

Научная статья
УДК 004.023
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_87

Динамический мультиагентный подход для решения задачи циклической маршрутизации

Валерий Иванович Хабаров^{1✉}, Владислав Евгеньевич Квашнин²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

¹ khabarov51@mail.ru✉

² gyro105@yandex.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию мультиагентной задачи коммивояжера с общим депо и динамическим распределением точек обслуживания. В отличие от традиционных подходов, предполагающих предварительную кластеризацию множества и жесткое закрепление точек за агентами, предлагаемый метод обеспечивает адаптивное формирование зон обслуживания непосредственно в ходе конструирования маршрутов. Принцип распределения основан на последовательной минимизации длины циклических маршрутов для каждого агента, выходящего из своей стартовой точки (т. е. депо), что обуславливает образование пространственно обособленных и компактных кластеров. Маршрутизация внутри формируемых подмножеств осуществляется с использованием модифицированного муравьиного алгоритма, в котором переходная вероятность учитывает, наряду с интенсивностью феромонового следа и информацией, обратно пропорциональной расстоянию, дополнительный корректирующий множитель, отражающий близость кандидата к стартовой вершине. Данная архитектура позволяет решать задачи кластеризации и маршрутизации согласованно в рамках единого оптимизационного процесса, исключая необходимость этапа предварительного разбиения. Реализована многопоточная обработка формируемых кластеров, обеспечивающая масштабируемость алгоритма при росте числа агентов. Результаты вычислительных экспериментов на стандартных тестовых наборах различной размерности подтверждают эффективность предложенного подхода по критерию минимизации суммарной длины маршрутов. Установлено, что интеграция фактора близости к начальной позиции в эвристическую функцию способствует формированию более компактных траекторий по сравнению с базовой версией муравьиного алгоритма. При сопоставимых вычислительных издержках динамическая схема распределения обеспечивает улучшение целевой функции в среднем на 6 %, а также повышает адаптивность системы к динамическим изменениям входных параметров.

Ключевые слова: мультиагентная система, задача многих коммивояжеров, динамическая маршрутизация, алгоритм муравьиной колонии, распределение точек, гамильтонов цикл, транспортная логистика, адаптивные эвристики

Для цитирования: Хабаров В. И., Квашнин В. Е. Динамический мультиагентный подход для решения задачи циклической маршрутизации // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 87–94. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_87.

Original article

The dynamic multi-agent approach to solving the traveling salesman problem

Valery I. Khabarov^{1✉}, Vladislav E. Kvashnin²

^{1,2} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

¹ khabarov51@mail.ru✉

² gyro105@yandex.ru

Abstract. This paper investigates the multi-agent traveling salesman problem with a common depot and dynamic distribution of service points. Unlike traditional approaches that require preliminary clustering and rigid assignment of points to agents, the proposed method ensures adaptive formation of service zones directly during route construction. The distribution principle is based on minimizing the distance to the agent's initial position, which leads to the formation of spatially separated and compact clusters. Routing within the formed subsets is performed using a modified ant colony algorithm, in which the transition probability accounts for, in addition to pheromone trail intensity and heuristic information inversely proportional to distance, an additional correcting factor reflecting the

candidate's proximity to the starting vertex. This architecture allows solving clustering and routing problems in a coordinated manner within a single optimization process, eliminating the need for a preliminary partitioning stage. To reduce computational complexity, multi-threaded processing of formed clusters is implemented, ensuring algorithm scalability as the number of agents increases. Results of computational experiments on standard test sets of various dimensions confirm the effectiveness of the proposed approach in terms of minimizing the total route length. It has been established that integrating the proximity factor to the initial position into the heuristic function contributes to the formation of more compact trajectories compared to the basic version of the ant colony algorithm. With comparable computational costs, the dynamic distribution scheme provides an improvement in the objective function by an average of 6% and also enhances the system's adaptability to dynamic changes in input parameters.

