

## ПОСТРОЕНИЕ МИКРОМОДЕЛИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ

Е. Р. МАЙОРОВ<sup>1</sup>, Л. А. УВАРОВА<sup>2</sup>, О. Н. САПРЫКИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>benjamin1437@mail.ru, <sup>2</sup>ladauvarova08@gmail.com, <sup>3</sup>saprykinon@gmail.com

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»  
(Самарский университет)

*Поступила в редакцию 18 декабря 2018 г.*

**Аннотация.** Проблема эффективности транспортной системы остро стоит во многих городах мира. Транспортная система города является сложной технической системой, что не позволяет модернизировать ее без применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Одним из ключевых элементов подобных систем является система имитационного моделирования транспортных потоков, благодаря которой появляется возможность проверить проектные решения до их непосредственной реализации и введения в эксплуатацию. Однако процесс создания модели транспортных потоков не является тривиальной задачей и требует глубокого анализа транспортного спроса в городе. В статье предлагается подход к построению микроскопической модели транспортных потоков города, основанный на системной интеграции источников с открытыми данными, методов моделирования транспортного спроса и мультиагентной системы моделирования.

На начальном этапе предлагаемого подхода происходит импорт данных из открытых источников. Улично-дорожная сеть импортируется из веб-ресурса OpenStreetMap. Информация о населении и организациях города импортируется из открытых данных, предоставляемых сайтами государственных органов. Моделирование транспортного спроса производится по гравитационному методу. На основе информации об улично-дорожной сети и транспортном спросе формируются цепи корреспонденций: генерируются агенты, расписание и путь их перемещений по городу. На последнем этапе предлагаемого подхода запускается система имитационного моделирования SUMO.

Решение поставленной задачи реализовано на языке программирования Python, который позволяет работать с моделью итеративно, пошагово внося изменения. В качестве среды выполнения был выбран Zerpelin, поскольку он предоставляет возможность создания масштабируемых ноутбуков с богатым пользовательским интерфейсом.

Проверка разработанного подхода осуществлялась на данных города Самары. Тестирование показало полную работоспособность разработанного метода построения микроскопической модели транспортных потоков. Главным достоинством метода является то, что для создания цепей корреспонденций необходим минимальный набор данных: транспортные районы, количество жителей и организаций в каждом транспортном районе. На данный момент полученная модель имеет ряд недостатков. Некоторые участки дорог не используются агентами из-за несовершенства преобразования данных из OpenStreetMap. Дальнейшее развитие проекта лежит в улучшении процесса импорта посредством очистки данных, решения задач верификации имитационной модели на реальных данных и повышения точности получаемой модели.

**Ключевые слова:** моделирование транспортных процессов; микроскопическое моделирование; матрица корреспонденций; SUMO.

### ВВЕДЕНИЕ

С момента, когда человечество перешло из доиндустриального в индустриальное общество, начался процесс урбанизации. Большая часть населения начала концентрироваться в городах, что привело к уве-

личению их размеров и появлению транспортной проблемы. Происходит это из-за того, что увеличивается количество личных транспортных средств. Во многих городах Европы данную проблему решают улучшением общественного транспорта и льготами для людей, отказавшихся от личного транс-

порта. К сожалению, в достаточно больших городах и мегаполисах применить это решение не всегда представляется возможным. Приемлемым способом является улучшение улично-дорожной сети города. В современных условиях высокой плотности транспортных потоков необходимо учитывать множество факторов при анализе транспортной ситуации, что невозможно выполнить без специализированных инструментов. Данная проблема обычно решается при помощи такого автоматизированного метода поддержки принятия решений [1], как имитационное моделирование.

