Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ ИУ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА ИУ7 «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

«Методы мультикритериального поиска путей в графах»

Студент ИУ7-73Б ________________ **К. Д. Курачева**
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Руководитель ________________ **Т. А. Никульшина**
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Рекомендованная руководителем НИР оценка: ________________

2025 г.

РЕФЕРАТ

В научно-исследовательской работе рассматриваются методы мультикритериального поиска путей в графах.

В процессе работы проанализирована предметная область логистики и транспортных сетей, формализована задача мультикритериального поиска путей в графах в виде IDEF0-диаграммы. Проведён анализ методов решения задачи мультикритериального поиска путей, сформулированы критерии сравнения этих методов и проведён их сравнительный анализ по сформулированным критериям.

Работа содержит расчётно-пояснительную записку объёмом 21 с., включая 1 таблицу, 1 иллюстрацию, 1 приложение и список использованных источников из 17 наименований.

Ключевые слова: граф, многокритериальный поиск путей, Парето-оптимальность, доминирование, многокритериальная оптимизация, транспортные сети, логистика.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В задачах городской логистики может возникнуть необходимость поиска маршрута по нескольким критериям. Например, при мультимодальных поездках оптимизируют время с учётом расписаний и пересадок [1], а при проектировании транспортной сети сопоставляют стоимость, время и надёжность инфраструктуры [2].

Целью данной работы является исследование основных методов мультикритериального поиска путей в графах.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- проанализировать предметную область логистики и транспортных сетей;
- формализовать задачу мультикритериального поиска путей в графах в виде IDEF0 диаграммы;
- рассмотреть основные методы или группы методов решения задачи мультикритериального поиска путей;
- провести сравнительный анализ рассмотренных методов.

1 Анализ предметной области

Транспортная сеть — совокупность транспортных линий, соединяющих узлы (города, предприятия, перекрёстки); практически представляется как граф с вершинами — узлами и дугами — линейными участками. В логистике под транспортной сетью понимают пространственную сеть, обеспечивающую движение транспорта или потока товара [3]. Существуют комплексные транспортные сети, объединяющие автодорожные, железнодорожные, воздушные и водные сети и связанную инфраструктуру.

Логистика охватывает планирование и управление потоками грузов и пассажиров, опираясь на транспортную сеть: в закупочной, производственной, распределительной и транспортной логистике оптимизируют перемещение ресурсов с учётом разных критериев, в том числе времени, стоимости и надёжности.

1.1 Основные определения

1.1.1 Задачи оптимизации

В инженерных и прикладных задачах оптимизация рассматривается как процесс поиска такого состояния системы или конструкции, которое обеспечивает максимальное или минимальное значение заданной функции при фиксированных условиях [4].

Требуется найти вектор $\mathbf{x}^* = (x_1^*, \dots, x_j^*, \dots, x_n^*)^\intercal$, доставляющий минимум (максимум) функции $y = f(\mathbf{x})$ с заданной точностью ε, где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$.

Как правило, область допустимых значений D задаётся. Тогда задача формализуется целевой функцией в области допустимых значений D:

$$f(\mathbf{x}) \to \min_{\mathbf{x} \in D}, \quad f(\mathbf{x}) \to \max_{\mathbf{x} \in D} \tag{1.1}$$

Допустимым решением называется решение, удовлетворяющее всем ограничениям задачи, то есть принадлежащее множеству D.

Многокритериальная оптимизация (МКО) — это одновременная оптимизация минимум двух (и более) конфликтующих между собой целевых функций в заданной области определения [5].

Окончательное решение принимает человек, которого принято называть лицом, принимающим решение (ЛПР) [5].

В общем виде постановка задачи МКО может быть представлена в виде $\{D, f_1, \ldots, f_m\}$, где D — множество допустимых исходов, f_i — числовая функция, заданная на D; при этом $f_i(a)$ есть оценка исхода $a \in D$ по i-му критерию ($i = 1, \ldots, m$) [5]. Такая модель соответствует задаче принятия решений, в которой множество альтернатив соответствует множеству допустимых исходов, а оценочная структура задаётся вектором $(f_1, \ldots, f_m)$. Критерий f_i называется позитивным, если ЛПР стремится к его увеличению, и негативным, если ЛПР стремится к его уменьшению.

