

Научная статья
УДК 656.025
doi: 10.17586/2713-1874-2024-4-21-29

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ И АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ

Любовь Николаевна Иванова¹, Сергей Евгеньевич Иванов²

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия, 45is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6880-0897>

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, serg_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2366-9458>
Язык статьи – русский

Аннотация: В статье анализируются ключевые методы оптимизации и планирования, применяемые для транспортной логистики. Рассмотрен алгоритм с применением моделей на графах для формирования оптимальных маршрутов перевозок с учетом основных логистических факторов. В отличие от классической задачи маршрутизации для транспортной логистики в представленной работе авторами применяются многофакторная оценка и адаптивная эвристика. Предложенная авторами эвристика учитывает не только расстояние, но и важные логистические параметры, такие как затраты на топливо и время прохождения участка пути. Применяемая многофакторная оценка позволяет построить уточненную графовую модель и получить оптимальные маршруты, учитывающие множество факторов, что повышает эффективность, снижает затраты и время доставки. Решаемая авторами задача многокритериальной оптимизации маршрутов имеет практическое применение для маршрутизации доставки товаров крупных маркетплейсов в пункты выдачи с учетом множества факторов. Для решения поставленной задачи авторами представлен многофакторный метод оптимизации маршрутов A* с адаптивной эвристикой. Для инструментального обеспечения логистических систем на языке объектно-ориентированного программирования C# реализован алгоритм в виде библиотеки. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют решать задачи оптимизации, планирования и развития сектора транспортно-логистических услуг.

Ключевые слова: алгоритм построения маршрутов, методы оптимизации перевозок, транспортная логистика

Ссылка для цитирования: Иванова Л. Н., Иванов С. Е. Методы оптимизации и алгоритм маршрутизации в транспортной логистике // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 4. С. 21–29. <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-21-29>.

OPTIMIZATION METHODS AND ROUTING ALGORITHM IN TRANSPORT LOGISTICS

Lubov N. Ivanova¹, Sergei E. Ivanov²

¹SMTU, Saint Petersburg, Russia, 45is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6880-0897>

²ITMO University, Saint Petersburg, Russia, serg_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2366-9458>
Article in Russian

Abstract: The article analyzes the key optimization and planning methods used for transport logistics. An algorithm using graph models for the formation of optimal transportation routes, taking into account the main logistical factors, is considered. In contrast to the classical routing problem for transport logistics, the authors use multifactorial assessment and adaptive heuristics in the presented work. The heuristics proposed by the authors takes into account not only the distance, but also important logistic parameters, such as fuel costs and the time of passage of the route section. The applied multifactorial assessment allows us to build a refined graph model and obtain optimal routes that take into account many factors, which increases efficiency, reduces costs and delivery time. The problem of multi-criteria route optimization solved by the authors has practical application for routing the delivery of goods from large marketplaces to pick-up points taking into account many factors. To solve the problem, the authors present a multi-factor route optimization method A* with adaptive heuristics. For instrumental support of logistics systems in the object-oriented programming language C#, an algorithm is implemented in the form of a library. The developed algorithm and software allow solving problems of optimization, planning and development of the transport and logistics services sector.

Keywords: algorithm for constructing routes, methods of transportation optimization, transport logistics

For citation: Ivanova L. N., Ivanov S. E. Optimization Methods and Routing Algorithm in Transport Logistics. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2024. No. 4. pp. 21–29. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2024-4-21-29>.

Введение. Транспортная логистика решает задачи планирования, реализации и контроля перемещения грузов и включает в себя выбор оптимальных маршрутов, средств передвижения и методов доставки, а также управление запасами и складскими процессами. Важной, ключевой задачей транспортной логистики является минимизация затрат при обеспечении своевременной доставки. Выполнение этой задачи возможно, если учитываются следующие факторы: расстояние, тип груза, условия дорожного движения, тарифы, время, расход топлива и многие другие. Применение современных цифровых технологий позволяет автоматизировать процессы транспортной логистики, улучшать мониторинг грузов и повышать эффективность перевозок. Для повышения конкурентоспособности в условиях глобализации транспортным компаниям необходимо оптимизировать свои логистические процессы. Кроме того, оптимизация маршрутов позволяет улучшить экологическую атмосферу, снизить углеродные выбросы. Компании стремятся сократить негативное воздействие на окружающую среду посредством оптимизации маршрутов.

