

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 2. С. 71–78
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(2):71-78

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW PAPER

УДК 614.842

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.02.71-78>

Применение метода Кларка – Райта в задачах тушения лесных пожаров силами авиационной охраны

Станислав Александрович Ермаков¹✉, Артем Андреевич Дмитриев¹,
 Полина Федоровна Постановова¹, Дмитрий Олегович Толстиков²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью данного исследования является определение минимальных затрат на путь до очагов низового лесного пожара и на его локализацию. Для достижения поставленной цели выполняются задачи: по анализу выбранного метода для расчета минимальных затрат на процесс выгрузки пожарного десанта и процесс локализации низового лесного пожара соответственно; по идентификации и характеристике необходимого оборудования, используемого при локализации низового лесного пожара; по определению оптимального пути и количества сотрудников МЧС в составе пожарного десанта с помощью приведенного псевдокода.

Аналитическая часть. Произведен обзор моделей, методов и алгоритмов поиска кратчайшего пути, оптимизации, кольцевой маршрутизации транспорта. Поставлена некоторая задача тушения лесного пожара. Применение модифицированного метода Кларка – Райта, который учитывает возможность варьирования глубины сращивания маршрутов и определение оптимального значения вероятности осуществления ухудшающего шага, позволяет найти минимальные временные затраты авиалесоохраны на локализацию низового лесного пожара. Предоставлено решение задачи доставки пожарного десанта благодаря псевдокоду, реализующему базовый метод Кларка – Райта.

Выводы. Решение на основе модифицированного метода Кларка – Райта предложит кольцевые авиамаршруты, которые будут закреплены за вертолетом, благодаря чему доставка пожарного десанта станет экономически обоснованной. Результаты исследования будут полезны аналитикам и разработчикам программного обеспечения для осуществления деятельности авиалесоохраны.

Ключевые слова: низовой лесной пожар; авиалесоохрана; локализация пожара; пожарный десант; кольцевая маршрутизация транспорта

Для цитирования: Ермаков С.А., Дмитриев А.А., Постановова П.Ф., Толстиков Д.О. Применение метода Кларка – Райта в задачах тушения лесных пожаров силами авиационной охраны // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 71–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.71-78

✉ Ермаков Станислав Александрович, e-mail: ErmakovSA@mgisu.ru

Application of Clarke and Wright algorithm in the tasks of forest fire suppression by aviation forest air protection

Stanislav A. Ermakov¹✉, Artem A. Dmitriev¹, Polina F. Postanogova¹, Dmitriy O. Tolstikov²

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this study is to determine the minimum cost of a path to a standstill forest fire and its localization. To achieve this goal, it is necessary to perform the tasks of analyzing the selected method for calculating the minimum costs for the process of unloading a fire landing and the process of localization of a low forest fire accordingly; identifying and characterizing the necessary equipment used in localizing a low forest fire; on definition of the optimal way and the number of employees of the Ministry of Emergency Situations as part of a fire landing force using an algorithm in the form of a pseudocode.

The analytical part. The models, methods and algorithms of search of shortest way, optimization, circulation routing of transport are reviewed. Some problem of extinguishing of forest fire is set. The application of the modified Clarke and Wright algorithm, which considers a possibility of variation of depth of route splice and definition of optimal value of probability of realization of the worsening step, makes it possible to find the minimum time

spent by aviation forest protection for localization of a low forest fire. A solution to the problem of fire troop delivery thanks to pseudocode implementing the basic Clarke and Wright algorithm is given.

Conclusions. The solution based on the modified Clarke and Wright algorithm provides circular air routes that will be assigned to a helicopter, so that the delivery of firefighting troops will become economically feasible. The results of the research will be useful to analysts and software developers for the implementation of aerial firefighting activities.

Keywords: lowland forest fire; aerial forest protection; firefighting; fire landing; transport routing

For citation: Ermakov S.A., Dmitriev A.A., Postanogova P.F., Tolstikov D.O. Application of Clarke and Wright algorithm in the tasks of forest fire suppression by aviation forest air protection. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):71-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.71-78 (rus).

