

УДК 004.023

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-4-143-148

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ*

В. А. Тенев, доктор физико-математических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; Удмуртский федеральный исследовательский центр УрОРАН, Ижевск, Россия

А. С. Шаура, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; Удмуртский федеральный исследовательский центр УрОРАН, Ижевск, Россия

Д. С. Шаура, ООО «ИРЗ», Ижевск, Россия

Рассматривается задача маршрутизации транспортных средств, являющаяся обобщением задачи коммивояжера. Существует несколько основных моделей маршрутизации, каждая из которых характеризуется наличием дополнительных условий (по грузоподъемности, транспортному парку, времени доставки, количеству баз и т. д.) и описывает группу реальных задач транспортной логистики. Эта задача относится к классу NP-трудных, а наличие дополнительных условий еще более усложняет ее решение.

В работе описан двухэтапный подход к организации оптимальной маршрутизации: на первом этапе все пункты доставки распределяются на географические районы методами нечеткой кластеризации, а на втором – для каждого района и каждого транспортного средства с помощью генетического алгоритма рассчитывается оптимальный маршрут. При этом все имеющиеся в задаче ограничения учитываются при вычислении фитнес-функции и определяют допустимость и приспособленность особей популяции.

В большинстве практических задач необходимо иметь сбалансированное распределение потребителей по различным маршрутам для равномерной загрузки транспортного парка и снижения общего времени доставки, поэтому в представленном алгоритме после предварительной оценки продолжительности всех маршрутов предусмотрена дополнительная процедура выравнивания кластеров.

Реализованный алгоритм успешно использовался для получения решения задачи маршрутизации в масштабах города и в условиях реальной транспортной сети.

Ключевые слова: задача маршрутизации транспортных средств, генетический алгоритм, нечеткая кластеризация, S-means, условная дискретная оптимизация.

Введение

Основной задачей транспортной логистики является определение оптимального маршрута доставки груза с соблюдением имеющихся ограничений и минимальными затратами. Считается, что в современном мире расходы на перевозку составляют до 50 % от всех логистических затрат, и этот факт определяет актуальность рассматриваемой проблемы и растущий интерес к ее решению.

Классическая задача коммивояжера (*Traveling Salesman Problem, TSP*) ставится следующим образом. Имеется n пунктов (городов) v_1, v_2, \dots, v_n , для каждой пары v_i и v_j которых известно расстояние между ними $d_{ij} = d(v_i, v_j)$. Необходимо найти кольцевой маршрут минимальной длины, проходящий через все пункты ровно один раз. Если для любых трех пунктов i, j и k выполняется неравенство треугольника $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$, то задача называется метрической. Задача коммивояжера относится к классу NP-трудных задач и уже даже при небольших значениях n не может быть решена перебором за разумное время, поэтому для ее решения применяются приближенные алгоритмы, в основе которых лежит ме-

тод ветвей и границ и различные эвристики, метрическая задача может быть решена приближенно с помощью алгоритма Кристофидеса [1]. В настоящее время одним из наилучших алгоритмов решения задачи коммивояжера является *Concorde* [2, 3], с помощью которого получено решение более чем 100 задач из библиотеки TSPLIB [4] с размерностью от $n=14$ до $n=85900$. Обобщением задачи коммивояжера является задача маршрутизации транспортных средств, которая накладывает дополнительные условия на решение и в большей степени востребована на практике, причем не только в транспортной логистике, но и других областях.

Задача маршрутизации транспортных средств (*Vehicle Routing Problem, VRP*) относится к задачам дискретной оптимизации и заключается в определении набора оптимальных маршрутов для имеющегося парка транспортных средств при заданных пунктах потребления. Присутствие дополнительных условий и ограничений: грузоподъемность транспорта (*Vehicle Capacity*), желаемое время доставки (*Time Windows*), наличие нескольких складов (*Multiple Depot*) и т. д. – порождают различные виды задачи маршрутизации (табл. 1).