Keywords: multi-agent system, multiple traveling salesman problem, dynamic routing, ant colony optimization algorithm, points distribution, Hamiltonian cycle, transport logistics, adaptive heuristics

For citation: Khabarov V. I., Kvashnin V. E. The dynamic multi-agent approach to solving the traveling salesman problem. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):87–94. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_87.

Введение

Современные городские логистические системы функционируют в условиях необходимости постоянной адаптации маршрутов доставки. Данная потребность обусловлена интенсивными транспортными процессами в городской среде, характеризующейся высокой степенью динамичности (Dynamic Vehicle Routing Problem, DVRP).

Статические методы маршрутизации не учитывают изменения, происходящие в реальном времени: дорожные заторы, аварийные ситуации, изменение погодных условий и пр. Для логистических систем существенным является также фактор динамического изменения распределения заказов, что требует разработки адаптивных алгоритмов, способных оперативно реагировать на ситуацию.

Среди задач маршрутизации особую актуальность приобретает задача с несколькими агентами-коммивояжерами (Multiple Travelling Salesmen Problem, MTSP). В данной постановке каждый агент (коммивояжер) должен построить свой маршрут оптимальной длины, охватывающий подмножество точек посещения. Актуальной проблемой в таких задачах является динамическое распределение точек между агентами с учетом текущего состояния маршрутов и возникновения новых точек обслуживания.

Важным аспектом данного класса задач является конкуренция между агентами за точки обслуживания. Следует отметить, что в мультиагентном подходе важен не только критерий минимизации суммарной стоимости, но и критерий балансировки для предотвращения перегрузки отдельных агентов [1]. Таким образом, приоритетными становятся взаимосвязанные критерии: минимизация суммарной длины маршрутов и сбалансированное распределение точек обслуживания между агентами.

В большинстве случаев основой мультиагентного подхода являются метаэвристические алгоритмы, в частности алгоритм муравьиной колонии. Данный алгоритм зарекомендовал себя как эффективный инструмент, позволяющий строить маршруты при большом количестве точек обслуживания [2]. В современных исследованиях встречаются работы, где используется мультиагентный алгоритм муравьиной колонии с динамическим кооперативным механизмом [3]. В работе [4] предложен гибридный алгоритм муравьиной колонии, который учитывает временные окна и использует адаптивные параметры. В [5] изучена комбинация алгоритмов роевого интеллекта с методами машинного обучения. Кроме того, статья [6] посвящена модификации муравьиных алгоритмов и других метаэвристик, направленных на повышение устойчивости к локальным минимумам, на адаптивность к изменению условий и на комбинирование с другими алгоритмами (например, генетическими) для повышения качества решений.

В мультиагентной интерпретации каждый из агентов-коммивояжеров рассматривается как самостоятельный участник, принимающий решения на основе локальной информации и при необходимости взаимодействующий с другими агентами. Такой характер взаимодействий соответствует принципам автономности, кооперации и конкуренции, что характерно для мультиагентных систем в целом [7, 8]. Данные постановки задач содержат в себе два важных понятия – конкуренция и кооперация.

Задачи маршрутизации группы агентов традиционно формализуются в рамках обобщенной задачи коммивояжера для нескольких агентов. В такой постановке задано множество вершин графа маршрутной сети, соответствующих точкам обслуживания, транспортная сеть,

описываемая системой ребер графа с заданными стоимостными характеристиками, а также конечное множество агентов, для каждого из которых требуется построить замкнутый маршрут посещения подмножества вершин. При этом каждая вершина должна быть обслужена ровно одним агентом, а целевая функция обычно связана с минимизацией суммарных затрат, например длины маршрутов либо времени выполнения задач [9, 10]. В [11] предложен обобщенный вариант MTSP с включением общих точек обработки груза.

В зависимости от характера исходной информации и условий функционирования системы статическая и динамическая постановки задачи маршрутизации принципиально различаются требованиями к моделированию, методам решения и интерпретации получаемых результатов.