✉ Stanislav Aleksandrovich Ermakov, e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

Введение

Среди множества задач в экстремальных условиях, к которым относят локализацию лесного низового пожара, одной из основных является нахождение кратчайшего пути авиалесоохраны. В литературе [1–4] анализируются некоторые подходы. Так, исходя из модели Парлара – Виксона делают вывод, что необходимо максимально быстро нарастить противопожарные силы и средства и в кратчайшие сроки их вывести [5].

Целью данного исследования приемем определение минимальных затрат на путь до очагов низового лесного пожара и на его локализацию.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать выбранный метод Кларка – Райта для расчета минимальных затрат на процессы выгрузки пожарного десанта и локализации низового лесного пожара соответственно;
- идентифицировать и охарактеризовать необходимое оборудование, используемое при локализации низового лесного пожара;
- с помощью псевдокода определить оптимальный путь и количество сотрудников МЧС в составе пожарного десанта.

Аналитическая часть

Статистика реальной практики пожаротушения, в частности локализации пожаров, показывает, что доставка десанта авиалесоохраны в места пожара часто экономически не обоснована и от этого способ отказываются в пользу сброса воды. Однако этот способ не так эффективен в локализации низовых лесных пожаров. Поэтому следует рассмотреть программу по минимизации расходов на привлечение пожарного десанта [6, 7].

Для обеспечения оперативной ликвидации лесного пожара в районах применения наземных сил и средств пожаротушения силами группы (до 10 человек) с пожарной техникой и оборудованием подразделение лесопожарной организации обязано прибыть на место лесного пожара и приступить к его тушению в лесах.

При локализации низового лесного пожара применяется следующая техника и оборудование: пожарный модуль, топор-мотыга, ранцевый лесной огнетушитель [8].

Чтобы обеспечить организацию оптимального режима работы и отдыха работников, участвующих в тушении лесных пожаров, а также составление последующей схемы тушения, предлагается приведенная ниже постановка задачи.

Вертолет Ми-8МТВ-1 с максимальной вместимостью 24 пассажира доставляет пожарные десанты МЧС в места низовых лесных пожаров. Максимально возможная дальность полета вертолета 590 км. Обычно требуется построить такой маршрут доставки сотрудников МЧС до места локализации низового лесного пожара, чтобы время наращивания противопожарных сил и средств (в первую очередь, пожарного десанта) было минимальным. Известно необходимое расположение подразделений лесопожарных организаций, указаны секторы и участки низового лесного пожара.

Рассмотрим некоторые методы и алгоритмы по определению кратчайших путей, в том числе в области кольцевой маршрутизации.

Алгоритм Флойда – Уоршелла подразумевает нахождение наименьших путей в графе с ребрами, имеющими вес, отличный от нуля, тогда как циклы не могут быть меньше нуля. После исполнения алгоритма определяются суммарные веса наименьших путей от одной вершины к другой. Используя несложные модификации алгоритма, получится преобразовать пути.

Алгоритм Дейкстры — это алгоритм поиска кратчайших путей от начальной вершины графа до остальных. Применяется строго только для графов с отсутствием ребер, имеющих вес меньше нуля.

Ранее был произведен ряд исследований в области кольцевой маршрутизации. Так, Т.Д. Гаскелл в 1967 г. ввел параметр формы маршрута. В своей работе Х. Паесенс в 1988 г. учел асимметрию по расстоянию от склада до каждого из двух слитых клиентов. Б. Голден в 1998 г. осуществил применение генетического алгоритма. Д. Пеппер в 2002 г. использовал метод отжига [9]. Б. Чандран в 2003 г. при-

менил генетический алгоритм в одноэтапной процедуре настройки параметров [10]. Вывод работы 2005 г. Л.К. Алтинела и Т. Онкана состоял в том, что больший комбинированный маршрут является лучшим [11].

