

## Популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера

Е. Е. Полупанова, А. С. Поляков\*

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар, Российская Федерация  
350040, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149

\* superpolikow@gmail.com

### Аннотация

В данной статье рассматривается популяционный гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера, построенный с применением двух алгоритмов – генетического и алгоритма роя частиц, объединенных по принципу высокоуровневой гибридизации вложением – предполагает слабую связность рассматриваемых алгоритмов. В статье приводится постановка задачи коммивояжера и подробный разбор данной проблемы, относящейся к классу задач комбинаторной оптимизации. Приводятся аргументы в пользу выбора эвристического популяционного алгоритма решения данной проблемы: задача коммивояжера является *NP*-трудной и для неё не доказано существование алгоритма, который мог бы решить её за полиномиальное время, даже более того – неизвестно, существует ли эвристический подход, который будет давать гарантированную точность решения (данный вопрос до сих пор является открытым). Кроме того, задачу коммивояжера относят к классу трансвычислительных задач – при количестве городов больше 66 для нахождения точного решения методом полного перебора необходимо обработать более чем  $10^{93}$  бит информации. Следовательно, эффективные приближенные методы решения являются очень важными для данной задачи. Далее формулируется популяционный гибридный метод решения задачи коммивояжера в виде пошаговой структуры с подробным описанием каждого из шагов алгоритма. Затем приводится блок-схема полученного алгоритма. Далее рассмотрен результат работы программы: построенный граф, найденный маршрут коммивояжера, его длина и последовательность городов. Также в статье приводятся разработанный пользовательский интерфейс с возможностью регулировки различных параметров алгоритма, позволяющий оптимизировать работу алгоритма. В последней части статьи приведены сравнительный анализ эффективности работы полученного алгоритма, а также сравнение точности разработанного популяционного гибридного алгоритма решения задачи коммивояжера с алгоритмом ближайшего соседа и муравьиным алгоритмом.

**Ключевые слова:** популяционный алгоритм, гибридный алгоритм, генетический алгоритм, эвристический подход, эволюционный алгоритм, метод роя частиц, задача коммивояжера, алгоритм ближайшего соседа, муравьиный алгоритм

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Для цитирования:** Полупанова, Е. Е. Популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера / Е. Е. Полупанова, А. С. Поляков. – DOI 10.25559/SITITO.17.202102.324-333 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 324-333.

© Полупанова Е. Е., Поляков А. С., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## Population-Based Algorithm for Solving the Traveling Salesman Problem

E. E. Polupanova, A. S. Polyakov\*

Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation  
149 Stavropolskaya St., Krasnodar 350040, Russian Federation  
\* superpolikow@gmail.com

### Abstract

This article covers the population-based hybrid algorithm for solving the traveling salesman problem. The algorithm is built on two algorithms: the genetic algorithm and the particle swarm algorithm. Hybridization was performed using high level hybridization. This article presents a detailed problem statement of the traveling salesman problem. The traveling salesman problem belongs to the class of  $NP$ -complete combinatorial optimization problems. There are arguments in favor of heuristic algorithms for this problem – the traveling salesman problem is considered to be  $NP$ -hard, and existence of an algorithm that could solve it in polynomial time is not proven, even more it is not known whether there is a heuristic algorithm that will guarantee accuracy of its solution (this question is still open). In addition, the traveling salesman problem is classified as a transcomputational problem – if the number of cities is more than 66, it is necessary to process more than  $10^{93}$  bits of information in order to find the exact solution using the exhaustive search. Therefore, effective approximate methods of solving this problem are very important. Further in the article, population-based hybrid algorithm is formulated in a form of a step-by-step structure with detailing the steps of the algorithm. Then a block diagram of the formulated algorithm is presented. In addition, the article presents the results of the program, the developed user interface with the ability to adjust various parameters of the algorithm, which allows us to change the performance of the algorithm. The last part of the article devoted to: comparative efficiency analysis of the formulated algorithm, comparison of the developed population-based hybrid algorithm with the nearest neighbor algorithm and the ant colony algorithm.

**Keywords:** population-based algorithm, hybrid algorithm, genetic algorithm, heuristic algorithm, evolutionary algorithm, swarm particle algorithm, traveling salesman problem, nearest neighbor algorithm, ant colony algorithm

*The authors declare no conflict of interest.*

**For citation:** Polupanova E.E., Polyakov A.S. Population-Based Algorithm for Solving the Traveling Salesman Problem. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(2):324-333. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.17.202102.324-333>



## Введение

Популяционные алгоритмы являются очень перспективным направлением в области оптимизации и моделирования. С помощью этих алгоритмов решаются множество задач на графах, задачи компоновки и составления расписаний, производится настройка и обучение искусственных нейронных сетей и многое другое [1, 2, 3]. Генетический алгоритм, и алгоритм роя частиц относятся к классу эвристических популяционных алгоритмов, то есть алгоритмов, для которых сходимость к глобальному решению не доказана, но экспериментально установлено, что в большинстве случаев они дают достаточно хорошее решение [2, 3, 5, 6].

