

Научная статья
УДК 656.078.11
doi:10.52170/1815-9265_2026_79_13

Оптимизация маршрутов топливозаправщиков методом Кларка – Райта при эксплуатации путевых машин

Артур Андреевич Оленберг¹, Виктор Иванович Кочергин^{2✉}, Марк Евгеньевич Корягин³

^{1, 2, 3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ snipe54@yandex.ru

² vkplus2011@yandex.ru✉

³ math@stu.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача оптимизации маршрутов доставки топливно-смазочных материалов специальному подвижному составу железных дорог с использованием метода Кларка – Райта. Актуальность исследования определяется необходимостью решения проблемы совмещения подвижных средств обслуживания (топливозаправщиков) с местами обслуживания (топливными базами) при минимизации логистических издержек.

На основе реальных данных участка Западно-Сибирской железной дороги построена матрица кратчайших расстояний между пятью станциями по автомобильным дорогам. Применен классический алгоритм Кларка – Райта (Clark – Wright Savings Algorithm), как один из наиболее эффективных методов для решения задачи маршрутизации транспорта с ограничениями вместимости. Алгоритм реализован на Python с пошаговой визуализацией процесса объединения маршрутов.

Метод Кларка – Райта позволил сократить количество топливозаправщиков с пяти (при индивидуальной доставке каждому клиенту) до двух, при общей протяженности маршрутов 86,9 км. Экономия количества транспортных средств составила 60 %, что приводит к значительному сокращению операционных расходов на содержание автопарка, оплату труда водителей и топливо.

Научная новизна работы состоит в применении классического алгоритма Кларка – Райта к специфической задаче оптимизации топливоснабжения специального подвижного состава железных дорог с подробной пошаговой реализацией и анализом результатов. Полученные результаты демонстрируют практическую эффективность метода и его применимость для железнодорожного транспорта. Предложенный подход может быть распространен на другие участки сети и модифицирован для учета динамических ограничений (временные окна, переменные объемы спроса).

Ключевые слова: оптимизация маршрутов, метод Кларка – Райта, Vehicle Routing Problem, топливозаправщики, железнодорожный транспорт, логистика, экономия ресурсов

Для цитирования: Оленберг А. А., Кочергин В. И., Корягин М. Е. Оптимизация маршрутов топливозаправщиков методом Кларка – Райта при эксплуатации путевых машин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 2 (79). С. 13–22. DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_13.

Original article

Route optimization for fuel delivery to railway transport using the Clarke – Wright method

Artur A. Olenberg¹, Viktor I. Kochergin^{2✉}, Mark E. Koryagin³

^{1, 2, 3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ snipe54@yandex.ru

² vkplus2011@yandex.ru✉

³ math@stu.ru

Abstract. This paper addresses the optimization of fuel and lubricating materials (FSM) delivery routes to special rolling stock on railways using the Clarke-Wright algorithm. The relevance of the study is determined by the need to solve the problem of combining mobile service vehicles (fuel tankers) with service locations (fuel depots) while minimizing logistics costs.

Based on real data from the West Siberian Railway section, a shortest distance matrix between five stations along road networks was constructed. The classical Clarke-Wright Savings Algorithm was applied – one of the most effective methods for solving vehicle routing problems with capacity constraints. The algorithm was implemented in Python with step-by-step visualization of the route merging process.

The Clarke-Wright method reduced the number of fuel tankers from five (individual delivery to each client) to two, with a total route length of 86,9 km. The savings in transport vehicles was 60 %, resulting in significant reductions in operating expenses for fleet maintenance, driver wages, and fuel consumption.

The scientific novelty of the work lies in applying the classical Clarke-Wright algorithm to the specific task of optimizing fuel supply to special rolling stock on railways with detailed step-by-step implementation and result analysis. The obtained results demonstrate the practical effectiveness of the method and its applicability to railway transport. The proposed approach can be extended to other network sections and modified to account for dynamic constraints (time windows, variable demand volumes).

Keywords: route optimization, Clarke – Wright algorithm, Vehicle Routing Problem, fuel tankers, railway transport, logistics, resource savings

For citation: Olenberg A. A., Kochergin V. I. Koryagin M. E. Route optimization for fuel delivery to railway transport using the Clarke – Wright method. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(79):13–22. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_79_13.