Важным фактором в транспортной логистике является эффективное и бесперебойное движение товаров. Цепочка поставок является комплексным процессом, включающим этапы движения товара от производства до потребителя. Главными компонентами цепочки поставок являются: поставщики, производство, складирование, транспортировка, распределение и обратная логистика. При определении оптимальных маршрутов и технических средств доставки очень важны аспекты своевременной доставки и повышения удовлетворенности клиентов.

Эффективное управление цепочкой поставок позволяет:

- снизить затраты на производство и транспортировку;
- увеличить скорость доставки товаров;
- улучшить качество обслуживания клиентов;
- повысить гибкость системы и оперативно реагировать на изменения спроса и рыночные условия.

В современных меняющихся условиях применение цифровых технологий для

управления цепочкой поставок позволяет получить существенные конкурентные преимущества на рынке. Отлаженные цепочки поставок должны оперативно реагировать на изменения логистических центров, складов, производства. Кроме того, постоянное изменение спроса на товары изменяют нагрузку на логистическую сеть и пропускную способность. При этом необходимо учитывать множество меняющихся факторов: ограничения логистических центров, сроки поставок, транспортные мощности, уровень запрашиваемого сервиса, издержки, пропускную способность, нагрузку, время планирования, географию транспортной сети, виды транспортных средств, условия доставки, параметры груза, доступность транспортных средств и многие другие. При планировании перевозок необходима оптимизация маршрута и стоимости доставки, минимизация порожнего пробега, снижение сроков доставки и затрат на виды транспортных средств.

Логистические системы играют основную роль в управлении цепочками поставок. Надежное инструментальное обеспечение необходимо для эффективного функционирования логистических систем. Инструментальное обеспечение включает в себя программные и аппаратные средства, которые используются для управления логистическими процессами. Основные компоненты инструментального обеспечения включают: программное обеспечение для управления цепочками поставок (SCM), системы управления складом (WMS), системы управления транспортом (TMS) для планирования маршрутов, управления грузоперевозками и отслеживания доставки. Аппаратные средства обеспечивают сбор данных и автоматизацию процессов и включают сканеры штрих-кодов, RFID-метки, мобильные устройства.

Архитектура логистических систем может быть представлена на нескольких уровнях. Уровень стратегического управления цепочками поставок необходим для выбора поставщиков, распределении ресурсов и разработки долгосрочных планов. Уровень тактического управления необходим для планирования производства, управления запасами и оптимизации транспортных маршрутов. Уровень операционного управления необходим для ежедневной обработки заказов,

управления складом и транспортировкой. Следовательно, инструментальное обеспечение и архитектура логистических систем являются основой для эффективного управления цепочками поставок.

Цель исследования и постановка задачи. Ключевой аспект в транспортной логистике – оптимизация маршрута – позволяет повысить эффективности транспортировки грузов. Оптимизация маршрутов уменьшает расходы на топливо и амортизацию транспортных средств. Эффективные маршруты сокращают время в пути, что повышает удовлетворенность клиентов работой логистической системы и позволяет быстро реагировать на изменение спроса. Также оптимизация маршрутов способствует уменьшению выбросов за счет снижения пробега. Целью работы является разработка методов и инструментальных средств, позволяющих решать задачи оптимизации маршрутов, планирования и развитие сектора транспортно-логистических услуг.

На сегодняшний день для транспортной логистики остаются актуальными несколько практических задач маршрутизации, которые требуют решения и дальнейшего совершенствования. Одной из них является задача многокритериальной оптимизации маршрутов с одновременным учетом различных критериев, таких как затраты на топливо, время доставки, а также экологические факторы. Учитывая повышенное внимание к экологической составляющей, логистические компании стремятся уменьшать углеродный след, выбирая экологически чистые маршруты.