Целью работы является разработка алгоритма решения задачи коммивояжера с применением высокоуровневой гибридизации вложением, в котором используется генетический алгоритм и алгоритм роя частиц.

## Постановка задачи

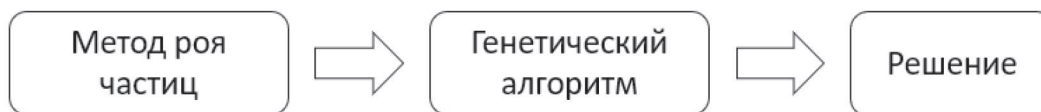
Большинство задач науки и техники относятся к обширному классу проблем поиска оптимальных решений, т.е. к оптимизационным задачам [4, 5, 6, 7]. Одной из них является задача коммивояжера – это одна из наиболее известных задач комбинаторной оптимизации [4, 8, 15].

Коммивояжеру необходимо найти такой кратчайший путь по заданным городам, чтобы каждый город посещался только один раз и конечным пунктом оказался город, с которого начиналось путешествие [4, 9, 15, 16, 17].

Представим проблему в виде математической модели. Задачу коммивояжера можно представить в виде модели на графе. Таким образом, вершины графа соответствуют городам, а ребра между вершинами и – пути сообщения между городами [10, 11, 15]. Каждому ребру можно сопоставить критерий выгодности маршрута  $c_{ab} \geq 0$ , которые можно понимать, как расстояние между городами, время или стоимость поездки [12, 13, 16]. После этого задача может быть сформулирована как задача поиска кратчайшего гамильтонова цикла неориентированного графа. Гамильтонов цикл – это такой цикл, который проходит по всем вершинам графа не более одного раза [14, 18]. Таким образом, решение задачи коммивояжера – это нахождение гамильтонова цикла минимального веса в полном взвешенном графе [19, 20]. Также, стоит отметить, что задача коммивояжера является NP-трудной. Для данной задачи не доказано существование алгоритма, находящего точное решение за полиномиальное время [18, 19]. Следовательно, в решении задачи коммивояжера разумно применить эвристический подход [21]–[25].

## Популяционный гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера

Основная идея популяционного гибридного алгоритма с использованием высокоуровневой гибридизации вложением (предполагает слабую связь объединяемых методов), которая представлена на рисунке 1, заключается в том, что первая популяция генетического алгоритма формируется с помощью алгоритма роя частиц.



Р и с. 1. Популяционный гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера  
F i g. 1. Population hybrid algorithm for solving the traveling salesman problem

Используя терминологию метода роя частиц и генетического алгоритма, сформулируем популяционный гибридный алгоритм в виде последовательности шагов:

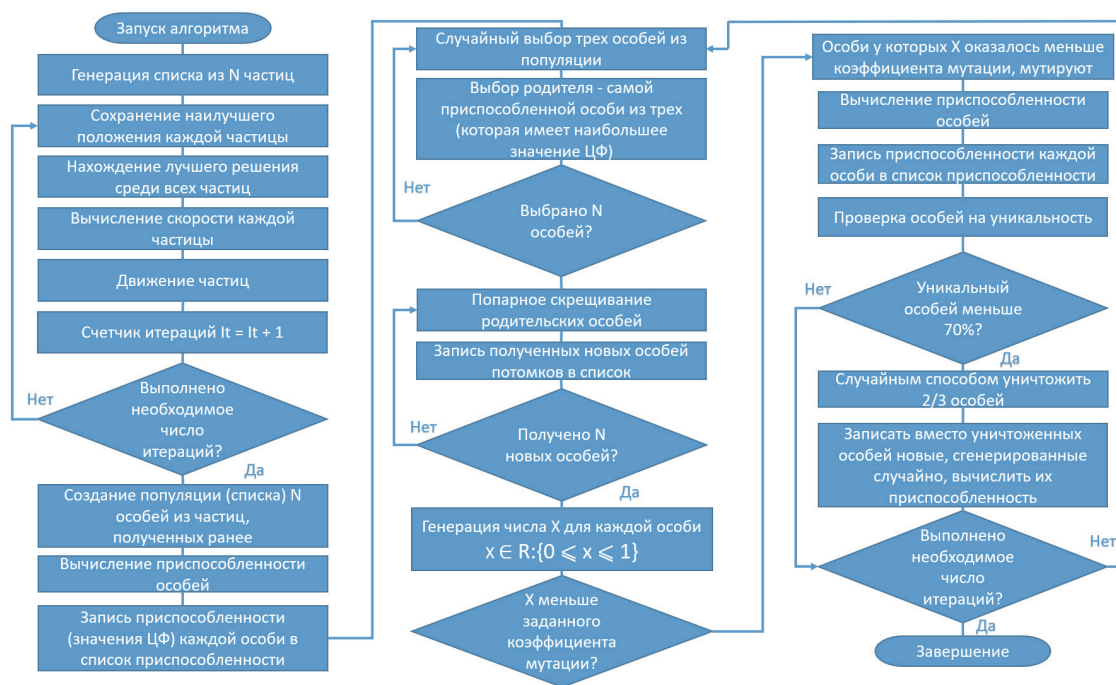
1. Генерация списка из  $N$  частиц.
2. Сохранение наилучшее положение каждой частицы.
3. Создание списка из лучших положений каждой частицы, из него выбирается самое лучшее.
4. Вычисление скорости каждой частицы, исходя из заданных параметров альфа и бета, альфа отвечает за вероятность перемещения к наилучшему собственному решению, бета отвечает за вероятность перемещения к наилучшему решению, общему среди всех частиц роя, причем полученная скорость представляет собой список операций обмена, применяемых для частицы.
5. Перемещение частицы происходит с помощью применения вычисленной ранее скорости.
6. Предыдущие шаги, начиная с шага 2, повторяются необходимое число раз.
7. На вход генетическому алгоритму подается популяция всех лучших решений алгоритма роя частиц, которая бу-

