

На правах рукописи



**БЕЛЫХ Михаил Алексеевич**

**ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ  
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ  
ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Барabanов Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Громов Юрий Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», директор института автоматизации и информационных технологий

**Медведева Ольга Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», доцент кафедры вычислительной математики и прикладных информационных технологий

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет»**

Защита состоится 28 февраля 2025 г. в 12<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.031.03, созданного на базе ВГТУ, ВГУ и ЛГТУ, по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, аудитория 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан «10» января 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 99.2.031.03,  
доктор технических наук, профессор



Белецкая  
Светлана Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Многокритериальная оптимизация является одной из ключевых задач в производстве, логистике, информационных технологиях и т. д. Решение задачи многокритериальной оптимизации позволяет обеспечить снижение расходов и издержек, определить оптимальный план действий или эффективнее распределить имеющиеся ресурсы, учитывая множество возможных факторов.

Для решения задач многокритериальной оптимизации нередко используются эволюционные алгоритмы, в число которых входят, например, генетические алгоритмы (ГА), алгоритм муравьиной колонии (АМК) и алгоритм пчелиной колонии (АПК). Данный тип алгоритмов применяется как в своих классических формулировках, так и с применением различных модификаций, направленных на улучшение эффективности поиска. Для решения каждой задачи оптимизации может быть пригодно несколько алгоритмов, однако для подбора наиболее оптимального алгоритма имеет место применение адаптивных систем поддержки принятия решений, способных предоставить рекомендации относительно наиболее подходящего для решения конкретной задачи алгоритма.

Также для адаптивных систем характерным и обязательным является наличие математического описания решаемой задачи. Это позволяет системе получить предельно четкие формулировки требований и ограничений, накладываемых на конкретную задачу, а также оценить приемлемость применения для ее решения конкретного алгоритма.

Для адаптивной системы поддержки принятия решений имеет место необходимость разработки механизмов проверки текущего решения и переключения активного алгоритма. В данном контексте под адаптацией понимается возможность системы настроить (или предложить) инструменты для решения задачи оптимизации, основываясь на результатах предыдущих решений схожих по критериям задач, а также с возможностью внесения изменений в алгоритм, который уже используется для проведения вычислений, основываясь на анализе получаемых решений в предыдущих итерациях. Механизм проверки текущего решения подразумевает отслеживание состояния решения в процессе работы алгоритма. Механизм переключения характеризуется возможностью замены активного алгоритма.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью разработки алгоритмического обеспечения для системы, способной получать оптимальные решения многокритериальных задач оптимизации, адаптироваться к изменениям результатов получаемых решений с целью их улучшения и обладающей механизмами проверки текущего решения и модификации алгоритмов в ходе выполнения вычислений.

Разработками и исследованиями в области эволюционных алгоритмов, задач оптимизации и адаптивных систем занимаются такие ученые, как Громов Ю.Ю., Золотарюк А.В., Кажанов А.А., Курейчик В.М., Ногин В.Д., Пересветов В.В., Подвальный С.Л., Подиновский В.В., Штовба С.Д., Ven Hamida S, Dorigo

M., Hwang C.L., Karaboga D., Li J.-Y., Seif M.S., Wierzbicki A.P., Zhang Q. и др. Все перечисленные ученые отмечают сложность и важность поиска оптимального решения многокритериальных транспортных задач.

Вышесказанное определяет **практическую задачу** – повышение эффективности решения многокритериальных транспортных задач оптимизации за счет сокращения времени расчета (переключением активного алгоритма) путем создания адаптивной системы поддержки принятия решений с использованием эволюционных алгоритмов.

При этом необходимо рассмотреть **научную задачу**, заключающуюся в разработке специализированных моделей, механизмов модификации эволюционных алгоритмов, структуры адаптивной системы при многокритериальной оптимизации транспортной задачи.

Тематика диссертационной работы соответствует научному направлению ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

**Объект исследования:** системы поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи с использованием эволюционных алгоритмов.

**Предмет исследования:** эволюционные алгоритмы для адаптивных систем поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи.

**Целью работы** является повышение эффективности адаптивной системы поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи за счет модифицированных эволюционных алгоритмов.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести комплексный анализ существующих эволюционных алгоритмов, применяемых для решения многокритериальной транспортной задачи оптимизации.

2. Разработать специализированное математическое описание многокритериальной транспортной задачи оптимизации.

3. Оценить эффективность и предложить модификации эволюционных алгоритмов: генетического алгоритма, алгоритма муравьиной колонии и алгоритма пчелиной колонии. Разработать механизмы проверки текущего решения.

4. Разработать структуру адаптивной системы поддержки принятия решений, основанной на модифицированных эволюционных алгоритмах.

5. Провести апробацию адаптивной системы поддержки принятия решений многокритериальной оптимизации транспортной задачи.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в ходе работы над диссертационным исследованием использовались методы теории системного анализа, принятия решений, оптимизации, эволюционных алгоритмов, адаптивных систем, специального математического обеспечения.

**Тематика работы** соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»: п. 5. «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 9. «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

**Научная новизна работы.** К результатам работы, отличающимся научной новизной, относятся следующие материалы:

1. Специализированное математическое описание многокритериальной транспортной задачи оптимизации с временными ограничениями, позволяющее применять адаптивный механизм поиска решения и отличающееся использованием модифицированных эволюционных алгоритмов.

2. Механизм модификации эволюционных алгоритмов (генетический, муравьиной колонии, пчелиной колонии), позволяющий ускорить процесс решения многокритериальных задач оптимизации (посредством варьирования правил скрещивания и мутаций, отбора, формирования новых популяций, изменения феромона и т.д.) и отличающийся учетом результатов предыдущих решений.

3. Адаптивный механизм проверки текущего решения, отличающийся учетом скорости на каждой итерации результатов для последующей обработки и внесения оперативных корректировок в системе поддержки принятия решений.

4. Структура адаптивной системы поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи, позволяющая производить ускоренный поиск и оптимизацию и отличающаяся использованием базы знаний, содержащей данные о полученных ранее решениях.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в развитии методов системного анализа для построения адаптивной системы поддержки принятия решений на базе эволюционных алгоритмов, разработке модификаций эволюционных алгоритмов с целью улучшения их вычислительных возможностей и формировании механизмов анализа решения и подбора эффективного алгоритма для решения транспортной задачи оптимизации.

**Практическая значимость исследования** заключается в реализации специализированного программного обеспечения в виде адаптивной системы поддержки принятия решений, направленной на эффективное решение многокритериальных транспортных задач оптимизации.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Специализированное математическое описание многокритериальной задачи оптимизации (транспортной задачи поиска оптимального маршрута) предполагает использование модифицированных эволюционных алгоритмов.

2. Механизм модификации эволюционных алгоритмов (генетический, муравьиный и пчелиный) для решения многокритериальной транспортной задачи поиска оптимального маршрута обеспечивает большую эффективность и скорость проведения расчетов.

