

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кубанский государственный университет»**

*На правах рукописи*

**ПЕТУХОВА АЛИНА ВЛАДИМИРОВНА**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАДАЧАХ  
ВЫБОРА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ**

Специальность 2.3.4. Управление в организационных системах

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Коваленко Анна Владимировна

Краснодар – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПОСЛЕДНИЕ<br/>ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОДХОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>1.1. Системы поддержки принятия решений в задачах управления .....</b>  | <b>14</b> |
| 1.1.1. Принципы СППР .....   | 16        |
| 1.1.2. Основные положения архитектур СППР.....   | 17        |
| 1.1.3. Типы архитектур СППР .....  | 19        |
| 1.1.4. Технологические тренды, формирующие архитектуры СППР.....   | 19        |
| 1.1.5. Проблемы проектирования архитектур СППР .....   | 20        |
| 1.1.6. Использование СППР .....  | 20        |
| <b>1.2. НКК Коско. Правило активации НКК. Функция активации.....</b>   | <b>23</b> |
| <b>1.3. Динамические свойства систем, основанных на НКК .....</b>  | <b>26</b> |
| 1.3.1. Функция активации .....   | 28        |
| <b>1.4. Обучение НКК Коско. Подходы, основанные на алгоритмах Хебба. Подходы,<br/>зависящие от ошибки. Подходы, зависящие от данных. Гибридные подходы .....</b> | <b>30</b> |
| 1.4.1. Подходы, основанные на хеббовских алгоритмах.....   | 30        |
| 1.4.2. Подходы, основанные на алгоритме Силова.....  | 34        |
| 1.4.3. Методы обучения, зависящие от ошибки .....  | 36        |
| 1.4.4. Сравнение алгоритмов обучения НКК.....  | 41        |
| <b>1.5 Нечеткие когнитивные карты, разработанные российскими исследователями ....</b>  | <b>42</b> |
| <b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ<br/>С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>2.1. Операции каузальной алгебры в НКК .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>2.2. Системные показатели НКК.....</b>  | <b>50</b> |
| <b>2.3. Решение прямой задачи моделирования в НКК Силова .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>2.4. Решение обратной задачи моделирования в НКК.....</b>   | <b>54</b> |
| 2.4.1. Метод минимальных корректировок при отсутствии явного решения<br>обратной задачи моделирования .....  | 61        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.4.2. Метод оптимизации структуры НКК для выделения целевых и управляющих концептов в начальной структуре карты ..... | 65         |
| <b>ГЛАВА 3. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «FUZZYM».....</b>   | <b>68</b>  |
| 3.1. Системы программного обеспечения для разработки и обучения НКК .....  | 68         |
| 3.2. Основные требования к разрабатываемой системе.....  | 77         |
| 3.3. Описание модулей системы «FuzzyM» .....   | 79         |
| <b>ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>                                       | <b>85</b>  |
| 4.1. Математическая модель предприятия розничной торговли .....  | 85         |
| 4.1.1. Методы исследования .....   | 87         |
| 4.1.2. Результаты численного эксперимента .....  | 89         |
| 4.2. Использование НКК для задачи развития муниципальных образований.....  | 106        |
| 4.2.1. Методы исследования .....   | 107        |
| 4.2.2. Результаты численного эксперимента .....  | 109        |
| 4.2.3. Ограничения модели .....  | 124        |
| 4.3. Математическая модель электродиализной установки на предприятии очистки воды .....                                | 125        |
| 4.3.1. Методы исследования .....   | 125        |
| 4.3.2. Результаты численного эксперимента .....  | 128        |
| 4.4. Использование больших языковых моделей для построения НКК .....   | 133        |
| 4.4.1. Методы исследования .....   | 136        |
| 4.4.2. Результаты эксперимента .....   | 141        |
| 4.4.3. Выводы по использованию LLM для построения НКК.....   | 148        |
| 4.5. Риски использования НКК при управлении бизнес-процессами .....  | 149        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>  | <b>153</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>   | <b>156</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>   | <b>170</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В настоящее время существенно возрастает размер и сложность организаций. Например, большинство компаний розничной торговли не только расширяют свои сферы деятельности в основном бизнесе, но также включают в себя подразделения, соответствующие ранее деятельности их поставщиков. Многие компании розничной торговли не только занимаются продажей, но и производят некоторые товарные группы, а также осуществляют логистическую деятельность. Расширение деятельности усложняет структуру таких предприятий и процессы управления ими. Применение традиционных методов моделирования и управления системами для таких процессов является сложной, которая во многих случаях не дает ожидаемых результатов. Современные вызовы, связанные с цифровизацией и автоматизацией процессов управления, также оказывают значительное влияние на сложность организационных систем. Внедрение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения изменяет традиционные подходы к управлению, требуя разработки новых методов анализа и принятия решений. Компании вынуждены адаптироваться к быстроменяющимся условиям рынка, интегрировать цифровые инструменты и перестраивать бизнес-процессы, что требует создания более сложных и адаптивных моделей управления.