дет являться начальной популяцией генетического алгоритма.

8. Хромосомы (решения) оцениваются целевой функцией, вычисляется их приспособленность и записывается в список приспособленности, самое лучшее решение запоминается отдельно.
9. Выполняется турнирная селекция, в ходе которой происходит выбор родителей для последующего скрещивания: случайным образом выбираются три хромосомы из всей популяции хромосом (особей). Из данных трех хромосом турнирным способом выбирается та, которая имеет наибольшее значение целевой функции, то есть наибольшую приспособленность. Таким образом, в турнире побеждает сильнейшая особь. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет набрано необходимое количество хромосом для последующего скрещивания.
10. Скрещивание: родители, выбранные в предыдущем шаге турнирным способом, случайно скрещиваются, результатом скрещивания являются новые особи, которые сохраняются в списке для новой популяции.



11. Происходит мутация хромосом в новой популяции: функция мутация применяется ко всем особям в новой популяции, но не все особи мутируют, а только часть из них в зависимости от заданной вероятности мутации.
  12. Особи (решения) в новой популяции оцениваются целевой функцией, вычисляется их приспособленность и записывается в список приспособленности, самое лучшее решение запоминается отдельно.
  13. Происходит проверка уникальности особей в новой популяции. Если количество уникальных особей меньше, чем 70%, то происходит так называемая «встряска», в ходе которой случайным образом уничтожаются 2/3 особей популяции, и они заменяются новыми особями, генерируемыми случайным способом, затем происходит повторное вычисление приспособленности особей.
  14. Шаги алгоритма повторяются, начиная с 9, или происходит остановка алгоритма по заданному условию – было создано заданное количество поколений.
- На рисунке 1 проиллюстрирована блок-схема построенного популяционного алгоритма.



Р и с. 2. Блок-схема популяционного алгоритма  
F i g. 2. Block diagram of the population algorithm

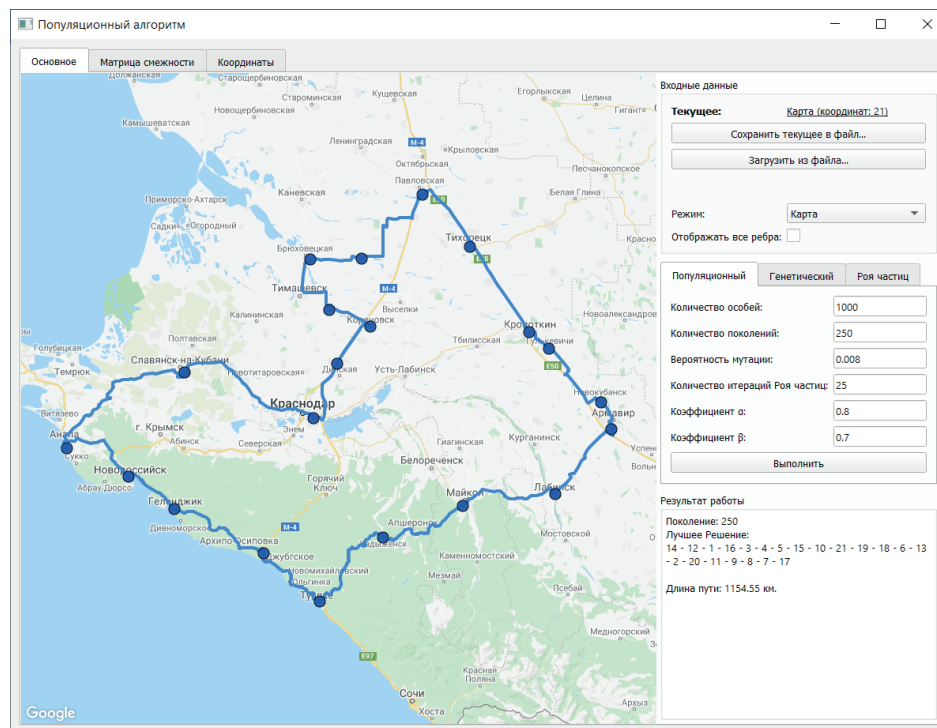
## Создание программного комплекса

Для исследования популяционного алгоритма решения задачи коммивояжера высокоуровневой гибридизацией вложением, была создана программа, которая случайно генерирует граф заданного размера, и производит необходимые вычисления. Результатом работы программы является интерактивная карта (или граф, в зависимости от выбранного режима работы программы), в которой отражен найденный маршрут коммивояжера, последовательность вершин (городов) и длина маршрута. Для создания программы используется язык программирования Python 3.7 и среда разработки PyCharm. Для режима работы «Карта» используется Google Maps Javascript API. Матрица смежности для заданных координат строится с использованием Google Distance Matrix API. При отображении конечного результата работы алгоритма используется Google Directions API, с помощью него отображается маршрут коммивояжера, построенный по реальным дорогам. Программа обладает достаточно широким визуальным функ-