3. Адаптивный механизм проверки текущего решения позволяет отслеживать скорость получаемых в процессе работы результатов и влиять на выбор алгоритма, модифицируя или заменяя его на другой.

4. Структура адаптивной системы поддержки принятия решений при поиске оптимального маршрута базируется на модифицированных эволюционных алгоритмах и обеспечивает адаптивное переключение алгоритмов при расчете, основываясь на анализе предыдущих решений.

**Реализация и внедрение результатов работы.** В рамках диссертационной работы был реализован программный компонент «Адаптивная система поддержки принятия решений». Разработанные материалы внедрены в образовательный и научно-исследовательский процесс кафедры автоматизированных и вычислительных систем Воронежского государственного технического университета, а также в компаниях «Девелоперс», «АЙТИ Комфорт», «КИИНАЙ».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XIV Международной научно-практической конференции «Антропоцентрические науки: Инновационный взгляд на образование и развитие личности» (Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 19-20 апреля 2021), на 61-ой, 62-ой, 64-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов в рамках Дней науки ВГТУ (Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2021, 2022, 2024 гг.), на Международной научно-практической конференции «НаБиТэм-2024» (Липецк, Липецкий государственный технический университет, 27-28 февраля 2024).

Достоверность результатов обусловлена корректным использованием теоретических методов исследования и подтверждена результатами сравнительного анализа данных вычислительных экспериментов.

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 12 научных работ (1 – без соавторов), в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце реферата, лично автором получены следующие результаты: [1, 6, 7] – структура интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов, описание подсистем; [2] – алгоритмическое обеспечение эволюционных алгоритмов; [3, 8, 9, 10] – модификации муравьиного алгоритма и формализация задач оптимизации; [11] – формализация задачи оптимизации на примере мониторинга состояний; [12] – математическая формулировка эволюционных алгоритмов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 125 наименований, приложений. Текст диссертации изложен на 128 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, формулируются цель и задачи, объект и предмет исследований. Также отмечаются научная новизна, практическая значимость и основные положения защищаемой работы, предоставляются сведения о проведенной апробации и внедрении полученных результатов.

**В первой главе** производится системный анализ методов решения задач многокритериальной оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов.

Одной из разновидностей задач оптимизации является задача поиска оптимального маршрута, к которой относятся задача коммивояжера (классическая и с временными ограничениями) и транспортная задача (классическая и многокритериальная).

Одним из перспективных и эффективных инструментов, применяемых для решения задач многокритериальной оптимизации, являются эволюционные алгоритмы.

Существующие готовые программные пакеты (AntColonySystem, ABC2 и др.), в которых реализованы эволюционные алгоритмы, имеют существенный недостаток – высокая требовательность к навыкам пользователей и узкая специализация, которая не позволяет объединить несколько алгоритмов под одним интерфейсом, не говоря о том, чтобы переключать алгоритмы для улучшения получаемых результатов.

На основе анализа различных источников, сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** осуществлена формализация многокритериальной транспортной задачи оптимизации в виде специализированного математического описания и модификаций эволюционных алгоритмов.

Пусть на момент времени  $t$  имеется автопарк из набора однотипных транспортных средств (ТС) в количестве  $k$  единиц ( $k = \overline{1, K}$ ) и набор заказов  $j = \overline{1, J}$ . Каждое ТС, как и каждый заказ, характеризуется определенным набором координат  $(x_i, y_i)$ . Также имеется некоторый набор узлов, каждый из которых является некоторой точкой из имеющихся координат, и временное окно  $t_j^* \in [t_j^{opn}, t_j^{cls}]$  для каждого заказа, характеризуемое отрезком времени со значениями открытия и закрытия доступа ( $t_j^{opn}$  и  $t_j^{cls}$  соответственно). Спецификой данной задачи является фактор ее решения в любой момент времени, что означает возможность изменения координат ТС. В связи с этим введем в рассмотрение функцию  $\rho(k, j, t)$ , которая будет определять расстояние от ТС  $k$  до поставщика  $j$  в момент времени  $t$ . Также введем функцию  $f(\cdot)$ , определяющую стоимость маршрута для данного ТС по данному расстоянию. Выполнение заказа может быть связано с поездкой, которая характеризуется определенным временем выполнения.

Целевые функции (ЦФ) данной задачи описываются как

$$F_1 = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j_1=1}^J x_{kj} \left( f(k, \rho(k, j_1, t)) + f(k, \rho(j_1, j_2)) \right), \quad (1)$$

$$F_2 = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{kj} h_{kj}, \quad (2)$$

$$F_3 = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j_1=1}^J x_{kj} t_{kj}, t_{kj} > 0, \quad (3)$$

где  $F_1$  – минимизация стоимости суммарного маршрута всех ТС,  $F_2$  – максимизация степени важности перевозок,  $F_3$  – минимизация общего времени на выполнение перевозок,  $x_{kj} \in X$  определяется как

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если ТС } k \text{ следует к заказу } j, (k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J}), \\ 0, & \text{в обратном случае} \end{cases} \quad (4)$$

$j_1$  – некоторый заказ из множества заказов  $J$ ,  $j_2$  – конечная точка для заказа  $j_1$ ,  $h_{kj} \in (0, 1]$  ( $h_{kj} \in H$ ) – степень важности выполнения конкретного заказа,  $t_{kj} \geq 0$  ( $t_{kj} \in T$ ) – время выполнения ТС  $k$  заказа  $j$ .

Временными ограничениями являются следующие. Функция  $T(\cdot)$  определяет длительность пребывания в пути, задаваемом расстоянием  $\rho$ . Тогда

$$\sum_{k=1}^K x_{kj} T(\rho(k, j, t)) \leq t_j^{cls} (j = \overline{1, J}) \quad (5)$$

и дополнительно, с учетом существования временных окон, накладывается ограничение-запрет на посещение вне временного окна

$$x_{kj} T(\rho(k, j, t)) \in t_j^* (k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J}). \quad (6)$$

Сформулированная задача может быть определена в виде

$$F = \min\{F_1, -F_2, F_3\} \quad (7)$$

либо

$$F = \max\{-F_1, F_2, -F_3\} \quad (8)$$

в зависимости от того, какой из критериев (либо минимизация стоимости или минимизация времени, либо максимизация важности) будет являться преобладающим.

Модификации эволюционных алгоритмов преследуют одну основную цель: видоизменить механизм работы алгоритма так, чтобы на выходе был получен наиболее оптимальный вариант решения поставленной задачи за наименьшее возможное время.

