilde{\Sigma} = \tilde{\Sigma}(t)$ пространство прибытия-убытия ЦМТ (парковочное пространство ЦМТ). Выражение $\rho = \rho(t)$ определяет наличие связей между подмножествами состояний, определяющих возможные потоки, например, перераспределение посетителей ЦМТ (в случае альтернативных посещений ЦМТ и др.) Соотношение $q = q(t)$ устанавливает пропускные способности, соответствующие связям между элементами подмножества состояний. $\pi_p = \pi_p(t)$ при этом становится характеристикой процесса, выполняемого участниками ДД в данном ЦМТ, а именно остановка на получение услуги данного ЦМТ.

Данная задача требует предварительной подготовки исходных данных о количестве, расположении, емкостях подмножества состояний, а именно конкретных парковочных зон, принадлежащих ЦМТ, а также расчета априорных вероятностей, что является достаточно нетривиальной задачей и характеризует спрос каждого конкретного ЦМТ.

Таким образом, используя обобщенную модель макросистемы (3) можно сформулировать достаточно большое число задач, описанных в таблицах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Имея совокупность подобных постановок задач, можно обратить внимание, что постановки задач о распределении транспортных средств по сети и о распределении участни-

ков ДД по территориям ЦМТ аналогичны и могут решать совместно на каждом структурном уровне. Это дает возможность не просто описывать центры генерации и поглощения транспортных средств как неких абстрактных объектов, а выполнять их существенную детализацию с точки зрения соответствующих реальных возможностей конкретных ЦМТ. Таким образом, возникает возможность ставить и решать связанные задачи равновесия различных макросистем на одном и том же структурном уровне (или даже разных).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассмотрено описание обобщенной транспортной системы в терминах теории транспортных макросистем. Транспортная система, состоящая из множеств отличающихся элементов, может демонстрировать совершенно различные равновесные состояния на разных структурных уровнях (макро-, мезо-, микро-) и для элементов разного типа (например, транспортные средства, участники дорожного движения, пользователи транспортной системы: водители, пешеходы и др.). Поэтому исследования были направлены на разработку единообразного описания формулировок задач о поиске равновесия в подсистемах разных структурных уровней. При этом в исследовании выделяются конкретные частные задачи, например, о поиске равновесного распределения посетителей в группе

ЦМТ определённого типа или транспортных средств в транспортных потоках [27, 28, 29, 30] на маршрутах⁸, перегонах, участках сети⁹ и др.

Отмечается наличие аналогий описания равновесий для распределения посетителей ЦМТ и для распределения транспортных средств на УДС на соответствующих СУ.

СУ могут использоваться и для классификации различных частных случаев транспортных систем, а также для выявления той границы, при достижении которой макросистемное описание становится невозможным (стохастическое поведение элементов не преобразуется в детерминированное поведение системы).

Постановка каждой задачи сопровождается соответствующей подготовкой системы (3): выбор типа элемента, выбор множества и подмножеств состояний, обоснование способа заполнения подмножества состояний элементами (В-, Е-, F-системы), определение типа ресурса и способа его расходования, вычисление априорных вероятностей для элементов, а также обоснование применимости макроскопического подхода для рассматриваемого структурного уровня. После этого следует выбор необходимой численной схемы, которая представляет собой тот или иной алгоритм реализации метода неопределенных множителей Лагранжа.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы решены следующие задачи: разработано описание структурных уровней множеств объектов улично-дорожной сети и центров массового тяготения как основных компонентов транспортных макросистем; разработаны постановки задач о поиске равновесных состояний транспортных систем на соответствующих структурных уровнях; выполнен анализ полученной методики, а также установлена аналогия описания равновесий для распределения посетителей ЦМТ и для распределения транспортных средств на УДС на соответствующих СУ в смысле общности постановки задач моделирования методами теории макросистем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wilson A. G. Ecological and urban systems models: some explorations of similarities in the context of complexity theory. *Environment and Planning A*, 2006; 38(4), 633–646.
2. Wilson A.G. The Future of Urban Modelling. *Appl. Spatial Analysis* 11, 647–655 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9258-6>.
3. Швецов В. И. Проблемы моделирования передвижений в транспортных сетях // ТРУДЫ МФТИ. 2010. Том 2, № 4. С. 169–179.
4. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации / А.С. Алиев, А.И. Стрельников, В.И. Швецов, Ю.З. Шершевский // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11. С. 113–125.
5. Структура комплексной модели транспортной системы г. Москвы / А.С. Алиев, Д.С. Мазурин, Д.А. Максимова, В.И. Швецов // Труды ИСА РАН. 2015. Т.65. № 1. С. 3–15.
6. Гасников А. В., Гасникова Е. В. О возможной динамике в модели расчёта матрицы корреспонденций (А. Дж. Вильсона) // ТРУДЫ МФТИ. 2010. Т. 2, № 4. С. 45–54.
7. Banks C.M. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains, John Wiley and Sons, Hoboken NJ, 2010. Pp. 1-24.
8. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *J. American Instit. Planners*. 1956. V. 22. P. 94–102.
9. de Martinis V., Pagliara F., & Wilson A.G. (2014). The evolution and planning of hierarchical transport networks. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 41(2). 192–210.
10. Dieleman F.M., Dijkstra M., and Burghouwt G. (2002). "Urban form and travel behavior: micro-level household attributes and residential context." *Urban Studies*, Vol. 39, No. 3, pp. 507–527, DOI: 10.1080/00420980220112801.
11. Ellam L. Stochastic modelling of urban structure/ L. Ellam, M. Girolami, G. A. Pavliotis, A. Wilson // 2018 Proc. R. Soc. A 20170700. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2017.0700>.
12. Goulias K. G., Kitamura R. Recursive model system for trip generation and trip chaining. *Transportation Research Record*, 1991, Vol. 1236, pp. 59–66.
13. Hauslbaue A. L., SchadeJ., Drexler C.E. Extending the theory of planned behavior to predict

