

# Оптимизация доступности городского общественного транспорта на основе генетического алгоритма

Е.В. Зубкова<sup>1</sup>, О.Н. Сапрыкин<sup>1</sup>, А.Н. Тихонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** В статье рассмотрена глобальная проблема доступности общественного транспорта в совокупности с пешеходной доступностью к остановкам. Были проанализированы существующие алгоритмы, позволяющие решить проблему доступности общественного транспорта в городах. Создано формальное математическое описание модели города с существующими остановками и маршрутами общественного транспорта. Разработана последовательность решения задачи оптимизации с помощью функций и операторов генетического алгоритма. Разработанный алгоритм реализован на языке программирования Python и прошел апробацию на выборочных данных города Самара.

## 1. Введение

Общественный пассажирский транспорт является важнейшей инфраструктурной составляющей любого города, играющей огромную роль в экономической и социальной жизни горожан. Городской пассажирский транспорт является подсистемой транспортной инфраструктуры и областью взаимодействия трёх систем: город, транспорт, население [Nikitina (2012)]. Основной функцией городского общественного транспорта является обеспечение транспортной подвижности населения. Следовательно, существенное отставание развития пассажирского транспорта от потребности населения в передвижениях, ведёт к появлению социально-экономических проблем и проблем в работе других отраслей экономики города.

Пассажирские перевозки оказывают огромное влияние на транспортную доступность регионов, уровень транспортной подвижности населения и благосостояния граждан. Таким образом, пассажирские перевозки необходимо организовать так, чтобы население было обеспечено необходимыми коммуникациями. Однако во многих городах России с каждым годом всё больше жителей отказываются от услуг городского общественного транспорта. Существуют две основные причины, объясняющие снижение спроса на услуги общественного транспорта. Первая причина – удобство маршрутов общественного транспорта. Очень часто у пассажиров нет возможности добраться на общественном транспорте из одного района города в другой, используя при этом только один маршрут. Таким образом, пассажирам необходимо осуществлять пересадки с одного маршрута на другой, чтобы добраться до нужного пункта назначения. Второй причиной является низкая пешеходная доступность остановок общественного транспорта, и жители тратят большое количество времени, чтобы дойти до них. Следовательно, возникает необходимость решения комплексной задачи доступности городского общественного транспорта.

В данной работе рассмотрена проблема доступности на примере города Самара, так как по результатам исследования аналитического агентства «Автостат» данный город занимает первое место по обеспеченности легковыми автомобилями среди российских городов миллионников. При парке, превышающем 390 тысяч единиц, и населении порядка 1,2 миллиона человек в Самаре на тысячу жителей приходится 334 легковых автомобиля [The Rating (2017)]. Город Самара поделён на девять административных районов, и на данный момент существует проблема доступности крайних районов города на общественном транспорте. Проблема низкой пешеходной доступности остановок общественного транспорта также близка городу Самара. Жители города тратят в среднем 15 минут для того, чтобы дойти до остановочного пункта общественного транспорта. На основе решённой проблемы доступности в городе Самара, можно составлять модели транспортной инфраструктуры других городов, тем самым увеличивать показатели доступности общественного транспорта по всей стране.

## 2. Обзор литературы

В настоящее время известно достаточно методов, которые могут быть использованы для решения задач оптимизации маршрутов транспорта. Так как данная задача является NP-трудной, то для неё не существует эффективного формального метода решения. Однако для решения подобных задач могут быть использованы эвристические и метаэвристические методы. Необходимо проанализировать принцип действия каждого алгоритма и выбрать подходящий для решения поставленной задачи оптимизации.

Среди эвристических методов чаще всего применяются алгоритм Кларка-Райта, алгоритм заметания и алгоритм оптимизации отдельного маршрута. Алгоритм Кларка-Райта основан на процессе слияния мелких маршрутов в более крупные. Данный процесс проводится до тех пор, пока существует возможность снизить суммарную стоимость объезда. В данном алгоритме существует возможность учесть ряд дополнительных факторов, которые влияют на конечное решение задачи. Достоинствами данного метода являются его простота, надёжность и гибкость, а также небольшая погрешность решения 5-10% [Nikonov (2012)].