Решаемая авторами задача многокритериальной оптимизации маршрутов имеет практическое применение для маршрутизации доставки товаров крупных маркетплейсов в пункты выдачи с учетом множества факторов. Для решения данной задачи авторами представлен многофакторный метод оптимизации маршрутов A^* с адаптивной эвристикой. Метод позволяет учесть посредством многофакторной оценки различные критерии. Для экологически чистых маршрутов в графовой модели многокритериальной оптимизации нормализованные коэффициенты имеют вес менее 0,5 и такие маршруты получаются более оптимальными.

В транспортной логистике при определении оптимального маршрута в рассматриваемой задаче учитывается ряд факторов, таких как затраты на топливо, время прохождения участка пути. Решается задача построения многофакторной графовой модели и применения к ней адаптированного алгоритма A^* . Для решения задачи авторами представлена адаптивная эвристика, учитывающая специфические условия, такие как время движения по разным участкам дорог, затраты. Выполняются предобработка, масштабирование, усреднение выбранных логистических факторов.

Новизна работы заключается в обработке логистических факторов, их математическом представлении, многофакторной оценке, в представлении адаптивной эвристики, в построении многофакторной графовой модели и применении модифицированного для транспортной логистики алгоритма A^* .

Литературный обзор. В последние годы было опубликовано множество статей, освещающих различные аспекты транспортной логистики. Многие статьи акцентируют внимание на внедрении новых технологий в транспортной логистике. Это включает автоматизацию, роботизацию, применение дронов для доставки товаров и автономных грузовиков. Технологии интернет вещей (IoT) позволяют отслеживать местоположение и состояние грузов в реальном времени. Анализ больших объемов данных помогает компаниям оптимизировать маршруты и предсказывать спрос. Обзор статей о транспортной логистике показывает, что эта область активно развивается под влиянием технологий, экологических требований и глобальных изменений. Компании, стремящиеся оставаться конкурентоспособными, должны адаптироваться к новым условиям, внедряя инновации и оптимизируя свои процессы.

Рассмотрим научные работы по современным технологиям и методам, применяемым в транспортной логистике. В рассмотренных ниже работах [1–14] на основе различных методов и подходов решается задача однокритериальной оптимизации маршрутов. В отличие от изученных научных работ, мы представляем многофакторный метод оптимизации маршрутов A^* с адаптивной эвристикой, который позволяет более эффективно

проводить оптимизацию и при этом учитывать множество различных факторов.

В работе [1] предлагается оптимизация методов транспортной логистики с помощью внедрения инновационных управляющих технологий. Цель проводимого исследования, помимо оценки эффективности варианта транспорта и определения результативности логистического предприятия, – формирование комплекса решений для мультимодальных перевозок. В качестве очень важного аспекта исследования можно выделить выстраивание концепции по зеленой логистике и экологичности транспорта. Следует обратить внимание на то, что в работе [1] не решена проблема многокритериальной оптимизации маршрутов мультимодальных перевозок с учетом совместимости различных транспортных средств.

В работе [2] исследованы оптимизационные способы управления с помощью искусственного интеллекта с учетом обязательной цифровизации предприятия. Предложенная автором интегрированная модель включает координационные составляющие и деятельность персонала. Следует отметить, что применение искусственного интеллекта для задачи управления и оптимизации логистической цепочки поставок имеет множество нерешенных проблем. Например, помимо высокой стоимости решения, отсутствие требуемых объемов корректных и актуальных данных для обучения приводит к крайне неэффективным решениям.

В работе [3] рассматриваются возможности цифровизации промышленного предприятия для управления логистикой с учетом результативности использования материальных ресурсов и в зависимости от потребностей конечных потребителей. В исследовании применены ключевые индикаторы эффективности логистических процессов промышленного предприятия, в частности, производительность и качество обслуживания. Авторы предлагают свою оценку результативности объединения метода бенчмаркинга и показателей ключевой производительности (KPI). Данные оценки применимы для крупных промышленных предприятий и результаты оценки могут существенно расходиться с традиционными методами прогнозирования и стратегического планирования.