Основные известные модификации АМК (например, система элитных муравьев и ММАС) предлагают ускорение процесса поиска путем сокращения числа рассматриваемых маршрутов посредством влияния на формирование и изменение феромона. Модификации ГА позволяют влиять на различные его



аспекты: правила скрещивания и мутации, принципы осуществления отбора, алгоритмы формирования новых популяций и т. д. Изменения алгоритма направлены как на снижение времени поиска (например, TLP), так и на повышение качества решения (например, модель Голденберга). Модификации АПК нередко представляют из себя изменения алгоритма в соответствии с задачей (например, N(Sol)) и работают в тандеме, например, с другими алгоритмами.

В рамках диссертационного исследования в состав адаптивной системы введен как механизм базовых модификаций (например, влияющих на правила формирование или изменения феромона в АМК или корректировка правил мутации в ГА), так и возможность внедрения более масштабных модификаций, например, как упомянутые выше MNAS, модели Голденберга и M(Sol). Последнее подразумевает возможность дальнейшего функционального расширения адаптивной системы.

Также для адаптивной системы поддержки принятия решений был разработан механизм проверки решения и переключения алгоритма. В ходе вычислительных экспериментов осуществляется контроль текущего решения (рисунок 1). Он представляет собой процесс проверки и анализа, проводимый после каждой итерации в ходе решения задачи. Его целью является выявление наличия или отсутствия улучшения получаемых результатов в сравнении с предыдущими в течение нескольких итераций подряд. Число итераций проверки может быть задано адаптивной системой по умолчанию или выставлено пользователем.

В случае отсутствия видимых улучшений результатов (разница между полученным в текущей и предыдущей итерациях решений не достигает установленного порога) в течение нескольких итераций подряд механизм контроля передает данные основной системе и пользователю для дальнейшей корректировки – применения модификации для активного алгоритма либо его замены на другой доступный (рисунок 2). Под модификацией алгоритма понимается как внесение корректировок в текущие настройки (например, изменение значений коэффициентов для АМК), так и применение, например, других методов отбора в ГА.

**В третьей главе** приводится общая структура работы адаптивной системы поддержки принятия решений (АСППР) при многокритериальной оптимизации (рисунок 3).

В состав данной системы входят следующие элементы: модуль пользовательского интерфейса; модуль типовых настроек; модуль математического ядра поддержки ЭА; модуль настройки системы; модуль формирования ЦФ; модуль справочной системы; модуль визуализации.

Взаимодействие с модулем визуализации основывается на преобразовании исходных данных для АСППР и результатов работы каких-либо ЭА в графический вид, например, изображение (рисунок 4), график, блок-схема и т.д. В данном случае подразумевается возможность отрисовки данным модулем графических примитивов.