Среди метаэвристических методов для задач оптимизации используются алгоритм Османа, алгоритм на основе муравьиных колоний и генетический алгоритм. Алгоритм Османа основывается на использовании оценочной функции, которая содержит характеристику планируемого хода, учитывая при этом значение исходной функции и имеющиеся исключения. На каждом шаге алгоритма выбирается решение, при котором значение оценочной функции максимально [Kostuk (2010)]. Суть алгоритма на основе муравьиных колоний заключается в использовании модели поведения муравьев, которые ищут путь от колонии к источнику пищи, при этом оставляя следы (феромоны) на пути для других муравьев. Таким образом, тот путь, на котором осталось больше всего феромонов, чаще всего используется муравьями и является оптимальным с точки зрения длины пути [Martynova (2014)]. Главной особенностью генетического алгоритма является возможность нахождения глобального оптимума при решении NP-трудных задач. При решении задач с помощью генетического алгоритма результатом является решение, полученное из скрещивания перспективных вариантов, которое удовлетворяет всем ограничениям и позволяет получить оптимальное значение целевой функции [Baskan (2014), Saprykina (2017)].

Несмотря на большое число исследований в области оптимизации маршрутов, задача оптимизации общественного транспорта в городских условиях рассмотрена не достаточно полно. Необходима разработка комплексного решения, которое бы позволило построить сеть общественного транспорта, удовлетворяющую потребностям населения в мобильности. Для этих целей авторами была формализована предметная область общественного транспорта и построена её математическая модель. Критерий доступности остановок общественного транспорта в построенной модели рассчитывается по методу изохрон, который учитывает естественные препятствия на пути пешеходов [Kondrateva (2017)]. В качестве метода оптимизации выбран генетический алгоритм, для которого разработан метод кодирования, приводящий модель в бинарный вид. Разработанный подход позволит решить проблему доступности общественного транспорта для горожан.

### 3. Модели и методы

Для решения проблемы доступности была разработана общая модель города, которая впоследствии может быть использована для решения схожих транспортных задач. Общая модель города образована улично-дорожной сетью, районами города, остановками общественного транспорта, а также маршрутами движения общественного транспорта по городу. Таким образом, математическое представление общей модели города имеет следующий вид:

$$M = \{G, Z, S, R\}, \quad (1)$$

где  $M$  - общая модель города,  $G$ - улично-дорожная сеть города,  $Z$  - районы города,  $S$ - остановки общественного транспорта,  $R$ - маршруты движения общественного транспорта.

Каждая составляющая общей модели города имеет свои характеристики, которые необходимо учитывать в процессе решения поставленной задачи. Далее рассмотрим каждую составляющую модели более подробно.

Улично-дорожная сеть города - часть территории поселений и городских округов, предназначенная для передвижения транспортных средств и пешеходов, представляющая собой иерархически построенную, взаимосвязанную систему улиц и дорог. На рисунке 1 представлена улично-дорожная сеть города в виде графа, основными составляющими которого являются рёбра и узлы. Рёбрами (1-9) на рисунке представлены улицы, стрелками указано направление движения транспорта по ним, узлы (1-4) обозначают перекрёстки улиц.

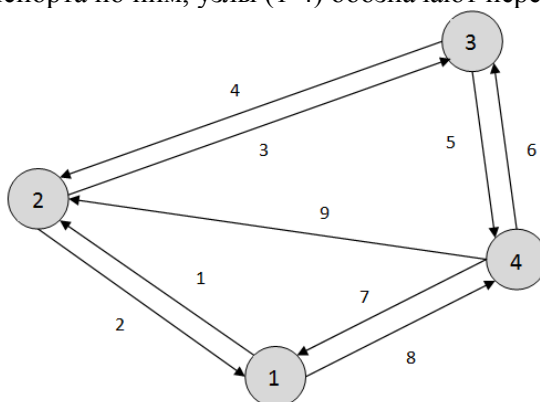


Рисунок 1. Граф улично-дорожной сети города.

Следовательно, улично-дорожную сеть города можно представить в следующем виде:

$$G = \{E, V\}, \quad (2)$$

где  $E$  – ребро графа улично-дорожной сети,  $V$ - узел графа улично-дорожной сети.

Транспортный район города является подграфом улично-дорожной сети, так как состоит из подмножества вершин и рёбер улично-дорожной сети города. Границы района выбираются на основе связности и плотности населения городских кварталов. Математическая запись  $i$ -ого района города:

$$Z_i = \{E_i, V_i\}, \quad (3)$$

где  $Z_i$  –  $i$ -ый район города,  $E_i$ - ребро графа улично-дорожной сети  $i$ -ого района города,  $V_i$ - узел графа улично-дорожной сети  $i$ -ого района города.