Введение

Обеспечение топливно-смазочными материалами (ТСМ) специального подвижного состава железных дорог является критической логистической задачей, от решения которой зависит эффективность работы всей транспортной системы [1]. Специальный подвижной состав требует регулярного пополнения запасов топлива на протяжении всего цикла эксплуатации. Традиционные подходы к организации топливоснабжения часто базируются на эмпирических решениях, не учитывающих оптимальное расположение топливозаправочных станций и рациональные маршруты доставки топливных ресурсов [2].

Проблема совмещения подвижных средств обслуживания (топливозаправщиков) с местами обслуживания (распределенными по сети железной дороги топливными базами) требует применения современных методов математической оптимизации. Неправильное решение этой задачи приводит к нерациональному использованию специализированного подвижного состава, увеличению транспортных и эксплуатационных расходов, а также снижению общей эффективности организации топливоснабжения железнодорожной инфраструктуры [3, 4].

Поставка топливно-смазочных материалов для железнодорожной инфраструктуры, как правило, осуществляется поставщиками по контрактам, предусматривающим доставку топлива непосредственно до линейных объектов эксплуатации. В стоимость таких поставок включаются расходы на транспортировку, экспедиционное обслуживание, использование подвижного состава и выполнение погрузочно-разгрузочных работ. В этих условиях эффективность организации маршрутов доставки становится важным фактором конкурентоспособности поставщиков топлива и может существенно влиять на итоговую стоимость логистических операций.

Методы исследования

Задача маршрутизации транспорта (Vehicle Routing Problem, VRP) была впервые сформулирована в 1959 г. при исследовании оптимизации доставки бензина к автозаправочным станциям [5]. С тех пор эта задача стала одной из центральных в исследовании логистических операций. Классические точные методы (линейное программирование, метод ветвей и границ) требуют экспоненциального времени вычислений при увеличении числа клиентов, что делает их непрактичными для реальных систем. Однако для средних размеров задач (от 50 до 100 клиентов) эти методы дают опорные точки для оценки качества эвристических решений [6, 7].

В 1964 г. был предложен эффективный алгоритм для решения задачи маршрутизации с ограничениями вместимости (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP), получивший название метода Кларка – Райта [8, 9]. Алгоритм основан на концепции экономии – сокращении расстояний путем объединения отдельных маршрутов. Основная идея предложенного метода заключается в замене отправки отдельного транспортного средства каждому клиенту объединением нескольких клиентов в один маршрут для экономии пройденного расстояния. Экономия для каждой пары клиентов (i, j) может быть рассчитана по следующей формуле:

$$S(i, j) = d(0, i) + d(0, j) - d(i, j), \quad (1)$$

где $d(0, i)$ – расстояние от депо до клиента i ; $d(0, j)$ – расстояние от депо до клиента j ; $d(i, j)$ – расстояние между клиентами i и j .

Алгоритм Кларка – Райта итеративно объединяет маршруты в порядке убывания экономии при условии соблюдения ограничений вместимости и отличается простотой реализации, хорошим качеством достигаемых решений и легкостью адаптации к различным ограничениям [8–11]. Многочисленные исследования

показали эффективность данного метода на практике как для стандартных задач транспортной логистики [12], так и для гибридных подходов, сочетающих этот алгоритм с локальной оптимизацией [13, 14]. Особый интерес представляют примеры его использования в контексте доставки специализированных грузов, включая топливо, где достигается сокращение маршрутов на 15...25 % [15, 16].

Решение специализированных задач маршрутизации с ограничениями вместимости CVRP может происходить по нескольким направлениям, в том числе для грузов с дополнительными ограничениями по совместимости: VRP с временными окнами (VRPTW), где каждый клиент доступен в определенный интервал времени; многоуровневая задача VRP (MDVRP) для нескольких складов (баз); VRP с разделением доставки (SDVRP), когда один клиент может быть обслужен несколькими транспортными средствами. Полный обзор разновидностей VRP-задач представлен в работе [17]. Применительно к транспортной логистике на примере топливного снабжения в последние годы VRP активно применяется к оптимизации доставки топлива на автозаправочные станции, в аэропорты, на военные базы [18, 19]. Опыт применения имитационного моделирования на основе алгоритма Кларка – Райта для оптимизации логистики заправки транспорта показывает, что использование VRP в области доставки топлива позволяет сэкономить до 16 % от базовых расходов [20, 21].