Основными исследовательскими вопросами являются:

- Как организациям преодолеть трудности, возникающие при управлении расширяющимися предприятиями?
- Как передовые системы поддержки принятия решений могут помочь в преодолении этих трудностей?
- Какие особенности должны учитывать комплексные модели управления для эффективного сценарного моделирования операционной деятельности предприятий?

На сегодняшний день отсутствует комплексная модель для сценарного моделирования и управления в сложных организациях, позволяющая учитывать всю сложность процессов операционной деятельности. В отрасли существует необходимость построения новых моделей для задач управления и сценарного планирования на таких предприятиях, применяя методы, которые позволяют учитывать имеющиеся экспертные знания о системе, количественные и качественные компоненты системы. Такие методы базируются на когнитивном подходе, при котором для моделирования системы строятся нечёткие когнитивные карты (НКК), основанные на синтезе нечёткой логики и теории графов. НКК рисует причинно-следственную картину для представления модели и поведения системы. Однако, текущий математический аппарат НКК не позволяет решить задачу обратного моделирования, которая является критической при увеличении сложности систем, что показывает **противоречие в науке**. При существующих методах и алгоритмах решения прямой задачи сценарного моделирования, в которой задается начальное изменение параметров системы и определяется в какое состояние перейдет система, отсутствует система, позволяющая решить обратную задачу моделирования (ОЗМ), которая позволит задать целевое состояние системы и определить необходимые начальные изменения параметров. Возможность решения ОЗКМ позволит значительно ускорить процесс принятия решения и разработки дальнейших стратегий развития компаний.

Анализ публикаций в области математического моделирования и интеллектуальных систем поддержки принятия решений, основанных на НКК для принятия решений в слабоструктурированных задачах выбора, свидетельствует об активном развитии теории в этой области. Число исследовательских работ по НКК в 2010 году почти вдвое превышает число исследовательских работ, представленных в 2006 году, и этот тренд сохраняется до 2025 года.

Исследования в этом направлении интенсивно ведутся в России и

зарубежных странах, начиная с 1980-х годов. Среди отечественных специалистов здесь следует отметить Леденёву Т.М. [1], Силова В.Б. [2], Максимова В.И. [3], Кулиничка А.А. [4], Гамазова И.Н. [5], Аверкина А.Н. [6], Ярушева С.А. [7], Павлова В.Ю. [6], Ефремову Н.А. [7], Гинис Л.А. [8], Оськина А.Ф. и Оськина Д.А. [9] и многих других. Моделированию сложных слабоструктурированных систем на основе НКК посвящены труды Ларичевой Е.А. [10], Строковой Л.А. [11], Мешалкина В.П. и Белозерского А.Ю. [12], Маригодова В.К. [13], Гореловой Г.В. и Радченко С.А. [14], Заболотского М.А., Поляковой И.А. и Тихониной А.В. [15], Путятю М.М. [16].

В период с 2019 по 2025 год исследователи расширили приложения НКК на такие сферы, как телекоммуникации (Бычков Е.Д. и Лузан Д.С. [17]), теория игр (Onari M.A. и Rezaee M.J. [18]), автодорожные карты (Wang J. и Zhen Peng Z. [19]), электронное обучение (D'Aniello G. и Falco M. [20]), виртуальные среды (Юрин А.А. и Емельяненко А.С. [21]), искусственный интеллект (Gonzalo Nápoles G. и Jastrzębska A. [22]), прогнозирование временных рядов (Vanhoenshoven F. [23]) и распознавание образов (Papakostas G. и Boutalis Y. [24]). Однако, при большом количестве систем моделирования НКК для поддержки принятия управленческих решений отсутствует преимущество программных продуктов, возможность воспроизвести полученные результаты и применить систему на предприятии. В силу чего имеется **противоречие в практике**, которое заключается в том, что существующие системы не адаптированы под нужды предприятий и в имеющихся программных продуктах отсутствует техническая возможность интеграции новых алгоритмов, полученных в результате исследований в области НКК. В рассмотренных в работе программных продуктах остаётся нерешённой проблема учёта менее значимых параметров для исследования и чувствительности результата.