Таблица 1. Основные виды задачи маршрутизации

Вид	Полное название	Описание
TSP	Traveling Salesman Problem	Задача коммивояжера
TSPB	Traveling Salesman Problem with Backhauls	Задача коммивояжера с возвратом товаров после завершения доставки
TSPTW	Traveling Salesman Problem with Time Windows	Задача коммивояжера с ограничениями по времени доставки (временными окнами)
MTSP / VRP	Multiple Traveling Salesman Problem / Vehicle Routing Problem	Маршрутизация транспортных средств
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem	Маршрутизация транспортных средств с ограничениями по грузоподъемности
DCVRP	Distance Constrained Vehicle Routing Problem	Маршрутизация с ограничениями на длину или продолжительность маршрутов
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls	Маршрутизация с возвратом товаров после завершения доставки (запрещена перестановка груза в транспорте во время доставки)
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows	Маршрутизация с временными окнами
VRPPD	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery	Маршрутизация с немедленным возвратом груза (часть груза возвращается назад от потребителей в депо или направляется другим потребителям)
MDVRP	Multiple Depot Vehicle Routing Problem	Маршрутизация с несколькими депо (складами)

Возможны более сложные случаи, когда в одной задаче одновременно присутствуют признаки сразу нескольких типов *VRP*, приведенных в табл. 1. Например, ограничена грузоподъемность транспортных средств, имеются ограничения по времени (времен-

ные окна), и совместно с доставкой необходимо осуществлять забор попутного груза. Связь между основными видами задач коммивояжера и маршрутизации схематично показана на рис. 1.

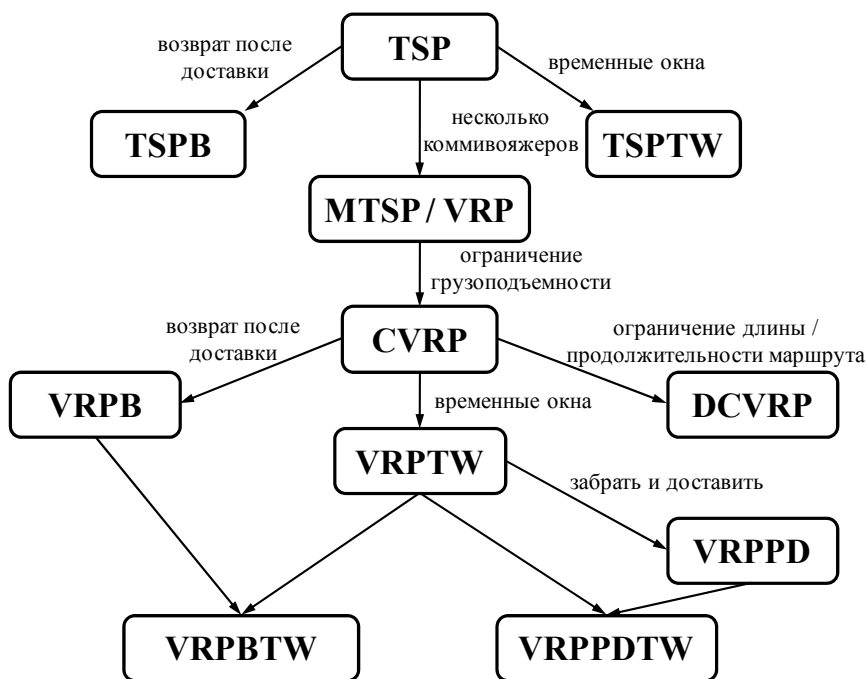


Рис. 1. Взаимосвязь между основными типами задач TSP и VRP

Постановка задачи маршрутизации транспортных средств

Если решается задача с несколькими депо, то, как правило, она может быть разбита на несколько подзадач маршрутизации в окрестности каждого депо. Пусть имеется одно депо (база) и *n* пунктов доставки, тогда $V = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество всех потребителей. Каждый потребитель $i \in V$ имеет потребность, равную q_i единицам груза, доставляемого из