Статическая постановка MTSP предполагает неизменность исходных данных на протяжении всего процесса построения решения. Координаты точек обслуживания, параметры транспортной сети, характеристики агентов, ограничения по времени и ресурсам считаются заранее известными. Задача формулируется как задача дискретной оптимизации с фиксированным множеством допустимых решений. В рамках статического подхода формирование маршрутов осуществляется в режиме предварительного планирования, после чего полученное решение используется в процессе практической реализации.

Динамическая постановка MTSP предполагает изменение исходных данных в процессе построения маршрута и необходимость корректировки маршрутов в процессе их построения. Каждый агент рассматривается как автономная интеллектуальная система принятия решений, обладающая ограниченной локальной информацией и взаимодействующая с другими агентами через механизмы кооперации и конкуренции. В результате формирование маршрутов приобретает характер распределенного оптимизационного процесса. Одной из принципиальных особенностей динамической постановки является возможность перераспределения точек обслуживания между агентами. Такое перераспределение может быть обусловлено изменением текущих условий движения, загрузки агентов, приоритетности задач либо пространственной

конфигурации точек. Фактически речь идет о динамической кластеризации множества вершин графа с последующим уточнением маршрутов внутри сформированных кластеров.

Целью данной работы является разработка и исследование динамического подхода к кластеризации точек и построению маршрутов для нескольких коммивояжеров на основе муравьиного алгоритма. Основное внимание уделяется формированию стратегии распределения точек между группами в процессе построения маршрутов, обеспечивающей баланс между длиной маршрутов и числом точек у каждого агента, а также учитывающей локальные характеристики точек (такие как плотность близлежащих точек).

Методы исследования

Динамический подход предполагает интеграцию кластеризации и построения маршрутов в один адаптивный процесс, в котором маршруты формируются параллельно с закреплением точек за агентами. Суть процесса состоит в том, что каждый агент строит свой маршрут, выбирая очередные точки, конкурируя или договариваясь с другими агентами.

Представим этот процесс более формально. Имеется:

- множество агентов A :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}; \quad (1)$$

- множество точек (вершин) транспортного графа V ;

- множество депо (стартовых точек) $W \subset V$;

- $d(i, j)$ – расстояние между точками обслуживания $i, j \in V$;

- структура маршрута агента $a_i \in A$:

$$p_i = \{w_i, v_{i_1}, \dots, v_{i_{n_i}}, w_i\} \in P_i,$$

$$\begin{aligned} w_i \in W, v_{i_r} \in V_i \setminus W, \bigcup_{i=1}^k V_i = V, \\ V_i \cap V_j = \emptyset, \forall i \neq j, \\ r \in \pi_i = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_i}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, агент $a_i \in A$ выезжает из своего депо w_i и обходит маршрут $p_i \subseteq V_i$, который не пересекается с маршрутами других агентов. Заметим, что заранее разбиение множества вершин $\bigcup_{i=1}^k V_i = V$, $V_i \cap V_j \neq \emptyset, \forall i \neq j$ при динамической постановке задачи сделать невозможно. Поэтому речь идет о процессе последовательного построения маршрутов $p_i \subseteq V_i$ и одновременного формирования кластеров V_i .

Распределение точек между агентами осуществляется с использованием модифицированного муравьиного алгоритма. Предполагается, что каждый агент реализует свой цикл муравьиного алгоритма [11] с фиксированным числом микроагентов (муравьев).

1. Агент a_i параллельно с другими агентами выбирает следующую точку $v_i \in V^*$, ближайшую к стартовой точке w_i :

$$v_i = \arg \min_{u \in V^*} d(u, w_i). \quad (3)$$

Эта точка должна быть свободной, т. е. не выбранной другим агентом, поэтому используется множество нераспределенных точек $V^* \in V$. Если это не так, то возникает конкуренция за эту точку. Предпочтение отдается тому агенту, для которого она оказывается ближе к стартовой.

