

*Р. А. Дьяченко<sup>1</sup>, Д. А. Гура<sup>1,2</sup>, С. А. Ярутин<sup>1✉</sup>, П. Е. Чечель<sup>1</sup>*

## **Алгоритмическое обеспечение эффективного сканирования территорий: построение оптимальных маршрутов**

<sup>1</sup>Кубанский государственный технологический университет,  
г. Краснодар, Российская Федерация

<sup>2</sup>Кубанский государственный аграрный университет,  
г. Краснодар, Российская Федерация  
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается задача построения эффективных маршрутов сканирования территорий, которая является ключевой в современных технологиях кадастрового учёта и трёхмерной идентификации объектов недвижимости. Оптимизация таких маршрутов позволяет значительно повысить точность и оперативность сбора геопространственных данных, необходимых для создания актуальных и детализированных трёхмерных моделей земельных участков и построек. Проблема формализуется как вариант задачи коммивояжёра, решение которой затруднено её NP-трудностью и необходимостью учитывать динамические изменения условий съёмки, таких как погодные факторы, временные ограничения и доступность объектов. Целью исследования является разработка алгоритма, обеспечивающего построение маршрутов, близких к оптимальным, с учётом этих изменяющихся параметров. В качестве основы выбран алгоритм Кристофидеса, модифицированный путём введения параметрической функции стоимости рёбер, зависящей от внешних факторов, включая условия эксплуатации и специфические ограничения кадастровых работ. Проведены экспериментальные расчёты на синтетических и геопространственно привязанных данных, отражающих реальные координаты и особенности местности. Полученные результаты показывают отклонение от нижней оценки менее чем на 8%, что сопоставимо с лучшими приближёнными методами и подтверждает устойчивость и практическую применимость предложенного решения для задач трёхмерного кадастрового мониторинга. В качестве направления дальнейших исследований обозначено расширение модели с учётом ограничений на зоны покрытия, необходимости многократного сканирования и учёта препятствий, что особенно важно для точного кадастрового учёта в урбанизированных и сложных природных ландшафтах.

**Ключевые слова:** оптимизация маршрутов, кадастр недвижимости, задача коммивояжёра, алгоритм Кристофидеса, сканирование территорий, приближённые алгоритмы

*R. A. Dyachenko<sup>1</sup>, D. A. Gura<sup>1,2</sup>, S. A. Yarutin<sup>1✉</sup>, P. E. Chechel<sup>1</sup>*

## **Algorithmic support for efficient area scanning: optimal route construction**

<sup>1</sup> Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

<sup>2</sup> Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation  
e-mail: yarutinsa@yandex.ru

**Abstract.** This work addresses the problem of constructing efficient scanning routes for territories, which is a key task in modern technologies for real estate cadastre and three-dimensional identification of property objects. Optimizing such routes significantly improves the accuracy and timeliness of collecting geospatial data required for creating up-to-date and detailed 3D models of

land parcels and buildings. The problem is formalized as a variant of the Traveling Salesman Problem (TSP), which is challenging due to its NP-hardness and the need to consider dynamic changes in scanning conditions, such as weather factors, time constraints, and accessibility of objects. The goal of the study is to develop an algorithm that constructs routes close to optimal while taking these varying parameters into account. The Christofides algorithm serves as the basis, modified by introducing a parametric edge cost function that depends on external factors, including operational conditions and specific constraints relevant to cadastral tasks. Experimental calculations were conducted on synthetic and geospatially referenced data reflecting real coordinates and terrain features. The results show a deviation from the lower bound of less than 8%, which is comparable to the best approximate methods, confirming the robustness and practical applicability of the proposed solution for 3D cadastral monitoring tasks. Future research directions include extending the model to incorporate coverage zone constraints, the necessity of multiple passes, and obstacle consideration — all critical for precise cadastral accounting in urbanized and complex natural landscapes.

**Keywords:** route optimization, real estate cadaster, traveling salesman problem, Christofides algorithm, area scanning, approximation algorithms

### *Введение*

В области оптимизации маршрутов особое значение приобретают работы Кристофидеса [1], предложившего полиномиальный алгоритм с гарантированной аппроксимацией не хуже 1.5 для задачи коммивояжёра (TSP). Этот алгоритм послужил фундаментом для множества последующих исследований. Классические обзоры, такие как работы Пападимитриу и Штайглица [2], детально анализируют сложность задачи TSP и разнообразие эвристических и приближённых методов её решения. Однако вопросы адаптивного применения алгоритмов в условиях динамически меняющихся весов рёбер и строгих временных ограничений остаются практически неразрешёнными, что особенно актуально для задач кадастрового учёта недвижимости и трёхмерной идентификации объектов, где требуется оперативное и точное построение маршрутов сканирования территорий [3].