ционалом: все необходимые параметры алгоритма можно задать в окне с удобным интерфейсом, запустить алгоритм и отслеживать в режиме реального времени как программа находит различные маршруты – все отображаемые данные постоянно динамически обновляются.

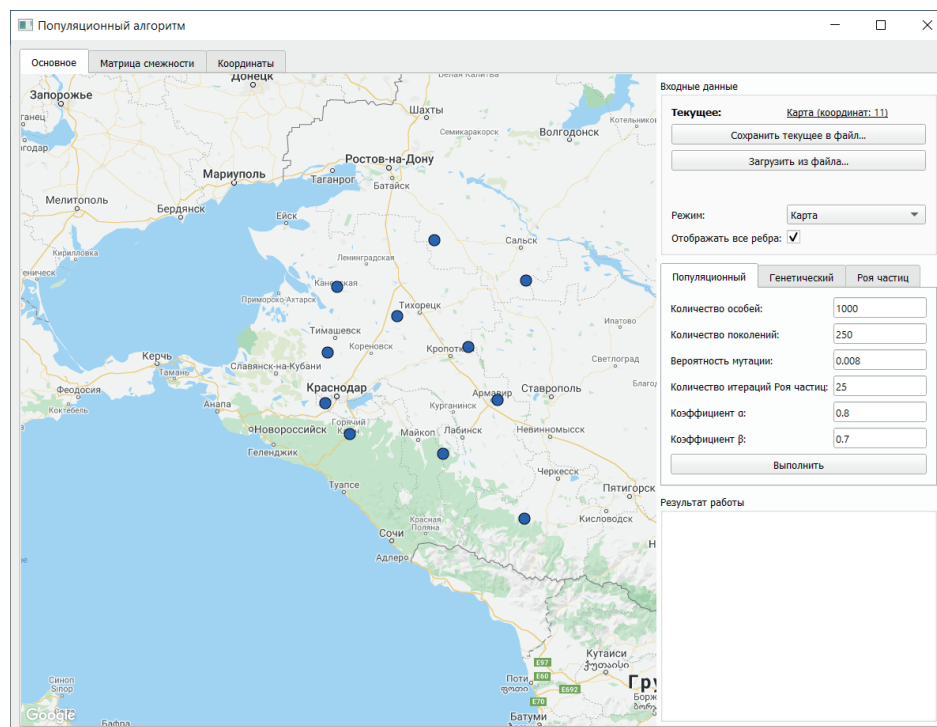
На рисунке 3 изображено главное окно программы – «Популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера». На данном рисунке изображен один из двух возможных режимов работы программы - интерактивная карта, с найденным маршрутом коммивояжера (также оператор может включить режим работы в виде графа). Точками обозначены города. Найденный путь коммивояжера соединяет выбранные города. Справа расположены различные параметры алгоритмов. Результат работы программы: номер последнего поколения, найденный маршрут коммивояжера (последовательность его городов) и длина найденного пути располагаются в правом нижнем углу. В данном случае режим «Отображать все ребра» отключен, но их можно отобразить, нажав на соответствующую кнопку.





Р и с. 3. Основное окно программы в режиме работы «Карта»