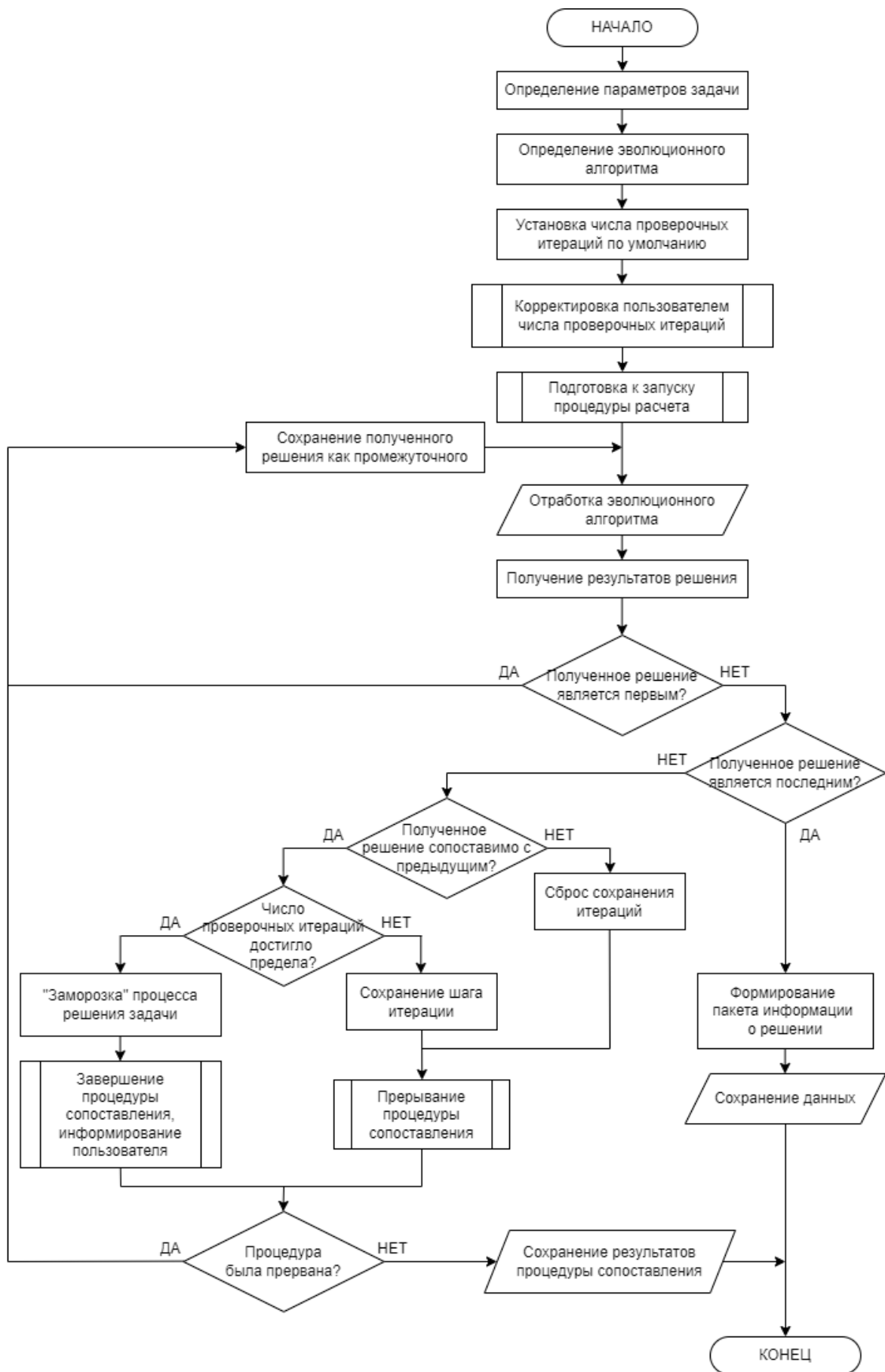


Рис. 1 – Схема проверки текущего решения задачи оптимизации

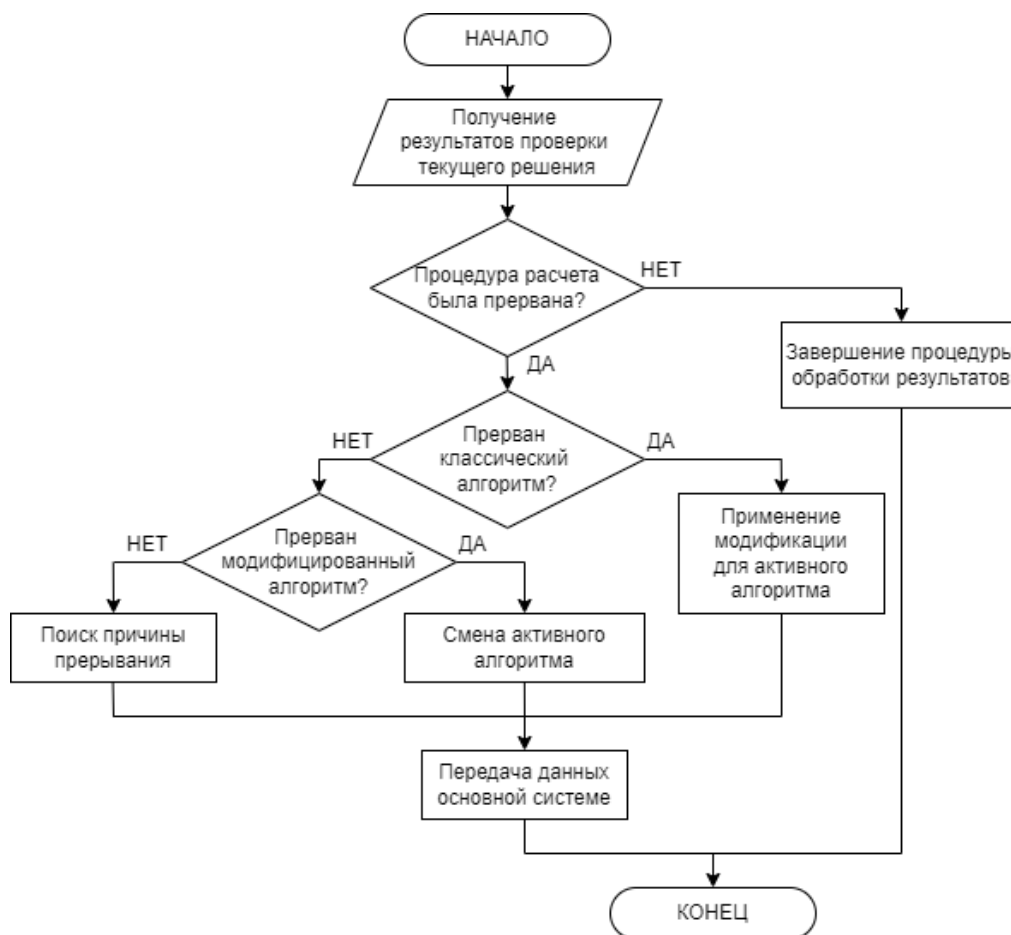


Рис. 2 – Схема смены алгоритмов с использованием механизмов модификации

Для использования механизмов базы знаний, включающих в себя базу данных решенных задач с указанием использованного алгоритма и результатов решения задачи оптимизации и правила оценивания, был сформирован ряд правил в формате «ЕСЛИ [условие] ТО [действие]»:

- ЕСЛИ [прерван классический ГА] ТО [использовать другую модификацию ГА];
- ЕСЛИ [время решения активного алгоритма больше, чем  $T_{calc}$ ] ТО [заменить активный алгоритм];
- ЕСЛИ [прерван модифицированный АПК] ТО [определить причину прерывания процедуры решения];
- ЕСЛИ [запрос на изменение активного алгоритма] ТО [предложить альтернативный алгоритм];
- ЕСЛИ [выбран активный алгоритм] ТО [выбрать модификацию активного алгоритма].

Здесь  $T_{calc}$  – время расчета, отведенное системой для получения решения задачи оптимизации и установленное пользователем. Под активным алгоритмом подразумевается тот, который в данный момент времени производит решение задачи оптимизации.

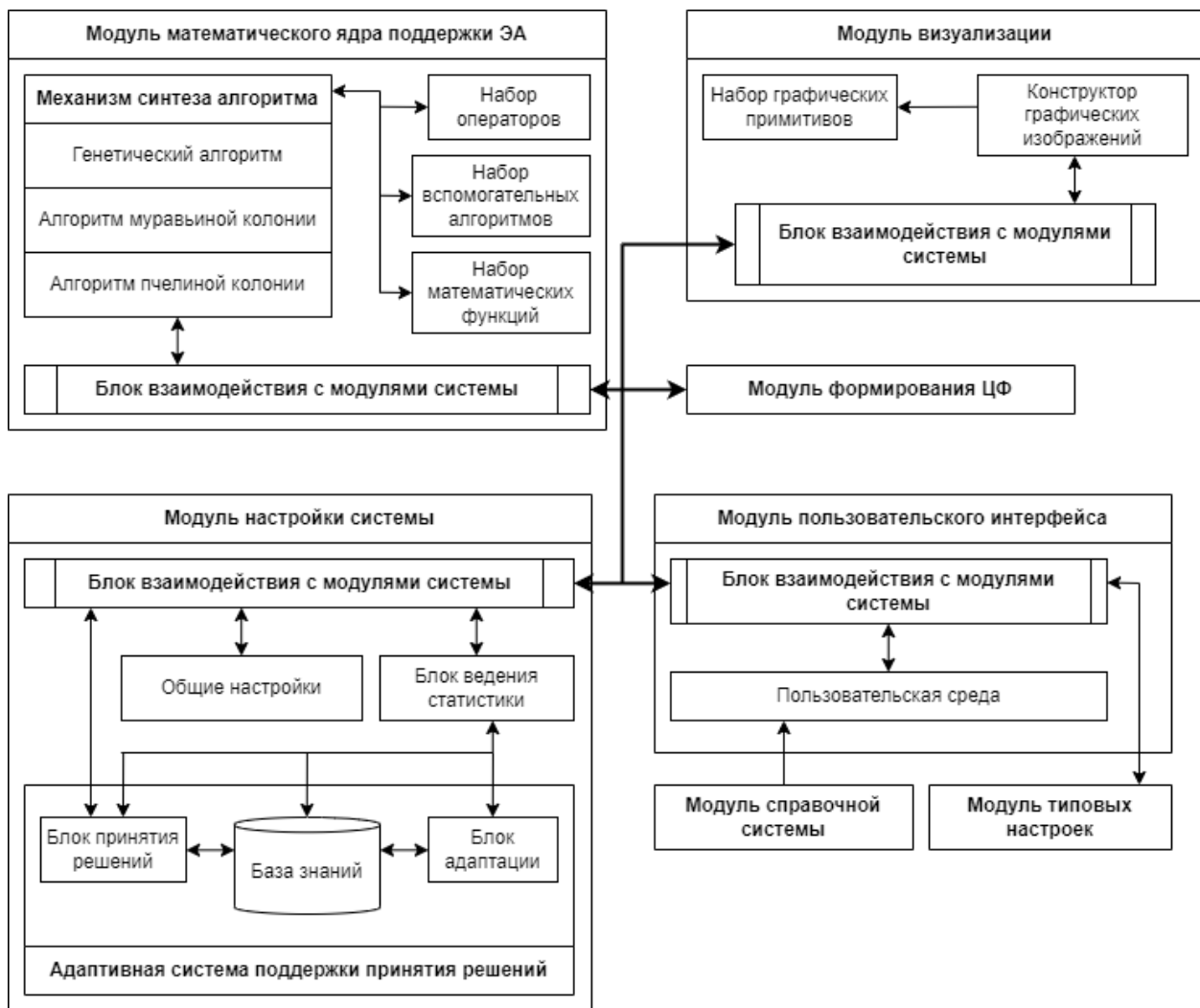


Рис. 3 – Структурная схема адаптивной системы поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации

В ходе проектирования адаптивной системы были разработаны различные макеты окон, демонстрирующие вид окна настройки системы (рисунок 4), формирование общих настроек задачи и возможные варианты визуализации решений задач оптимизации – например, в виде долей, тепловой карты или схематичного графа маршрутов и связываемых ими пунктов доставки.

Выгрузка данных о населенных пунктах осуществляется посредством обращения к базе данных, где хранятся названия пунктов и координаты их расположения (широта и долгота), по которым рассчитывается расстояние между ними.

**В четвертой главе** приводится апробация программного комплекса «Адаптивная система поддержки принятия решений», приводятся результаты апробации. Для этого системой решалась многокритериальная транспортная задача как без ограничений, так и с временными ограничениями, а также задача коммивояжера.

### Адаптивная Система Поддержки Принятия Решений

Настройки

Импорт из файла

Сброс всех настроек

Аппаратные

Ограничения по числу ядер CPU	<input type="text" value="10"/>	<input type="checkbox"/>	Использовать ускорение графического процессора
Ограничения по ОЗУ (мб)	<input type="text" value="4096"/>		
Максимальное время простоя (с)	<input type="text" value="60"/>	<input type="button" value="Сброс"/>	

Импорт/экспорт в файл

Способ сохранения в файл  Поточковый  Статичный

Муравьиный алгоритм

Число особей	<input type="text" value="100"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Включен	<input type="checkbox"/> Авто
Коэффициент испарения феромонов	<input type="text" value="0.1"/>		
Мин. число итераций перед заменой	<input type="text" value="5"/>	Макс. число итераций перед заменой	<input type="text" value="10"/>
<input type="button" value="Сброс"/>			

Генетический алгоритм

Число особей	<input type="text" value="100"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Включен	<input type="checkbox"/> Авто
Коэффициент мутации	<input type="text" value="0.4"/>	Шанс мутации	<input type="text" value="0.4"/>
Способ отбора	<input type="text" value="Турнирный"/> ▼	Способ скрещивания	<input type="text" value="Авто"/> ▼
Мин. число итераций перед заменой	<input type="text" value="5"/>	Макс. число итераций перед заменой	<input type="text" value="10"/>
<input type="button" value="Сброс"/>			

Пчелиный алгоритм

Число разведчиков	<input type="text" value="100"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Включен	<input type="checkbox"/> Авто
Число рабочих	<input type="text" value="100"/>		
Число наблюдателей	<input type="text" value="100"/>		
Мин. число итераций перед заменой	<input type="text" value="5"/>	Макс. число итераций перед заменой	<input type="text" value="10"/>
Вероятность отказа от источника	<input type="text" value="5"/>	Лимит оставления от источника	<input type="text" value="10"/>
<input type="button" value="Сброс"/>			

Рис. 4 – Макет окна общих настроек решения и эволюционных алгоритмов

Для проведения апробации разработанной адаптивной системы поддержки принятия решений было решено провести ряд вычислительных экспериментов. Изначальная численность постановок составляет 28025. Постановки представляют собой квадратные матрицы размерностью от  $10 \times 10$  до  $20 \times 20$ . Смежные матрицы содержали между собой расстояния между городами в общем диапазоне [223; 15000]. На рисунке 5 приводится график распределения средних значений матриц смежности.

Вариации алгоритмов с параметрами приведены в таблице 2. Для АМК  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты «видимости» муравьем города и «чувствительности» к оставленному феромону соответственно,  $p$  и  $q$  – коэффициенты «оставления» и «испарения» феромона соответственно.

Каждый алгоритм в приведенных ниже фрагментах диаграмм имеет сокращения (муравьиный – МА, пчелиный – ПА, генетический – ГА). Для наибольшего числа задач наиболее эффективным оказались модификации АМК. Для малого количества задач эффективными оказались модификации ГА, использующие турнирный способ отбора.

На рисунке 6 приводится фрагмент диаграммы результатов анализа решений задач с точки зрения скорости получения решения. Наиболее быстрыми показали себя модификации АПК, в частности, «смена индекса» и «реверс подмножества» с долей рабочих пчел от общего числа колонии 0.9. Значительно уступающие результаты по числу решенных задач показали модификации ГА и часть модификаций АПК.

В рамках вычислительных экспериментов многокритериальной транспортной задачи с временными окнами было решено порядка 76,7% вариаций постановок: результаты по остальным не были получены до окончания времени, отведенного на обработку, что подразумевает необходимость в данных случаях переключения модификации или расчетного алгоритма на какой-либо другой.

На рисунке 7 приводится фрагмент диаграммы численности задач, решенных различными вариациями алгоритмов.

Таблица 2. Фрагмент используемых в вычислительном эксперименте вариаций алгоритмов

№	Алгоритм / наименование параметра / значение параметра			
	Алгоритм муравьиных колоний			
	$\alpha$	$\beta$	$\rho$	$q$
1	1,25	0,5	0,75	1
2	0,75	1	1,25	0,5
3	1,5	0,5	0,75	0,5
...	...	...	...	...
10	1,5	1,25	1	0,75
11	0,25	1	1	0,75
	Алгоритм пчелиных колоний			
	Доля пчел-работниц		Метод поиска нового источника	
1	0,15		Смена индексов	
2	0,15		Реверс подмножества	
3	0,25		Смена индексов	
...	...		...	
15	0,9		Смена индексов	
16	0,9		Реверс подмножества	
	Генетический алгоритм			
	Шанс мутации	Метод мутации		Метод отбора
1	0,2	Смена индексов		Рулетка
2	0,2	Реверс подмножества		Рулетка
3	0,2	Смена индексов		Стохастический
...	...	...		...
23	0,8	Смена индексов		Турнирный
24	0,8	Реверс подмножества		Турнирный