Общая тема настоящего исследования — алгоритмическое обеспечение эффективного сканирования территорий с учётом динамических условий на основе модификации алгоритма Кристофидеса. Цель работы — разработать модульную версию алгоритма, способную улучшать качество маршрутов и снижать вычислительную сложность за счёт адаптивных механизмов, что важно для автоматизированных систем кадастрового мониторинга и 3D-идентификации объектов недвижимости [4].

Для достижения цели поставлены задачи: формализация модели задачи коммивояжёра с учётом особенностей реальных геопространственных данных и динамических весов рёбер, характерных для кадастровых съёмок; создание эффективной структуры данных для оперативного управления изменениями параметров рёбер; внедрение адаптивного этапа поиска минимального совершенного паросочетания; интеграция гибридного локального поиска для улучшения точности маршрутов сканирования в сложных трёхмерных условиях.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении моделей приближённого решения задачи коммивояжёра, адаптированных к динамическим

параметрам, что существенно расширяет возможности алгоритмического обеспечения задач кадастрового учёта и трёхмерной идентификации недвижимости. Практическая значимость проявляется в возможности использования предложенного решения в современных геоинформационных системах и автономных платформах для высокоточного и эффективного сбора данных о территории.

### ***Методы и материалы***

Задача построения эффективного маршрута сканирования территорий формализована как модифицированная задача коммивояжёра с ограничениями, характерными для реальных условий эксплуатации (временные окна, переменные условия среды и пр.) [5]. В качестве базового подхода выбран приближённый алгоритм Кристофидеса, модифицированный с использованием эвристических стратегий улучшения маршрута.

Минимальное остовное дерево строится с использованием весовой функции, зависящей от расстояний между вершинами. Далее выделяется множество вершин нечётной степени, на котором рассчитывается минимальное паросочетание. Объединение остова и паросочетания формирует эйлеров граф, из которого извлекается маршрут обхода путём последовательного удаления повторяющихся вершин.

Собственная модификация включает введение динамически изменяемой функции стоимости:

$$c(e, t) : E \times R_+ \rightarrow R_+,$$

где  $c(e, t)$  — вес ребра  $e$ , зависящий от времени  $t$ ; учитывает погодные условия, затраты ресурсов или ограничение по времени выполнения. Такой подход актуален для задач сканирования в переменных условиях.

Для оценки качества построенного маршрута применяется отклонение от нижней оценки:

$$\delta = \frac{LB}{\text{weight}(C)},$$

где  $\text{weight}(C)$  — длина маршрута, построенного алгоритмом,  $LB$  — нижняя граница, полученная из задачи линейного программирования или двойственной оценки.

Реализация алгоритма проведена на модели евклидова графа [6]. Сравнение проводилось на синтетических и геопространственных данных, включая равномерно распределённые точки и реальные координаты, приведённые к метрической системе.

### ***Результаты***

В ходе экспериментального исследования была реализована модифицированная версия алгоритма Кристофидеса с параметрической функцией стоимости.

Алгоритм протестирован на множестве тестов с различным числом узлов (от 10 до 100), распределённых по евклидовой плоскости. Основные результаты представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

Результаты построения маршрутов с использованием предложенного алгоритма

| КОЛ-ВО ТОЧЕК | ДЛИНА<br>МАРШРУТА<br>(НАША МОДЕЛЬ) | НИЖНЯЯ<br>ГРАНИЦА<br>(LP-RELAXATION) | ОТКЛОНЕНИЕ, % |
|--------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| 10           | 132,7                              | 127,4                                | 4,2           |
| 30           | 392,5                              | 368,1                                | 6,6           |
| 50           | 651,8                              | 608,9                                | 7,0           |
| 100          | 1220,3                             | 1131,0                               | 7,9           |

Среднее отклонение от нижней оценки по всем тестам не превышает 8%, что подтверждает высокую точность и эффективность предложенного метода при умеренной вычислительной сложности. Для оценки нижней границы использовалась релаксация задачи линейного программирования (LP-relaxation), что является стандартным подходом в решении задач коммивояжёра [3].

Кроме того, был проведён сравнительный анализ с классическим жадным алгоритмом, который показал значительно худшую точность: отклонения у жадного метода достигали до 18%. Таким образом, предложенный алгоритм демонстрирует устойчивое преимущество в качестве построенных маршрутов при сопоставимом времени выполнения.

### **Обсуждение**

Полученные результаты ясно демонстрируют высокую эффективность предложенной модификации алгоритма Кристофидеса для задачи построения оптимальных маршрутов сканирования территорий. Среднее отклонение от нижней границы, не превышающее 8%, соответствует уровню лучших современных приближённых методов решения задачи коммивояжёра. Это свидетельствует о том, что адаптация классического алгоритма с учётом динамически изменяющейся стоимости рёбер позволяет добиться баланса между качеством и вычислительной эффективностью.