2. Для группы V_i с текущим набором точек рассчитывается фактор близости точки v_i к стартовой точке w_i :

$$\varphi(v_i) = 1 + \gamma \left(1 - \frac{d(v_i, w_i)}{\max_{v \in V_i} d(v, w_i)} \right), \quad (4)$$

где $\gamma = 0,3$.

Формула вероятности перехода микроагента из точки i в точку j имеет вид

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta \varphi(v_j)}{\sum_{l \in V^*} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta \varphi(v_l)}, \quad (5)$$

где τ_{ij} – уровень феромона между соседними точками на пути из точки i в точку j ; α – коэффициент, контролирующий влияние феромона на ребре; $\eta_{ij} = 1/d(v_i, v_j)$ – привлекательность ребра i, j ; β – коэффициент, контролирующий влияние привлекательности ребра; $\varphi(v_j)$ – фактор близости точки j .

3. Чтобы принять решение о добавлении точки в кластер V_i , алгоритм также учитывает изменение длины маршрута при включении точки и размер группы. Первый критерий добавления точки – приемлемый прирост расстояния. Пусть $L_i = L(p_i)$ – текущая длина маршрута агента a_i . При добавлении новой точки v_j рассчитывается новая длина маршрута L_i' , т. е. $L_i' \leq \varepsilon L_i$. Значение параметра ε , определяющего коэффициент прироста длины маршрута при добавлении новой точки в группу, было установлено эмпирическим путем в ходе серии вычислительных экспериментов. В рамках исследования проводилось варьирование параметра ε в диапазоне от 1,1 до 1,5 с шагом 0,1 для наборов

данных с 300, 600 и 1 200 точками. Анализ результатов показал, что при значениях ε , близких к 1,0, алгоритм демонстрирует слишком «жесткое» поведение, ограничивая возможность самостоятельного добавления новых точек в маршрут. Это приводит к тому, что группы наполняются случайным образом. В свою очередь, при увеличении значения ε выше 1,3 наблюдается ухудшение качества маршрутов, которое связано с избыточным ростом их длины и нарушением баланса между группами агентов. На основании проведенного анализа установлено, что значение $\varepsilon = 1,2$ обеспечивает наилучший компромисс между длиной маршрутов и распределением точек. Результаты анализа показаны в табл. 1.

Вторым критерием добавления точки является баланс по числу точек в кластерах (группах). Объем каждой группы ϕ_i не должен превышать среднее количество точек на группу во избежание монополии, т. е.

$$\phi_i \leq \frac{|V|}{k}, i = 1, \dots, k. \quad (6)$$

4. После завершения итерации феромоны обновляются по следующему правилу:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sum_{m=1}^k \Delta \tau_{ij}^m, \quad (7)$$

где ρ – коэффициент испарения феромона; τ_{ij}^l – количество феромона, добавляемое на ребро (i, j) агентом l .

В начале работы алгоритма все значения τ_{ij} равны нулю и обновляются после каждой итерации.

Алгоритм продолжается до тех пор, пока множество V не станет пустым, т. е. все точки будут распределены по группам, и каждая группа сформирует замкнутый маршрут $p_i \in P$.

Если по окончании всех итераций в множестве V остаются нераспределенные точки, то производится дополнительная стадия распределения. Каждая такая точка $v \in V$ назначается в ту группу V_i , для которой расстояние от точки v до центра кластера C_i минимально:

$$V_i = \arg \min_i d(v, C_i), \quad (8)$$

где $d(v, C_i)$ – расстояние между точкой v и центром кластера.

$$C_i = \frac{1}{|V_i|} \sum_{u \in V_i} u_j, i = 1, \dots, k. \quad (9)$$

После этого маршруты агентов пересчитываются с учетом добавленных точек для сохранения гамильтоновых циклов.