Подобными задачами занимались М. Р. Якимов, Т. И. Михеева, Ю. Р. Михайлов. Якимов в своей работе [2] делает уклон на методы получения информации, необходимой для транспортного моделирования. Также он проводит анализ отдельных видов транспорта и моделирование транспортных спроса и предложений. Работы Михеевой [3] по моделированию транспортных процессов основаны на транспортной геоинформационной системе ITSGIS. Михайлов в своей работе [4] создал систему показателей уровня обслуживания, а также методы оценки матриц корреспонденций. В этих исследованиях главным образом проводится усовершенствование моделей городов путем постоянного анализа их транспортных систем. Последнее время большое внимание в литературе уделяется микроскопическому моделированию транспортных потоков. Часть работ посвящена разработке и оптимизации мультиагентных систем. Например, работа [5] посвящена оптимизации синхронизации сигналов агентов в микроскопической модели. Интерес также представляют работы, посвященные внедрению поведения человека в модели водителей микроскопических моделей транспортных средств [6]. Важным элементом моделирования является анализ полученных данных. Например, G. Waizman [7] занимается анализом данных аварий и других происшествий на дороге, а M. Andre [8] – анализом зависимости загрязнения от количества автомобилей. Так же существует множество исследований на узкие темы, такие как взаимодействие транспортных средств и пеше-

ходов [9], исследование поведения транспортных средств с различной скоростью движения [10]. Главными задачами данной работы являются: создание универсального метода построения цепей корреспонденций для использования в программе транспортного моделирования SUMO; создание модели транспортных процессов в городе Самаре, с использованием открытых данных.

## МЕТОДЫ

Моделирование – это создание модели, характеристики которой максимально приближены к характеристикам объекта реального мира. В данной работе используется моделирование транспортных процессов. Данный способ позволяет без больших экономических затрат и физических усилий проверить целесообразность любых изменений [11] на улично-дорожной сети.

На данный момент существует большое количество прикладных программ, позволяющих осуществить транспортное моделирование от макроскопического до микроскопического уровня детализации: VISSIM, MATSim, SUMO, T7F/TSIS, TRANSYT. Особенностью микроскопического моделирования является возможность моделирования поведения [12] отдельных транспортных средств. В данной работе используется система микроскопического моделирования транспортных потоков SUMO.

Для наиболее точного построения модели необходимо решить 3 задачи: разбиение города на транспортные районы, построение матрицы корреспонденции [13] и построение цепей корреспонденции. В идеальной модели транспортных процессов транспортные районы являются такими районами, в пределах которых агент не использует транспорт для передвижения. В данной работе в качестве первоначального варианта за транспортные районы были приняты административные районы города.

Одной из важнейших задач в транспортном моделировании является построение матрицы корреспонденций. Существует несколько классов построения матрицы корреспонденций. К первому классу относятся линейные модели, такие как модель грузовых железнодорожных перевозок. Ко второму классу относятся статистические мо-

дели, которые используются в пассажирских перевозках на разных видах транспорта. К третьему классу – гравитационные модели, а к четвертому – энтропийные.

Для построения матрицы корреспонденций была использована гравитационная модель, так как она хорошо описывает передвижение городского транспорта. Она была предложена В. Рейли [14]. Применительно к транспортной системе в качестве тел выступают пункты, порождающие и поглощающие транспортные потоки [15], за массу тела принимается суммарный объем выезжающего и въезжающего транспортного потока. Физическое расстояние можно заменить любыми затратами, связанными с передвижением из одного транспортного района в другой. Транспортная гравитационная модель связывает интенсивность потока  $T_{ij}$  между полным числом отправок из  $i$ -го района  $Q_i$  и прибытий в  $j$ -й район  $D_j$  и затратами на передвижение между зонами  $i$  и  $j$  –  $c_{ij}$

$$T_{ij} = \frac{Q_i D_j}{c_{ij}^2} \quad i=1, \dots, N, \quad j=1, \dots, M,$$

где  $N$  – общее количество районов отправления,  $M$  – общее количество районов прибытия. В данной модели расстояние между районами считается как расстояние между центрами этих районов.

Построение цепей корреспонденций является сложной задачей, поскольку построение маршрутов для каждого агента в соответствии с матрицей корреспонденций не тривиально. Главной целью являлось создать универсальный метод, который подойдет к моделированию транспортных процессов любого города в программе SUMO.

Первым шагом является получение карты города. Ее можно получить из картографических online-источников: Яндекс.Карты, GoogleMaps или OpenStreetMap. Во многих случаях имеется возможность использовать формат данных xml. Его использование предпочтительно, поскольку позволяет применять стандартные средства чтения структурированных текстовых файлов с данными.

Следующим шагом является разбиение города на транспортные районы. Для этого

был использован язык программирования Python [16] и библиотека GeoPandas. Данная библиотека позволяет работать и производить различные манипуляции с географической базой данных, в которой содержатся различные таблицы с исходными данными: названиями улиц, районов, дорог и т.д.