В отличие от традиционных эвристических подходов, которые не всегда учитывают изменчивость условий, наш метод учитывает динамическую стоимость перемещения, что делает его особенно актуальным для реальных условий эксплуатации. Такие условия включают в себя изменяющиеся погодные факторы, жёсткие временные ограничения и ограничение ресурсов, что расширяет сферу применения алгоритма, особенно в задачах мониторинга территорий, поисково-спасательных операциях и логистике.

Сравнительный анализ с жадными алгоритмами показал, что при сопоставимом времени вычислений предложенный подход обеспечивает значительно более высокую точность маршрутов. Кроме того, было установлено, что увели-

чение числа точек сканирования не приводит к значительному ухудшению качества решений, что указывает на устойчивость и масштабируемость разработанного алгоритма.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение модели с учётом многопроходного сканирования, что особенно важно для повторного обследования территорий, а также включение в алгоритм топологических ограничений, таких как препятствия и зоны с ограниченным доступом [7,8]. Это позволит применять метод в более сложных условиях, характерных для городской среды и зон стихийных бедствий, тем самым повысив практическую значимость и адаптивность решения.

### ***Заключение***

В настоящей работе рассмотрен алгоритмический подход к задаче построения оптимальных маршрутов сканирования территорий с учётом практических ограничений и динамически меняющихся условий, актуальных для кадастровых съёмок и трёхмерной идентификации объектов недвижимости. Предложена и реализована модификация классического алгоритма Кристофидеса, в которой стоимость перемещения между точками адаптируется во времени, что позволяет учитывать реальные эксплуатационные факторы, такие как погодные условия, временные ограничения и ресурсы, что особенно важно при сборе высокоточных геопространственных данных для кадастра.

Экспериментальные результаты демонстрируют высокую эффективность разработанного метода. Среднее относительное отклонение длины построенного маршрута от нижней оценки не превышает 8%, что свидетельствует о сбалансированности между точностью решения и приемлемой вычислительной сложностью. Такой уровень качества маршрутов делает предложенный алгоритм перспективным инструментом для применения в системах автоматизированного кадастрового мониторинга и трёхмерного моделирования объектов недвижимости.

Разработанный алгоритм может быть успешно использован в широком спектре задач, включая мониторинг территорий для обновления кадастровых данных, оптимизацию логистических процессов в геоинформационных системах, а также автономные поисково-спасательные операции, где требуется оперативная адаптация маршрутов в условиях изменяющихся внешних факторов и ограничений.

В качестве направлений дальнейших исследований планируется расширение модели с учётом физических препятствий, зон с ограниченным доступом и необходимости многократного покрытия отдельных участков территории, что актуально для точного кадастрового учёта в сложной городской среде [9]. Кроме того, представляется важным изучение многопроходных маршрутов в динамической среде с целью повышения надёжности и качества трёхмерной идентификации недвижимости.

### ***Благодарности***

Исследование проводилось при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № LAB-24.1/2.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem // Report 388. Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1976. 28 p.
2. Papadimitriou C.H., Steiglitz K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Prentice Hall, 1982. 384 p.
3. Разработка структуры интеллектуальной системы для решения задач территориального планирования / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, К. Л. Саввиди, Д. А. Дражецкий // Передовые исследования Кубани : Сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 29–31 мая 2024 года. – Краснодар: Кубанский научный фонд, 2024. – С. 197-200.
4. К вопросу о структуризации информации для хранения данных лазерного сканирования / Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С. В. Самарин [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2024. – № 2. – С. 102-110. – DOI 10.26297/2312-9409.2024.2.6.
5. Reinelt G. The traveling salesman: computational solutions for TSP applications. Springer-Verlag, 1994. 369 p.
6. Genova, K., & Williamson, D. P. (2017). An Experimental Evaluation of the Best-of-Many Christofides' Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Algorithmica*, 78(5), 1109–1130. <https://doi.org/10.1007/s00453-017-0293-5>
7. Ma, Y., Easa, S., Cheng, J., & Yu, B. (2021). Automatic Framework for Detecting Obstacles Restricting 3D Highway Sight Distance Using Mobile Laser Scanning Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(4), 04021008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000973)
8. Saha, A., & Dhara, B. C. (2023). 3D LiDAR-based Obstacle Detection and Tracking for Autonomous Navigation in Dynamic Environments. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 8(1), 39–60. <https://doi.org/10.1007/s41315-023-00302-1>
9. Huang, Y., Huang, S., Wang, H., & Meng, R. (2022). 3D Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for Obstacle-Overcoming Robots. *arXiv preprint arXiv:2209.00871*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.00871>

© Р. А. Дьяченко, Д. А. Гура, С.А. Ярутин, П. Е. Чечель, 2025