⁸ Агуреев И. Е. Модельное представление транспортной системы города (агломерации) с позиций теории макросистем / И. Е. Агуреев, А. В. Ахромешин // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2021): Сборник статей XIII Международной научно-технической конференции, Курск, 20 ноября 2021 года / Отв. редактор Е.В. Агеев. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021 С. 20–23.

⁹ Агуреев И. Е. Транспортная модель для обоснования принимаемых решений с целью совершенствования организации движения грузового автомобильного транспорта / И. Е. Агуреев, В. А. Пышный, В. А. Митюгин // Сборник научных статей X Международной научно-практической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ» (30 декабря 2020 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т.; Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 33–38.

and nudge toward the subscription to a public transport ticket. *Eur. Transp. Res. Rev.* 14, 5, 2022. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00528-3>.

14. Javid M. A., Okamura T., Nakamura F. People's behavioral intentions towards public transport in Lahore: Role of situational constraints, mobility restrictions and incentives. *KSCE J CivEng* 20, 401–410 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12205-015-1123-4>.

15. Li, W Exploring Resident's Daily Activity-Travel Behavior: Activity Pattern, Duration and Competition / W. Li, H. Guan, Y. Han // *KSCE J CivEng* 25, 3121–3135 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2013-6>.

16. Matyas M. Opportunities and barriers to multimodal cities: lessons learned from in-depth interviews about attitudes towards mobility as a service. *Eur. Transp. Res. Rev.* 12, 7 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0395-z>.

17. Feng J. The impacts of household structure on the travel behaviour of seniors and young parents in China. / J. Feng, M. Dijst B. Wissink J. Prillwitz. *Journal of Transport Geography*. 2013. Vol. 3. pp. 117–126, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.03.008.

18. Modeling of the city transport flows as applied to the Moscow agglomeration / A. S. Aliev, V. I. Shvetsov, A. I. Strel'nikov, Yu. Z. Shershevskii // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66. No 11. P. 1805-1815. DOI 10.1007/s10513-005-0214-y.

19. Агуреев И. Е. Развитие теории макросистем как необходимое условие повышения качества транспортного моделирования // *Мир транспорта*. Москва, 2020. № 2 (Т. 18). С. 6–20.

20. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // *Мир транспорта*. 2021. Т. 19, № 6(97). С. 13–18. DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2.

21. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. Обоснование выбора теоретического аппарата для описания транспортного поведения жителей города (мегаполиса) // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т. 18, № 6(82). С. 746–758. DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758.

22. 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.

23. Агуреев И. Е. Нелинейные модели транспортных систем // *Мир транспорта и технологических машин*. Орел: ГТУ, 2009. № 2. С. 3–16.

24. Banerjee A. Understanding activity engagement and time use patterns in a developing country context, Doctoral dissertation, University of South Florida, 2006.