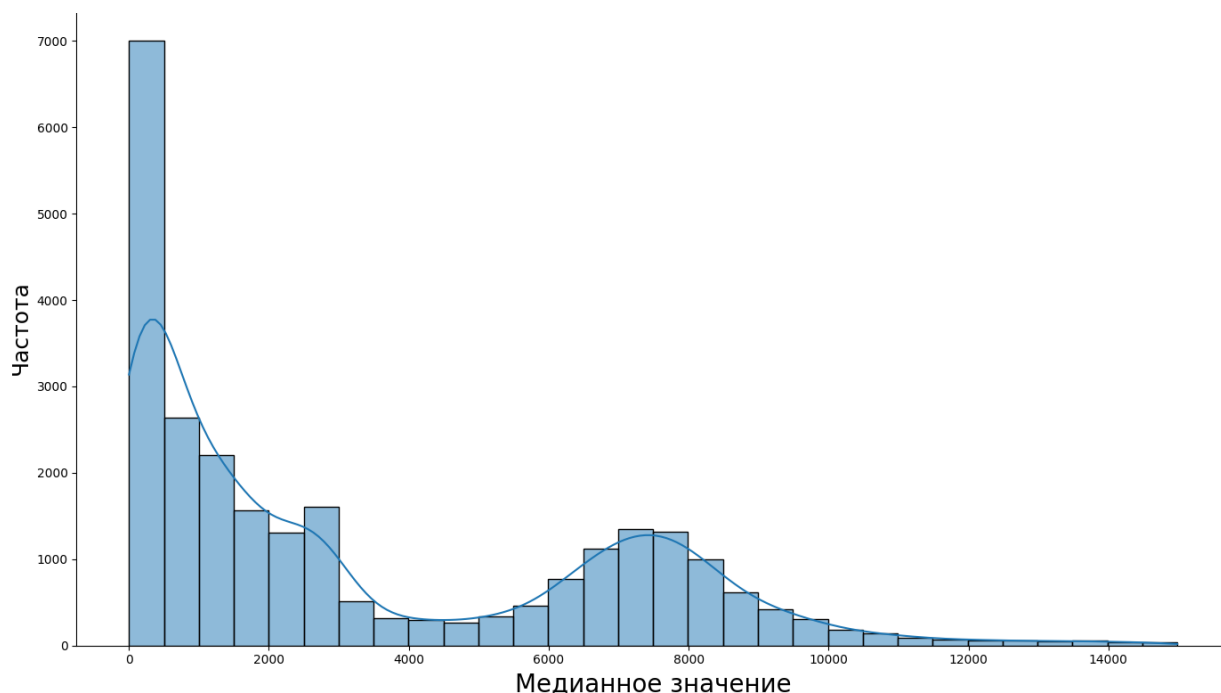


Рис. 5 – Распределение средних значений матриц смежности

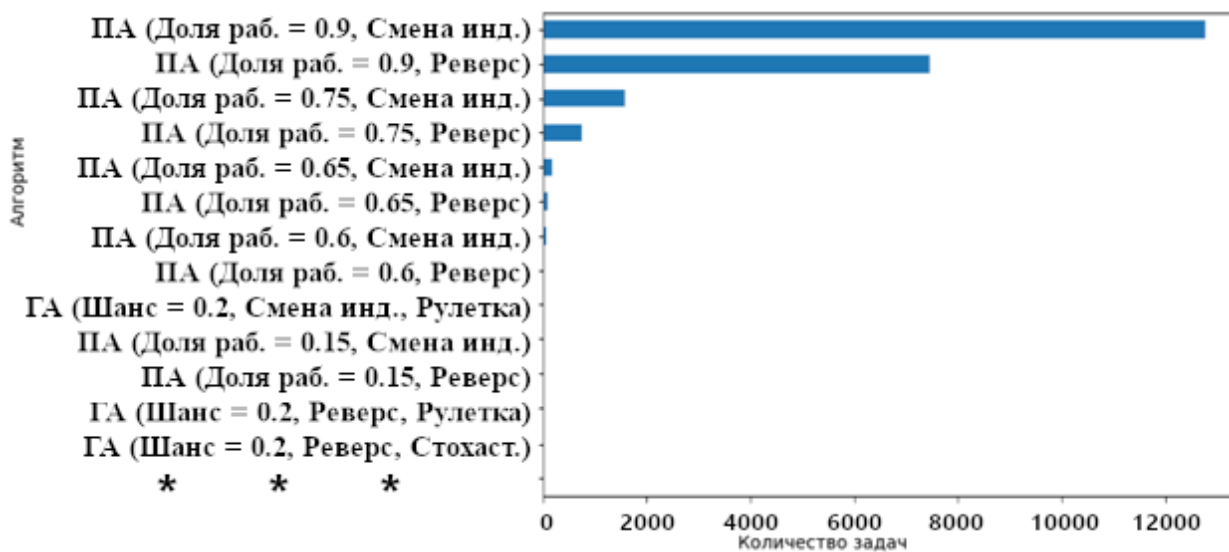


Рис. 6 – Фрагмент диаграммы эффективности алгоритмов по количеству решенных задач

На рисунке 8 приводится медианное значение итерационного шага для алгоритмов, при котором достигнуто оптимальное значение. На нем можно увидеть, что АМК получал оптимальные значения на более поздних итерациях в сравнении с ГА и АМК.

Рисунок 9 содержит график усредненных значений результатов расчетов эволюционных алгоритмов по трем критериям.

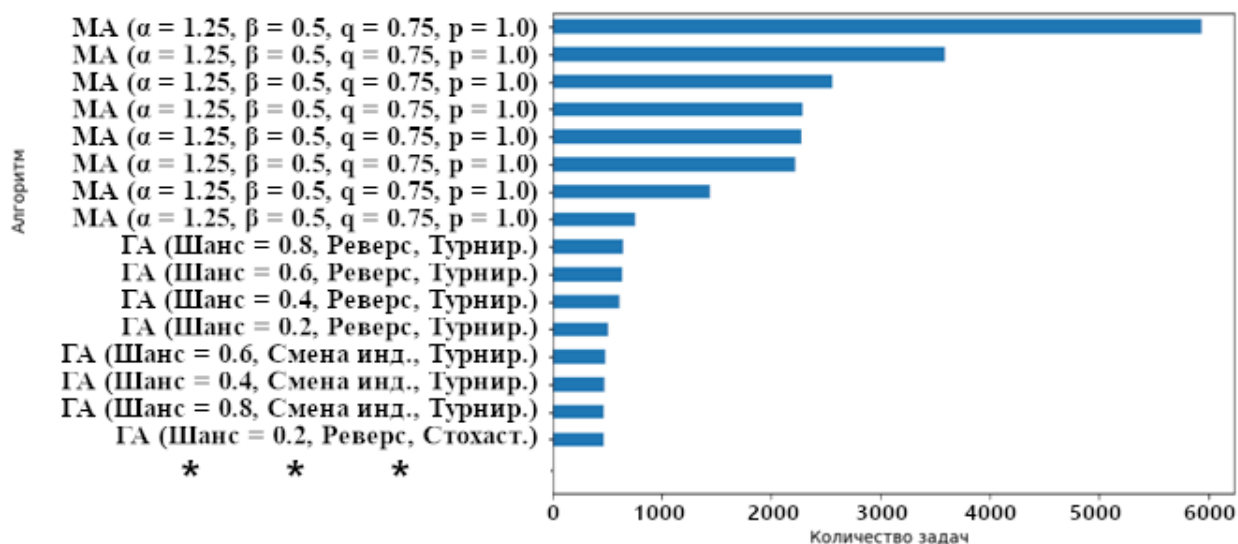


Рис. 7 – Фрагмент диаграммы эффективности вариаций эволюционных алгоритмов по численности полученных решений многокритериальной транспортной задачи