В работе [4] рассматриваются главные аспекты оптимизации управления цепочками поставок для результативности деятельности транспортной логистики и повышения конкурентоспособности предприятия. Для достижения поставленных целей авторами предложена специализированная система управления цепями поставок (SCMS), которая включает планирование, мониторинг и контроль материальных и финансовых ресурсов. Однако применение разработанной системы требует существенных затрат на внедрение, обучение персонала, что в основном подходит для крупных предприятий.

Основная цель исследований в работе [5] – предложения по снижению транспортных расходов при доставке необходимых товаров в конкретную определенную точку маршрута с использованием преимуществ распределительной логистики. Итогом исследования стали рекомендации по применению совокупности способов оптимизации распределенной транспортной логистики с возможностью снижения расходов, стоимости, повышения скорости процессов для комфортного и удобного взаимодействия заказчика и поставщика. Следует отметить, что в исследовании не представлены практические методы и алгоритмы для многокритериальной оптимизации маршрутов.

В работе [6] исследуются актуальные методы оптимизации процессов транспортной логистики предприятий с применением высокотехнологичных инноваций, с учетом предпочтений конечных потребителей и, главное, в контексте изменений в международной торговле. Рассматриваются разного вида стратегии управления логистическими цепочками поставок, для определения результативности практических инструментов оптимизации транспортных процессов. Проведен анализ следующих аспектов: выход на новые рынки, рост уровня электронной коммерции, повышение централизации и градостроительство умных городов. В рамках исследования не представлены алгоритмы многокритериальной оптимизации маршрутов.

В работе [7] рассматриваются возможности оптимизации и повышения надежности системы маршрутизации логистической системы предприятий с помощью инновационных продуктов. Нельзя обойти вниманием

предлагаемые авторами динамические адаптивные алгоритмы, с помощью которых можно выбирать альтернативные маршруты в соответствии с текущими условиями. К недостаткам применения динамических адаптивных алгоритмов относят высокие вычислительные затраты, переобучение, необходимость постоянного обновления моделей, параметров и сильную зависимость от актуальности, точности входных данных.

В основе работы [8] лежит концепция достижения результативности в логистических цепочках поставок при минимизации, снижении расходов при точном соблюдении требований конечного потребителя. Помимо главных финансовых показателей учитываются такие важные аспекты, как необходимость различных видов страхования и специфичность груза. В рамках работы выделен основной фактор при управлении транспортной логистикой и не применяются модели многофакторной оптимизации.

В работе [9] рассматриваются возможности и результаты использования технологий искусственного интеллекта для оптимизации маршрутов в транспортной автомобильной логистической системе. Предполагается, что применение высокотехнологичных продуктов в логистической системе российских предприятий является перспективным и развивающим данную предметную область направлением. Недостатками применения искусственного интеллекта для оптимизации маршрутов являются: высокие вычислительные затраты, необходимость больших объемов точных и актуальных данных, риск переобучения, сложность интерпретации и адаптации к изменениям.

В ходе исследований [10] разработана логическая последовательность построения цифровой экосистемы региональной транспортно-логистической технологической инфраструктуры. Цифровой информационный ресурс строится как единая комплексная транспортно-производственная платформа, что соответствует стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года. В работе представлены только общие этапы построения технологической транспортно-логистической инфраструктуры без указания конкретных алгоритмов оптимизации и методов отбора факторов.

В работе [11] проводится координация управленческих решений и изучение возможности применения математического моделирования, методов машинного обучения и сетевого анализа для достижения оптимизации процессов логистической системы цепочек поставок. Особое внимание направлено на комплексные решения в стратегиях управления рисками, на использование аналитических систематических методов. Однако, в работе не представлен сравнительный анализ моделей и методов оптимизации маршрутов в транспортной логистике.

В работе [12] автор конкретизирует, исследует и классифицирует вероятные риски работы системы цепочек поставок транспортной логистики. Оптимизация маршрутов гарантирует эффективное управление поставками, соблюдение экологических нормативов, грамотное складирование, безопасную транспортировку и доставку грузов, при этом следует в обязательном порядке учитывать логистические риски, в том числе и форс-мажоры, непредвиденные обстоятельства. В работе не отражено, что корректный учет логистических рисков возможен только при наличии достаточного объема качественных, актуальных данных, при выявлении всех потенциальных рисков и изменений, включая экономические колебания.