Несмотря на широкое использование VRP в различных областях логистики, некоторые аспекты его применения остаются не вполне изученными. Во-первых, недостаточно исследована в настоящее время специфика железнодорожного транспорта с расположением цепочки станций вдоль линии [2, 3]. Во-вторых, не в полной мере разработаны вопросы интеграции с существующими геоинформационными системами и реальными дорожными сетями [22]. Кроме того, в большинстве известных работ в этой области знаний представляют только финальные результаты, без пошаговой демонстрации алгоритма и сравнения полученных результатов со статистикой реальных операций.

Цель данного исследования заключается в демонстрации эффективности метода Кларка – Райта при решении задачи оптимизации

маршрутов доставки топливно-смазочных материалов на склады ТСМ линейных предприятий железных дорог либо при необходимости непосредственно к местам заправки топливом специального железнодорожного подвижного состава. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: построить пример матрицы кратчайших расстояний между станциями на основе реальной дорожной сети и фактических расстояний по автомобильным дорогам; сформулировать задачу как CVRP с ограничениями вместимости топливозаправщиков; реализовать алгоритм Кларка – Райта с пошаговой визуализацией каждого этапа объединения маршрутов и провести анализ сходимости алгоритма и качества полученного решения; сравнить результаты оптимизации (количество маршрутов, общее расстояние) со сценарием «каждый клиент отдельно» и оценить экономический эффект и практическую применимость алгоритма для железнодорожного транспорта.

Результаты исследования

Исследование проведено на примере участка полигона Западно-Сибирской железной дороги. На основе использования сервиса «Яндекс Карты» [23] были определены кратчайшие расстояния по автомобильным дорогам между станциями (рисунок). Для демонстрации работы метода был рассмотрен условный пример, включающий пять пунктов: одну нефтебазу, выступающую в роли базы отправления, и четыре железнодорожные станции, на которых расположены склады ТСМ, требующие регулярного пополнения запасов топлива.

Входными данными для расчета являются:

- количество станций (включая базовую) $n = 5$, из которых станция 0 – база/склад, станции 1...4 – потребители;
- вместимость каждого топливозаправщика в условных единицах топлива $Q = 2$;
- спрос каждого потребителя равен одной условной единице (равномерный спрос);
- реальные дорожные расстояния в км по автомобильным дорогам на основе данных сервиса «Яндекс Карты» [23], матрица расстояний представлена в табл. 1.

Транспортная задача в данном случае формализуется как задача маршрутизации с ограничениями вместимости (CVRP) [8, 9]. В качестве исходных данных выступают: граф $G = (V, E)$,

Сложность оценивается выражением $O(n^2 \log n)$, причем для вычисления экономии $+ O(n^2)$, а для объединения маршрутов $= O(n^2)$.

К преимуществам применения данного алгоритма относятся: простая реализация; хорошее качество решений на практике (обычно 10...15 % от оптимума); легкая адаптация к дополнительным ограничениям. Недостатками являются: отсутствие гарантии достижения оптимального решения; зависимость результатов от порядка обработки пар и возможная потребность в дальнейшей локальной оптимизации (2-opt, 3-opt).

Алгоритм реализован на языке программирования Python 3.8+ с использованием стандартных библиотек. Код включает пошаговый вывод каждого решения, позволяющий отследить процесс объединения маршрутов. На первом этапе по формуле (1) и представленной в табл. 1 матрице вычислена экономия для всех пар клиентов. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Наибольшая полученная экономия (125,6 км) достигается при объединении клиентов 3 и 4. Это объясняется тем, что они находятся близко друг к другу (расстояние 24,1 км) и на значительном удалении от депо. Исходное состояние – каждый клиент обслуживается отдельным маршрутом. Вначале рассчитываем каждого клиента «отдельно», т. е. идем от базы до клиента напрямую, каждый раз начиная с одной точки и возвращаясь в нее обратно с загрузкой 1. Поскольку один кли-

ент у нас соответствует одной загрузке, вместимость принимаем равной двум. В этом случае мы просто условно «ходим» до клиента и обратно, без оптимизации методом Кларка – Райта.