Таблица 1

Анализ параметра ε

Значение ε	Суммарная длина маршрутов	Прирост длины, %	Доля случайно распределенных точек, %	Время выполнения, с
<i>На примере 300 точек</i>				
1,1	237	–	4	55
1,2	244	2,95	0	65
1,3	250	5,49	0	80
1,4	258	8,86	0	103
1,5	273	15,19	0	117
<i>На примере 600 точек</i>				
1,1	25	–	4,5	718
1,2	27	8	0	745
1,3	44	76	0	780
1,4	52	108	0	802
1,5	68	172	0	824
<i>На примере 1 200 точек</i>				
1,1	31	–	5,3	2 952
1,2	37	19,4	0	3 077
1,3	52	67,7	0	3 154
1,4	67	116,1	0	3 265
1,5	79	154,8	0	3 321

Итоговая целевая функция имеет вид

$$\sum_{i=1}^k L(p_i) \rightarrow \min, \quad i = 1, \dots, k, \quad (10)$$

где $L(\cdot)$ – функция длины маршрута.

Результаты исследования

Для класса задач мультиагентной маршрутизации с использованием динамического подхода были проведены сравнительные вычислительные эксперименты по построению маршрутов на графе с 300 точками. Результаты приведены в табл. 2 и на рисунке. Для сравнения дополнительно указаны результаты выполнения алгоритмов с использованием статического подхода. Можно отметить, что динамический подход требует больше времени вычисления, но в то же время незначи-

тельно отстает по суммарной длине маршрута от роевых алгоритмов.

Входные параметры имеют следующие значения: количество групп – 2; количество муравьев (микроагентов) – 100; количество итераций – 20; α – 1,2; β – 3,5; ρ – 0,3.

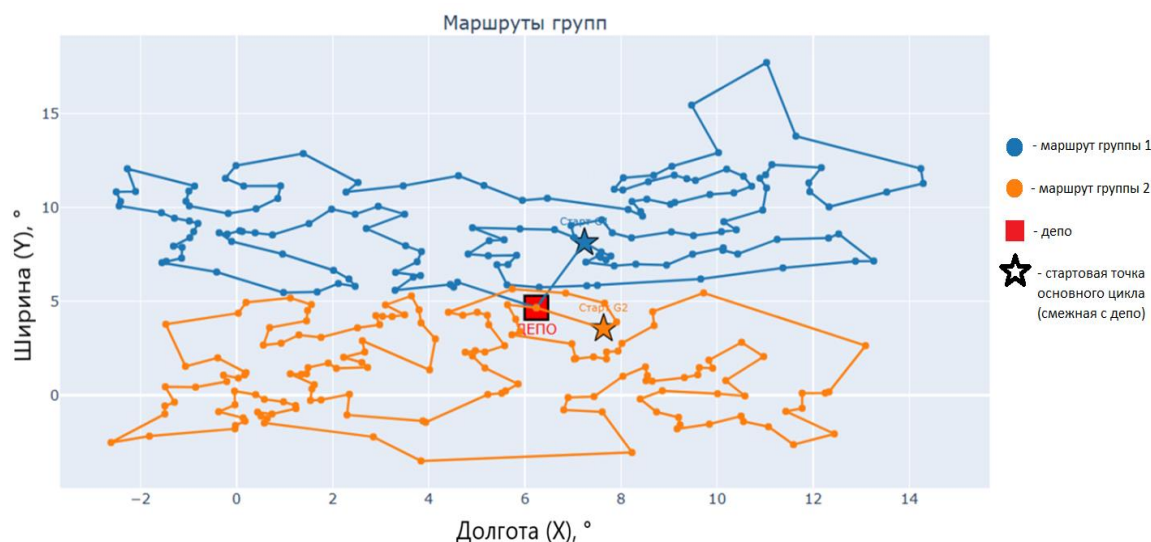
Также для проверки работоспособности в реальных условиях были проведены экспериментальные расчеты на графах, содержащих в себе 600 и 1 200 точек. Результаты данных экспериментальных расчетов представлены в табл. 3.