В работе [13] исследуются методы оптимизации логистических цепей поставок в контексте достижения необходимого уровня рентабельности предприятия. В рамках анализа конкурентоспособности оценивают показатели деятельности поставщиков и пожелания конечных потребителей с точки зрения стратегического планирования. По мнению авторов, наилучшим вариантом является динамичная стратегия для развития конкурентного преимущества предприятия. Однако динамичная стратегия требует постоянного мониторинга и анализа данных, имеет высокие затраты на адаптацию, высокий риск неэффективности без точных данных, сложного анализа результатов и сложности в координации подразделений.

В рамках исследования [14] изучается проблемная транспортная логистическая система в Санкт-Петербурге и других мегаполисах с возможностью применения высокотехнологичных инноваций. Представлены дан-

ные наблюдения фаз работы светофоров с сложных перекрёстков и предложено использовать моделирование для результативности работы транспортной сети. В работе проводится только статистический анализ собранных данных, не представлены методы решения задачи оптимизации маршрутов транспортной системы.

В приведенных работах используемые алгоритмы не учитывают важные внешние факторы для построения транспортных маршрутов. Кроме того, предложенные в обзоре традиционные методы оптимизации маршрутов основаны на алгоритме Дейкстры и некорректно работают для графовых моделей с отрицательными весовыми коэффициентами.

Многофакторный метод оптимизации маршрутов A^* с адаптивной эвристикой. Оптимизация маршрута в логистике – это не только способ снижения затрат, но и важный элемент повышения конкурентоспособности компании. С использованием современных технологий и методов компании могут значительно улучшить свои логистические процессы, что в конечном итоге ведет к повышению удовлетворенности клиентов и устойчивому развитию бизнеса.

Рассмотрим традиционные методы оптимизации маршрутов. Широко применяются алгоритмы маршрутизации на графовых моделях: алгоритм Дейкстры и алгоритм ближайшего соседа предназначены для поиска наиболее эффективных маршрутов между заданными точками. Алгоритм Дейкстры демонстрирует высокую эффективность при работе с небольшими сетями, обеспечивая быстрое определение оптимальных маршрутов. Алгоритм A^* [15, 16] представляет собой модификацию алгоритма Дейкстры, улучшает его функциональные возможности и использует эвристическую функцию для ускорения поиска. Впервые алгоритм A^* был представлен в работе авторов Питера Харта, Нисана Карпа и Реймонда Рубина [17]. Эвристический метод ближайшего соседа не всегда дает оптимальное решение, но легко реализуется и быстро работает. Генетический алгоритм эффективно обрабатывает сложные задачи маршрутизации с множеством переменных.

Модели на графах играют важную роль в оптимизации маршрутов перевозок. В контексте логистики узлы графа представляют склады, транспортные узлы, потребительские точки. Рёбра графа отражают транспортные маршруты между этими узлами, а также содержат информацию о расстоянии, времени доставки или стоимости перевозки. Модели на графах являются мощным инструментом для решения широкого спектра задач в логистике.

Авторами представлен эффективный алгоритм для оптимизации маршрутов грузовых и пассажирских перевозок на основе графовых моделей с учетом логистических факторов, таких как: стоимость перевозок, расстояние, тип груза, условия дорожного движения, тарифы, время доставки, расход топлива, экологические факторы. Для приведения всех факторов к единой шкале измерения выполняется масштабирование и нормализация. После чего вводятся весовые коэффициенты посредством усреднения нормализованных факторов.

Графовая модель строится на основе географических карт, узлы графа представляют перекрестки, ребра имеют определенные веса. Для решения задачи оптимизации применен модифицированный алгоритм A^* [15], который определяет наилучший маршрут для транспортной логистики с учетом главных параметров. Авторами применяются многофакторная оценка и адаптивная эвристика, которая учитывает не только расстояние, но и важные логистические параметры.

