

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2024 Issue: 03 Volume: 131

Published: 19.03.2024 <http://T-Science.org>

Issue

Article



Aleksandra Dmitrievna Danilova

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Bachelor

Oleg Yurievich Sabinin

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
Candidate of Engineering Sciences, Docent

ALGORITHMIC SOFTWARE OF VEHICLE ROUTING WITH REDUCTION NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Abstract: The paper is devoted to the problem of transportation planning in conditions of reducing the impact of carbon dioxide emissions from vehicles. A brief overview of existing routing systems is given and a process for creating routes based on solving the Dynamic Vehicle Routing Problem and emissions model is proposed.

Key words: vehicle routing, transportation planning, optimization, logistics, ecology.

Language: Russian

Citation: Danilova, A. D., & Sabinin, O. Yu. (2024). Algorithmic software of vehicle routing with reduction negative impact on the environment. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 03 (131), 91-97.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-03-131-15> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2024.03.131.15>

Scopus ASCC: 1701.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПОНИЖЕНИЕМ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Аннотация: Статья посвящена проблеме планирования перевозок в условиях учета влияния выбросов углекислого газа транспортными средствами. Приводится краткий обзор существующих систем маршрутизации и предлагается процесс составления маршрутов на основе решения задачи динамической маршрутизации транспорта и модели выбросов.

Ключевые слова: маршрутизация транспортных средств, планирование перевозок, оптимизация, логистика, экология.

Введение

В настоящее время крайне актуальна в различных сферах деятельности транспортная логистика. Например, за последние десять лет наблюдается тенденция роста в онлайн-торговле (e-commerce), и в ближайшие годы рост будет продолжаться [1]; широко распространяется доставка продуктов питания из магазинов и ресторанов, посылок в пункты выдачи [2] и т.д. Планирование перевозок играет важную роль для бизнеса, поскольку влияет как на операционную эффективность, так и на финансовые результаты и качество обслуживания клиентов. При этом отмечается, что неоптимальное транспортное планирование приводит к проблемам с экологией

и здоровьем населения. Например, в Барселоне ежегодно пятую часть от общего числа смертей составляют преждевременные смерти из-за плохого городского и транспортного планирования [3]. Также примерно 4-9 млн человек ежегодно умирают из-за загрязнения воздуха [3]. В некоторых странах уже принимаются меры по снижению выбросов углекислого газа и для достижения этой цели обновляются стандарты для различных видов транспорта [4]. Каким образом можно при планировании перевозок внести вклад в минимизацию выбросов уже сейчас?

Целью данной работы является разработка алгоритмического обеспечения маршрутизации

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

транспортных средств для снижения негативного воздействия на окружающую среду. В соответствии с целью определены следующие задачи работы:

- A. Выполнить обзор систем маршрутизации.
- B. Определить алгоритмы для обеспечения планирования перевозок, инструменты для хранения данных и визуализации маршрутов.

1. Обзор существующих решений

Известно множество систем, которые решают задачу планирования маршрутов с учетом оптимизации движения по пройденному расстоянию, стоимости и др. Среди них такие системы, как Яндекс Маршрутизация, Amazon Supply Chain and Logistics и SAP Travel Management. Ниже описан функционал, который они предоставляют.

1) Яндекс Маршрутизация

Данная система от компании Яндекс предназначена для автоматического распределения заказов по курьерам (транспортное средство или пеший сотрудник) и построения маршрутов их движения с учетом минимизации по времени, расстоянию или стоимости маршрутов. Среди более 50 учитываемых факторов выделяют виды транспорта, габаритные характеристики грузов, учет пробок и опозданий, временные окна выполнения заказов, совместимость заказов между собой и многие другие. Позволяет построить маршруты для 1000 точек за 15 минут. Так, сервис подходит как для разных отраслей бизнеса: как для курьерских служб и торговых компаний (например, интернет-магазины, дистрибьюторские и транспортные компании), так и для производств и банков. [5; 6]