депо. Транспортный парк $M = \{1, 2, \dots, m\}$ состоит из *m* различных типов транспортных средств. В депо имеется l_k транспортных средств каждого типа $k \in M$, имеющих грузоподъемность Q_k . Для каждой пары потребителей *i* и *j* и каждого типа транспорта $k \in M$ стоимость перевозок по маршруту (*i, j*) составляет c_{ij}^k . Как правило, основными критериями, определяющими стоимость и эффективность органи-

зации перевозок, являются протяженность или продолжительность маршрутов, поэтому часто можно принять в качестве c_{ij}^k продолжительность перевозки t_{ij}^k . Если доставка груза j -му потребителю связана с необходимостью затратить некоторое время Δt_j^k на разгрузку или обслуживание, то оно прибавляется ко времени доставки $t_{ij}^k + \Delta t_j^k$ и общей продолжительности маршрута. С учетом введенных обозначений маршрут определяется парой (R, A_l^k) , где $R = (i_1, i_2, \dots, i_{|R|})$ – последовательность объезда потребителей, а A_l^k – транспортное средство типа $k \in M$, и номером $l \in \{1, 2, \dots, l_k\}$. Если маршрут должен начинаться и заканчиваться в депо, а депо обозначить как пункт с номером $i = 0$, то рассматривать $R = (0, i_1, i_2, \dots, i_{|R|-2}, 0)$. Маршрут (R, A_l^k) является допустимым (*feasible*), если сумма всего доставляемого груза не превосходит грузоподъемности Q_k , т. е.

$$\sum_{i \in R} q_i \leq Q_k. \quad (1)$$

Если решается задача с временными окнами и дополнительно заданы ограничения в виде интервалов времени $[t_i^L, t_i^H]$, в течение которого должен быть обслужен каждый i -й клиент, задача дополняется условиями вида

$$t_i^L \leq T(i, A_l^k) + \Delta t_i^k \leq t_i^H, \quad (2)$$

где $T(i, A_l^k)$ – время прибытия транспорта A_l^k к i -му потребителю, Δt_i^k – время обслуживания i -го потребителя.

Стоимость доставки по маршруту (R, A_l^k) состоит

$$F(R, A_l^k) = \sum_{h=0}^{|R|-1} c_{i_h i_{h+1}}^k,$$

а продолжительность

$$T(R, A_l^k) = \sum_{h=0}^{|R|-1} (t_{i_h i_{h+1}}^k + \Delta t_{i_{h+1}}^k).$$

Суммарная стоимость доставки и суммарная продолжительность всех маршрутов для всех транспортных средств соответственно составят

$$F = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{l_k} F(R, A_l^k) \quad (3)$$

и

$$T = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{l_k} T(R, A_l^k). \quad (4)$$

Тогда задача маршрутизации транспортных средств сводится к отысканию условного минимума функции (3) или (4) при наличии ограничений по грузоподъемности (1), времени (2) и т. д.

Эволюционный подход к решению задачи маршрутизации

Задачу маршрутизации можно рассматривать как две связанные подзадачи: первая – распределение пунктов потребления между имеющимися транспортными средствами, вторая – построение оптимального пути для каждого транспорта. Первую задачу иногда называют определением географических районов. Она представляет собой задачу кластеризации: необходимо разбить всех потребителей на непесекающиеся группы (районы) так, чтобы внутри каждой группы оказались наиболее близкие объекты в смысле выбранной метрики (расстояние, время или стоимость), а в разных группах – удаленные. В данной работе для этого использован алгоритм нечеткой кластеризации C-means [5, 6] с масштабированием Густафсона – Кесселя [7]. При решении практических задач необходимо стремиться к сбалансированности разбиения на кластеры, чтобы максимально эффективно и равномерно загрузить имеющийся транспортный парк. Особенно это важно при организации посменной работы или необходимости завершить доставку по всем маршрутам к одному времени (например, к концу дня). Для этого в алгоритме была специально предусмотрена процедура «выравнивания» размера кластеров по результатам оценки решения путем передачи граничных точек наиболее крупных кластеров соседним, но меньшего размера с последующим обновлением решения.