Алгоритм A^* строит маршрут для графовой модели с минимальной стоимостью, применяя оценочную функцию:

$$F(x) = E(x) + C(x), \quad (1)$$

где $E(x)$ – адаптивная эвристическая функция, которая представляет оценку стоимости пути от текущей до конечной вершины.

$$E(x) = M(x) L, \quad (2)$$

здесь $M(x)$ – манхэттенское расстояние, равное сумме модулей разностей географических координат двух вершин.

Для географических координат манхэттенское расстояние рассчитывается по формуле:

$$M(x) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|, \quad (3)$$

где x_1, x_2 – широты соседних вершин - перекрестков, y_1, y_2 – долгота.

Применяемая эвристическая функция является допустимой, она является монотонной. В работе [16] показано, что любая монотонная эвристика является допустимой. Здесь L – среднее арифметическое нормализованных логистических параметров f_i для участка (время для участка, расход топлива для участка):

$$L = 1/n \sum ((f_i - \min(f_i))/(\max(f_i) - \min(f_i))), \quad (4)$$

В графовой модели для каждого участка между двумя смежными узлами рассчитывается свой нормализованный усредненный коэффициент L .

Здесь $C(x)$ – оценка пути из стартовой вершины, равная $C(x) = G(x) L$, где $G(x)$ – наименьшая стоимость пути из начальной вершины в текущую.

Согласно алгоритму A^* [16], на каждом шаге просматриваются все пути из стартовой вершины в целевую для поиска минимального значения функции $F(x)$. Определяются пути из начальной вершины в другие нерассмотренные вершины, которые записываются в очередь с приоритетом. Условие завершения алгоритма является просмотр всего графа или минимальное значение $F(x)$ в очереди. Таким образом, с помощью очереди определяется оптимальное решение с минимальной стоимостью.

Рассмотрим основные этапы алгоритма A^* [15].

1) Стартовая вершина графа записывается в открытый список.

2) Выполняется основной цикл пока открытый список не пустой или не содержит конечной вершины.

а) Выбирается верхняя вершина из открытого списка.

б) Обработывается выбранная вершину. Проверяется вершина на проходимость. Вычисляется оценка $F(x)$ через этот узел.

с) Обработываются смежные вершины графа.

Для обработки выполняются следующие действия.

– Проверяется смежная вершина на проходимость. В случае непроходимости вершины выполняется переход к смежной.

– Далее рассчитывается оценка $F(x)$ в соответствии с формулой.

– Выполняется поиск смежной вершины в списке и сравнение оценки с вычисленной. Если находим, то сравниваем ее оценку пути от начальной вершины графа с рассчитанной оценкой. При лучшей оценке выполняется переход к смежной вершине. В противном случае вершина удаляется из списка.

– Далее выполняется пересчет оценки пути до целевой вершины.

д) Размещается рассматриваемая вершина в список.

е) Выполняется завершение основного цикла

3) Выводится найденный путь с минимальной стоимостью.

Проведенные оценки модифицированного алгоритма показывают вычислительную сложность алгоритма $O((x+y)\log x)$, где x, y – количество вершин и ребер модели в графе. В сравнении с широко применяемым алгоритмом Дейкстры со сложностью $O(x^2+y)$, предложенный алгоритм – более быстрый и может рассчитывать маршруты в режиме реального времени. Кроме того, алгоритм Дейкстры не применим для моделирования с отрицательными весовыми коэффициентами. С применением языка объектно-ориентированного программирования $C\#$ реализован алгоритм в виде библиотеки и выполнено моделирование модифицированным алгоритмом «Звезда» различных примеров на дорожной карте. Библиотека на языке $C\#$ реализует следующие методы для классов: добавление и удаление вершин и ребер ориентированного графа, вычисление функций стоимости, эвристическая функция расстояния, определение пути с минимальной стоимостью. Для реализации на языке $C\#$ использовались массивы, матрицы, списки, структуры *Generic*.

Выводы. Рассмотрены основные методы оптимизации и планирования грузовых и пассажирских перевозок. Предложен алгоритм на графовой модели для построения оптимальных маршрутов перевозок с учетом основных логистических параметров.