В задачах минимизации решение x_1 доминирует над решением x_2 ($x_1 \prec x_2$), в случаях [6]:

1. x_1 не хуже x_2 во всех целевых функциях;

2. x_1 строго лучше, чем x_2 по крайней мере по одной целевой функции.

Множеством Парето называется множество всех допустимых решений задачи многокритериальной оптимизации, которые не доминируются ни одним другим допустимым решением.

Фронт Парето — это множество всех векторных значений критериев, соответствующих решениям из множества Парето.

1.1.2 Задачи поиска путей в графе

Граф G состоит из двух множеств — множества вершин и множества рёбер, причём для каждого ребра указана пара вершин, которые это ребро соединяют. Вершины и рёбра называются элементами графа.

Ориентированный граф G задаётся двумя множествами $G = (V, E)$, где V — конечное множество, элементы которого называют вершинами (узлами); E — множество упорядоченных пар на V (подмножество $V \times V$), элементы которого называют дугами [7].

Если дуга $e = (u, v)$, то говорят, что дуга e ведёт из вершины u в вершину v, и обозначают это $u \to v$ [7].

Путь в ориентированном графе G — это последовательность вершин (конечная или бесконечная) $v_0, v_1, \ldots, v_n, \ldots$ такая, что $v_i \to v_{i+1}$ для любого i, если v_{i+1} существует [7].

Простой путь — это путь, все вершины которого, кроме, быть может, первой и последней, попарно различны [7].

Взвешенный граф — это граф, в котором каждому ребру присвоено числовое значение, называемое весом.

Однокритериальная задача поиска пути заключается в нахождении пути между двумя заданными вершинами взвешенного графа, при котором оптимизируется один скалярный критерий, обычно равный сумме весов рёбер на пути.

Векторная стоимость ребра — это обобщение понятия веса ребра во взвешенном графе, при котором каждому ребру сопоставляется вектор числовых значений, отражающих несколько критериев оценки (например, время, стоимость, надёжность). Каждому ребру $v \in E$ ставится в соответствие вектор

$$w(v) = \big(w_1(v), w_2(v), \ldots, w_m(v)\big),$$

где каждая компонента соответствует отдельному критерию оптимальности.

Стоимость пути в пространстве критериев — это вектор, получаемый агрегированием векторных стоимостей всех рёбер, входящих в данный путь, и отражающий значения каждого критерия для всего пути в целом. Для пути

$$P = \langle v_1, v_2, \ldots, v_k \rangle$$

его стоимость определяется как

$$W(P) = \sum_{i=1}^{k} w(v_i),$$

где суммирование выполняется покомпонентно. Полученный вектор используется для сравнения путей на основе отношения доминирования или других правил многокритериального сравнения.

Нормализация и масштабирование критериев — это процедуры преобразования значений критериев к сопоставимому числовому масштабу, применяемые в многокритериальных задачах для устранения различий в размерностях и диапазонах значений. Нормализация обычно сводит значения критериев к безразмерному интервалу $[0, 1]$, тогда как масштабирование изменяет диапазон значений с сохранением относительных пропорций.

2 Формализация задачи

Задача мультикритериального поиска путей в графе формально определяется как поиск множества Парето-оптимальных путей в ориентированном графе $G(V, E)$ от стартовой вершины $n_S \in V$ до конечной $n_{End} \in V$, где каждый путь $p_i = (n_S, \ldots, n_{End})$ имеет переменную длину K и оценивается по набору целевых функций $\vec{f}(p)$, подлежащих минимизации [8]. Эта задача является обобщением классической задачи поиска кратчайшего пути и также известна в англоязычной литературе как Multi-Objective Shortest Path Problem (MOSP Problem).

Следует отметить, что в зависимости от класса применяемых методов под решением многокритериальной задачи поиска путей может пониматься либо точное построение множества Парето-оптимальных путей, либо получение его аппроксимации. Точные методы ориентированы на полное перечисление множества Парето, тогда как эвристические и популяционные методы позволяют получить приближённое представление фронта Парето при приемлемых вычислительных затратах.

Под компромиссным путём далее будет пониматься путь, который либо является Парето-оптимальным, либо принадлежит аппроксимации множества Парето и не доминируется другими допустимыми путями в рамках принятой точности аппроксимации.