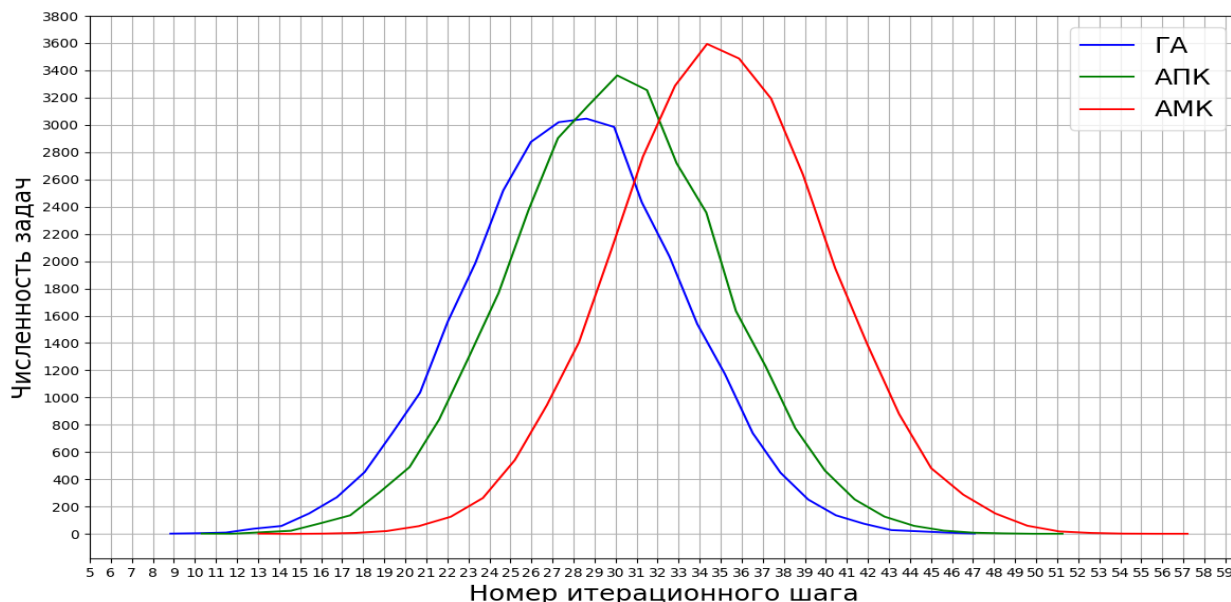


Рис. 8 – Медианное значение итерационного шага для алгоритмов, при котором достигнуто оптимальное значение

Также был проведен ряд вычислительных экспериментов с последующей проверкой оптимальности по Парето, в основе которых лежала многокритериальная транспортная задача с временными ограничениями. Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют, что каждый из алгоритмов пригоден при решении определенного спектра задач оптимизации со своими особенностями:

– АМК предлагает высокую скорость получения парето-оптимальных решений, особенно в условиях многокритериальной транспортной задачи с временными ограничениями, однако в силу своей специфической особенности (высокой чувствительности к настроечным параметрам) рекомендуется его



использование в случаях, когда в распоряжении имеется достаточно времени для проведения нескольких просчетов с различными параметрами; в противном случае рекомендуется переключение на ГА либо АМК в зависимости от ситуации;

– ГА обеспечивает «баланс» между скоростью получения решений и их качеством, при этом стоит помнить о том, что в ряде постановок время поиска решения может возрасти в несколько раз; в таких случаях рекомендуется переключение на АПК, если требуется предельно ускорить процесс решения, либо на АМК, если необходимо получить

– АПК предлагает наивысшую скорость получения результатов решения задач среди трех алгоритмов, однако полученные решения могут не соответствовать критериям парето-оптимальности; тем не менее, данный алгоритм имеет наивысший приоритет в предпочтительности в случаях небольших по размерностям задач, в ином случае рекомендуется его замена на АМК либо ГА в зависимости от ситуации.

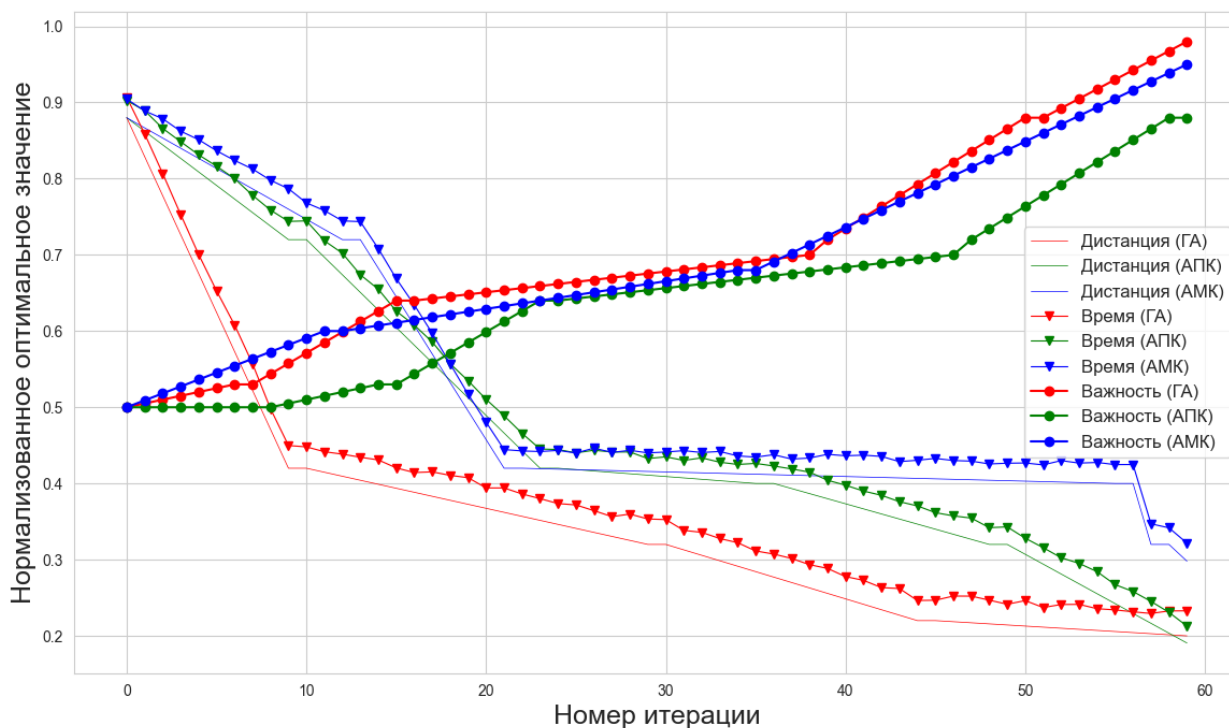


Рис. 9 – Усредненные значения результатов расчетов эволюционных алгоритмов по трем критериям