Маршрут 1: $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$; расстояние = $15,3 + 15,3 = 30,6$ км; загрузка = 1.

Маршрут 2: $0 \rightarrow 2 \rightarrow 0$; расстояние = $25,8 + 25,8 = 51,6$ км; загрузка = 1.

Маршрут 3: $0 \rightarrow 3 \rightarrow 0$; расстояние = $62,8 + 62,8 = 125,6$ км; загрузка = 1.

Маршрут 4: $0 \rightarrow 4 \rightarrow 0$; расстояние = $86,9 + 86,9 = 173,8$ км; загрузка = 1.

Используя полученные данные, считаем общую сумму маршрута для каждого клиента отдельно.

Общее расстояние составит: $30,6 + 51,6 + 125,6 + 173,8 = 381,6$ км.

При рассмотрении пары (3, 4) определяем, что клиенты находятся на разных маршрутах, являются их концами, а суммарная загрузка составляет $2 \leq Q$, это позволяет объединить маршруты в $\{0 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0\}$. Для пар (2, 3) и (2, 4) объединение невозможно вследствие превышения вместимости либо несоблюдения условия расположения клиентов на концах маршрутов. Пара (1, 2) удовлетворяет всем условиям, поэтому соответствующие маршруты объединяются в $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0\}$. Сравнение результатов при расчете «каждый клиент отдельно» и методом Кларка – Райта приведено в табл. 3.

Таблица 2

Экономия для всех пар клиентов (сортировка по убыванию)

Пара клиентов	Экономия, км	Ранг
(3, 4)	125,6	1
(2, 3)	51,6	2
(2, 4)	51,6	3
(1, 2)	30,6	4
(1, 3)	30,6	5
(1, 4)	30,6	6

Таблица 3

Сравнение результатов при расчете «каждый клиент отдельно» и методом Кларка – Райта

Параметр	Индивидуальные маршруты	Оптимизированные маршруты (по методу Кларка – Райта)	Сокращение, %
Количество маршрутов	5	2	60
Общее расстояние, км	381,6	225,4	40,9
Среднее расстояние на маршрут, км	76,3	112,7	-47,8
Требуемое количество топливозаправщиков	5	2	60
Требуемое количество водителей	5	2	60

Примечание. Увеличение среднего расстояния маршрута объясняется тем, что два оптимизированных маршрута служат двум парам клиентов, а не одному.

Итоговым решением, полученным в результате применения алгоритма Кларка – Райта, являются два маршрута:

– маршрут А: $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0\}$ с длиной 51,6 км и загрузкой 2;

– маршрут В: $\{0 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0\}$ с длиной 173,8 км и загрузкой 2.

Общее расстояние после оптимизации составляет 225,4 км, что соответствует сокращению на 156,2 км (40,9 %) по сравнению с исходным решением. Количество маршрутов уменьшилось с четырех до двух, что эквивалентно сокращению используемого парка транспортных средств на 60 %.

Полученное решение рассмотрено со следующих точек зрения:

1. Уровень использования вместимости: оба маршрута используют вместимость на 100 % (две единицы из двух возможных), что свидетельствует об эффективном использовании ресурсов.

2. Возможность улучшений локальной оптимизацией (2-орт):

– для маршрута А $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0\}$: альтернативный порядок $\{0 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 0\}$ дает расстояние $25,8 + 10,5 + 15,3 = 51,6$ км (то же самое);

– для маршрута В $\{0 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 0\}$: альтернативный порядок $\{0 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 0\}$ дает расстояние $86,9 + 24,1 + 62,8 = 173,8$ км (то же самое).

2-орт – это локальная оптимизация, т. е. мы пробуем улучшить порядок посещения точек внутри маршрута, заменяя два ребра для уменьшения длины. Получается то же самое: матрица симметрична, т. е. $d(i,j) = d(j,i)$, а в расчете суммы значения просто переставлены местами, при двух клиентах это наиболее частая ситуация. В итоге оба маршрута уже локально оптимальны (2-орт не дает улучшений).