Ниже представлена IDEF0-диаграмма решения задачи мультикритериального поиска путей в графе.

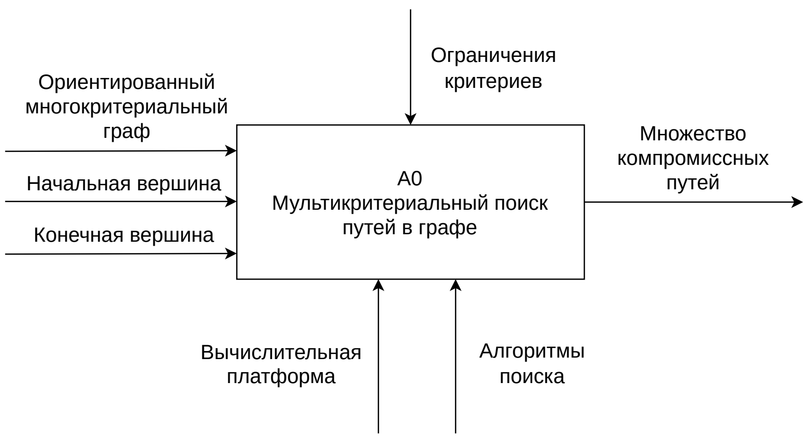

Рисунок 2.1 – IDEF0-диаграмма решения задачи мультикритериального поиска путей в графе

3 Основные методы

3.1 Методы скаляризации

В задачах многокритериального поиска путей в графах методы скаляризации применяются для сведения исходной векторной задачи оптимизации к последовательности однокритериальных задач поиска пути. В качестве допустимых решений рассматриваются пути в графе, соединяющие заданные начальную и конечную вершины. Каждому пути p ставится в соответствие вектор значений частных критериев $f(p) = (f_1(p), \ldots, f_m(p))$, которые определяют показатели качества данного пути. Значения частных критериев $f_i(p)$ вычисляются путём агрегирования стоимостей рёбер, входящих в рассматриваемый путь. Скаляризация заключается в построении скалярной целевой функции $J(f(p))$, значения которой используются для сравнения допустимых путей в рамках однокритериальной задачи оптимизации.

В результате применения методов скаляризации исходная многокритериальная задача поиска путей сводится к однокритериальной задаче на графе. Для её решения могут применяться классические алгоритмы поиска кратчайшего пути в графе или их модификации.

3.1.1 Метод главного критерия

Метод предполагает выбор одного функционала $f_i(x)$ в качестве целевой функции. Остальные требования к результату, описываемые функционалами f_1, ... , f_m, учитываются с помощью введения необходимых дополнительных ограничений [9]. Тогда многокритериальная задача сводится к однокритериальной, вида:

$$f_1(x) \to \max_{x \in D'}, D' \subseteq D \subseteq \mathbb{R}^n, D' = \{x \in D \mid f_i(x) \geqslant t_i,\ i = 2, \ldots, m\}. \quad (3.1)$$

где D' — новое допустимое множество, t_i задают минимально допустимые уровни по второстепенным критериям.

Подход требует обоснованного выбора «главного» критерия из многих.

3.1.2 Линейная свёртка

Данный метод позволяет заменить векторный критерий оптимальности $f = (f_1, \dots, f_m)$ на скалярный $J\colon D \to R$. Все частные целевые функционалы линейно объединяются в один скаляр с помощью весов α_i:

$$J(x) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i f_i(x) \to \max_{x \in D}, \tag{3.2}$$

где $\alpha_i \geqslant 0$, а $\sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1$.

Весовые коэффициенты i могут при этом рассматриваться как показатели относительной значимости отдельных критериальных функционалов f_i [9]: чем важнее f_i, тем больше должно быть α_i.

3.1.3 Максиминная свёртка

В данном методе, в отличие от метода линейной свёртки, на целевой функционал $J(x)$ оказывает влияние только тот частный критерий оптимальности, которому в данной точке x соответствует наименьшее значение функции $f_i(x)$:

$$J(x) = \min f_i(x) \to \max_{x \in D}. \tag{3.3}$$

Если в случае линейной свёртки, возможны «плохие» значения некоторых f_i за счёт достаточно «хороших» значений остальных целевых функционалов, то в случае максиминного критерия производится расчёт «на наихудший случай» [9]. Так, по значению $J(x)$ можно определить гарантированную нижнюю оценку для всех функционалов $f_i(x)$. Этот факт расценивается как преимущество максиминного критерия перед методом линейной свёртки [9].