F i g. 3. The main window of the program in the "Map" mode



Р и с. 4. Выбор точек на карте

F i g. 4. Selection of points on a map



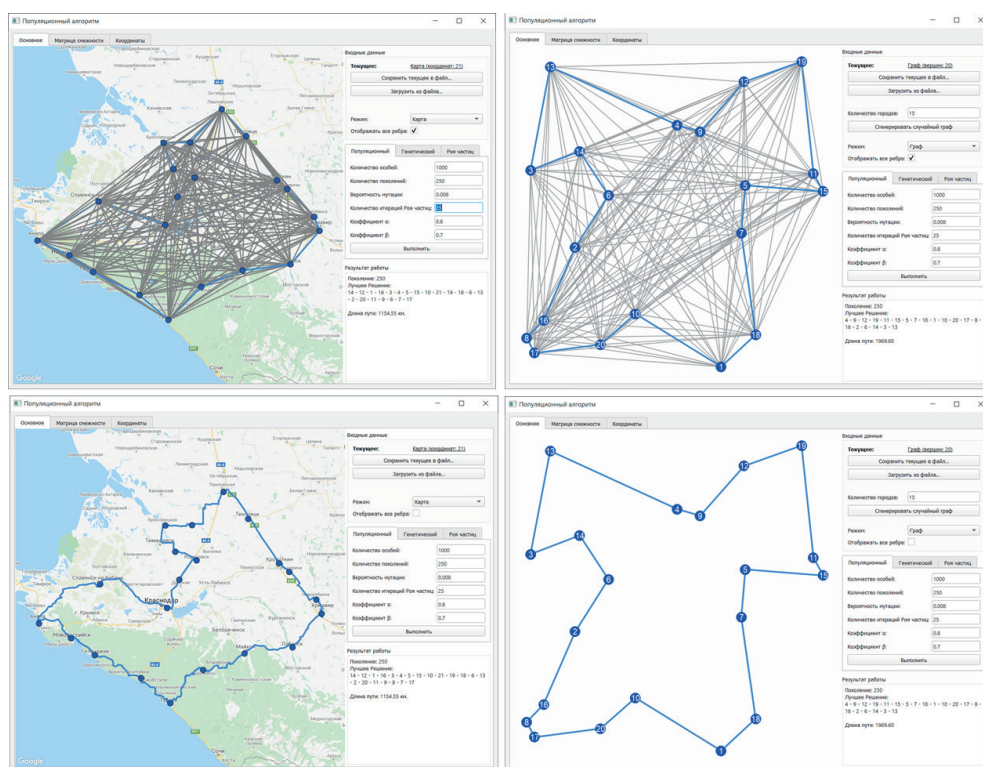


Все параметры алгоритма уже заданы автоматически и оптимально настроены. При необходимости их можно изменить в соответствующих полях. Параметры можно задавать как для популяционного алгоритма в целом, так и для каждого алгоритма по отдельности (для роя частиц, генетического). Пользователь (или оператор) может загрузить исходную задачу из файла, сохранить текущую конфигурацию в файл.

В режиме «Карта», в отличие от абстрактного режима «Граф», используется карта Google с привязкой к координатам реальных географических объектов (точек), а все маршруты строятся по действующим дорогам, с учетом их уникальных особенностей (к примеру, одностороннего движения).

Также пользователь может в режиме «Граф» сгенерировать задачу случайно. Для этого ему необходимо выбрать количество городов (точек) и нажать на кнопку «Сгенерировать случай-

ный граф». Вне зависимости от того, загрузил ли пользователь задачу из файла, или ввёл задачу вручную путем выбора точек на карте, или задал её случайно путем, нажав кнопку «Сгенерировать случайный граф» в главном меню программы, автоматически отобразится наглядное представление задачи в виде точек на карте, или графа. Далее пользователю необходимо нажать кнопку «Выполнить», и программа начнет динамически отображать решение задачи, на последней итерации отобразится найденное лучшее решение в виде маршрута коммивояжера. На рисунке 5 показаны результат работы программы в режиме «Карта» и «Граф» с включенным отображением всех ребер, и без. В левой части данного рисунка проиллюстрирован результат работы программы в режиме «Карта», в правой – в режиме «Граф».



Р и с. 5. Результат работы программного комплекса

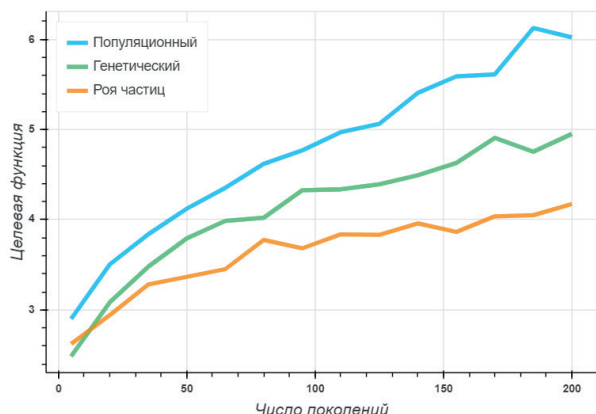
F i g. 5. The result of the software package

## Анализ эффективности гибридного алгоритма

На рисунке 6 изображена зависимость максимальных значений ЦФ от количества поколений (итераций) генетического алгоритма (график посередине) и роя частиц (самый нижний график) по отдельности, а также вместе в виде гибридного популяционного алгоритма (самый верхний график). Из данных графиков следует, что гибридный популяционный алгоритм работает намного эффективнее, чем генетический алгоритм и метод роя частиц по отдельности.

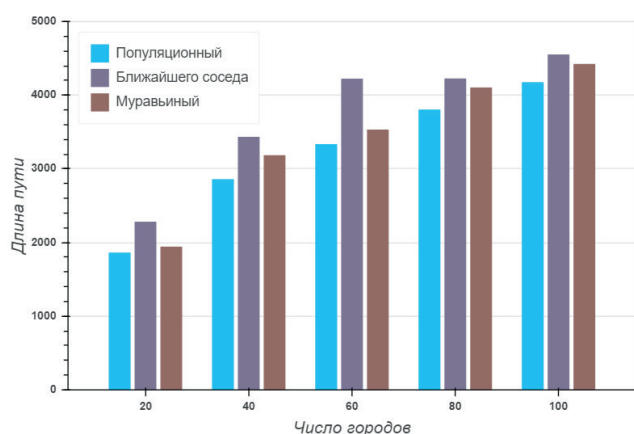
На рисунке 7 представлена гистограмма сравнения точности разработанного популяционного гибридного алгоритма с наиболее популярными методами решения задачи коммивояжера, какими являются: метод ближайшего соседа (жадный алгоритм), муравьиный алгоритм. Как видно из данной гистограммы, полученный популяционный гибридный алгоритм показывает уверенное преимущество в точности над другими широко распространёнными методами решения задачи коммивояжера.