Анализ факторов, влияющих на пожаробезопасность объекта, в том числе и на территории лесного массива, был проведен в работе [12].

Примерами моделей расчета корреспонденций могут служить гравитационная модель, энтропийная (Вильсона), а также модель семейства конкурирующих центров и промежуточных возможностей Стауффера.

Суть гравитационной модели состоит в следующем утверждении: корреспонденция из района i в район j пропорциональна общему объему отправления из центра i , общему объему прибытия из центра j и некоторой функции $C(t_{ij})$, зависящей от транспортного расстояния t_{ij} между центрами i и j . Благодаря параметрам учета скорости и удобства передвижений, созданных транспортной сетью, можно дать количественную оценку степени близости районов. В зависимости от вариаций моделей метод расчета этой характеристики будет отличаться.

Энтропийная модель описывает поведение пользователей сети. Пользователи случайным образом подразделяются по набору некоторых состояний. При расчете корреспонденций состоянием пользователя можно считать принадлежность его к корреспонденции из i в j . Состояние системы напрямую зависит от случайного и независимого выбора пользователями своих состояний. Основываясь на утверждении системного состояния энтропийной модели, можно сказать, что оно является состоянием с наивысшим показателем статистического веса.

Модели конкурирующих центров рассматриваются в виде гравитационной модели, которая включает в свою формулировку дополнительные факторы, такие как индекс посещаемости района прибытия. В структуре корреляции введение дополнительного фактора позволит произвести моделирование агломерационного эффекта в модели.

Модель Стауффера основана на утверждении, что объем корреспонденции на расстоянии от одного центра до другого определяется не только лишь расстоянием, а в большинстве случаев количеством посещений с альтернативной возможностью.

Описанные выше модели для расчетов оптимального пути не могут быть применены, так как обладают недостаточным учетом факторов. За основу исследования может быть взята модель распределения потоков [13] и их построения.

Метод последовательных приближений Франка – Вульфа — это итеративный алгоритм оптимизации первого порядка для выпуклой оптими-

зации с ограничениями. На каждом шаге алгоритм Франка – Вульфа рассматривает линейное приближение целевой функции и движется в направлении минимизации этой линейной функции (на том же множестве допустимых решений).

Расширенные модели равновесного распределения и оптимальных стратегий также относятся к моделям распределения потоков.

К моделям динамики транспортного потока относят макроскопические, кинетические и микроскопические модели. Примером микроскопических моделей может быть модель оптимальной скорости или модель Трайбера.

Макроскопическими являются модели, описывающие передвижение транспортных авиационных средств (летательных аппаратов) в скалярных или векторных физических величинах, таких как плотность, средняя скорость и т.п. При использовании данного подхода поток транспорта приравнивается к течению жидкости, из чего следует, что модель данного класса можно назвать гидродинамической [13].

Микроскопическими являются модели, моделирующие передвижение каждого летательного аппарата (ЛА) [13]. Такая комбинация в теории может помочь в достижении верного описания передвижения ЛА, сравнительно с описанием макроскопической модели. Не стоит забывать, что представленный подход на практике нуждается в значительных вычислительных ресурсах.

Кинетический подход заключается в полном распределении ЛА среди фазового пространства. Уравнение кинетики описывает динамику фазовой плотности. В его основе лежит усредненное представление взаимодействий эффектов. Кинетический подход по своему содержанию схож с моделью микроуровня. Теоретическое значение кинетических моделей состоит в том, что на их основе можно систематически выводить макроскопические модели [13].

Время прибытия к месту лесного пожара устанавливается на основе методических рекомендаций по применению сил и средств для тушения лесных пожаров¹.

Метод Кларка – Райта — это эвристический метод для решения задач по маршрутизации перевозок. Он основан на понятии «сбережения», которое представляет снижение общей стоимости, получаемое при объединении маршрутов [14]. Принцип метода Кларка – Райта заключается в последовательном преобразовании мелких маршрутов в более крупные, до момента достижения минимальных значений характеристик маршрутов и выполнения различных ограничений. В дальнейшем предлагается

¹ Методические рекомендации по применению сил и средств для тушения лесных пожаров : Методические рекомендации МЧС России от 16.07.2014. № 2-4-87-9-18.