Данная работа направлена на разработку методов и алгоритмов для системы управления реальными предприятиями на примере предприятий розничной торговли, системы развития муниципальных образований и

системы электродиализной установки для предприятия очистки воды. Задачами разрабатываемых методов и алгоритмов являются построение и анализ структуры НКК по методу Коско, решение прямых и ОЗМ для поддержки принятия управленческих решений на основе заданных целевых приращений концептов с использованием теории нечётких реляционных уравнений (НРУ), анализ возможности построения НКК с использованием больших языковых моделей, определение рисков использования НКК на предприятиях. Реализация такой системы позволит получить прикладной программный комплекс анализа НКК модульного типа; провести анализ уже существующих НКК, разработанных российскими и зарубежными экспертами, что позволит качественно улучшить знания о системах, обнаружить и учесть скрытые взаимосвязи концептов и, в итоге, решить актуальные задачи в соответствующих областях знаний.

Таким образом, рассматриваемая в работе задача построения, анализа и моделирования сложных систем на основе НКК для принятия решения в слабоструктурированных задачах выбора с целью поддержки принятия управленческих решений в организационных системах актуальна.

Диссертация выполнена на кафедре анализа данных и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертации состоит в повышении эффективности управление и скорости принятия управленческих решений в таких организационными системами, как предприятия розничной торговли, муниципальные образования, предприятия очистки воды на основе концепции нечётких когнитивных карт.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- провести сравнительное исследование методов и алгоритмов построения НКК, методов решения ОЗМ в НКК;
- построить и исследовать модель системы розничной торговли на основе НКК для повышения эффективности управления предприятием;
- построить и исследовать модель стратегии развития города на основе

НКК;

- построить и исследовать модель электродиализной установки для предприятия очистки воды на основе НКК;

- разработать и программно реализовать алгоритм и методы решения ОЗКМ систем на основе НКК;

- провести анализ проблемы неразрешимости НРУ, разработать метод минимально значимых корректировок;

- провести анализ возможности использования больших языковых моделей при определении связей между концептами в НКК;

- провести анализ рисков использования НКК на предприятиях;

- развить научно-методологический аппарат математического моделирования и разработать соответствующий программный комплекс для моделирования организационных систем;

- спроектировать и реализовать прототип программного комплекса для анализа системных характеристик НКК и решения задачи динамического моделирования.

**Объект исследования:** нечеткие когнитивные карты.

**Предмет исследования:** математические модели управления организационными системами предприятий розничной торговли, муниципальных образований и предприятий очистки воды их и использование для поддержки принятия управленческих решений.

**Методология и методы исследования.** В работе применялись методы математического моделирования, системного анализа, теории нечетких множеств и нечеткой логики, теории графов, когнитивного и имитационного моделирования, нечеткого реляционного анализа, теории нейросетей, теории машинного обучения, численные методы, математическая статистика, а также принципы структурного и модульного программирования и проведение вычислительных экспериментов.

Содержание диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.4. Управление в организационных

системах: п.3 - Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах; п.4 - Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах; п.5 - Разработка методов получения данных и идентификации моделей, прогнозирования и управления организационными системами на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации. п.9 - Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах.

**Научная новизна исследования.** В диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

- впервые описаны модифицированные алгоритмы решения ОЗМ на основе методов решений НРУ, базирующиеся на введении понятий доминантных уравнений и детерминирующих коэффициентов, позволяющие эффективно определять необходимые изменения на предприятии для достижения поставленных стратегических целей;

- предложено решение проблемы формальной неразрешимости ОЗМ с помощью минимально значимой корректировки вектора целевых показателей и метод оптимизации структуры НКК для выделения целевых и управляющих концептов в начальной структуре карты, обеспечивающие возможность стратегического планирования для более широкого спектра проблем;

- впервые описано использование больших языковых моделей при построении НКК и проведен сравнительный анализ полученных матриц взаимодействий с НКК составленными экспертами;

- сформулирован алгоритм комплексного анализа НКК, отличающийся от существующих возможностью выбора произвольной операции композиции (t-нормы и s-нормы), для получения наиболее полной информации об исследуемой системе;

- разработана и реализована модульная программа «FuzzyM», отличающаяся гибкой модульной структурой и возможностью расширения

функционала и позволяющая использовать алгоритмы в других научных исследованиях;

- сформированы и проанализированы математические модели системы управления предприятием розничной торговли, стратегии развития муниципального образования город Краснодар, системы функционирования электродиализной установки на предприятии очистки воды, позволяющие описать комплексные процессы на предприятиях методами НКК и использовать разработанную систему при принятии решений;

**Теоретическая значимость** заключается в развитии методов управления организационными системами на основе концепции нечётких когнитивных карт.