Р и с. 6. Влияние числа поколений (количества итераций) на максимальное значение ЦФ

Fig. 6. Influence of the number of generations (number of iterations) on the maximum value of the objective function



Р и с. 7. Гистограмма влияния размера входных данных (числа городов) на длину найденного минимального маршрута коммивояжера

Fig. 7. Histogram of the influence of the size of the input data (the number of cities) on the length of the found minimum traveling salesman route

## Заключение

В данной работе был реализован популяционный алгоритм решения задачи коммивояжера с использованием высокоуровневой гибридации вложением, на основе генетического алгоритма и метода роя частиц. В результате экспериментальных исследований удалось установить, что алгоритм обладает хорошей масштабируемостью, что очень важно для алгоритмов, работающих с большими объемами информации. Также полученный алгоритм показывает превосходство в точности над методом ближайшего соседа и муравьиным алгоритмом. Кроме того, необходимо отметить, что для разработанного популяционного алгоритма был создан многофункциональный программный комплекс, в котором используется привязка к

реальным географическим объектам и координатам, а маршруты прокладываются с учетом особенностей действительных дорог, и реальных расстояний, при помощи средств Google Maps JavaScript API и Google Directions API.

## Список использованных источников

- [1] Нигодин, Е. А. Гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера / Е. А. Нигодин, Е. Е. Полупанова, А. С. Поляков // Прикладная математика XXI века: современные проблемы математики, информатики и моделирования. – Краснодар: Краснодарский ЦНТИ – ф-л ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2019. – Вып. 1. – Ч. 4. – С. 252-259. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38189428> (дата обращения: 13.04.2021).
- [2] Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А. П. Карпенко. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2014. – 448 с.
- [3] Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2010. – 317 с.
- [4] Мудров, В. И. Задача о коммивояжере / В. И. Мудров. – М.: «Знание», 1969. – 62 с.
- [5] Антух, А. Э. Глобальная оптимизация на основе гибридации методов роя частиц, эволюции разума и клональной селекции / А. Э. Антух, А. П. Карпенко. – DOI 10.7463/0812.0431723 // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 8. – С. 379-416. – Рез. англ.
- [6] del Valle, Y. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems / Y. del Valle [и др.]. – DOI 10.1109/TEVC.2007.896686 // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2008. – Vol. 12, No. 2. – Pp. 171-195.
- [7] Domínguez, J. S. H. A comparison on the search of particle swarm optimization and differential evolution on multi-objective optimization / J. S. H. Domínguez, G. T. Pulido. – DOI 10.1109/CEC.2011.5949858 // 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC). – IEEE Press, New Orleans, LA, USA, 2011. – Pp. 1978-1985.
- [8] Niknam, T. An efficient hybrid approach based on PSO, ACO and  $k$ -means for cluster analysis / T. Niknam, B. Amiri. – DOI 10.1016/j.asoc.2009.07.001 // Applied Soft Computing. – 2010. – Vol. 10, issue 1. – Pp. 183-197.
- [9] Ritscher, T. Design and experimental evaluation of multiple adaptation layers in self-optimizing particle swarm optimization / T. Ritscher, S. Helwig, R. Wanka. – DOI 10.1109/CEC.2010.5586255 // IEEE Congress on Evolutionary Computation. – IEEE Press, Barcelona, Spain, 2010. – Pp. 1-8.
- [10] Shi, Y. A modified particle swarm optimizer / Y. Shi, R. Eberhart. – DOI 10.1109/ICEC.1998.699146 // 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360). – IEEE Press, Anchorage, AK, USA, 1998. – Pp. 69-73.
- [11] Simon, D. Evolutionary Optimization Algorithms / D. Simon. – John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 784 p.