25. Бурков Д. Г., Зедгенизов А. В. Математическое описание транспортного спроса к объектам культурно-бытовой направленности // *Вестник ИрГТУ*. 2016. Т. 20, № 12. С. 201–209.

26. Zedgenizov A.V. Assessment of the impact of capital construction on the adjacent street-road network with traffic at unregulated intersections. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyemeh

- 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012066. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012066. EDN AMGLHB.

27. Zeng M. Stochastic route choice models based on VMS information and hierarchy for urban transport network / M. Zeng, Z. Ling, B. Zhang // *KSCE J CivEng* 22, 850–858, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0107-y>.

28. Zedgenizov A.V., Seliangin K., Efremenko I. Methodology for assessing required area for allocating centers of mass attraction in layout of urbanized territories and their impact on quality of traffic management in adjacent street and road network. *Transportation Research Procedia*. 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" 2020. pp. 743-748.

29. Solodkiy A.I., Chernikh N. V. Improving the level of traffic service on the road network of cities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012044. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012044. EDN MLK KOA.

30. Tyrinopoulos Y., Antoniou C. Factors affecting modal choice in urban mobility. *Eur. Transp. Res. Rev.* 5, 27–39, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12544-012-0088-3>.

REFERENCES

1. Wilson A. G. Ecological and urban systems models: some explorations of similarities in the context of complexity theory. *Environment and Planning A*, 2006; 38 (4): 633–646.

2. Wilson A.G. The Future of Urban Modelling. *Appl. Spatial Analysis* 11, 647–655 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9258-6>.

3. Shvecov V. I. Problemy modelirovaniya peredvizhenij v transportnyh setjah TRUDY MFTI [Problems of movement modeling in transport networks]. *TRUDY MFTI*. 2010; Tom 2. No 4: 169–179. (In Russ.)

4. Shvecov V. I., Strel'nikov A. I., Shvecov V. I., Shershevskij Ju. Z. Modelirovanie transportnyh potokov v krupnom gorode s primeneniem k moskovskoj aglomeracii [Modeling of traffic flows in a large city with application to the Moscow agglomeration]. *Automatic i telemekhanika*. 2005; 11: 113–125. (In Russ.)

5. Shvecov V. I., Mazurin D. S., Maksimova D. A., Shvecov V. I., Aliev A. S. Struktura kompleksnoj modeli transportnoj sistemy g. Moscow. [Structure of the integrated model of the transport system in Moscow]. *Trudy ISA RAN*. 2015; T.65, no 1: 3–15. (in Russ.)

6. Gasnikov A.V., Gasnikova E.V. O vozmozhnoj dinamike v modeli raschjota matricy korrespondencij (A. Dzh. Vil'sona) [On the possible dynamics in the model of calculating the correspondence matrix (A. J. Wilson)]. *TRUDY MFTI*. 2010; T. 2. № 4: 45–54. (in Russ.)