3. Сравнение с нижней границей, которая для CVRP рассчитывается как половина суммы расстояний в км от всех клиентов до депо и обратно, разделенная на вместимость:

$$LB = \frac{\sum_{i=1}^n 2 d(0, i)/Q = 2(15,3 + 25,8 + 62,8 + 86,9)}{2} = 190,8. \quad (3)$$

Нижняя граница LB представляет собой самое оптимистическое расстояние, меньше которого решение физически невозможно.

Элемент $2d(0, i)$ в выражении (3) – это минимальный вклад клиента i в общее расстояние в любом допустимом решении, заключающемся в следующем: один раз нужно выехать из базы, один раз вернуться обратно. Значения расстояний берутся из табл. 1. Затем производится деление на Q : один рейс обслуживает максимум Q клиентов, а значит, общие затраты рейса делятся между этими клиентами.

Полученное решение – 225,4 км находится на 18,1 % выше нижней границы, что является хорошим результатом для эвристического метода (теоретически метод Кларка – Райта находит решения в пределах 10...25 % от оптимума). Применение алгоритма Кларка – Райта к задаче оптимизации маршрутов топливозаправщиков дало следующие результаты:

1. Значительное сокращение парка транспортных средств: удалось сократить маршруты с пяти независимых до двух и получить экономию 60 % в количестве топливозаправщиков. Для крупных железнодорожных сетей это означает снижение эксплуатационных затрат, связанных с организацией доставки топливно-смазочных материалов и использованием специализированных средств обслуживания.

2. Сокращение общего пробега топливозаправщиков в размере 156,2 км (40,9 %), что способствует прямому снижению расходов на топливо, амортизацию и обслуживание автопарка транспортного подвижного состава. При цене дизельного топлива около 50 р./л и среднем расходе топлива при эксплуатации топливозаправщиков 20–50 л / 100 км экономия топливно-энергетических ресурсов может составлять порядка 1 500–4 000 р. на одном цикле обслуживания.

3. Полное использование вместимости: оба маршрута используют вместимость транспорта на 100 %, что указывает на высокую эффективность распределения.

4. Локальная оптимальность: дальнейшая локальная оптимизация методом 2-орт не улучшает решение, это говорит о том, что локально оптимальное решение уже найдено.

Сравнение результатов применения метода Кларка – Райта с другими известными подходами к решению транспортных задач приведено в табл. 4.

Метод Кларка – Райта в сравнении с другими известными подходами

Характеристика	Жадный алгоритм (Nearest Neighbor)	Метод Кларка – Райта	Генетический алгоритм	Муравьиная колония
Временная сложность	$O(n^2)$	$O(n^2)$	$O(n \cdot p \cdot g)$	$O(n^2 \cdot m)$
Качество решения	15...20 % выше оптимума	10...15 % выше оптимума	5...10 % выше оптимума	5...10 % выше оптимума
Легкость реализации	Очень простая	Простая	Средняя	Средняя
Требуемые ресурсы	Минимальные	Минимальные	Значительные	Значительные
Адаптируемость к ограничениям	Хорошая	Отличная	Отличная	Отличная
Стабильность результатов	Зависит от начальной точки	Детерминирован	Недетерминирован	

Выводы

В статье продемонстрирована эффективность применения классического алгоритма Кларка – Райта для оптимизации маршрутов доставки топливно-смазочных материалов специальному подвижному составу на примере одного из участков полигона Западно-Сибирской железной дороги. Основные результаты применения данного алгоритма:

- сокращено количество требуемых топливозаправщиков на 60 % (с 5 до 2);
- сокращен общий пробег топливозаправщиков на 40,9 % (с 381,6 до 225,4 км);
- выявлена локальная оптимальность полученного решения (при 2-орт улучшений нет);
- качество решения находится в пределах 18,1 % от расчетной нижней границы, что является хорошим результатом для эвристического подхода.

Представленная работа демонстрирует пример пошаговой реализации алгоритма Кларка – Райта с описанием каждого этапа, что облегчает понимание сущности метода практикующими специалистами железнодорожного транспорта и студентами. Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности внедрения данной методики в системы управления повседневной логистикой топливозаправщиков железнодорожных предприятий. Для реализации алгоритма возможно использование платформы для программирования и численных вычислений MATLAB [24] или других платформ для имитационного моделирования логистических потоков и проверки результатов оптимизации в более реалистичных условиях [25–27].