Для контроля сбалансированности кластеров может использоваться предварительная оценка протяженности каждого маршрута по методу дальней точки или методам, основанным на алгоритме Свира [8]. Такая оценка будет достаточно далека от истинного значения протяженности (стоимости) маршрута, особенно при наличии в задаче временных окон и ограничений по грузоподъемности, но при большом количестве потребителей и предположении о том, что периоды их работы и объемы доставляемого груза распределены между ними равномерно, позволит на первом этапе оценить «равноценность» и сбалансированность полученных после кластеризации районов. Результат определения географических районов с учетом городской транспортной сети для одной из решенных задач (при $n = 114$, $m = 2$ и $m = 5$) показан на рис. 2.

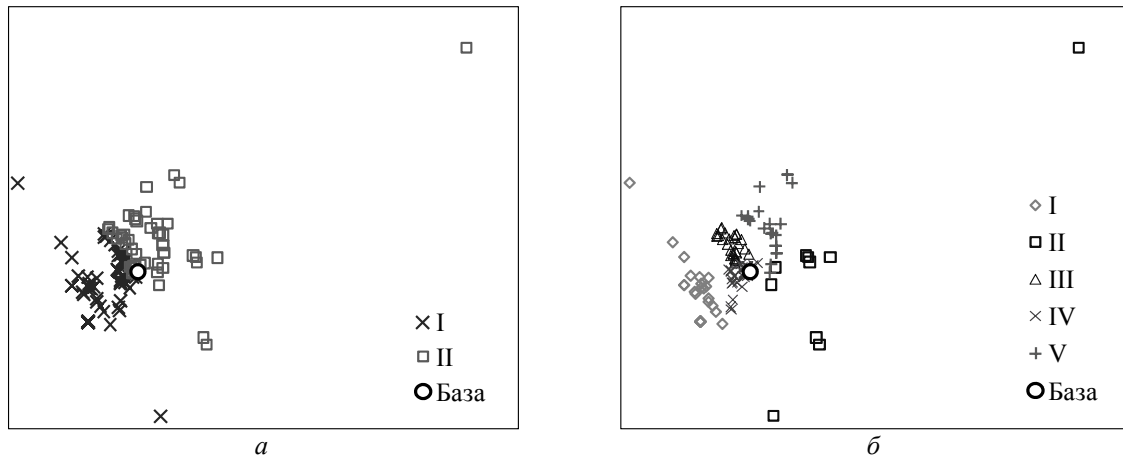


Рис. 2. Результаты кластеризации в задаче маршрутизации при $n = 114$:
 a – для двух транспортных средств; b – для пяти транспортных средств

Вторая задача – поиск оптимального маршрута в каждом определенном географическом районе – это задача условной дискретной оптимизации. Для ее решения удобно применять генетический алгоритм, поскольку это позволяет учитывать все имеющиеся в задаче ограничения при вычислении функции приспособленности особей [9], не требуя строгой формализации всех условий или их записи в явном виде. Каждая особь генетического алгоритма представляет собой последовательность потребителей в маршруте (R, A_i^k) , т. е. вектор целых чисел $R = (i_1, i_2, \dots, i_{|R|})$. Целевые функции (3) или (4) зависят только от порядка следования номеров $i_1, i_2, \dots, i_{|R|}$ в путевом листе, поэтому приспособленность каждой особи $Fitness(R)$ вычисляется пошагово по мере продвижения по маршруту и складывается из следующим составляющих:

$$1) \sum_{h=0}^{|R|-1} (t_{i_h i_{h+1}}^k + \Delta t_{i_{h+1}}^k) - \text{это суммарное время нахождения в пути при перемещении от потребителя к потребителю плюс время } \Delta t_{i_{h+1}}^k, \text{ затраченное на обслуживание каждого } h+1 \text{ потребителя;}$$

2) если в какой-то момент закончился груз или при очередном его заборе от клиента будет превышена грузоподъемность транспорта, к текущему значению $Fitness(R)$ добавляется время возвращения на базу, время погрузки-разгрузки груза и время движения от базы до следующего клиента в маршрутном листе;

3) если транспорт прибыл к клиенту до открытия временного окна $[t_i^L, t_i^H]$, то к текущему значению $Fitness(R)$ дополнительно добавляется время ожидания до момента времени t_i^L ;