2) Amazon Supply Chain and Logistics

Это облачная система сервисов от компании Amazon, которая позволяет использовать ее собственные ресурсы для вычисления маршрутов с предоставлением по умолчанию кода алгоритма для решения задачи коммивояжера, минимизирующего расстояния маршрутов. Также у пользователей есть возможность дорабатывать и разрабатывать код под собственные нужды. Можно оценить время и расстояние в пути, проложить маршруты на карте на основе времени отправления, различных видов транспорта (автомобиль, грузовик, пешком), а также данных о дорожном движении и дорожной сети. Максимальное число пунктов отправления и назначения – по 350 шт. [7]

3) SAP Travel Management

Компания SAP предоставляет программное обеспечение *Travel Management* для планирования деловых поездок [8], где одной из предоставляемых функций является планирование маршрутов Route Planning [9] в

рамках компонента Travel Expenses для расчета командировочных расходов. С помощью Route Planning можно вычислить маршрут, предварительно выбрав адреса, и посчитать расстояние, а затем отобразить на масштабируемой карте. При изменении данных рассчитанное расстояние и карта обновятся. [9]

Таким образом, среди рассмотренных систем планирования маршрутов оптимизация производится по стоимости, времени, расстоянию и др. Однако ни в одной из них не рассматривается проблема загрязнения окружающей среды.

2. Обзор алгоритмов

1) Задача маршрутизации транспорта

Среди решений проблемы построения маршрутов одним из наиболее известных является решение задачи коммивояжера (Travelling Salesman Problem, или TSP). Это задача комбинаторной оптимизации по поиску выгодного маршрута по различным критериям (минимизация по пройденному расстоянию, стоимости и т.п.), который проходит через указанные города хотя бы раз с последующим возвратом в исходный город [10].

Задача маршрутизации транспорта (Vehicle Routing Problem, или VRP) обобщает задачу коммивояжера [11] и относится к классу NP-трудных задач, то есть вычислительная сложность задачи зависит от размера входных данных экспоненциально [12].

В задаче VRP определяется набор маршрутов до нескольких клиентов для парка транспортных средств, расположенных в одном или нескольких депо [12]. Другими словами, целью решения задачи VRP является поиск наиболее эффективных маршрутов по доставке товаров и грузов для парка транспортных средств. При этом подобранный маршрут должен быть оптимальным по числу задействованных транспортных средств, пройденному расстоянию, времени, затрачиваемому на доставку, и другим факторам [13].

Существует более 20 типов задачи VRP, которые сосредоточены на решении таких проблем, как [13]:

- обслуживание клиентов в определенный временной интервал;
- максимизация общей прибыли при посещении всех клиентов;
- учет ограничений вместительности транспортного средства и времени, а также управления несколькими поездками;
- и др.

2) Задача маршрутизации зеленого транспорта

Но среди них есть один тип, который пытается решить проблему учета влияния выбросов на окружающую среду, а именно задача

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 3.939
 ESJI (KZ) = 8.771
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

маршрутизации зеленого транспортного средства (Green Vehicle Routing Problem, или GVRP).

Задача GVRP сводится к оптимизации маршрутов таким образом, чтобы одновременно маршруты были эффективными и влияние на окружающую среду было минимальным [14].

К факторам, которые может учитывать GVRP, относят [14]:

- место вывоза товара;
- место доставки товара;
- тип транспортного средства;
- технические характеристики транспортного средства;
- улично-дорожная сеть;
- условия дорожного движения.

Среди основных подходов к решению задачи GVRP выделяют [14] эвристики и метаэвристики, например, генетический алгоритм и алгоритм имитации отжига соответственно.

Количество выбросов углекислого газа пропорционально расходу топлива транспортного средства. На расход топлива, который можно оценить в режиме реального времени, могут влиять пройденное расстояние, средняя скорость движения и ускорение, нагрузка, тип и размер двигателя, уклон дороги и погодные условия. [11]

Чем больше груза будет везти машина, тем больше выбросов будет производиться, значит, его необходимо скорее доставить. При этом большие скорости производят больше выбросов, чем поездки на средних скоростях. Таким образом, при наличии временного ограничения на доставку (например, привезти клиенту посылку в течение 1 ч) необходимо построить оптимальный по времени маршрут с меньшими выбросами. Выбран критерий оптимальности по времени, поскольку по пути могут появиться пробки, которые могут повлиять как на общее время доставки, так и на выбросы (т.к. низкие скорости передвижения тоже дают больше выбросов, чем средняя скорость).