7. Banks C.M. Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains, John Wiley and Sons, Hoboken NJ, 2010: 1–24.

8. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // J. American Instit. Planners. 1956. V. 22: 94 – 102.
9. de Martinis V., Pagliara F., & Wilson A.G. (2014). The evolution and planning of hierarchical transport networks. *Environment and Planning. B, Planning & Design*, 41 (2): 192–210.
10. Dieleman F.M., Dijst M., and Burghouwt G. (2002). "Urban form and travel behavior: micro-level household attributes and residential context." *Urban Studies*, Vol. 39, No. 3: 507–527, DOI: 10.1080/00420980220112801.
11. Ellam L. Stochastic modelling of urban structure / L. Ellam, M. Girolami, G. A. Pavliotis, A. Wilson // 2018 Proc. R. Soc. A 20170700. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2017.0700>.
12. Goulias K. G., Kitamura R. Recursive model system for trip generation and trip chaining. *Transportation Research Record*. 950300101991, Vol. 1236. pp. 59–66.
13. Hauslbaue A. L. Schade J., Drexler C. E. Extending the theory of planned behavior to predict and nudge toward the subscription to a public transport ticket. *Eur. Transp. Res. Rev.* 14, 5, 2022. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00528-3>.
14. Javid M. A. People's behavioral intentions towards public transport in Lahore: Role of situational constraints, mobility restrictions and incentives / M. A. Javid, T. Okamura, F. Nakamura // *KSCE J Civ Eng* 20, 401–410 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12205-015-1123-4>.
15. Li, W Exploring Resident's Daily Activity-Travel Behavior: Activity Pattern, Duration and Competition / W. Li, H. Guan, Y. Han // *KSCE J CivEng* 25, 3121–3135 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2013-6>.
16. Matyas M. Opportunities and barriers to multi-modal cities: lessons learned from in-depth interviews about attitudes towards mobility as a service. *Eur. Transp. Res. Rev.* 12, 7 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0395-z>.
17. Feng J. The impacts of household structure on the travel behaviour of seniors and young parents in China. / J. Feng, M. Dijst B. Wissink J. Prillwitz. *Journal of Transport Geography*. 2013. Vol. 3. pp. 117–126, DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.03.008.
18. Modeling of the city transport flows as applied to the Moscow agglomeration / A. S. Aliev, V. I. Shvetsov, A. I. Strel'nikov, Yu. Z. Shershevskii // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66. No 11. P. 1805-1815. DOI 10.1007/s10513-005-0214-y.
19. Agureev I. E. Razvitie teorii makrosistem kak neobhodimoe uslovie povysheniya kachestva transportnogo modelirovaniya [Development of macrosystem theory as a prerequisite for improving the quality of transport modeling]. *Mir transporta*. Moscow. 2020; 2 (Tom 18); 6–20. (In Russ.)
20. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Mathematical Model of Transport Behaviour Based on Transport Macrosystems Theory. *World of Transport and Transportation*. 2021; 19 (6): 13-18. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>
21. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Justification of the choice of a theoretical apparatus to describe the transport behavior of city residents (megapolis). *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):746-758. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>
22. Agureev I. E., Akhromeshin A. V. Mathematical Model of Transport Behaviour Based on Transport Macrosystems Theory. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(6):13-18. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-2>
23. Agureev I. E. Nelinejnye modeli transportnyh sistem [Non-linear models of transport systems]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. Orel: GTU, 2009; 2: 3-16. (In Russ.)
24. Banerjee A. Understanding activity engagement and time use patterns in a developing country context, Doctoral dissertation, University of South Florida, 2006.
25. Zedgenizov A. V. Assessment of the impact of capital construction on the adjacent street-road network with traffic at unregulated intersections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroy-meh - 2019*, ISM 2019, Kazan, 12–13 sentjabrja 2019 goda. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012066. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012066. EDN AMGLHB.
26. Zeng M., LingZ., Zhang B. Stochastic route choice models based on VMS information and hierarchy for urban transport network. *KSCE J Civ Eng* 22, 850–858, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0107-y>.
27. Zedgenizov A. Seliangin V. K., Efremenko I. Methodology for assessing required area for allocating centers of mass attraction in layout of urbanized territories and their impact on quality of traffic management in adjacent street and road network. *Transportation Research Procedia*. 14. Ser. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" 2020. S. 743-748.
28. Solodkiy A. I., Chernikh N. V., Improving the level of traffic service on the road network of cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroy-meh - 2019*, ISM 2019, Kazan, 12–13 sentjabrja 2019 goda. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012044. DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012044. EDN MLKKA.
29. Tyrinopoulos Y., Antoniou C. Factors affecting modal choice in urban mobility. *Eur. Transp. Res. Rev.* 5, 27–39, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12544-012-0088-3>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Агуреев И. Е. Формулировка задач исследования, научные положения.

Ахромешин А. В. Оформление, поиск и подбор источников литературы. Обзор классификаций УДС, анализ исследований отечественных и зарубежных авторов.

Пышный В. А. Обзор классификаций ЦМТ, анализ исследований отечественных и зарубежных авторов.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Igor E. Agureev. Statement of research objectives, scientific provisions.

Andrey V. Akhromeshin. Design, search and selection of literature sources. Review of UDS classifications, analysis of research by domestic and foreign authors.

Vladislav A. Pyshnyi. A review of the classifications of ITC, an analysis of the research of domestic and foreign authors.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агуреев Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство», SPIN-код: 1910-6751.

Ахромешин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Пышный Владислав Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство», SPIN-код: 9454-4966.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Igor E. Agureev – Dr of Sci., Associate Professor, Head of the of the Motor Transport and Motor Industry Department, SPIN-код: 1910-6751.

Andrey V. Akhromeshin – Cand. of Sci., Associate Professor, the Motor Transport and Motor Industry Department.

Vladislav A. Pyshnyi – Cand. of Sci., Associate Professor, the Motor Transport and Motor Industry Department, SPIN-код: 9454-4966.