улучшение алгоритма. Помимо работ таких авторов, как Т.Д. Гаскелл, Х. Паесенс, Б. Голден, Д. Пеппер, Б. Чандрян, Л.К. Алтинел и Т. Онкан, в которых учитывается уточнение формулы выигрыша и последующая настройка независимых параметров, метод Кларка – Райта усовершенствовался алгоритмами Флойда – Уоршелла и Дейкстры [15].

Последние опубликованные модификации алгоритма строятся на возможности варьирования глубины срачивания маршрутов [16, 17], на основе изменения значений вероятности осуществления ухудшающего шага [18], на основе объединения маршрутов при нулевом выигрыше с применением эвристики, в которой любое не проигрышное объединение выгодно [19], а также на обмене ребер между маршрутами — улучшении нескольких маршрутов [20].

Описание метода Кларка – Райта в виде алгоритма достаточно часто встречается в работах, например [3, 14, 19, 20], в данном исследовании предлагается решение исходной задачи на основе следующего псевдокода.

1 **ФУНКЦИЯ** Метод Кларка – Райта

2 **ПАРАМЕТРЫ**

3 Г_Р: массив расстояний между точками

4 Г_Т: массив данных, сколько человек из пожарного десанта нужно на каждую точку

5 С: максимальная вместимость вертолета

6 Н: количество точек

7 **ПЕРЕМЕННЫЕ**

8 М_Выигр: массив выигрышей от объединения двух маршрутов

9 М_Марш_Точ: массив распределения точек очагов лесного низового пожара по маршрутам

10 М_Марш_С: массив количества человек пожарного десанта на каждом маршруте

11 М_Марш_Кол: массив количества точек очагов лесного низового пожара в каждом маршруте

12 М_Марш: массив, хранящий сами маршруты

13 М_Сост_Точ: массив состояний точек (1 – конечная точка или 0 – точка заблокирована)

14 М_Очер: массив очереди пар точек для попыток объединения маршрутов

15 **НАЧАЛО ФУНКЦИИ**

16 #построение таблицы выигрышей

17 **ЦИКЛ** по I1 от 1 до Н

18 **ЦИКЛ** по I2 от I1 до Н

19 **ЕСЛИ** (I1 != I2)

20 М_Выигр[I1][I2] := Г_Р[0][I1] + Г_Р[0][I2] - Г_Р[I1][I2]

21 **ИНАЧЕ**

22 М_Выигр[I1][I2] := 0

23 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

24 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

25 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

26 #инициализация массива маршрутов

27 **ЦИКЛ** по I1 от 1 до Н

28 М_Марш_Точ[I1] := I1

29 М_Сост_Точ[I1] := 1

30 М_Марш_С[I1] := Г_Т[I1]

31 М_Марш_Кол[I1] := 1

32 М_Марш[I1] := I1

33 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

34 #создание очереди пар точек для объединения

35 **ЦИКЛ** по I1 от 1 до Н

36 **ЦИКЛ** по I2 от I1 до Н

37 Добавление в М_Очер **НОВЫЙ** элемент (I1, I2, М_Выигр[I1, I2]))

38 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

39 **КОНЕЦ ЦИКЛА**

40 Сортировка элементов М_Очер по убыванию 3 части каждого элемента

41 #Обработка всех пар точек

42 **ЦИКЛ** по Элем из И_Очер

43 #Проверка на ненулевой выигрыш

44 **ЕСЛИ** Элем[3] <= 0

45 Выйти из цикла

46 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

47 #Проверка пары на возможность объединения маршрутов

48 #Обе точки являются конечными

49 **ЕСЛИ** М_Сост_Точ[Элем[1]] = 0

ИЛИ М_Сост_Точ[Элем[2]] = 0

50 Перейти к следующей итерации цикла

51 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

52 #Ввод вспомогательных локальных переменных

53 Марш_Т1 := М_Марш_Точ[Элем[1]]