Основные параметры, характеризующие остановки общественного транспорта:

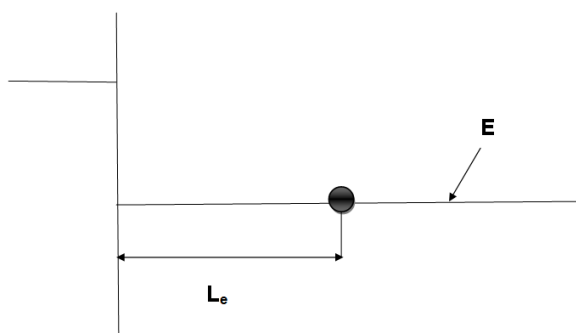
$$S = \{E, L_e\}, \quad (4)$$

где  $E$  - ребро, на котором расположена остановка общественного транспорта,  $L_e$  - расстояние от начала ребра до месторасположения остановки общественного транспорта (рис. 2).

Каждому маршруту общественного транспорта присвоены идентификационные номера ( $N$ ), пункты отправления ( $P_o$ ) и назначения ( $P_x$ ), а также вектор ( $P$ ) из промежуточных остановок ( $P_j$ ).

$$R = \{N, P_o, P_d, P\}. \quad (5)$$

Вектор  $P$ , состоящий из промежуточных остановок ( $P_j$ ) имеет длину  $N_s$ , ( $j \in [1, N_s]$ ).



**Рисунок 2.** Графическое изображение параметров остановки общественного транспорта.

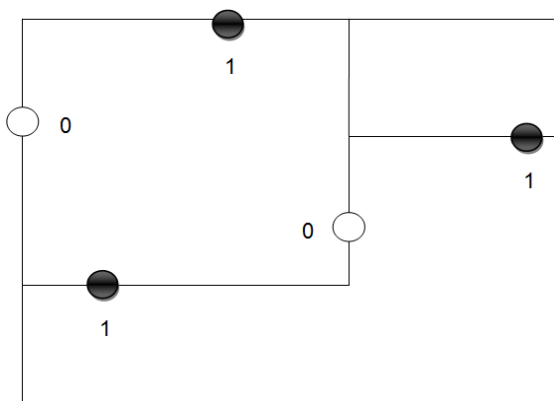
В качестве целевой функции было выбрано максимальное значение показателя доступности остановок общественного транспорта. Данный показатель характеризует степень приспособленности транспортной инфраструктуры для пешеходов. Для определения пешеходной доступности, необходимо определить отношение площади доступности остановки к общей площади исследуемой области.

$$D = \frac{S_m}{S} * 100\% \rightarrow \max \tag{6}$$

где  $D$  – доступность объекта транспортной инфраструктуры,  $S_m$  – площадь покрытия исследуемой области изохронами,  $S$  – общая площадь исследуемой области.

Основными ограничениями в данной задаче выступают градостроительные нормы, которые устанавливают максимальное расстояние от жилых домов до остановочного пункта. Для создания пар родителей выбираются те особи, значения фитнес-функций которых максимально и они не нарушают установленных ограничений [Aslan (2014)].

В качестве хромосомы рассматривается вариант решения, который состоит из множества элементов - генов. Множество вариантов решения составляют популяцию. В качестве гена выбраны остановки общественного транспорта. Ген представлен с помощью двоичной системы исчисления. Предварительно на карту исследуемого участка города нанесены существующие остановки общественного транспорта, а также предполагаемое расположение новых остановок в местах с низкой пешеходной доступностью. Обозначив месторасположение существующей остановки 1, а предполагаемой 0, были закодированы маршруты общественного транспорта (рис. 3).



**Рисунок 3.** Расположение существующих и предполагаемых остановок общественного транспорта.

На первых этапах поиска оптимального решения осуществляется отбор наиболее приспособленных особей, значение фитнес-функции которых велико. Процесс отбора особей осуществляется с помощью рангового метода, то есть создаётся отсортированный список особей, упорядоченных по направлению от наиболее приспособленных к наименее приспособленным, при этом каждой особи приписывается число, определяющее ее место в

списке (ранг). Далее следует рекомбинация, результатом которой является появления новых особей, образующих новую популяцию. После появления нового поколения, предыдущие операции с особями повторяются  $n$ -раз. Осуществление запусков генетического алгоритма прекращается, когда значение доступности принимает максимальное значение. В результате, с помощью генетического алгоритма получены оптимальные расположения остановок общественного транспорта, при которых доступность объекта транспортной инфраструктуры максимальна.