После получения базы данных с координатами дорог и районов необходимо определить принадлежность дорог к определенному району. С помощью операции «overlay» из библиотеки GeoPandas можно выполнять различные наложения двух пространственных таблиц и визуализировать их. После этого создается общий файл, содержащий данные о принадлежности всех дорог в городе определенному району.

Следующим шагом является занесение полученных данных в программы OD2TRIPS и DUAROUTER. Данные программы содержат алгоритмы построения маршрутов для агентов. OD2TRIPS позволяет определить начальную и конечную точки пути, однако она не имеет возможности составлять маршрут по реально существующим дорогам. А программа DUAROUTER составляет путь, исходя из данных, полученных в OD2TRIPS и улично-дорожной сети. Данные программы дополняют друг друга для создания цепей корреспонденций.

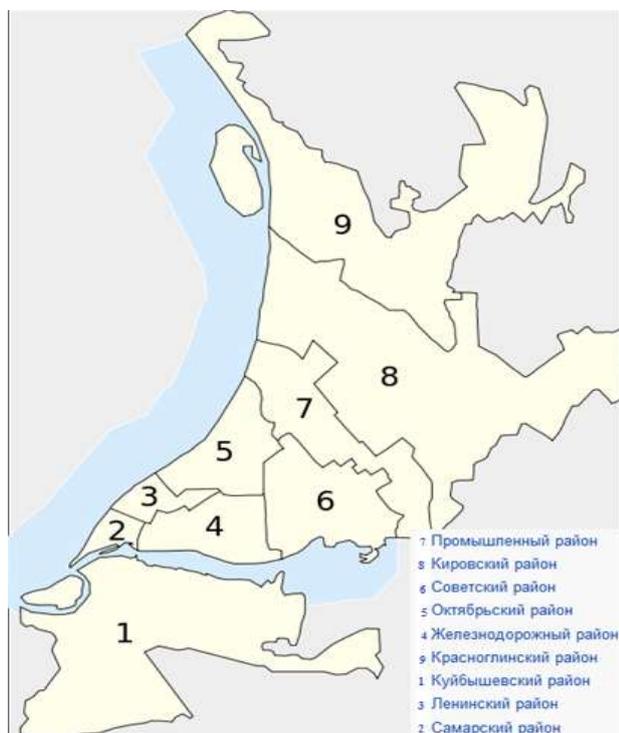
Заключительным шагом является занесение всех полученных данных в программу SUMO для визуализации процесса моделирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Самара – достаточно большой город с обширной инфраструктурой. Население, по данным на 2012 год, составляет 1,17 млн человек [17]. Соответственно, как и у многих городов с количеством жителей более миллиона человек, имеется такая проблема, как многочисленные транспортные заторы, которые доставляют жителям неудобства и оказывают негативное влияние на социально-экономическое положение города в целом [18].

Для поиска оптимального решения предложена имитационная модель транспортных потоков города. В первоначальном варианте деление города на транспортные

районы проведено по административным районам. В итоге город разделен на 9 транспортных районов, представленных на рис. 1.



**Рис. 1.** Разделение г. Самары на транспортные районы

Построенная матрица корреспонденций [19], представленная на рис. 2, показывает интенсивность транспортных потоков между полученными транспортными районами. Проанализировав полученную матрицу, можно выявить несколько закономерностей:

- Интенсивность между двумя районами напрямую зависит от количества жителей в этих транспортных районах, чем больше жителей в районах, тем больше интенсивность между ними.
- Интенсивность зависит от расстояния между двумя транспортными районами. Например, интенсивность между Куйбышевским и Красноглинским районами очень мала, так как они находятся на большом расстоянии друг от друга.
- В данной матрице интенсивность внутри района равна 0, так как изначально была выдвинута гипотеза о том, что жители одного транспортного района не используют общественный и личный транспорт при передвижении.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00	124,40	142,96	117,09	203,55	98,79	58,88	135,55	17,03
2	124,40	0,00	319,98	81,56	122,94	41,30	36,60	75,33	8,27
3	142,36	319,98	0,00	388,54	494,69	112,89	166,45	264,51	24,93
4	117,09	81,56	388,54	0,00	930,95	669,62	571,22	2237,89	90,71
5	203,55	122,94	494,69	930,95	0,00	477,22	214,82	533,88	39,79
6	98,79	41,30	112,89	669,62	477,22	0,00	930,27	1523,08	126,35
7	58,88	36,60	116,45	571,22	214,82	930,27	0,00	3314,59	645,36
8	135,55	78,33	264,51	2237,89	533,88	1523,08	3314,59	0,00	407,83
9	17,03	8,27	24,93	90,71	39,79	126,35	654,36	407,83	0,00