54 Марш_Т2 := М_Марш_Точ[Элем[2]]

55 #Точки принадлежат разным маршрутам

56 **ЕСЛИ** Марш_Т1 = Марш_Т2

57 Перейти к следующей итерации цикла

58 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

59 #Проверка на вместимость вертолета (ограничение С)

60 **ЕСЛИ** М_Марш_С[Марш_Т1] + М_Марш_С[Марш_Т2] > С

61 Перейти к следующей итерации цикла

62 **КОНЕЦ ЕСЛИ**

63 #Объединение маршрута

64 М_Марш_С[Марш_Т1] := М_Марш_С[Марш_Т1] + М_Марш_С[Марш_Т2]

65 М_Марш_С[Марш_Т2] := 0

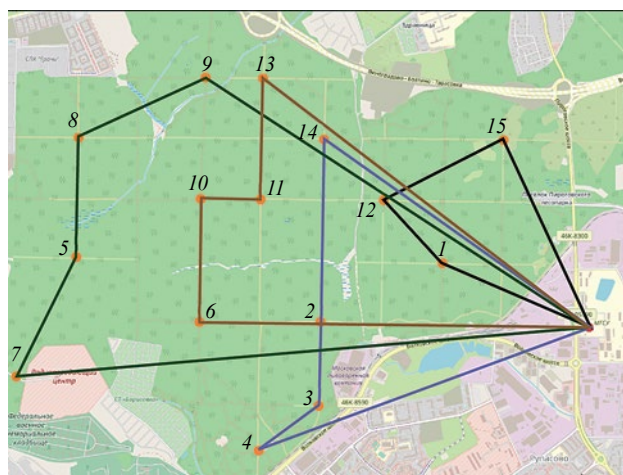
66 М_Марш[Марш_Т1] := М_Марш[Марш_Т1] Объединить с М_Марш[Марш_Т2]

67 Очистить М_Марш[Марш_Т2]

68 **ЕСЛИ** М_Марш_Кол[Марш_Т1] > 1

69 М_Сост_Точ[Элем[1]] := 0

70 **КОНЕЦ ЕСЛИ**



Пример решения задачи тушения лесных пожаров силами авиационной охраны

An example of a solution to the problem of extinguishing forest fires by aviation forest air protection

```

71  ЕСЛИ М_Марш_Кол[Марш_Т2] > 1
72      М_Сост_Точ[Элем[2]]:=0
73  КОНЕЦ ЕСЛИ
74  М_Марш_Кол[Марш_Т1]:= М_Марш_
    Кол[Марш_Т1] + М_Марш_Кол[Марш_Т2]
75  М_Марш_Кол[Марш_Т2]:=0
76  ЦИКЛ по И от 1 до Н
77      ЕСЛИ М_Марш_Точ[И] = Марш_Т2
78          М_Марш_Точ[И] := Марш_Т1
79  КОНЕЦ ЕСЛИ
80  КОНЕЦ ЦИКЛА
81  КОНЕЦ ЦИКЛА
82  Вывод М_Марш
83  Вывод М_Марш_С
84  Подсчет и вывод длины маршрутов на основе
    Г_Р и М_Марш
85  КОНЕЦ ФУНКЦИИ

```

Условное расположение подразделений лесопожарных организаций на территории Мытищин-

ского филиала МГСУ отмечено красным кружком (рисунок), указаны секторы и участки низового лесного пожара (оранжевые кружки, пронумерованные от 1 до 15), на каждый из которых необходим пожарный десант количеством 6 человек. Оптимальные кольцевые маршруты, рассчитанные в программе на языке C#, изображены ломаными линиями разных цветов (4 маршрута).