Чтобы учесть выбросы при построении маршрутов, необходимо использовать

аналитическую модель выбросов (МВ). В статье [11] рассматриваются три класса МВ для малотоннажных дизельных автомобилей в зависимости от расстояния. Формулы расчета выбросов $Emissions$ (1)-(3) определяют класс 1-3 соответственно. [14]

Первый класс МВ описывают формулы (1.1) и (1.2) ниже [11]:

$$Emissions = EF \cdot d, \quad (1.1)$$

$$EF = 147 \frac{r}{km}, \quad (1.2)$$

где EF (*Emission Factor*) – коэффициент выбросов, определяемый нормами выбросов углекислого газа EU 2020 для легкого коммерческого транспорта [11; 15], d – расстояние между местом отправки и доставки.

Если учесть нелинейную взаимосвязь между выбросами и скоростью, то формулу (1) можно улучшить:

$$Emissions = EF' \cdot d, \quad (2.1)$$

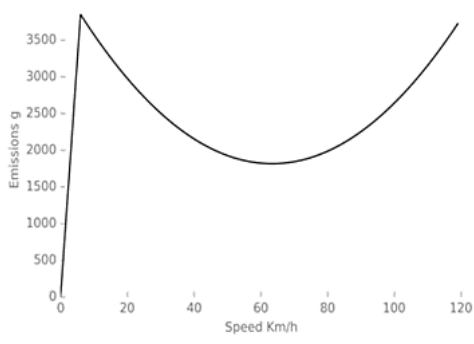
$$EF' = 0,0617 \cdot v^2 - 7,8227 \cdot v + 429,51, \quad (2.2)$$

где v – средняя скорость транспортного средства в км/ч. Формула для коэффициента выбросов (2.2) определена для дизельного транспорта малой грузоподъемности в отчете «Методологии расчета транспортных выбросов и энергопотребления» в рамках проекта МЕЕТ [16].

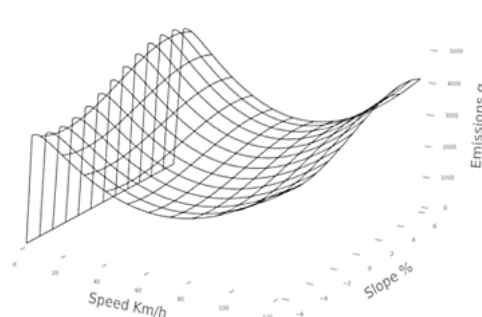
Поскольку уклон дороги и нагрузка на транспортное средство также могут влиять на выбросы, то МВ можно еще усложнить, тогда формула (3) – это модель градиентного веса, которая включает корректировку, основанную на эмпирическом анализе образцов дизельных транспортных средств, где g – уклон дороги, $k = 1,27$ – константа, учитывающая вес груза; $l = 0,0614$; $q = -0,0011$; $r = -0,00235$; $u = -1,33$ – коэффициенты [11; 16]:

$$Emissions = \left(k + l \cdot g + q \cdot g^2 + r \cdot v + \frac{u}{v} \right) \cdot EF' \cdot d. \quad (3)$$

Рис.1 позволяет сравнить модели скорости, определяемых формулами (2) и (3), где выбросы рассчитаны для скорости от 0 до 120 км/ч на расстояние 10 км.



a)



b)

Рисунок 1. Сравнение моделей выбросов, включая: а) модель скорости; б) градиентную модель [11].

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Для анализа маршрутов в режиме онлайн (приближенного к режиму реального времени) воспользуемся решением задачи не на основе генетического алгоритма, предлагаемым в статье [11], а решением задачи динамической маршрутизации транспорта (Dynamic Vehicle Routing Problem, или DVRP). Алгоритм DVRP адаптирован под изменяющиеся условия окружающей среды и спрос клиентов, когда потребительский спрос и время в пути являются неизвестными величинами и меняются с течением времени [13].

Согласно алгоритму, рассмотренному в источнике [17], необходимо определить следующие параметры:

- *capacity* – максимальная вместимость транспортного средства;
- *vehicles* – список транспортных средств в парке (депо);
- *fleet_size* – количество транспортных средств в парке;
- *total_waiting_time* – общее время ожидания;
- *speed* – средняя скорость транспортного средства;
- *t*, *t_max*, *dt* – время появления заказа, максимальное время моделирования, шаг времени соответственно;

— *origin*, *destination* – пары из места отправления и места назначения;

— *demands* – начальные заказы (спрос).