**Рис. 2.** Матрица корреспонденций

Далее необходимо определить дороги, принадлежащие каждому району. Применение разработанных программных сценариев на языке программирования Python позволило выделить дороги, входящие в каждый район. После использования созданного метода построения цепей корреспонденций и занесения всех полученных данных в программу SUMO было запущено моделирование транспортных потоков [20] в городе.

На рис. 3 представлен скриншот из программы SUMO. Желтыми треугольниками обозначены агенты – транспортные средства. В данной программе можно изменять их цвет в зависимости от их характеристик (скорость, время ожидания, уровень выброса вредных веществ). Агенты могут обмениваться информацией друг с другом посредством габаритных огней, обозначающих торможение или поворот. На каждом участке дороги указаны возможные движения для агентов (например, может ли он ехать вперед или сделать разворот). На карте также указываются пути движения рельсовых видов транспорта. На регулируемых перекрестках отображаются сигналы светофоров.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Созданный метод построения цепи корреспонденции является полностью рабочим. Уже в данный момент его можно использовать для создания модели транспортных процессов в других городах. Главным достоинством данной модели является то, что для создания цепей корреспонденций необходим минимальный набор данных: транспортные районы, количество жителей и организаций в каждом транспортном районе.



**Рис. 3.** Модель транспортных потоков в программе SUMO

На данный момент полученная модель имеет ряд недостатков. Многие участки дорог не используются агентами. Подавляющее большинство перемещаются по Московскому и Заводскому шоссе, и лишь некоторые агенты перемещаются по маленьким улицам. Агенты исчезают и появляются на границе Куйбышевского района. Дальнейшее развитие проекта лежит в решении задач верификации имитационной модели на реальных данных и повышении точности модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы был получен универсальный метод создания цепей корреспонденций, были изучены различные модели матриц корреспонденций, разработан код на языке программирования Python для разбиения города на транспортные районы и определения принадлежности участков дорог к районам. В дальнейшем будет проведено сравнение реальной интенсивности потока и смоделированной для анализа правильности построения модели. Данная модель будет усовершенствована путем уменьшения транспортных районов до минимальных размеров. Также будет улучшаться матрица корреспонденции путем получения более точных данных о жителях города: количество организаций и количество людей, работающих в них; количество учащихся в школах и институтах и т.д. В улучшенной модели будет применен более точный метод построения матрицы корреспонденций – энтропийный метод. Также рассматривается применение кластерного