**Практическая значимость** состоит в возможности использования разработанных моделей исследователями разного уровня для формирования и проверки гипотез, связанных с поведением сложных организационных систем при различных внешних воздействиях, а также синтеза и анализа стратегий управления такими системами.

**Достоверность результатов** диссертации обеспечивается использованием фундаментальных положений нечёткой логики, нечетких реляционных уравнений, математических методов, элементов теории статистического анализа, теории систем, теории когнитивного и имитационного моделирования. Достоверность проверена сопоставлением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов, опубликованием полученных результатов в рецензируемых журналах и разработкой программного комплекса, на который получены свидетельства о государственной регистрации, и подтверждается проведённой апробацией на предприятиях.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика применения методов системного анализа НКК с использованием различных операций композиции.

2. Методы и алгоритмы синтеза множества стратегий управления системой на основе решения обратной задачи когнитивного моделирования,

метод минимально значимой корректировки при неразрешимости ОЗМ, метод оптимизации структуры карты при неразрешимости ОЗМ.

3. Метод получения взаимовлияний концептов НКК на основе LLM.

4. Программный комплекс «FuzzyM» для поддержки принятия решений с использованием аппарата НКК, учитывающий слабоструктурированность организационных систем и предприятий.

5. Математические модели управления предприятием розничной торговли, управления муниципальным образованием, электродиализной установки на предприятии очистки воды.

**Внедрение результатов работы.** Методы и алгоритмы, реализованные в программном комплексе «FuzzyM», а также отдельные элементы теоретических исследований и программные модули использованы при формировании стратегии управления предприятия розничной торговли разрабатываемой компанией LTD «TectumAI», что способствовало сокращению времени на принятие решения на 45%, в 3.5 раза увеличить количество проанализированных сценариев на один цикл и на 40% увеличить уверенность экспертов в прогнозе. Программный комплекс «FuzzyM», а также разработанный алгоритм решения ОЗМ использован при разработке системы принятия решений с целью оптимизации процессов планирования и управления организацией ООО «Программные технологии». Внедрение результатов работы подтверждается актами.

**Апробация результатов исследования.** Результаты научно-исследовательской работы, полученные во время исследования, докладывались и обсуждались на семинарах кафедры прикладной математики КубГУ (2015–2018); использованы в Программе стратегического развития ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», в проектах РФФИ №13-08-96507, РФФИ №13-08-01168; были представлены в конкурсе «Премия IQ года 2018»; на конференциях: IV Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных «Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования», г. Краснодар (2022)

[25], IX Международная конференция «Современная математика и концепции инновационного математического образования», г. Москва (2022) [26]. Диссертация под названием «Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечётких когнитивных карт» проходила защиту в Южном федеральном университете и результаты работы были опубликованы в рукописи [27]. Работа была снята с защиты по личному заявлению, диссертация была доработана: уточнены объект, предмет исследования, скорректирована тема настоящей диссертационной работы, добавлен пример использования разработанных методов и алгоритмов для решения задачи моделирования на предприятии очистки воды, расширен обзор литературы, описан алгоритм использования больших языковых моделей для построения НКК, дополнительно вышли публикации [28], [29].

По результатам научного исследования был составлен курс лекций для факультативной дисциплины «Введение в теорию нечётких когнитивных карт» для магистров направления подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика, профиль Математическое и информационное обеспечение экономической деятельности.

**Публикации.** Основные результаты научного исследования опубликованы в 11 печатных работах [26] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37], из которых 5 соответствуют Перечню ВАК, в т.ч. 2 статьи опубликованы в журналах Web of Science/Scopus, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [36] [37].

**Личное участие соискателя в получении результатов.** Основные результаты диссертации получены лично автором, а именно: методика применения методов системного анализа НКК с использованием различных операций композиции, методы использования больших языковых моделей при построении НКК, методы и алгоритмы синтеза множества стратегий управления системой на основе решения ОЗКМ, метод минимально значимой корректировки и метод оптимизации структуры карты при неразрешимости

ОЗМ, программный комплекс для поддержки принятия решений.

В работе [30] авторским вкладом является разработанный алгоритм решения ОЗМ в НКК, применение алгоритма для решения различных задач. В работе [31] – применение разработанного программного комплекса «FuzzyM» для НКК, описывающей работу компании розничной торговли. В [32] – анализ предприятия розничной торговли как сложной системы и решение ОЗМ, [33] – анализ задачи развития муниципальных образований. В [28] – обзор методов прогнозирования развития и алгоритмов построения систем поддержки принятия решений. В [29] в разработке метода использования больших языковых моделей. В [26] – обоснование рисков использования НКК при управлении бизнес-процессами. В [34] [35] – обзор методов прогнозирования развития и алгоритмов обучения сложных систем с применением теории НКК.