4) если транспорт не успевает доставить оставшийся груз до конца смены (до превышения ограничения по времени доставки) либо прибыл к клиенту после закрытия временного окна $[t_i^L, t_i^H]$, то к

$Fitness(R)$ добавляется время ожидания до следующего возможного периода доставки (начала нового временного окна $[t_i^L, t_i^H]$, смены, следующего дня и т. п.) и при необходимости время движения до базы и обратно (в случае окончания смены);

5) в случае присутствия в задаче иных ограничений, они также учитываются при вычислении приспособленности особи путем увеличения времени (стоимости) доставки по рассматриваемому маршруту.

Таким образом, невыполнение каких-либо ограничений приводит к существенному увеличению продолжительности маршрута или его удорожанию, что снижает приспособленность особи генетического алгоритма, и наоборот, удовлетворение всех ограничений повышает приспособленность, обеспечивая поиск допустимого решения.

При реализации генетического алгоритма в работе использованы соответствующие известные операторы скрещивания и мутации [10, 11], применяемые для решения задач дискретной оптимизации.

Результаты решения задачи маршрутизации

Апробация представленного метода проведена на решении реальных задач маршрутизации с различным числом пунктов потребления, отличающихся величиной и грузоподъемностью транспортного парка.

Результат решения задачи доставки груза для $n = 99$ потребителей в течение одной рабочей смены с помощью $m = 3$ транспортных средств с учетом реальной городской транспортной сети, имеющих развязок и возможностей подъезда приведен на рис. 3.

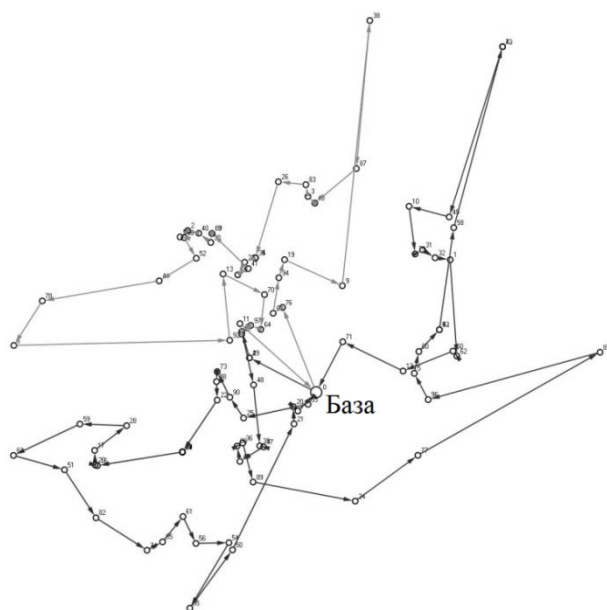
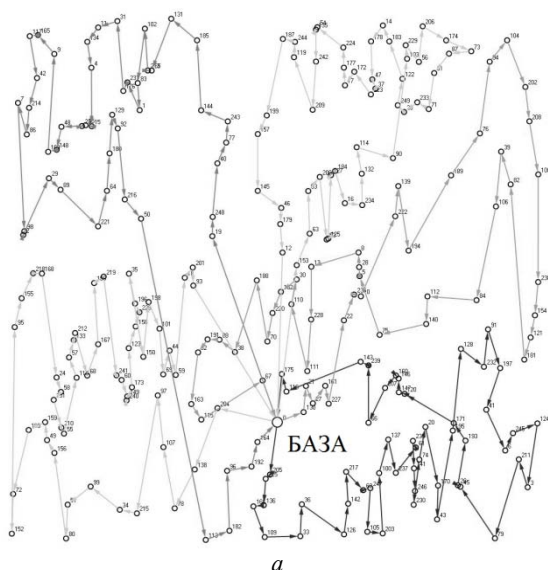
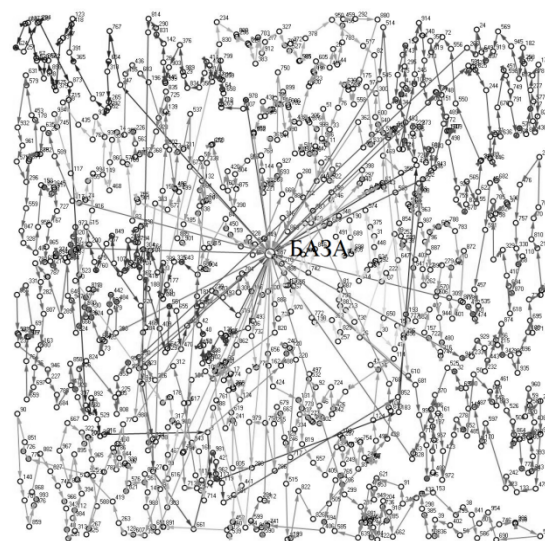