Следует отметить, что методы скаляризации в общем случае не позволяют получить всё множество Парето-оптимальных путей. В зависимости от выбранной функции свёртки и её параметров может быть найдено отдельное Парето-оптимальное решение или компромиссный путь, обеспечивающий приемлемое соотношение между критериями.

3.2 Точные методы

Точные методы вычисляют полное множество Парето-оптимальных путей, обеспечивая получение всех недоминируемых решений. Их основной практический предел связан с тем, что количество таких путей может расти экспоненциально даже на графах умеренного размера [10; 11].

3.2.1 Меточные методы

Основная идея меточных методов состоит в последовательном построении и обновлении множества недоминируемых промежуточных путей, каждый из которых представлен меткой, содержащей вектор значений критериев. В отличие от однокритериального случая, где каждой вершине соответствует единственная метка, многокритериальная постановка приводит к необходимости хранения множества недоминируемых меток, каждая из которых описывает отдельный уникальный недоминируемый путь.

В зависимости от того, к какому элементу графа привязывается метка, различают два класса методов: вершинно-меточные и дугово-меточные. В вершинно-меточных методах метка ассоциируется с вершиной графа и представляет состояние пути при достижении этой вершины. В дугово-меточных методах метка привязывается к состоянию пути непосредственно после прохождения определённой дуги, а обновление метки осуществляется посредством применения дуговой функции расширения при добавлении очередной дуги к частичному пути.

В обоих классах методов на каждой итерации выбирается необработанная метка, выполняется расширение соответствующего подпути, формируются новые метки и проводится проверка доминирования. Метка сохраняется для дальнейшего расширения, если она не доминируется существующими метками для того же состояния пути, а все доминируемые метки удаляются. Процесс продолжается до тех пор, пока множество необработанных меток не станет пустым, что гарантирует построение полного множества недоминируемых путей. В зависимости от стратегии выбора меток выделяют метко-установочные и метко-исправляющие алгоритмы, применимые как в вершинной, так и в дуговой формулировке [10; 11]:

– Метко-установочные (label-setting): метки сканируются таким образом, что хотя бы одна метка становится финальной, означая, что наилучший путь из s в определённую вершину найден. Для этой техники требуется гарантировать, что выбранная метка может стать окончательно недоминируемой;

– Метко-исправляющие (label-correcting): любая метка может обновляться до тех пор, пока не выполнится условие остановки.

3.2.2 Методы ветвей и границ

Методы ветвей и границ (branch-and-bound) для многокритериальной оптимизации основаны на поэтапном разбиении исходной задачи на подзадачи и оценке их границ. В многокритериальной версии метода каждая подзадача сопровождается нижней оценкой, отражающей достижимые значения критериев, и набором найденных недоминируемых решений, используемых в качестве верхней границы. Подзадача исключается из рассмотрения, если при учёте наложенных ограничений в ней не существует ни одного допустимого решения, если её нижняя оценка совпадает с найденным решением или если она полностью доминируется текущим множеством недоминируемых точек [12].

Алгоритм многокритериального метода ветвей и границ работает итеративно. На каждом шаге выбирается подзадача для обработки в соответствии со стратегией выбора. После этого для выбранной подзадачи вычисляется нижняя оценка. Если на этапе вычисления обнаружено допустимое решение, оно сравнивается с текущим множеством найденных решений и, при необходимости, обновляет его. Определяется, подлежит ли подзадача отсечению. Если отсечение невозможно, выполняется ветвление: исходная подзадача разбивается на две новые, каждая из которых добавляется в список необработанных подзадач. Процесс повторяется до тех пор, пока все подзадачи не будут обработаны или отброшены.

3.3 Метаэвристические методы

Метаэвристические методы предназначены для получения приближённого множества Парето-оптимальных путей при ограниченных вычислительных ресурсах. В отличие от точных методов, они не гарантируют нахождения всего множества Парето, однако способны эффективно работать на графах большой размерности и обеспечивать разнообразие найденных решений [13].