#### 4. Реализация

Описанный в разделе 3 метод реализован в интерактивной аналитической среде Apache Zeppelin на языке программирования Python. Генетический алгоритм разработан с помощью пакета Dear – гибкого инструмента эволюционного моделирования, содержащего генетические операторы. Кодирование объектов модели (1) для их использования в генетическом алгоритме проводилось с использованием пакета Numpy. Фитнес-функция зарегистрирована в эволюционной модели как пользовательская функция, рассчитывающая изохроны по улично-дорожной сети и находящая значение отношения (6).

Отладка разработанного решения проводилась на одном административном районе города Самара. Исходные данные о карте города Самара загружены из открытого источника OpenStreetMap при помощи пакета OSMnx. Данные о маршрутах общественного транспорта загружены с использованием пакета Pandas. Полученные при отладке данные показали сходимость разработанного решения, однако существует необходимость проведения дополнительных исследований.

#### 5. Выводы

В данной статье рассмотрена проблема, связанная с доступностью пассажирского общественного транспорта, а также с доступностью остановок общественного транспорта для пешеходов. Рассмотрены существующие методы решения аналогичных задач доступности, связанные с оптимизацией расположения остановочных пунктов и маршрутов общественного транспорта. Разработана общая математическая модель города с остановками и маршрутами общественного транспорта. Для оптимизации пешеходной доступности остановок был использован генетический алгоритм. С помощью данного алгоритма может быть найдено оптимальное расположение остановок, которое будет соответствовать нормам градостроительства, и при котором значение пешеходной доступности остановок общественного транспорта будет максимальным. Рассмотрено решение частного случая проблемы доступности города Самара. Однако, созданная модель города и разработанный алгоритм решения являются универсальными для любого города. Дальнейшие исследования предполагают проведение большего числа экспериментов с различными гиперпараметрами генетического алгоритма и с моделями городов разного масштаба.

#### 6. Литература

- [1] Aslan, D. Genetic Algorithms [Electronic resource]. — Access mode: [http://www2.cs.unipaderborn.de/cs/agklbue/de/courses/ws04/ea/students/ga\\_report.pdf](http://www2.cs.unipaderborn.de/cs/agklbue/de/courses/ws04/ea/students/ga_report.pdf). 1-19 (28.09.2018).
- [2] Baskan, O. Differential evolution algorithm based solution approaches for solving transportation network design problems. / O. Baskan, H. Ceylan // Pamukkale University Journal of Engineering Sciences. – 2014. – Vol. 20(9). – P. 324-331.
- [3] Martinova, J.A. Formalization of the problem of the organization of route networks of urban passenger transport / J.A. Martinova, Y.A. Martinov // Internet journal of the Institute of public administration, law and innovative technologies. – 2014. – Vol. 6(25). – P. 1-13.
- [4] Nikitina, A.N. Accessibility to passenger transport for the population from the point of view of formation of the tariff Young scientist / A.N. Nikitina. – Moscow, 2012. – P. 134-136.
- [5] Nikonorov, V.N. Features of the advanced method of Clark–Wright for the solution of the routing problem / V.N. Nikonorov, V.K. Tytykin // Jurnal of scientific and technology of Saint Petersburg state technical university. – 2012. – Vol. 6. – P. 203-205.

- [6] The rating of Russian cities in the provision of car [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.autostat.ru/press-releases/29680/> (29.08.2018).
- [7] Kondrateva, E. An Isochrones Based Public Transport Stops Optimization Technique / E. Kondrateva, A. Sidorov, O. Saprykin // Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems. – Naples, Italy, 2017. – P. 182-187.
- [8] Костюк, Ю.Л. Сбалансированная эвристика для решения задачи маршрутизации транспорта с учетом грузоподъемности / Ю.Л. Костюк, М.С. Пожидаев // Журнал томского государственного университета. – 2010. – Т. 3(12). – С. 65-72.

## Optimization of urban public transport accessibility based on genetic algorithm

E.V. Zubkova<sup>1</sup>, O.N. Saprykin<sup>1</sup>, A.N. Tikhonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** The article discusses the global problem of public transport accessibility in conjunction with pedestrian accessibility to bus stops. We analyzed the existing algorithms to solve the public transport accessibility problem in cities. The study proposes a formal mathematical description of the city model with the existing bus stops and public transport routes. An algorithm has been developed for solving the optimization problem using genetic functions and operators. The developed algorithm is implemented in the Python programming language and has been tested on sample data of the city of Samara.