Список источников

1. Оленберг А. А., Кочергин В. И. Интегрированное оптимизационное моделирование логистики топливозаправщиков в транспортных и транспортно-технологических системах // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2025. № 2 (17). С. 59–65. DOI 10.52170/2712-9195_2025_2_59. EDN HBIILZZ.
2. Оленберг А. А., Кочергин В. И. Использование ГИС карт для создания имитационной модели // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 3 (14). С. 56–61. DOI 10.52170/2712-9195_2024_3_56. EDN BYVGVU.
3. Clarke G., Wright W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points // Operations Research. 1964. No. 12 (4). P. 568–581. DOI 10.1287/opre.12.4.568.
4. Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms // European Journal of Operational Research. 1992. No. 59 (3). P. 345–358. DOI 10.1016/0377-2217(92)90192-C.
5. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem // Management Science. 1959. No. 6 (1). P. 80–91. DOI 10.1287/mnsc.6.1.80.
6. Toth P., Vigo D. The vehicle routing problem. SIAM, 2002. 367 p. DOI 10.1137/1.9780898718515.
7. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints // European Journal of Operational Research. 2012. No. 218 (1). P. 1–6. DOI 10.1016/j.ejor.2011.07.037.
8. Guerriero F., Saccomanno F. P. A Parallel implementation of the Clarke-Wright algorithm on GPUS // 14th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems. 2025. No. 1. P. 100–111. DOI 10.5220/0013138100003893.

9. Garside A. K., Erlinda L., Amallynda I. Solving heterogeneous fleet vehicle routing problem with Clarke Wright saving heuristic and genetic algorithm // *Proceedings of the 4th International Conference on Green Civil and Environmental Engineering (GCEE)* 2023. 2024. No. 2927. P. 050002. DOI 10.1063/5.0192216.
10. Fikejz J., Brázdová M., Jánošíková L. Modification of the Clarke and Wright algorithm with a dynamic savings matrix // *Journal of Advanced Transportation*. 2024. No. 2024 (1). P. 1–15. DOI 10.1155/2024/8753106.
11. Selecting fast algorithms for the capacitated vehicle routing problem with machine learning techniques / R. Asin-Achá, A. Espinoza, O. Goldschmidt [et al.] // *Networks*. 2024. No. 84 (4). P. 465–480. DOI 10.1002/net.22244.
12. Segerstedt A. A simple heuristic for vehicle routing – A variant of Clarke and Wright's saving method // *International Journal of Production Economics*. 2014. No. 157. P. 74–79. DOI 10.1016/j.ijpe.2013.09.017.
13. Heuristics for vehicle routing problem: A survey and recent advances / F. Liu, C. Lu, L. Gui [et al.] // *Artificial Intelligence*. 2023. DOI 10.48550/arXiv.2303.04147.
14. CAMP: Collaborative attention model with profiles for vehicle routing problems / C. Hua, F. Berto, J. Son [et al.] // *Multiagent Systems*. 2025. DOI 10.48550/arXiv.2501.02977.
15. Nurcahyo R., Irawan D. A., Kristanti F. The Effectiveness of the Clarke & Wright savings algorithm in determining logistics distribution routes (case study PT.XYZ) // *E3S Web of Conferences*. 2023. No. 426 (01107). DOI 10.1051/e3sconf/202342601107.
16. Nugroho J. A. Penentuan Rute Pengambilan Sampah Dengan Menggunakan Metode Clarke & Wright Algorithm Saving Heuristic Di Perusahaan Daerah Kebersihan Untuk Wilayah Bandung Timur // *Journal Pendidikan Sains Dan Teknologi*. 2024. No. 3 (3). P. 569–573. DOI 10.47233/jpst.v3i3.1984.
17. Vehicle routing problems with multiple commodities: A survey / W. Gu, C. Archetti, D. Cattaruzza [et al.] // *European Journal of Operational Research*. 2024. No. 317 (1). P. 1–15. DOI 10.1016/j.ejor.2023.11.032.
18. A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics / M. E. Bruni, E. Fadda, S. Fedorov, G. Perboli // *Computers & Operations Research*. 2023. No. 157 (20). DOI 10.1016/j.cor.2023.106262.
19. Analysis and optimization of transportation logistics for supply chain management of perishable goods using Monte Carlo Simulation / S. M. Pol, A. Rayte, B. T. Patil, K. N. Joshi // *E3S Web of Conferences*. 2024. No. 559 (04004). DOI 10.1051/e3sconf/202455904004.
20. Vehicle routing problem approach for improving fuel delivery scheduling to austere test sites / S. Allen, J. Heller, G. Lamb [et al.] // *A Regional Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*. 2024. No. 12 (2). P. 109–114. DOI 10.37266/ISER.2025v12i2.pp109-114.
21. Kaczor G., Szkoda M. The application of a simulation method in the evaluation of the reliability of transport systems // *Czasopismo Techniczne*. 2018. No. 6 (115). P. 167–178. DOI 10.4467/2353737XCT.18.096.8701.
22. Qu P. Design of supply chain logistics intelligent management information system based on GIS optimization model // *Procedia Computer Science*. 2024. No. 243. P. 396–405. DOI 10.1016/j.procs.2024.09.049.
23. Яндекс Карты : [поисково-информационная картографическая служба]. URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 01.02.2026).
24. MATLAB : платформа для программирования и численных вычислений. URL: <https://www.math-works.com/products/matlab.html> (дата обращения: 01.02.2026).
25. Wang R. Research on cold chain logistics distribution path optimization based on improved ant colony algorithm // *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. 2023. DOI 10.1109/ICPECA56706.2023.10075989.
26. Li Y., Zhang Z. Research on the site selection of fresh agricultural products distribution center based on logistics cost and its MATLAB implementation // *AICI 25: Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. 2025. P. 293–297. DOI doi.org/10.1145/3730436.3730485.
27. Zhang W., Xu M., Wang S. Joint location and pricing optimization of self-service in urban logistics considering customers' choice behavior // *Transportation Research. Part E. Logistics and Transportation Review*. 2023. No. 174. DOI 10.1016/j.tre.2023.103128.