Выводы

Выполнен обзор моделей задачи маршрутизации транспорта и методов их решения. Поставлена некоторая задача тушения лесных пожаров, развитие которых смоделировано в работе [5]. С помощью модифицированного алгоритма Кларка – Райта, который учитывает возможность варьирования глубины срачивания маршрутов и изменения значений вероятности осуществления ухудшающего шага, эффективность чего подтверждена в исследованиях [16, 18], и включает дальнейшее определение рационального значения такой вероятности, можно найти оптимальный путь и количество сотрудников МЧС в пожарном десанте. Для реализации базового метода Кларка – Райта предложен псевдокод, который был реализован в программном коде на C#. Решение на основе модифицированного алгоритма предложит кольцевые авиамаршруты, которые будут закреплены за летательным аппаратом, благодаря чему доставка пожарного десанта станет экономически обоснованной.

Данное исследование рассматривает поиск оптимального по времени пути перемещения сотрудников МЧС при тушении низовых лесных пожаров, что будет полезно аналитикам и разработчикам программного обеспечения для осуществления деятельности авиалесоохраны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Beresneva E., Avdoshin S. Analysis of mathematical formulations of capacitated vehicle routing problem and methods for their solution // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2018. Vol. 30. Issue 3. Pp. 233–250. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-17
2. Vega-Mejia C.A., Neira E.M.G., Montoya-Torres J.R., Islam S.M.N. Using a hybrid heuristic to solve the balanced vehicle routing problem with loading constraints // International Journal of Industrial Engineering Computations. 2020. Vol. 11. Issue 2. Pp. 255–280. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.8.002
3. Achamu G., Berhan E. A classical heuristic algorithm implementation for logistic analysis of waste collection problem: a case of Addis Ababa Arada subicthy // Journal of EEA. 2021. Vol. 39. Pp. 97–113.
4. Kosasih W., Ahmad A., Laricha Salomon L., Febricky. Comparison study between nearest neighbor and farthest insert algorithms for solving VRP model using heuristic method approach // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 852. Issue 1. P. 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/852/1/012090
5. Коляда А.В. Оптимизация процессов тушения лесного пожара с использованием имитационного моделирования // Ученые записки российского государственного социального университета. 2010. № 8. С. 89–94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17066620>
6. Таранцев А.А., Чикитов Ю.И. Модель применения беспилотных летательных аппаратов в целях тушения крупных лесных пожаров

- в зоне применения наземных сил и средств // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. № 2. С. 21–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26183977>
7. Бородин В.А., Кузовлев А.В., Харитонов А.А. Тактика тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 1 (8). С. 83–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576096>
 8. Алаторцев А.С. Совершенствование организации тушения лесных пожаров в Самарской области : магистерская дис. Тольятти, 2017. 113 с.
 9. Pepper J., Golden B., Wasil E. Solving the traveling salesman problem with annealing-based heuristics: A computational study // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Hum. 2002. Vol. 32. Issue 1. Pp. 72–77. DOI: 10.1109/3468.995530
 10. Chandran B., Golden B., Wasil E. A computational study of three demon algorithm variants for solving the traveling salesman problem // Computational Modeling and Problem Solving in the Networked World. H.K. Barghava, N. Ye (eds). Boston : Kluwer Academic Publisher, MA, 2003. Pp. 155–175. DOI: 10.1007/978-1-4615-1043-7_8
 11. Altinel I.K., Öncan T. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem // Journal of the Operational Research Society. 2005. Vol. 56. Issue 8. Pp. 954–961. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601916
 12. Черепанов Д.А., Ермаков А.С. Экспертная оценка пожарного риска для кемпинга с применением матрицы последствий и вероятностей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 2. С. 62–71. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.62-71
 13. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. Вып. 11. С. 3–46. URL: https://www.mathnet.ru/php/getFT.html?jrnid=at&paperid=1966&what=fullt&option_lang=rus
 14. Kristina S., Jason. Minimize transportation cost with Clark and Wright algorithm saving heuristic method with considering traffic congestion factor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 673. Issue 1. P. 012080. DOI: 10.1088/1757-899X/673/1/012080
 15. Никоноров В.М. Усовершенствование метода Кларка – Райта для решения задачи маршрутизации автомобильных мелкопартионных перевозок // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 1. С. 295–298.
 16. Бронштейн Е.М., Зелев П.А. Об оптимальной доставке грузов транспортным средством с учетом стоимости перевозки от загрузки транспортного средства по нескольким циклическим маршрутам // Информатика и ее применения. 2014. Т. 8. № 4. С. 53–57. DOI: 10.14357/19922264140407 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22846465>
 17. Бронштейн Е.М., Зелев П.А. Задача маршрутизации транспортного средства с учетом зависимости стоимости перевозок от загрузки // Информационные технологии. 2014. № 4. С. 33–37.
 18. Зелев П.А., Бронштейн Е.М. Исследование эффективности модификаций алгоритма Кларка – Райта при решении задач доставки грузов // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решения : тр. IV Междунар. конф. Уфа, 2016. С. 94–97.
 19. Коробова Л.А., Зеленова Е.Е. Модификация алгоритма Кларка – Райта для оптимизации работы городской транспортной компании : мат. LV отчет. науч. конф. преподавателей и науч. сотрудников ВГУИТ за 2016 г. : в 3 ч. Ч. 2. / под ред. С.Т. Антипова. Воронеж : ВГУИТ, 2017. С. 111–114.
 20. Арташес С. Исследование некоторых классических алгоритмов задачи маршрутизации транспорта // World Science. 2019. Vol. 1. Issue 3 (43). Pp. 10–14. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/31032019/6398