В транспортной логистике при определении оптимального маршрута в рассматриваемой задаче учитывается ряд факторов, такие как затраты на топливо, время прохождения участка пути. Решается задача построения многофакторной графовой модели и применения к ней адаптированного алгоритма A^* . Предложенная авторами эвристика учитывает не только расстояние, но и важные логистические параметры, такие как затраты на топливо и время прохождения участка пути. Выполняются предобработка, масштабирование, усреднение выбранных логистических факторов. Применяемая многофакторная оценка позволяет построить уточненную графовую модель и получить оптимальные маршруты, учитывающие множество факторов, что повышает эффективность и снижает затраты, время доставки. Результаты работы заключаются в обработке логистических факторов, их математическом представлении, многофакторной оценке, в представлении

адаптивной эвристики, в построении многофакторной графовой модели и применении модифицированного для транспортной логистики алгоритма A^* .

Для инструментального обеспечения логистических систем на языке объектно-ориентированного программирования C# реализован алгоритм в виде библиотеки. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют решать задачи оптимизации и развития сектора транспортно-логистических услуг. Представленный алгоритм является важным инструментом для построения оптимальных маршрутов перевозок с учетом различных логистических параметров. Применение разработанной библиотеки в логистических задачах ведет к повышению эффективности бизнеса и снижению затрат. В условиях быстро меняющегося рынка использование современных цифровых инструментов становится неотъемлемой частью успешной логистической стратегии.

Список источников

1. Мамметэсенова А., Гыратлыев С. Анализ эффективности использования различных видов транспорта в логистической цепи // *Всемирный ученый*. 2024. Т. 1. № 16. С. 256–261.
2. Горский М. М. Логистическая цепь поставок: управление и оптимизация // *Сборник научных разработок аспирантов Московской международной академии*. 2024. № 2. С. 54–56.
3. Малышев А. Е. Анализ методов оптимизации управления логистической системой компании // *Вестник науки*. 2024. Т. 5. № 3 (72). С. 127–131.
4. Атаева А., Мяликов Н. Разработка системы управления цепочками поставок для повышения эффективности транспортной логистики // *Всемирный ученый*. 2024. Т. 1. № 21. 7 с.
5. Брынских И. Д., Синенков М. В. Методы оптимизации процесса перевозки грузов по распределительной сети // *Вестник науки*. 2024. № 4 (73). С. 41–45.
6. Какалыева А., Керими К. Оптимизация процессов в транспортной логистике: современные подходы, инновации и вызовы в контексте глобализации // *Всемирный ученый*. 2024. Т. 1. № 25. 8 с.
7. Новоселова В. М., Клековкин В. С. Оптимизация системы маршрутизации в транспортной логистике: принципы и перспективы // *Вестник науки*. 2024. № 5 (74). С. 1215–1222.
8. Калужский Г. Р. Формирование логистических решений управления транспортировкой в цепях поставок // *Экономика и социум*. 2024. № 3-1 (118). С. 653–656.
9. Данилочкина Н. Г., Лысенко А. А. Оптимизация логистических маршрутов посредством применения технологий искусственного интеллекта // *Научные труды*

References

1. Mammetesenova A., Gytratlyev S. Analysis of the Effectiveness of the Use of Various Modes of Transport in the Logistics Chain. *Vsemirnyy uchenyy*. 2024. Vol. 1. No. 16. pp. 256–261. (In Russ.).
2. Gorsky M. M. Logistics Supply Chain: Management and Optimization. *Collection of scientific developments of postgraduate students of the Moscow International Academy*. 2024. No. 2. pp. 54–56. (In Russ.).
3. Malyshev A. E. Analysis of Methods for Optimizing the Management of a Company's Logistics System. *Vestnik nauki*. 2024. Vol. 5. No. 3 (72). pp. 127–131. (In Russ.).
4. Ataeva A., Myalikov N. Development of a Supply Chain Management System to Improve the Efficiency of Transport Logistics. *Vsemirnyy uchenyy*. 2024. Vol. 1. No. 21. 7 p. (In Russ.).
5. Brynskikh I. D., Sinenkov M. V. Methods for Optimizing the Process of Cargo Transportation Along the Distribution Network. *Vestnik nauki*. 2024. No. 4 (73). pp. 41–45. (In Russ.).
6. Kakalyeva A., Kerimi K. Optimization of Processes in Transport Logistics: Modern Approaches, Innovations and Challenges in the Context of Globalization. *Vsemirnyy uchenyy*. 2024. Vol. 1. No. 25. 8 p. (In Russ.).
7. Novoselova V.M., Klekovkin V.S. Optimization of the Routing System in Transport Logistics: Principles and Prospects. *Vestnik nauki*. 2024. No. 5 (74). pp. 1215–1222. (In Russ.).
8. Kaluzhskiy G. R. Formation of Logistics Solutions for Transportation Management in Supply Chains. *Ekonomika i sotsium*. 2024. No. 3-1 (118). pp. 653–656. (In Russ.).
9. Danilochkina N. G., Lysenko A. A. Optimization of Logistics Routes Through the Use of Artificial Intelligence Technologies. *Nauchnyye trudy Vol'nogo*