- [12] Курейчик, В. В. Бионспирированный поиск в задачах конструкторского проектирования и оптимизации / В. В. Курейчик, В. В. Бова, В. В. Курейчик // Информационные технологии в науке, образовании и управлении / под ред. Е. Л. Глориозова. – Гурзуф: ООО «Ин-т новых инф. тех.», 2015. – С. 427-432. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23519161> (дата обращения: 13.04.2021). – Рез. англ.
- [13] Курейчик, В. В. Об одном гибридном подходе к решению комбинаторно-логических задач на графах / В. В. Курейчик, Л. В. Курейчик // Труды международного научно-технического Конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2020» («ИС&ИТ-2020», «IS&IT'20»). – Дивноморское: Изд-во Ступина С. А., 2020. – С. 102-108. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45435484> (дата обращения: 13.04.2021). – Рез. англ.
- [14] Kureichik, V. V. Application of bioinspired algorithms for solving transcomputational tasks / V. V. Kureichik, I. O. Kuritys, E. V. Kuliev, E. M. Gerasimenko. – DOI 10.1088/1742-6596/1703/1/012021 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1703. – Article 012021.
- [15] Kureichik, V. Hybrid Approach for Graph Partitioning / V. Kureichik, D. Zaruba, V. Kureichik. – DOI 10.1007/978-3-319-57261-1\_7 // Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing; ed. by R. Silhavy, R. Senkerik, Z. Kominkova Oplatkova, Z. Prokopova, P. Silhavy. – Vol. 573. – Springer, Cham, 2017. – Pp. 64-73.
- [16] Su, F. Modeling and application for rolling scheduling problem based on TSP / F. Su, L. Kong, H. Wang, Z. Wen. – DOI 10.1016/j.amc.2021.126333 // Applied Mathematics and Computation. – 2021. – Vol. 407. – Article 126333.
- [17] Zhang, J. An Improved Whale Optimization Algorithm for the Traveling Salesman Problem / J. Zhang, L. Hong, Q. Liu. – DOI 10.3390/sym13010048 // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, issue 1. – Article 48.
- [18] Krishna, M. M. Solving traveling salesman problem using hybridization of rider optimization and spotted hyena optimization algorithm / M. M. Krishna, N. Panda, S. K. Majhi. – DOI 10.1016/j.eswa.2021.115353 // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 183. – Article 115353.
- [19] Garn, W. Balanced dynamic multiple travelling salesmen: Algorithms and continuous approximations / W. Garn. – DOI 10.1016/j.cor.2021.105509 // Computers & Operations Research. – 2021. – Vol. 136. – Article 105509.
- [20] Oliveira, S. M. A detailed analysis of the population-based ant colony optimization algorithm for the TSP and the QAP / S. M. Oliveira, M. S. Hussin, T. Stuetzle, A. Roli, M. Dorigo. – DOI 10.1145/2001858.2001866 // Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO'11). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2011. – Pp. 13-14.
- [21] Nagata, Y. High-Order Entropy-Based Population Diversity Measures in the Traveling Salesman Problem / Y. Nagata. – DOI 10.1162/evco\_a\_00268 // Evolutionary Computation. – 2020. – Vol. 28, issue 4. – Pp. 595-619.
- [22] Pop, P. A two-level diploid genetic based algorithm for solving the family traveling salesman problem / P. Pop, O. Matei, C. Pinte. – DOI 10.1145/3205455.3205545 // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'18). – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. – Pp. 340-346.
- [23] Bernardino, R. Solving the family traveling salesman problem / R. Bernardino, A. Paia. – DOI 10.1016/j.ejor.2017.11.063 // European Journal of Operational Research. – 2018. – Vol. 267, issue 2. – Pp. 453-466.
- [24] Cacchiani, V. A multistart heuristic for the equality generalized traveling salesman problem / V. Cacchiani, A. E. F. Muritiba, M. Negreiros, P. Toth. – DOI 10.1002/net.20421 // Networks. – 2011. – Vol. 57, issue 3. – Pp. 231-239.
- [25] Morán-Mirabal, L. F. Randomized heuristics for the family traveling salesperson problem / L. F. Morán-Mirabal, J. L. González-Velarde, M. G. C. Resende. – DOI 10.1111/itor.12026 // International Transactions in Operational Research. – 2014. – Vol. 21, issue 1. – Pp. 41-57.

Поступила 13.04.2021; одобрена после рецензирования 22.05.2021; принята к публикации 15.06.2021.

#### Об авторах:

**Полупанова Елена Евгеньевна**, доцент кафедры вычислительных технологий, факультет компьютерных технологий и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (350040, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149), кандидат технических наук, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>**, [jenka@mail.ru](mailto:jenka@mail.ru)

**Поляков Алексей Сергеевич**, магистрант кафедры вычислительных технологий, факультет компьютерных технологий и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (350040, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6765-7769>**, [superpolikow@gmail.com](mailto:superpolikow@gmail.com)

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### References

- [1] Nigodin E.A., Polupanova E.E., Polyakov A.S. *Gibridnyj algoritm reshenija zadachi kommivojazhera* [Hybrid algorithm for solving the traveling salesman problem]. *Proceedings of the International Conference on Applied Mathematics of the XXI Century: Modern Problems of Mathematics, Computer Science and Modeling*. Issue 1, part 4. Krasnodar; 2019. p. 252-259. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38189428> (accessed 13.04.2021). (In Russ.)
- [2] Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj* [Modern search optimization algorithms. Nature-inspired algorithms]. BMSTU, Moscow; 2014. 448 p. (In Russ.)
- [3] Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic Algorithms]. PhysMathLit, Moscow; 2010. 317 p. (In Russ.)