REFERENCES

1. Beresneva E., Avdoshin S. Analysis of mathematical formulations of capacitated vehicle routing problem and methods for their solution. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2018; 30(3):233-250. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-17
2. Vega-Mejia C.A., Neira E.M.G., Montoya-Torres J.R., Islam S.M.N. Using a hybrid heuristic to solve the balanced vehicle routing problem with loading constraints. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2020; 11(2):255-280. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.8.002
3. Achamu G., Berhan E. A classical heuristic algorithm implementation for logistic analysis of waste collection problem: a case of Addis Ababa Arada subcity. *Journal of EEA*. 2021; 39:97-113.
4. Kosasih W., Ahmad A., Laricha Salomon L., Febricky. Comparison study between nearest neighbor and farthest insert algorithms for solving VRP model using heuristic method approach. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 852(1):012090. DOI: 10.1088/1757-899X/852/1/012090
5. Kolyada A.V. Optimization of forest fire extinguishing processes using simulation modeling. *Scientific Notes of the Russian State Social University*. 2010; 8:89-94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17066620> (rus).
6. Tarantsev A.A., Chekistov Yu.I. Model of the unmanned aerial vehicles applying in purpose of forest

- firefighting in ground forces zone. *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2016; 2:21-27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26183977> (rus).
7. Borodin V.A., Kuzovlev A.V., Kharitonov A.A. Forest fire extinguishing tactics. *Fire safety: problems and prospects*. 2018; 1(8):83-85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36576096> (rus).
 8. Alatorsev A.S. *Improving the organization of extinguishing forest fires in the Samara region : master's thesis in specialty*. Togliatti, 2017; 113. (rus).
 9. Pepper J., Golden B., Wasil E. Solving the traveling salesman problem with annealing-based heuristics: A computational study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Hum.* 2002; 32(1):72-77. DOI: 10.1109/3468.995530
 10. Chandran B., Golden B., Wasil E. A computational study of three demon algorithm variants for solving the traveling salesman problem. *Computational Modelling and Problem Solving in the Networked World: Interfaces in Computer Science and Operations Research. Operations Research*. H.K. Barghava, N. Ye (eds). Boston, Kluwer Academic Publisher, MA, 2003; 155-175. DOI: 10.1007/978-1-4615-1043-7_8
 11. Altinel I.K., Öncan T. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*. 2005; 56(8):954-961. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601916
 12. Cherepanov D.A., Ermakov A.S. Expert fire risk assessment camping with the use of a matrix of consequences and probability. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(2):62-71. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.62-71 (rus).
 13. Shvetsov V.I. Mathematical modeling of traffic flows. *Automation and Remote Control*. 2003; 11: 3-46. URL: [https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?](https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=at&paperid=1966&what=fullt&option_lang=rus)
 14. Kristina S., Jason. Minimize transportation cost with Clark and Wright algorithm saving heuristic method with considering traffic congestion factor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 673(1):012080. DOI: 10.1088/1757-899X/673/1/012080
 15. Nikonorov V.M. Improvement of the Clark and Wright method for solving routing problems of small-party automobile transportation. *Scientific and Technical bulletin of SPbSTU*. 2012; 1:295-298. (rus).