Алгоритм [17] основан на жадной эвристике. Жадный алгоритм – это однопроходный итерационный алгоритм, с помощью которого итоговое решение получается путем пошагового добавления к текущему решению (пути) нового элемента, выбираемого на основе локального оптимума («наилучший на текущем шаге») [18]. А именно в решении [17] применяются жадные вставки, когда новые вершины вставляются последовательно в частичное решение (путь) [18].

Рассмотрим этапы жадных вставок [18]:

1. Построить начальный путь минимальной стоимости.
 2. Пока в решение входят не все вершины:
 - 2.1. Выбрать новую вершину: ближайшую к какой-либо вершине пути.
 - 2.2. Выбрать пару смежных в пути вершин, между которыми лучше всего вставить новую вершину.
 - 2.3. Произвести вставку новой вершины.
- Временная сложность жадных вставок составляет $O(n^2)$.
- На рис.2 представлена блок-схема алгоритма DVRP.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИНЦ (Russia) = 3.939
 ESJI (KZ) = 8.771
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

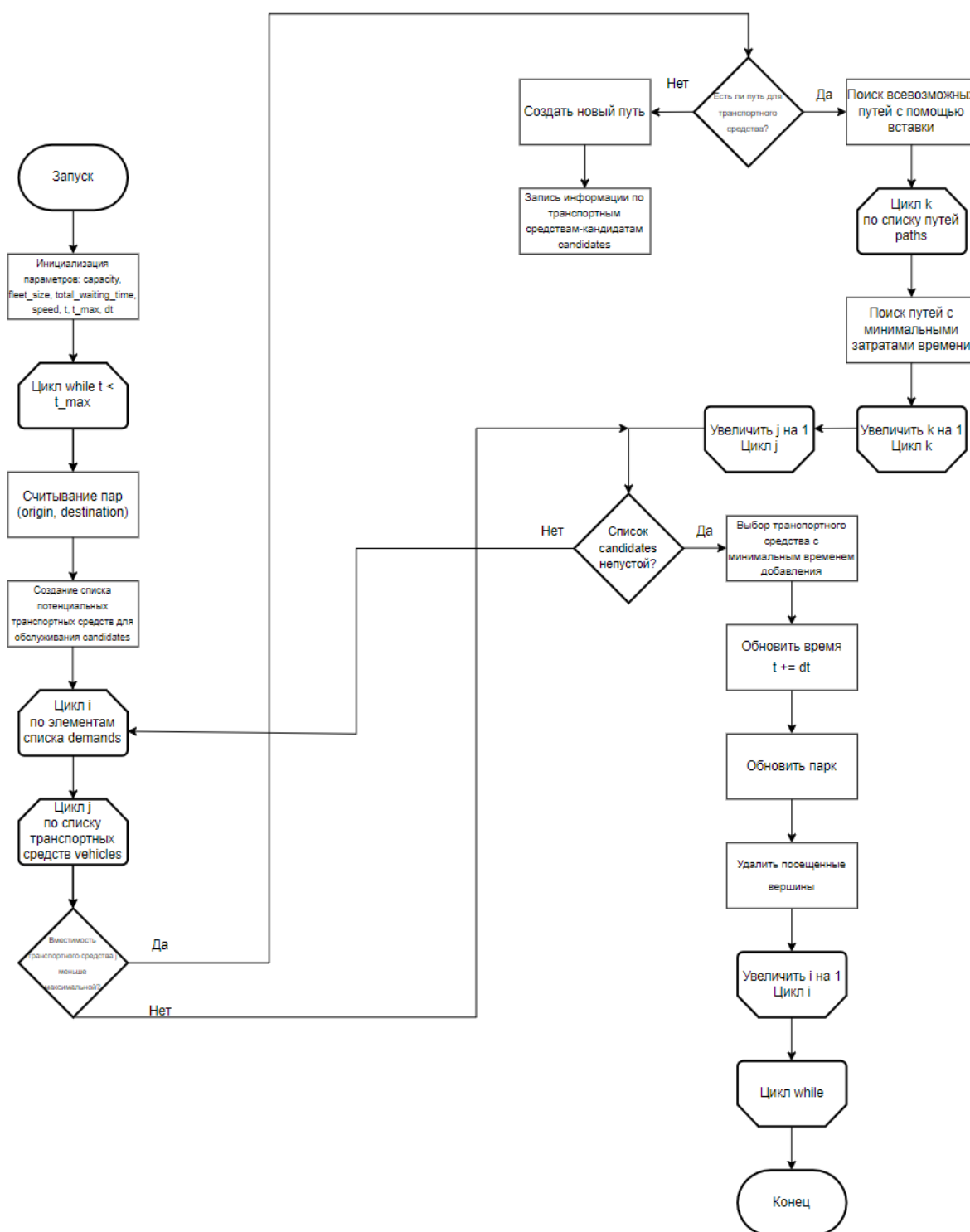


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма DVRP.

Чтобы учесть изменения в дорожных условиях, а именно пробки, о которых становится известно заранее, предлагается добавить соответствующий параметр и пересчитывать время ожидания при их возникновении.

3. Процесс составления маршрута

Последовательность действий при составлении маршрутов представлена на рис.3. Предлагается входные данные такие, как координаты и другие необходимые параметры, записывать в базу данных PostGIS. PostGIS расширяет возможности реляционной базы данных с открытым исходным кодом PostgreSQL

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