References

1. Olenberg A. A., Kochergin, V. I. Integrated optimization modeling of fuel tanker logistics in transport and transport-technological systems. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2025;(17):59–65. (In Russ.). DOI 10.52170/2712-9195_2025_2_59 EDN HBILZZ.
2. Olenberg A. A., Kochergin V. I. Use of GIS maps to create a simulation model. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2024;(14):56–61. DOI 10.52170/2712-9195_2024_3_56 EDN BYVGVU. (In Russ.).
3. Clarke G., Wright W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*. 1964;12(4):568–581. DOI 10.1287/opre.12.4.568.

4. Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*. 1992;59(3):345–358. DOI 10.1016/0377-2217(92)90192-C.
5. Dantzig G. B., Ramser J. H. The truck dispatching problem. *Management Science*. 1959; 6(1):80–91. DOI 10.1287/mnsc.6.1.80.
6. Toth P., Vigo D. The vehicle routing problem. SIAM; 2002. 367 p. DOI 10.1137/1.9780898718515.
7. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*. 2012;218(1):1–6. DOI 10.1016/j.ejor.2011.07.037.
8. Guerriero F., Saccomanno F. P. A Parallel implementation of the Clarke-Wright algorithm on GPUs. Conference: *14th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*. 2025;(1):100–111. DOI 10.5220/0013138100003893.
9. Garside A. K., Erlinda L., Amallynda I. Solving heterogeneous fleet vehicle routing problem with Clarke Wright saving heuristic and genetic algorithm. *Proceedings of the 4th international Conference on green Civil and environmental Engineering (GCEE) 2023*. 2024;(2927):050002. DOI 10.1063/5.0192216.
10. Fikejz J., Brázdová M., Jánošíková L. Modification of the Clarke and Wright algorithm with a dynamic savings matrix. *Journal of Advanced Transportation*. 2024;(1):1–15. DOI 10.1155/2024/8753106.
11. Asín-Achá R., Espinoza A., Goldschmidt O., Hochbaum D.S., Huerta I.I. Selecting fast algorithms for the capacitated vehicle routing problem with machine learning techniques. *Networks*. 2024;84(4):465–480. DOI 10.1002/net.22244.
12. Segerstedt A. A simple heuristic for vehicle routing – A variant of Clarke and Wright's saving method. *International Journal of Production Economics*. 2014;(157):74–79. DOI 10.1016/j.ijpe.2013.09.017.
13. Liu F., Lu C., Gui L. [et al.]. Heuristics for vehicle routing problem: A survey and recent advances. *Artificial Intelligence*. 2023. DOI 10.48550/arXiv.2303.04147.
14. Hua C., Berto F., Son J. [et al.]. CAMP: Collaborative attention model with profiles for vehicle routing problems. *Multiagent Systems*. 2025. DOI 10.48550/arXiv.2501.02977.
15. Nurcahyo R., Irawan D. A., Kristanti F. The effectiveness of the Clarke & Wright savings algorithm in determining logistics distribution routes (case study PT.XYZ). *E3S Web of Conferences*. 2023;426(01107). DOI 10.1051/e3sconf/202342601107.
16. Nugroho J. A. Penentuan Rute Pengambilan Sampah Dengan Menggunakan Metode Clarke & Wright Algorithm Saving Heuristic Di Perusahaan Daerah Kebersihan Untuk Wilayah Bandung Timur. *Journal Pendidikan Sains Dan Teknologi*. 2024;3(3):569–573. DOI 10.47233/jpst.v3i3.1984.