3.3.1 Эволюционные алгоритмы

Эволюционные алгоритмы представляют собой класс стохастических методов поиска, вдохновлённых идеями естественного отбора и генетики.

В этих алгоритмах используется популяция решений, каждое из которых кодирует допустимую точку пространства поиска (в рассматриваемой задаче — путь в графе).

Классический эволюционный алгоритм включает следующие этапы [13]:

1. генерация начальной популяции;

2. оценка качества особей;

3. отбор родительских решений;

4. применение операторов вариации (скрещивания и мутации);

5. формирование новой популяции.

В эволюционных алгоритмах поддерживается множество потенциальных решений, для которых на каждой итерации проводится оценка качества. Однако в многокритериальных задачах качество решения не может быть выражено одним скалярным показателем. Вместо этого рассматривается множество недоминируемых решений [13]. Поэтому используется отношение доминирования по Парето, а целью эволюционного алгоритма является приближение множества Парето-оптимальных путей.

Для эволюционных алгоритмов над маршрутами естественными являются следующие типы операторов:

– мутация: локальное изменение пути, например вставка новой вершины, замена части маршрута альтернативным подмаршрутом, удаление циклов;

– скрещивание: обмен подмаршрутами между двумя родительскими путями при условии сохранения связности и допустимости результата.

Показано [14], что простой эволюционный алгоритм, применённый к многокритериальной задаче кратчайшего пути, может обладать строгими аппроксимационными гарантиями: он обеспечивает построение приближённого множества Парето за полиномиальное время относительно размера входных данных.

3.3.2 Методы роя частиц

Методы роя частиц относятся к популяционным метаэвристикам и основаны на идее коллективного поведения групп организмов, таких как стаи птиц или косяки рыб. В исходной версии алгоритм был предложен Кеннеди и Эберхартом в 1995 году [4].

В рассматриваемой задаче каждая частица представляет собой допустимый маршрут в графе. Для частицы вычисляется вектор значений критериев, отражающий качество маршрута. Сравнение решений выполняется с помощью отношения доминирования по Парето.

Алгоритм поддерживает популяцию частиц и внешний архив недоминируемых решений. Архив служит ориентиром для поиска, поскольку в многокритериальной задаче отсутствует единственное оптимальное решение. Каждая частица также запоминает своё личное лучшее состояние.

Положение частиц обновляется через дискретные изменения маршрутов, направленные на приближение к личному лучшему решению и выбранному элементу архива. После изменения маршруты корректируются, чтобы оставаться допустимыми (например, удаляются циклы). Далее новые решения сравниваются с архивом: доминируемые исключаются, недоминируемые добавляются. Если архив становится слишком большим, из него удаляют решения из областей с высокой плотностью, чтобы сохранять равномерное представление фронта Парето.

На выходе алгоритм формирует множество недоминируемых маршрутов, которое является приближением множества Парето для многокритериальной задачи поиска пути.

4 Сравнение основных методов

Для сравнения групп методов, рассмотренных ранее, выделены следующие критерии:

1. Доступность: способность метода корректно находить Парето-оптимальные пути в невыпуклых областях фронта Парето.
2. Точность: способность получать точные Парето-оптимальные решения.
3. Полнота: способность метода получать полное множество Парето-оптимальных путей.
4. Вычислительная сложность.

Таблица 4.1 – Сравнение групп методов решения многокритериальной задачи поиска путей

Методы	**Доступность**	**Точность**	**Полнота**	**Вычислительная сложность**
Методы скаляризации	+/–	–	–	Полиномиальная [15]
Точные методы	+	+	+	Экспоненциальная [11]
Метаэвристические методы	+	–	–	Полиномиальная [16; 17]

На основе таблицы можно сформулировать следующие выводы:

— Методы скаляризации характеризуются низкой вычислительной сложностью и обеспечивают высокую доступность решений при выпуклом фронте Парето, однако не позволяют корректно восстанавливать невыпуклые области, не обеспечивают точности в таких случаях и не гарантируют полноты множества Парето-оптимальных путей.

— Точные методы обладают максимальной доступностью, обеспечивают получение полностью корректного и полного множества Парето-оптимальных путей с высокой точностью, но их практическое применение существенно ограничено экспоненциальной вычислительной сложностью, обусловленной ростом количества недоминируемых меток.