 16. Bronstein E.M., Zelev P.A. About optimum delivery of freights by the vehicle taking into account dependence of cost of transportations on loading of vehicles on several cyclic routes. *Informatics and Applications*. 2014; 8(4):53-57. DOI: 10.14357/19922264140407 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22846465> (rus).
 17. Bronstein E.M., Zelov P.A. The vehicle routing problem with the transportation cost dependence of vehicle loading. *Information Technologies*. 2014; 4:33-37. (rus).
 18. Zelev P.A., Bronstein E.M. *Investigation of the effectiveness of modifications of the Clark-Wright algorithm in solving cargo delivery problems : Proceedings of the fourth international conference "Information technologies of intellectual decision support"*. Ufa, 2016; 94-97. (rus).
 19. Korobova L.A., Zelenova E.E. *Modification of the Clark and Wright algorithm for optimizing the work of a city transport company : Materials of the LV reporting scientific conference of VSUIT teachers and researchers for 2016 : in 3 p. Part 2*. S.T. Antipov (Ed.). Voronezh, VSUIT, 2017; 111-114. (rus).
 20. Artashes S. Investigation of some classical algorithms of the transport routing problem. *World Science*. 2019; 1(3):10-14. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/31032019/6398 (rus).

Поступила 28.01.2023, после доработки 08.02.2023;
принята к публикации 10.03.2023

Received January 28, 2023; Received in revised form February 8, 2023;

Accepted March 10, 2023

Информация об авторах

ЕРМАКОВ Станислав Александрович, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 638451; Scopus Author ID: 56073793500; ORCID: 0000-0002-9158-8801; e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

ДМИТРИЕВ Артем Андреевич, студент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0002-8293-678X; e-mail: 89020821214@mail.ru

Information about the authors

Stanislav A. ERMAKOV, Senior Lecturer of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 638451; Scopus Author ID: 56073793500; ORCID: 0000-0002-9158-8801; e-mail: ErmakovSA@mgsu.ru

Artem A. DMITRIEV, Student of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8293-678X; e-mail: 89020821214@mail.ru

ПОСТАНОГОВА Полина Федоровна, студент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0003-1465-3005; e-mail: sud00@mail.ru

ТОЛСТИКОВ Дмитрий Олегович, студент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4; ORCID: 0000-0003-3916-8452; e-mail: dimastarcraft2014@gmail.com

Вклад авторов:

Ермаков С.А. — научное руководство, написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Дмитриев А.А. — написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Постаногова П.Ф. — написание исходного текста, доработка текста.

Толстик Д.О. — разработка псевдокода, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Polina F. POSTANOGOVA, Student of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1465-3005; e-mail: sud00@mail.ru

Dmitriy O. TOLSTIKOV, Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Shosse, 4, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3916-8452; e-mail: dimastarcraft2014@gmail.com

Contribution of the authors:

Stanislav A. Ermakov — scientific guidance, writing the source text, revision of the text, final conclusions.

Artem A. Dmitriev — writing the source text, revision of the text, final conclusions.

Polina F. Postanogova — writing the source text, revision of the text.

Dmitriy O. Tolstikov — pseudocode development, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interest.