17. Gu W., Archetti C., Cattaruzza D. [et al.]. Vehicle routing problems with multiple commodities: A survey. *European Journal of Operational Research*. 2024;317(1):1–15. DOI 10.1016/j.ejor.2023.11.032.
18. Bruni M. E., Fadda E., Fedorov S., Perboli G. A machine learning optimization approach for last-mile delivery and third-party logistics. *Computers & Operations Research*. 2023;157(20). DOI 10.1016/j.cor.2023.106262.
19. Pol S. M., Rayte A., Patil B. T., Joshi K. N. Analysis and optimization of transportation logistics for supply chain management of perishable goods using monte carlo simulation. *E3S Web of Conferences*. 2024;559(04004). DOI 10.1051/e3sconf/202455904004.
20. Allen S., Heller J., Lamb G. [et al.]. Vehicle routing problem approach for improving fuel delivery scheduling to austere test sites. *A Regional Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*. 2024;12(2):109–114. DOI 10.37266/ISER.2025v12i2.pp109-114.
21. Kaczor G., Szkoda M. The application of a simulation method in the evaluation of the reliability of transport systems. *Czasopismo Techniczne*. 2018;6(115):167–178. DOI 10.4467/2353737XCT.18.096.8701.
22. Qu P. Design of supply chain logistics intelligent management information system based on GIS optimization model. *Procedia Computer Science*. 2024;243:396–405. DOI 10.1016/j.procs.2024.09.049.
23. Search and information cartographic service Yandex Maps. URL: <https://yandex.ru/maps..>
24. MATLAB programming and numerical computing platform. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
25. Wang R. Research on cold chain logistics distribution path optimization based on improved ant colony algorithm. *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*. 2023. DOI 10.1109/ICPECA56706.2023.10075989.
26. Li Y., Zhang Z. Research on the site selection of fresh agricultural products distribution center based on logistics cost and its MATLAB implementation. *AICI '25: Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. 2025:293–297. DOI doi.org/10.1145/3730436.3730485.
27. Zhang W., Xu M., Wang S. Joint location and pricing optimization of self-service in urban logistics considering customers' choice behavior. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023;174. DOI 10.1016/j.tre.2023.103128.

Информация об авторах

А. А. Оленберг – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

В. И. Кочергин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения.

М. Е. Корягин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

A. A. Olenberg – Postgraduate of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

V. I. Kochergin – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Transport Engineering Technology and Machine Operation Department, Siberian Transport University.

M. E. Koryagin – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Higher Mathematics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; одобрена после рецензирования 01.03.2026; принята к публикации 31.03.2026.

The article was submitted 22.01.2026; approved after reviewing 01.03.2026; accepted for publication 31.03.2026.