— Метаэвристические методы демонстрируют высокую доступность и способны находить решения в невыпуклых областях фронта Парето, однако предоставляют только приближённые результаты, не обеспечивают точности и не гарантируют полноты множества Парето-оптимальных путей, несмотря на полиномиальную вычислительную сложность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены группы методов решения задачи мультикритериального поиска путей в графах. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что универсального метода, одновременно обеспечивающего высокую точность, полноту и низкую вычислительную сложность, не существует. Можно сделать вывод о том, что при выборе подхода необходимо пойти на компромисс между требуемым качеством решения и допустимыми ресурсными затратами.

Цель данной работы была выполнена.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- проанализирована предметная область логистики и транспортных сетей;
- в виде IDEF0 диаграммы формализована задача мультикритериального поиска путей в графах;
- рассмотрены основные методы решения задачи мультикритериального поиска путей;
- проведён сравнительный анализ рассмотренных методов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Тесля Н. Н.* Учет расписания общественного транспорта при планировании индивидуальной мультимодальной поездки // Intellectual Technologies on Transport. — 2016. — № 2.
2. *Медведева Н. А.*, *Шварцфельд В. С.* Многокритериальный подход к отбору вариантов создания сети железных дорог // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21, № 2. — С. 398—408. — DOI: `10.20295/1815-588X-202402-398-408`.
3. *Шайтура С. В.* Распределенное управление в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. — 2017. — № 3. — С. 25—34.
4. *Верещага А. Н.* Методы оптимального проектирования и междисциплинарной оптимизации. Основы. — Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2023. — 336 с. — ISBN 978-5-9515-0524-8. — УДК 519.8; ББК 22.18.
5. *Хмелевский В. Е.* Применение методов многокритериальной оптимизации для определения оптимального варианта покупки жилой недвижимости //. — Минск : БГУ, 2024. — С. 611—614. — ISBN 978-985-881-663-6.
6. *Полковникова Н. А.*, *Курейчик В. М.* Многокритериальная оптимизация на основе эволюционных алгоритмов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2024. — УДК 004.891.
7. *Белоусов А. И.*, *Ткачев С. Б.* Дискретная математика / под ред. В. С. Зарубин, А. П. Крищенко. — 8-е изд. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025. — 704 с. — ISBN 978-5-7038-6517-0.
8. *Maristany de las Casas P.*, *Sedeño-Noda A.*, *Borndörfer R.* An Improved Multiobjective Shortest Path Algorithm // Computers and Operations Research. — 2021. — Т. 135. — С. 105424. — ISSN 0305-0548. — DOI: `10.1016/j.cor.2021.105424`.
9. *Аванский С. М.* Проблемы многокритериальной оптимизации // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 1. — 2007. — С. 161—162.

10. *Paixão J. M.*, *Santos J. L.* Labelling Methods for the General Case of the Multi-Objective Shortest Path Problem – A Computational Study // Preprint of the Department of Mathematics, University of Coimbra. — 2007. — № 07—42. — С. 1—23.

11. *Euler R.*, *Maristany de las Casas P.* Labeling Methods for Partially Ordered Paths // European Journal of Operational Research. — 2024.

12. *Bauß J.*, *Parragh S. N.*, *Stiglmayr M.* Adaptive Improvements of Multi-Objective Branch and Bound. — 2023.

13. *Pangilinan J. M. A.*, *Janssens G. K.* Evolutionary Algorithms for the Multi-Objective Shortest Path Problem // International Journal of Applied Science, Engineering and Technology. — 2007. — Т. 4, № 1. — С. 205—210.

14. *Horoba C.* Analysis of a Simple Evolutionary Algorithm for the Multiobjective Shortest Path Problem // Proceedings of the 10th Workshop on Foundations of Genetic Algorithms. — 2009.

15. Theoretical Time Complexity of Dijkstra's Algorithm Variants: A Review / K. Charan [и др.]. — 2025. — Июль.

16. Ant Colony Optimization: An Advanced Approach to the Traveling Salesman Problem / B. May [et al.]. — Provo, UT, USA, 2023.

17. *Bian C.*, *Qian C.* Running Time Analysis of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) using Binary or Stochastic Tournament Selection. — 2022.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Презентация к научно-исследовательской работе состоит из 3 слайдов.