Рис. 3. Решение задачи маршрутизации для 99 потребителей и 3 транспортных средств

В полученном решении после кластеризации географические районы I, II и III курьера содержали по



а



б

Рис. 4. Результаты решения задачи: а – для $n = 250$ и $m = 5$; б – для $n = 1000$ и $m = 20$

Для случая, представленного на рис. 4, б, наименьший размер кластера составил 40, а наибольший – 59, продолжительность смены от 17.00 до 19.30.

Заключение

Представленный в работе подход демонстрирует возможность эффективного решения основной задачи транспортной логистики – задачи маршрутизации транспортных средств – с помощью совместного использования методов кластеризации для определения географических районов и снижения размерности задачи и генетического алгоритма для поиска оптимального пути с учетом дополнительных ограничений непосредственно при подсчете приспособленности особей. Такой подход существенно упро-

щает не только решение задачи, но и ее формализацию, поскольку фитнес-функция определяется пошагово в порядке следования по маршруту и соответствует логике последовательности доставки груза.

31, 34 и 34 пункта доставки соответственно. Рабочая смена каждого из 3 курьеров начиналась в 8.00 на базе и завершалась тоже возвращением на базу после окончания доставки. Курьеры вернулись на базу в 15.20, 15.35 и 14.55 соответственно. Хорошая сбалансированность районов и близкое время окончания смен – это результат эффективной кластеризации и дополнительного «выравнивания» кластеров по итогам оценки решения.

Совместное использование кластеризации для распределения пунктов доставки между имеющимися транспортными средствами и генетического алгоритма для решения задачи построения оптимального маршрута каждого курьера реализует известный принцип «разделяй и властвуй» и позволяет решать задачи большой размерности даже при наличии дополнительных условий. На рис. 4 приведены результаты решения задач для 250 и 1000 точек с учетом базы при наличии 5 и 20 единиц транспорта. В случае, представленном на рис. 4, а, размер кластеров составил 52, 49, 52, 48 и 48 пунктов доставки, а время окончания смен – 19.54, 18.09, 19.09, 18.20, 18.30.

Библиографические ссылки

1. Nicos Christofides, Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem, Report 388, Graduate School of Industrial Administration, CMU, 1976.
2. Applegate D.L., Bixby R.B., Chav'atal V. and Cook W.J. The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. Princeton University Press, 2006.

3. Pouya Baniyadi, Vladimir Ejoy, Michael Haythorpe, and Serguei Rossomakhine. A new benchmark set for Traveling salesman problem and Hamiltonian cycle problem. 2018.

4. TSPLIB. library of sample instances for the TSP (and related problems) from various sources and of various types. <https://www.iwr.uniheidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/>.

5. Dunn J. C. A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters, *Journal of Cybernetics* 3: 32-57, 1973.

6. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York. 1981.

7. Uzay Kaimak, Magne Setnes. Extended Fuzzy Clustering Algorithms. ERIM report series ERS-2000-51-LIS. Rotterdam, Netherlands, November 2000, 24 pp.

8. Akhand M. A. H., Sultana T, Shuvo M. I. R, Al-Mahmud. Constructive and Clustering Methods to Solve Capacitated Vehicle Routing Problem. *Orient. J. Comp. Sci. and Technol*;10 (3). 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/ojst/10.03.02>.