анализа при разбиении города на транспортные районы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang T., et al. Enabling bidirectional traffic mobility for ITS simulation in smart city environments // *Future Generation Computer Systems*. Vol. 92, March 2019, pp. 342-356.
2. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография. М.: Логос, 2013. 188 с. [ M. R. Yakimov, *Transport planning: the creation of transport models of cities*, (in Russian). Moscow: Logos, 2013]
3. Михеева Т. И., Михеев С. В., Рудаков И. А. Моделирование дорожного движения в интеллектуальной транспортной системе // *Актуальные проблемы автотранспортного комплекса*. 2010. С. 141-151 [Т. И. Mikheeva, S. V. Mikheev, I. A. Rudakov, "Simulation of traffic in an intelligent transport system", (in Russian), in *Aktual'nye problemy avtotransportnogo kompleksa*. 2010. P. 141-151]
4. Михайлов А. Ю. Научные основы проектирования улично-дорожных сетей. URL: [http://transport.istu.edu/downloads/auto\\_mikhailov.pdf](http://transport.istu.edu/downloads/auto_mikhailov.pdf) (дата обращения 19.03.2017) [A. U. Mikhailov ( 2017, March 19.) *Scientific basis for the design of road networks* [Online] (in Russian) Available: [http://transport.istu.edu/downloads/auto\\_mikhailov.pdf](http://transport.istu.edu/downloads/auto_mikhailov.pdf)]
5. Sun L., et al., Microscopic Simulation and Optimization of Signal Timing based on Multi-Agent: A Case Study of the Intersection in Tianjin // *KSCE Journal of Civil Engineering* Vol. 22, Iss. 9, 1 September 2018, pp. 3373-3382.
6. Lindorfer M., Mecklenbrauker C. F., Ostermayer G., Modeling the Imperfect Driver: Incorporating Human Factors in a Microscopic Traffic Model // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 19, Iss. 9, September 2018, Article number 8116671, pp. 2856-2870.
7. Waizman G., Shoal S., Benenson I. Traffic accident risk assessment with dynamic microsimulation model using range-range rate graphs // *Accident Analysis and Prevention* Vol. 119, October 2018, pp. 248-262.
8. Andre M., Pasquier A., Carteret M. Experimental determination of the geographical variations in vehicle fleet composition and consequences for assessing low-emission zones // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 65, December 2018, pp. 750-760.
9. Gorrini A., et al. Observation results on pedestrian-vehicle interactions at non-signalized intersections towards simulation // *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. Vol. 59, November 2018, pp. 269-285.
10. Huang Y. X., et al., Experimental study and modeling of car-following behavior under high speed situation // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 97, December 2018, pp. 194-215.
11. Tettamanti T. et al. Vehicle-In-the-Loop Test Environment for Autonomous Driving with Microscopic Traffic Simulation // *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES 2018* 31 October 2018, Article number 8519486.
12. Jiang R., et al., On some experimental features of car-following behavior and how to model them // *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 80, October 01, 2015, pp. 338-354.

13. **Сапрыкин О. Н., Майоров Е. Р., Уварова Л. А.** Выделение транспортных районов на улично-дорожной сети города для построения микроскопической модели транспортных потоков // Перспективные информационные технологии: сборник научных статей. 2017. С. 704–707 [O. N. Saprykin, E. R. Maiorov, L. A. Uvarova “ Isolation of transport areas on the city’s road network to build a microscopic model of traffic flows”, (in Russian), in Perspektivnye informacionnye tekhnologii. 2017. pp. 704-707]

14. **Reilly W. J.** The law of retail gravitation. New York. 1931.

15. **Stolfi D. H., Alba E.** Generating realistic urban traffic flows with evolutionary techniques // Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol. 75, October 2018, pp. 36-47.

16. **McKinley W.** Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython. O’Reilly Media. 2012.

17. **Wilson A. G.** A statistical theory of spatial distribution models. Transportation Research. 1967. Vol. 1. P. 253-270.

18. **Jing N.** Application of Wireless Sensor Network in Urban Intelligent Traffic Information Acquisition // Automatic Control and Computer Sciences. Vol. 52, Iss.5, 1 September 2018, pp.431-438.

19. **Moreira-Matias L.** Time-evolving O-D matrix estimation using high-speed GPS data streams // 2016 Expert Systems With Applications 44, pp. 275–288.

20. **Saprykin O., Saprykina O.** Multilevel Modelling of Urban Transport Infrastructure. In Proceedings of the 1st International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS-2015). Portugal, Lisbon: SCITEPRESS, 2015. P. 78-82.

#### ОБ АВТОРАХ

**САПРЫКИН Олег Николаевич**, доц. каф. организации и управления перевозками на транспорте. Дипл. каф. автоматизированных систем обработки информации и управления (СГАУ 2007). Канд. тех. наук, дисс. на тему «Информационная поддержка управления пространственно-координированными объектами средствами нейронных сетей» (СГАУ 2011). Иссл. в обл. моделирования транспортных процессов, интеллектуального анализа данных, искусственного интеллекта.

**МАЙОРОВ Евгений Русланович**, студент каф. организации и управления перевозками на транспорте. (Самарский национальный исследовательский университет).

**УВАРОВА Лада Алексеевна**, студент каф. организации и управления перевозками на транспорте. (Самарский национальный исследовательский университет).