Одновременно с этим, использование механизмов адаптации системы с модификацией и переключением активного алгоритма позволило добиться улучшения получаемых результатов в среднем на 4,5-11,2% в отношении каждого алгоритма.

Также в главе приводятся дальнейшие возможные пути развития разработанной адаптивной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен комплексный анализ существующих эволюционных алгоритмов (ГА, АМК, АПК), применяемых для решения многокритериальных задач оптимизации, в частности – многокритериальной транспортной задачи, а также рассмотрены варианты их модификаций, направленных на их качественные улучшения.

2. Сформулировано специализированное математическое описание многокритериальной транспортной задачи с временными ограничениями, предполагающее применение при ее решении модифицированных эволюционных алгоритмов, механизмов проверки текущего решения и оперативной замены активного алгоритма.

3. Разработаны механизмы и проведена модификация эволюционных алгоритмов в адаптивной системе и правила базы знаний для взаимодействия с данными о решенных задачах оптимизации, позволяющие ускорить процесс решения многокритериальной транспортной задачи.

4. Разработаны схемы контроля и обработки результатов текущего решения с учетом информации о решении на предыдущем шаге (итерации) и ограничений по количеству итераций и формирующие рекомендации для модификации либо смены алгоритма.

5. Разработана структура адаптивной системы поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи, в основе вычислительного инструмента которой заложены модифицированные эволюционные алгоритмы (ГА, АМК, АПК), а также механизм их переключения в процессе решения задачи.

6. В рамках вычислительных экспериментов многокритериальной транспортной задачи с временными окнами в отведенное ограниченное время было решено порядка 76,7% вариаций постановок, что подтверждает необходимость в данных случаях переключения варианта модификации эволюционного алгоритма.

7. Проведенная апробация адаптивной системы поддержки принятия решений посредством решения многокритериальных транспортных задач оптимизации, показала, что АМК предлагает высокую скорость получения решения, ГА обеспечивает баланс между скоростью решения и качеством, АПК при высокой скорости решения для задач небольшой размерности, а также продемонстрировали улучшение показателей получаемых результатов в среднем на 4,5-11,2% по сравнению с базовыми алгоритмами.

В соответствии с целью диссертационной работы решена основная задача – повышение эффективности адаптивной системы поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи за счет модифицированных эволюционных алгоритмов.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Разработанную в ходе выполнения диссертационной работы адаптивную систему поддержки принятия решений при многокритериальной оптимизации транспортной задачи целесообразно применять для внедрения в организации и

компании, связанные с обеспечением транспортной логистики, а также можно использовать основой для последующего развития систем поддержки принятия решений.

Дальнейшее развитие адаптивной системы может быть связано с развитием базы знаний системы, наращиванием списка эффективных алгоритмов, расширения параметров настройки, интеграции механизмов нейронных сетей и т. д.

### **Список основных публикаций по теме диссертации:**

#### **Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ**

1. Белых М.А. Структура интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов / М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, А.К. Донских. // Вестник ВГТУ. – 2021. – Т. 17. – №3. – С. 7-13.

2. Донских А.К. Обзор архитектуры систем управления интеллектом на основе полезности и дерева поведения / А.К. Донских, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, М.А. Белых // Вестник ВГТУ. – 2021. – Т. 17. – №3. – С. 36-41.

3. Баранов Д.А. Программная реализация задачи линейной оптимизации на базе муравьиного алгоритма / Д.А. Баранов, М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.Н. Черников // Вестник ВГТУ. – 2023. – Т. 19. – №6. – С. 53-58.

4. Белых М.А. Формализация многокритериальной транспортной задачи с временными ограничениями / М.А. Белых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12. – № 2. – С. 1-9.

#### **Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ**

5. Олейникова С.А. Оптимизация управления производственными системами на базе генетических алгоритмов / С.А. Олейникова, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, М.А. Белых, И.А. Селищев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022681169 от 10.11.2022.

#### **Статьи и материалы конференций**

6. Belykh M.A. Structure of intellectual support system solution using evolutionary algorithms / M.A. Belykh, E.P. Komarova // Материалы XIV Международной научно-практической конференции – Воронеж: Научная книга. – 2021. – С. 330-333.

7. Белых М.А. Схема работы выбора эволюционного алгоритма интеллектуальной системы / М.А. Белых, А.В. Барабанов // Информационные технологии моделирования и управления. Научно-технический журнал. – Воронеж: Научная книга. – 2022. – №2 (128). – С. 114-117.

8. Андреев М.П. Применение генетического алгоритма для решения транспортной задачи / М.П. Андреев, М.Ю. Сергеев, М.А. Белых // Сборник трудов «Научная опора Воронежской области». – 2022. – С.146-148.

9. Баранов Д.А. Программная реализация задачи линейной оптимизации на примере муравьиного алгоритма / Д.А. Баранов, М.А. Белых, В.Ф. Барабанов

// Оптимизации и моделирование в автоматизированных системах: труды Международной научной школы – Воронеж: ВГТУ. – 2023. – С. 23-27.

10. Белых М.А. Решение задачи коммивояжера вариативным муравьиным алгоритмом / М.А. Белых, Д.А. Баранов // Информационные технологии моделирования и управления. Научно-технический журнал – Воронеж: Научная книга. 2024. – №2 (136). – С. 116-119.

11. Бобровников Б.Н. Мониторинг состояния вычислительной системы инструментами языка разработки / Б.Н. Бобровников, А.В. Барабанов, М.А. Белых // Информационные технологии моделирования и управления. Научно-технический журнал, – Воронеж: Научная книга, 2024. – №2 (136). – С. 100-104.

12. Белых М.А. Разработка интеллектуальной системы оптимизации на основе эволюционных алгоритмов / М.А. Белых, Д.А. Баранов // Нано-биотехнологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование. Сборник статей международной науч.-практ. конф. – Липецк. – 2024. – С. 158-164.

Подписано в печать 13.12.2024г.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов

Усл. печ. л. \_\_. Тираж \_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026, Воронеж, Московский пр., 14