Анализ показывает, что показатель длины является производным от топологии графа, вследствие чего его рост не обязательно коррелирует с увеличением количества узлов. Временные затраты на выполнение операций,

Таблица 2

Сравнение результатов методов маршрутизации

Критерий/алгоритм	Генетический алгоритм	Алгоритм пчелиного роя	Алгоритм муравьиной колонии (традиционный подход)	Алгоритм имитации отжига	Алгоритм муравьиной колонии (динамический подход)
Длина маршрута: для группы 1	848,05	562,12	160,52	276,19	124,51
для группы 2	262,01	192,09	98,41	122,17	119,55
Суммарная длина	1 110,06	754,21	258,93	398,36	244,06
Время выполнения, с: для группы 1	18,69	9,57	31,5	0,45	65 для обеих групп суммарно
для группы 2	3,88	2,08	4,91	0,28	



Результаты работы динамического подхода

Таблица 3

Результаты работы динамического подхода на реальных данных

Критерий/набор данных	600 точек	1 200 точек
Длина маршрута: для группы 1	15,8	29,86
для группы 2	11,5	7,28
Суммарная длина	27,3	37,14
Время выполнения (для обеих групп), с	745,95	3 077,96

в свою очередь, демонстрируют устойчивую положительную корреляцию с размерностью графа.

Выводы

В данной работе рассмотрен динамический мультиагентный подход к решению задачи коммивояжера. В отличие от традиционных статических постановок, предполагающих раздельную модель кластеризации и построения гамильтоновых циклов с однократной оптимизацией при фиксированных исходных данных, предложенный алгоритм основан на сочетании кластеризации точек и построения маршрутов внутри кластеров.

Показано, что метод муравьиной колонии является весьма удобной метаэвристикой, поскольку позволяет организовать мультиагентное взаимодействие.

Вычислительные эксперименты дают основание сделать следующие выводы:

1) динамический подход требует больших вычислительных затрат по сравнению со статическим подходом;

2) на тестовых данных динамический подход показывает суммарную длину маршрута, которая на 6 % меньше, чем лучший показатель статического подхода.

В дальнейшем планируется развитие предложенного динамического подхода в направлении масштабирования на большее число агентов и кластеров, применения на реальных транспортных сетях с учетом временных ограничений и дорожной обстановки, а также интеграции обучающихся агентов, способных адаптировать параметры алгоритмов на основе накопленного опыта.

Список источников

1. Hassett C. Last-mile delivery statistics: the complete data resource for 2025 // SmartRoutes. 2025. URL: <https://smartroutes.io/blogs/last-mile-delivery-statistics-the-complete-data-resource> (дата обращения: 17.01.2026).
2. ITF, The Final frontier of urban logistics: tackling the last metres // ITF Mobility Innovation Hub. Paris : OECD Publishing, 2024. No. 131. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/final-frontier-urban-logistics.pdf> (дата обращения: 17.01.2026).

3. Holmes J., Brady-Phillips V. Transforming urban logistics: sustainable and efficient last-mile delivery in cities // *World Economic Forum*. 2024. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Transforming_Urban_Logistics_2024.pdf (дата обращения: 20.01.2026).
4. Мифтахов Э. Н., Акимов А. А., Гнатенко Ю. А. Методы роевой оптимизации частиц и локальных эвристик для решения мультиагентной задачи коммивояжера // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2025. Т. 25, № 5. С. 856–865. DOI 10.17586/2226-1494-2025-25-5-856-865.
5. Телегин В. А. Муравьиные алгоритмы для решения задачи коммивояжера // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 7 (145). URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.64> (дата обращения: 23.01.2026).
6. Mo Y., You X., Liu S. Multi-colony ant optimization with dynamic collaborative mechanism and cooperative game // *Complex Intell.* 2022. Syst. 8. P. 4679–4696. DOI 10.1007/s40747-022-00716-7.
7. Olivari L., Đukić G. Current State of Dynamic Vehicle Routing Problems Solved by Ant Colony Optimization Algorithm // *Tehnički glasnik*. No. 15 (3). P. 429–434. DOI 10.31803/tg-20210708131104.
8. Wu H., Gao Y., Wang W. A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows // *Complex Intell.* 2023. Syst. 9. P. 2491–2508. DOI 10.1007/s40747-021-00401-1.
9. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B (Cybernetics)*. 1996. Vol. 26, No. 1. P. 29–41. doi.org/10.1109/3477.484436.
10. Германчук М. С. Знаниеориентированные модели многоагентной маршрутизации. Симферополь : ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», 2022. URL: http://www.science.vsu.ru/dissertations/10681/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA_%D0%9C.%D0%A1..pdf (дата обращения: 23.01.2026).
11. Хабаров В. И., Квашнин В. Е. Мультиагентные системы маршрутизации при организации городских перевозок // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2025. № 2 (74). С. 94–102. DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_94.