- [4] Mudrov V.I. *Zadacha o kommivojzhere* [The traveling salesman problem]. Znanie, Moscow; 1969. 62 p. (In Russ.)
- [5] Antukh A.E., Karpenko A.P. Global optimization based on methods of particle swarm, mind evolution and clonal selection. *Science and Education of Bauman MSTU*. 2012; (8):379-416. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7463/0812.0431723>
- [6] del Valle Y., Venayagamoorthy G.K., Mohagheghi S., Hernandez J. -C., Harley R.G. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2008; 12(2):171-195. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.8966686>
- [7] Domínguez J.S.H., Pulido G.T. A comparison on the search of particle swarm optimization and differential evolution on multi-objective optimization. *2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE Pres, New Orleans, LA, USA; 2011. p. 1978-1985. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CEC.2011.5949858>
- [8] Niknam T., Amiri B. An efficient hybrid approach based on PSO, ACO and *k*-means for cluster analysis. *Applied Soft Computing*. 2010; 10(1):183-197. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.07.001>
- [9] Ritscher T., Helwig S., Wanka R. Design and experimental evaluation of multiple adaptation layers in self-optimizing particle swarm optimization. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. IEEE Press, Barcelona, Spain; 2010. p. 1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/CEC.2010.5586255>
- [10] Shi Y., Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*. IEEE Press, Anchorage, AK, USA; 1998. p. 69-73. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEC.1998.699146>
- [11] Simon D. *Evolutionary Optimization Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc.; 2013. 784 p. (In Eng.)
- [12] Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.V. Bioinspired algorithm for design and optimization problems. In: Ed. by E. L. Gloriov. *Proceedings of the International Conference on Information technologies in science, education and management*. Gurfuz; 2015. p. 427-432. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23519161> (accessed 13.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [13] Kureychik V.V., Kureychik L.V. Summary of some hybrid approach to solving combinatorically logical tasks on graphs. *Proceedings of the International Scientific and Technical Congress on Intelligent Systems and Information Technologies – 2020 (IS&IT-2020)*. Publ. house of Stupin S.A., Divnomorskoye; 2020. p. 102-108. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45435484> (accessed 11.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [14] Kureychik V.V., Kursitys I.O., Kuliev E.V., Gerasimenko E.M. Application of bioinspired algorithms for solving transcomputational tasks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1703:012021. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012021>
- [15] Kureychik V., Zaruba D., Kureychik V. Hybrid Approach for Graph Partitioning. In: Ed. by R. Silhavy et al. *Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017; 573:64-73. Springer, Cham. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57261-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57261-1_7)
- [16] Su F., Kong L., Wang H., Wen Z. Modeling and application for rolling scheduling problem based on TSP. *Applied Mathematics and Computation*. 2021; 407:126333. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126333>
- [17] Zhang J., Hong L., Liu Q. An Improved Whale Optimization Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Symmetry*. 2021; 13(1):48. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/sym13010048>
- [18] Krishna M.M., Panda N., Majhi S.K. Solving traveling salesman problem using hybridization of rider optimization and spotted hyena optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*. 2021; 183:115353. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115353>
- [19] Garn W. Balanced dynamic multiple travelling salesmen: Algorithms and continuous approximations. *Computers & Operations Research*. 2021; 136:105509. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105509>
- [20] Oliveira S.M., Hussin M.S., Stuetzle T., Roli A., Dorigo M. A detailed analysis of the population-based ant colony optimization algorithm for the TSP and the QAP. *Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO'11)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2011. p. 13-14. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/2001858.2001866>
- [21] Nagata Y. High-Order Entropy-Based Population Diversity Measures in the Traveling Salesman Problem. *Evolutionary Computation*. 2020; 28(4):595-619. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1162/evco\\_a\\_00268](https://doi.org/10.1162/evco_a_00268)
- [22] Pop P., Matei O., Pinte C. A two-level diploid genetic based algorithm for solving the family traveling salesman problem. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2018. p. 340-346. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/3205455.3205545>
- [23] Bernardino R., Paias A. Solving the family traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*. 2018; 267(2):453-466. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.063>
- [24] Cacchiani V., Muritiba A.E.F., Negreiros M., Toth P. A multistart heuristic for the equality generalized traveling salesman problem. *Networks*. 2011; 57(3):231-239. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/net.20421>
- [25] Morán-Mirabal L.F., González-Velarde J.L., Resende M.G.C. Randomized heuristics for the family traveling salesperson problem. *International Transactions in Operational Research*. 2014; 21(1):41-57. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12026>

Submitted 13.04.2021; approved after reviewing 22.05.2021;  
accepted for publication 15.06.2021.



**About the authors:**

**Elena E. Polupanova**, Associate Professor of the Department of Computational Technologies, Faculty of Computer Technologies and Applied Mathematics, Kuban State University (149 Stavropol'skaya St., Krasnodar 350040, Russian Federation), Ph.D. (Technology), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>**, [jenka@mail.ru](mailto:jenka@mail.ru)

**Aleksey S. Polyakov**, Master's degree student of the Department of Computational Technologies, Faculty of Computer Technologies and Applied Mathematics, Kuban State University (149 Stavropol'skaya St., Krasnodar 350040, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6765-7769>**, [superpolikow@gmail.com](mailto:superpolikow@gmail.com)

*All authors have read and approved the final manuscript.*