и позволяет хранить географические данные, индексировать их и составлять к ним запросы [19].

Затем эти данные поступают на обработку алгоритму на основе DVRP и модели выбросов. Он найдет оптимальные маршруты, однако они будут представлены в виде линейного расстояния между двумя точками. Соответственно, чтобы проложить более детальный маршрут, предлагается использовать алгоритм A* по данным, полученным по API из открытой карты мира OpenStreetMap (OSM) [20], которая

поддерживается сообществом картографов и содержит данные о дорогах, тропах, кафе, железнодорожных станциях и многом другом по всему миру. Для поддержания карты в актуальном состоянии используются такие источники, как, к примеру, аэрофотоснимки и устройства GPS [20]. Алгоритм A* [21] в свою очередь представляет собой модификацию алгоритма Дейкстры, которая находит путь к единственной точке и отдает приоритет путям, которые ведут ближе к цели.

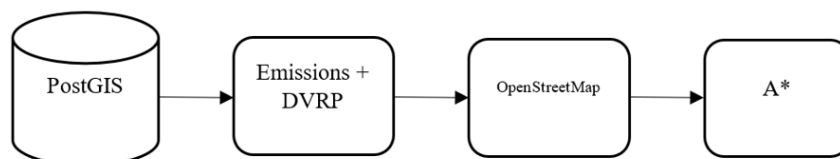


Рисунок 3. Процесс составления маршрута.

Соответственно для решения задачи снижения выбросов при планировании перевозок можно как самостоятельно использовать предлагаемый процесс составления маршрутов, так и встроить при необходимости полностью или отдельные компоненты в существующие системы.

Заключение

В данной работе рассмотрены системы маршрутизации (Яндекс Маршрутизация, Amazon Supply Chain and Logistics и SAP Travel

Management), а также выявлены их особенности. Для учета характеристики по снижению выбросов в окружающую среду предлагается процесс построения маршрутов на основе технологий PostGIS, GVRP, OpenStreetMap и A*. Таким образом, достигнута поставленная цель по разработке обеспечения маршрутизации транспорта для снижения негативного воздействия на окружающую среду.

References:

- Chevalier, S. (2024). *Retail e-commerce sales worldwide from 2014 to 2027 / Statista*. — 2024. Retrieved 09.02.2024 from <https://www.statista.com/statistics/379046/worldwide-retail-e-commerce-sales/>
- Kuo, M. (2024). *Solving the Vehicle Routing Problem / Routific Solutions Inc*. — 2024. Retrieved 09.02.2024 from <https://www.routific.com/blog/what-is-the-vehicle-routing-problem>
- Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). *Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence. Environment International*. T. 140. — C. 105661. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105661>
- (2023). *Fit for 55 / European Council Council of the European Union*. — 2023. Retrieved 11.02.2024 from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/gr>
- (n.d.). *Sravneniye sistem marshrutizatsii dostavki*. Retrieved 10.02.2024 from <https://efsol.ru/articles/sravnienie-sistem-marshrutizaczii-dostavki.html>
- (n.d.). *Yandeks Marshrutizatsiya / Ofitsial'nyy sayt*. Retrieved 18.02.2024 from <https://yandex.ru/routing/>
- Nightingale, M., & Subramanian, S. (2023). *Deploy a serverless application to optimize vehicle routing with Amazon Location Service*. Retrieved 10.02.2024 from <https://aws.amazon.com/blogs/supply-chain/deploy-a-serverless-application-to-optimize-vehicle-routing-with-amazon-location-service/>
- (n.d.). *Travel Management (FI-TV) / Documentation*. Retrieved 18.02.2024 from https://help.sap.com/docs/SAP_S4HANA_ON-

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИИ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

- [PREMISE/f4153779fcb742c094bb6157c0ff1cb/e/3982c2531bb9b44ce1000000a174cb4.html](https://premise.com/f4153779fcb742c094bb6157c0ff1cb/e/3982c2531bb9b44ce1000000a174cb4.html)
9. (n.d.). *Business Packages in HCM: Route Planning / Documentation*. Retrieved 14.03.2024 from https://help.sap.com/docs/HR_RENEWAL/f8850892e7134ecb9e99a4bf02971ae4/a6dde353a53d424de1000000a174cb4.html.
 10. B'erczi, K., Mnich, M., & Vincze, R. (2022). Efficient Approximations for Many-Visits Multiple Traveling Salesman Problems / *ArXiv*. — 2022. — Vol. abs/2201.02054. Retrieved 02.03.2024 from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:245769596>
 11. P.R. de Oliveira da Costa P.R., et al. (2018). A Genetic Algorithm for a Green Vehicle Routing Problem / *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. Volume 64. — 2018. — Pages 65-74, ISSN 1571-0653. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.01.008>
 12. (n.d.). *Zadacha marshrutizatsii transporta. Diskretnaya matematika: algoritmy*. Retrieved 02.03.2024 from https://www.lobanov-logist.ru/library/all_articles/55059/.
 13. Patel, R. (2023). *The Vehicle Routing Problem (VRP) Demystified: Solutions for Your Delivery Operations / Upper*. — 2023. Retrieved 28.12.2024 from <https://www.upperinc.com/blog/vehicle-routing-problem/>
 14. Patel, R. (2023). *What is Green Vehicle Routing Problem (GVRP)? [Working and Examples] / Upper*. — 2023. Retrieved 11.02.2024 from <https://www.upperinc.com/glossary/route-optimization/green-vehicle-routing-problem-gvrp/>
 15. (n.d.). *CO₂ emission performance standards for cars and vans*. Retrieved 02.03.2024 from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en
 16. (n.d.). *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption. Project Report SE/491/98 / Transport Research Laboratory*. — ed. by Hickman A.J. — European Commission; Directorate-General for Energy and Transport — 1998. Retrieved from <https://trimis.ec.europa.eu/project/methodology-calculating-transport-emissions-and-energy-consumption>
 17. (n.d.). *Insertion heuristic for dynamic vehicle routing problem (DVRP)*. Retrieved 01.03.2024 from <https://github.com/zuzhaoye/insertion-heuristic-for-dynamic-vehicle-routing-problem-dvrp>.
 18. Adigeyev, M. G. (n.d.). *Algoritmy resheniya vychislitel'no slozhnykh zadach. Lektsiya 13 «Evrsticheskiye algoritmy»*. Retrieved 03.03.2024 <https://edu.mmcs.sfedu.ru/mod/resource/view.php?id=9918>.
 19. (n.d.). *About PostGIS*. Retrieved 01.03.2024 from <https://postgis.net/>.
 20. (n.d.). *OpenStreetMap*. Retrieved 18.02.2024 from <https://www.openstreetmap.org/#map=3/69.62/-74.90>.
 21. Rachmawati, D., & Gustin, L. (2020). Analysis of Dijkstra's Algorithm and A* Algorithm in Shortest Path Problem / *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 1566. — 2020. Retrieved 14.02.2024 from <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1566/1/012061>