#### METADATA

**Title:** Building micromodels of traffic flows based on open data.

**Authors:** E. R. Maiorov<sup>1</sup>, L. A. Uvarova<sup>2</sup>, O. N. Saprykin<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Samara National Research University, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>benjamin1437@mail.ru, <sup>2</sup>ladauvarova08@gmail.com, <sup>3</sup>saprykinon@gmail.com.

**Language:** Russian.

**Source:** SIIT, no. 1, pp. 14-21, 2019. ISSN 2658-5014 (Print).

**Abstract:** The problem of the efficiency of the transport system is vital in many cities around the world. The social and economic well-being of the city directly depends on the quality of transport communication. The transport system of the city is a complex technical system and the efficiency of it depends on many evident and latent factors. This provision does not allow modernizing the transport infrastructure of the city without using of intelligent decision support systems to assess the effectiveness of the proposed decisions. One of the key elements of such systems is a simulation system of traffic flows, which makes it possible to check the design solutions before their direct implementation and commissioning. However, the process of creating a model of traffic flows is not a trivial task and requires a deep analysis of transport demand in the city. The article proposes an approach to the construction of a microscopic model of transport flows of the city, based on the system integration of sources with open data, methods of modeling of transport demand and multi-agent modeling system.

The proposed approach is based on the principle of transparency of information transformation, which is achieved through the use of a directed acyclic graph for generating data streams. At the initial stage, data is imported from open sources. Street and road network are imported from the OpenStreetMap web resource, which has an open programming interface and a large number of cartographic processing utilities. Information about the population and organizations of the city is imported from open data provided by the websites of government agencies. The collected data is aggregated and converted into the internal format of the database used to build the model. The simulation of transport demand is made by the gravitational method, as it quite well describes the movement of urban transport. With regard to the transport system, the points generating and absorbing traffic flows act as interacting objects, the volume of the leaving or entering traffic flow is taken as the mass of the object. Any costs associated with the movement from one transport area to another are taken for the distance between the objects. Transport demand is formed as the origin-destination matrix showing the volume of movement between transport areas. In this work, the administrative districts of the city are used as transport areas. On the basis of information about the street and road network and transport demand, activity chains are formed. As a result, agents, the schedule and the path of their movements around the city are generated. Activity chain building is performed using SUMO simulation system utilities: OD2TRIPS and DUAROUTER. OD2TRIPS allows determining the starting and ending points of the route, but it does not have the ability to make a route along the street and road network. A DUAROUTER program creates the way, based on the data obtained in OD2TRIPS and the street and road network. At the last stage of the proposed approach, the SUMO simulation system is launched, which allows to visualize the traffic flows of the city, as well as to obtain statistics for further analysis in the intelligent decision support system.

The solution of the problem is implemented in the Python programming language, which allows working with the model iteratively, making changes step by step. The following Python packages were used to work with spatial

data in our project: Shapely; GeoPandas; NetworkX; OS-Mnx; Matplotlib. Zeppelin was chosen as the execution runtime because it provides the ability to create scalable notebooks with a rich user interface. The developed software is implemented in the form of a Docker container, which contains all configured modules and packages and can be deployed in most common operating systems. Scripts and notebooks are stored in Bitbucketgit repositories. Verification of the developed approach was carried out on the data of the city of Samara. Testing has shown the complete operability of the developed method for constructing a microscopic model of traffic flows. The main advantage of the method is that to create an activity chain requires a minimum set of data: transport areas, the number of residents and organizations in each transport area.

At the moment, the resulting model has several disadvantages. Some sections of the road network are not used by agents due to the imperfection of data conversion from OpenStreetMap. Further development of the project is in improving the import process by cleaning the data, solving the problems of verification of the simulation model on real data and improving the accuracy of the resulting model.

**Key words:** modeling of transport processes; microscopic simulation; O-D matrix; SUMO.

**About authors:**

**SAPRIKYN, Oleg Nikolaevich**, Assoc. Prof., Dept. Transportation Organization and Management. Dipl. Automated systems of data processing and control (SSAU 2007). Cand.of Tech. Sci. Information support of management of spatially-coordinated objects by means of neural networks (SSAU 2011).

**MAIOROV, Eugene Ruslanovich**, stud, DEP. Organization and management of transport. Samara national research University.

**UVAROVA, Lada Alekseevna**, stud, DEP. Organization and management of transport. Samara national research University.