References

1. Hassett C. Last-Mile Delivery Statistics: The Complete Data Resource for 2025. *SmartRoutes*. 2025. URL: <https://smartroutes.io/blogs/last-mile-delivery-statistics-the-complete-data-resource>.
2. ITF, The Final Frontier of Urban Logistics: Tackling the Last Metres. ITF Mobility Innovation Hub No. 131, OECD Publishing, Paris. 2024. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/final-frontier-urban-logistics.pdf>.
3. Holmes J., Brady-Phillips V. Transforming Urban Logistics: Sustainable and Efficient Last-Mile Delivery in Cities. *World Economic Forum*. 2024. URL: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Transforming_Urban_Logistics_2024.pdf.
4. Miftakhov E. N., Akimov A. A., Gnatenko Yu. A. Methods of swarm optimization of particles and local heuristics for solving the multi-agent traveling salesman problem. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025;25(5):856–865. (In Russ.). DOI 10.17586/2226-1494-2025-25-5-856-865.
5. Telegin V. A. Ant colony algorithms for solving the traveling salesman problem. *International Research Journal*. 2024;(145). (In Russ.). URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.64>.
6. Mo Y., You X., Liu S. Multi-colony ant optimization with dynamic collaborative mechanism and cooperative game. *Complex Intell.* 2022. Syst. 8. P. 4679–4696. DOI 10.1007/s40747-022-00716-7.
7. Olivari L., Đukić G. Current State of Dynamic Vehicle Routing Problems Solved by Ant Colony Optimization Algorithm. *Tehnički Glasnik*. 2021;(15(3)):429–434. DOI 10.31803/tg-20210708131104.
8. Wu H., Gao Y., Wang W. A hybrid ant colony algorithm based on multiple strategies for the vehicle routing problem with time windows. *Complex Intell.* 2023. Syst. 9. P. 2491–2508. DOI 10.1007/s40747-021-00401-1.
9. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B (Cybernetics)*. 1996;26(1):29–41. doi.org/10.1109/3477.484436.
10. Hermanchuk M.S. Knowledge-oriented models of multi-agent routing. Simferopol: V. I. Vernadsky Crimean Federal University; 2022. (In Russ.). URL: http://www.science.vsu.ru/dissertations/10681/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA_%D0%9C.%D0%A1.pdf.
11. Khabarov V. I., Kvashnin V. E. Multi-agent routing systems in organizing urban transportation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(74):94–102. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_74_94.

Информация об авторах

В. И. Хабаров – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта, декан факультета «Бизнес-информатика», заведующий кафедрой «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики Новосибирского государственного технического университета.

В. Е. Квашнин – аспирант кафедры «Информационные технологии на транспорте» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. I. Khabarov – Doctor of Engineering, Professor, Academician of Russian Academy of Transport, Dean of the Information Technology in Business Faculty, Head of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University, Professor of the Theoretical and Applied Information Science Department, Novosibirsk State Technical University.

V. E. Kvashnin – Postgraduate of the Information Technologies in Transport Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 12.05.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 28.05.2026.

The article was submitted 12.05.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 28.05.2026.