- Вольного экономического общества России. 2024. Т. 246. № 2. С. 298–314.
10. Булатова Н. Н., Дудин В. С., Алексеев А. В. Формирование цифровой экосистемы региональной транспортно-логистической инфраструктуры // *π-Economy*. 2024. Т. 17. № 3. С. 68–80.
11. Рогулин Р. С. Обзор методов управления цепочками поставок: будущие, настоящие и прошлые подходы к моделированию // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент»*. 2023. № 2. С. 164–179.
12. Пономарева Е. С. Логистические риски в транспортной деятельности и способы их минимизации // *Молодой исследователь Дона*. 2024. № 9 (2). С. 58–61.
13. Акопова Е. С., Полуботко А. А., Самыгин С. И. Особенности стратегического планирования и управления логистическими цепями поставок // *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*. 2024. № 2. С. 103–108.
14. Кудряева Д. В. Анализ интенсивности загрузки транспортной сети для моделирования // *Системный анализ и логистика*. 2024. № 2. С. 40.
15. Иванова Л. Н. Методы построения эффективных транспортных маршрутов в логистике грузоперевозок // *Счисляевские чтения: актуальные проблемы экономики и управления*. 2024. № 12 (12). С. 113–121.
16. Dechter R., Pearl J. Generalized best-first search strategies and the optimality of A* // *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1985. Т. 32. № 3. С. 505–536. (In Eng.).
17. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. Т. 4. № 2. С. 100–107. (In Eng.).
- ekonomicheskogo obshchestva Rossii*. 2024. Vol. 246. No. 2. pp. 298–314. (In Russ.).
10. Bulatova N. N., Dudin V. S., Alekseev A. V. Formation of a Digital Ecosystem of Regional Transport and Logistics Infrastructure. *π-Economy*. 2024. Vol. 17. No. 3. pp. 68–80. (In Russ.).
11. Rogulin R.S. Review of Supply Chain Management Methods: Future, Present and Past Approaches to Modeling. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment»*. 2023. No. 2. pp. 164–179. (In Russ.).
12. Ponomareva E.S. Logistics Risks in Transport Activities and Ways to Minimize them. *Molodoy issledovatel' Dona*. 2024. No. 9 (2). pp. 58–61. (In Russ.).
13. Akopova E. S., Polubotko A. A., Samygin S. I. Features of Strategic Planning and Management of Supply Chain Logistics. *Gumanitarnyye, sotsial'no-ekonomicheskkiye i obshche-stvennyye nauki*. 2024. No. 2. pp. 103–108. (In Russ.).
14. Kudryaeva D. V. Analysis of the Intensity of Loading of the Transport Network for Modeling. *Sistemnyy analiz i logistika*. 2024. No. 2. P. 40. (In Russ.).
15. Ivanova L. N. Methods of Building Effective Transport Routes in the Logistics of Cargo *Transportation*. *Schislyayevskiy chteniya: aktual'nyye problemy ekonomiki i upravleniya*. 2024. No. 12(12). pp. 113–121. (In Russ.).
16. Dechter R., Pearl J. Generalized Best-First Search Strategies and the Optimality of A*. *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1985. Vol. 32. No. 3. pp. 505–536.
17. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. 1968. Vol. 4. No. 2. pp. 100–107.