9. Благодатский Г. А., Тенев В. А., Шаура А. С. Численная реализация алгоритма управления запасами при длительных сроках поставки комплектующих в условиях «узких» мест производственного цикла // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 4 (31). С. 40–44. DOI: 10.22213/2410-9304-2016-4-40-44.

10. Abdoun Otman, Jaafar Abouchabaka, Chakir Tajani. Analyzing the Performance of Mutation Operators to Solve the Travelling Salesman Problem. *Int. J. Emerg. Sci.* 2. 2012.

11. Батищев Д. И., Неймарк Е. А., Старостин Н. В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Н. Новгород, 2007. 88 с.

References

1. Nicos Christofides, Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem, Report 388, Graduate School of Industrial Administration, CMU, 1976.

2. Applegate, D.L., Bixby, R.B., Chav'atal, V., and Cook, W.J. The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. Princeton University Press, 2006.

3. Pouya Baniyadi, Vladimir Ejoy, Michael Haythorpe, and Serguei Rossomakhine. A new benchmark set for Traveling salesman problem and Hamiltonian cycle problem. 2018.

4. TSPLIB. library of sample instances for the TSP (and related problems) from various sources and of various types. <https://www.iwr.uniheidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/>.

5. J. C. Dunn. A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters, *Journal of Cybernetics* 3: 32-57, 1973.

6. J. C. Bezdek. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York. 1981.

7. Uzay Kaimak, Magne Setnes. Extended Fuzzy Clustering Algorithms. ERIM report series ERS-2000-51-LIS. Rotterdam, Netherlands, November 2000, 24 pp.

8. Akhand M. A. H, Sultana T, Shuvo M. I. R, Al-Mahmud. Constructive and Clustering Methods to Solve Capacitated Vehicle Routing Problem. *Orient. J. Comp. Sci. and Technol*;10(3). 2017. DOI : <http://dx.doi.org/10.13005/ojst/10.03.02>.

9. Blagodatskiy G. A., Tenenev V. A., Shaura A. S. [Numerical Implementation of the Algorithm of Inventory Management for Long Term Supply of Components at Presence of "Bottlenecks" of Production Cycle]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, 2016, no. 4, pp. 40-44 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2016-4-40-44.

10. Abdoun Otman, Jaafar Abouchabaka, Chakir Tajani. Analyzing the Performance of Mutation Operators to Solve the Travelling Salesman Problem. *Int. J. Emerg. Sci.* 2. 2012.

11. Batiщchev D. I., Neymark Ye. A., Starostin N. V. *Primeneniye geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach diskretnoy optimizatsii* [Application of genetic algorithms to solving discrete optimization problems]. Nizhny Novgorod, 2007, 88 p. (in Russ.).

An Evolutionary Approach to Solving the Problem of Vehicle Routing

V. A. Tenenev, DSc (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

A. S. Shaura, PhD in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

D. S. Shaura, Software engineer, JSC «IRZ», Izhevsk, Russia

In this paper we consider the vehicles routing problem, that is a generalization of the salesman problem. There are several basic routing models, each of which is characterized by additional constraints (vehicles capacity, transport fleet, delivery time, number of depot, etc.) and describes a group of real transport logistics tasks. This problem belongs to the class of NP-hard ones, and the presence of additional constraints makes its solution even more difficult.

The paper describes a two-step approach to optimal routing: at the first stage, all delivery points are distributed to geographic areas using fuzzy clustering methods, and at the second stage an optimal route is calculated using a genetic algorithm for each region and each vehicle. All constraints are taken into account when calculating fitness function and determine the feasibility and fitness of individuals of the population.

In practice, it is necessary to have a balanced distribution of consumers between different routes to evenly load the transport fleet and reduce the total delivery time, so in the presented algorithm after a preliminary assessment of duration of all routes, an additional procedure for cluster alignment is provided.

The implemented algorithm was successfully used to solve a routing problem in a real urban transport network.

Keywords: vehicle routing problem, genetic algorithm, fuzzy clustering, C-means, constrained discrete optimization.

Получено: 15.11.19