**Структура и объём работы.** Научно-исследовательская работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы, приложений. Общий объём диссертации 180 страниц, в том числе 24 рисунка, 29 таблиц, 7 приложений, список литературы из 211 наименований.

# ГЛАВА 1. КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПОСЛЕДНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОДХОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

## 1.1. Системы поддержки принятия решений в задачах управления

В современной научной литературе предлагаются разные варианты определения термина «системы поддержки принятия решений», например, — это автоматизированная рекомендательная система, способная помочь в процессе принятия решений, предоставляя соответствующую информацию и данные. Этот тип системы может использоваться в самых разных условиях, включая бизнес, правительство и здравоохранение.

Основная цель системы поддержки принятия решений (СППР) — помочь пользователям принимать более обоснованные решения, предоставляя им доступ к соответствующей информации и данным. СППР играют ключевую роль в современном управлении, особенно в условиях высокой неопределённости и сложности. Эти системы применяются в различных сферах — бизнесе, государственном управлении, здравоохранении — и используются для поддержки процессов стратегического планирования, распределения ресурсов, управления рисками и других задач. Особую актуальность СППР приобретают при использовании для принятия решений в слабоструктурированных задачах выбора, которые характеризуются отсутствием чётко определённых целей, критериев и множества альтернатив, наличием неполной, противоречивой или неопределённой информации, а также невозможностью построения формальной модели и точного прогнозирования последствий решений. Для поддержки таких задач используются экспертные знания, методы когнитивного моделирования, многокритериальный анализ, технологии искусственного интеллекта и машинного обучения [38] [39]. Эти передовые технологии позволяют СППР

эффективно работать с большими объёмами данных, выявляя закономерности и предоставляя точные прогнозы развития систем.

Существует ряд различных типов СППР, каждая из которых предлагает различные функции. Наиболее популярный тип — экспертные системы, которые предназначены для предоставления пользователям советов и рекомендаций на основе набора правил или руководств. СППР призваны помочь пользователям принимать более обоснованные решения, предоставляя им доступ к соответствующей информации, данным и отношениям между элементами системы.

История СППР началась в 1960-х годах, когда компания General Electric (GE) применила их в производстве и управлении запасами. Внедряя в процесс управления статистические модели и методы линейного программирования, GE открыла новый путь для интеграции вычислительных методов в бизнес-процессы, что позволило оптимизировать производство и управление ресурсами [40]. В 1970-е годы СППР нашли применение в здравоохранении, где их использование в системах вроде MYCIN значительно улучшило процессы медицинской диагностики. Хотя внедрение этих систем было сопряжено с этическими сложностями, они показали огромный потенциал в улучшении принятия решений [41]. Развитие СППР продолжилось в 1980-е годы с появлением групповых систем поддержки принятия решений (GDSS), которые представили платформы для коллективного обсуждения и стратегического планирования [42]. В 1990-е годы были разработаны исполнительные информационные системы (EIS), которые обеспечили руководителям доступ к важной информации и её визуализации для принятия управленческих решений в реальном времени [43].

Сегодня ИИ и МО значительно расширили функциональность СППР. ИИ позволяет не только анализировать большие объемы данных в реальном времени, но и предсказывать будущие сценарии, выявлять скрытые закономерности и автоматически оптимизировать решения. Интеллектуальные агенты и глубокие нейронные сети улучшают рекомендации товаров или услуг,

делая их персонализированными, а интеграция с технологиями обработки естественного языка делает взаимодействие с системой более интуитивным. В результате СППР становятся более гибкими, автономными и эффективными в условиях высокой неопределенности. Интеграция когнитивных систем в СППР открывает новые горизонты, интегрируя в СППР логику экспертов для адаптации к меняющимся условиям. Достижения в этой области, такие как IBM Watson, показывают значительное влияние когнитивных СППР в таких сферах, как здравоохранение и финансы [44] [45].

Недавние достижения в моделировании и симуляции значительно расширили возможности СППР, что позволяет проводить более глубокий анализ и создавать предсказательные модели для поддержки сложных сценариев принятия решений [46].

Эта глава исследует основные принципы, методологии и сферы применения СППР, подчёркивая их потенциал для трансформации процессов принятия решений, а также указывая сложности, которые возникают при внедрении СППР в реальных организациях.

### **1.1.1. Принципы СППР**

СППР основываются на ряде ключевых принципов, обеспечивающих эффективность их применения в различных отраслях. Важнейший из них — построение СППР, основанных на данных. Это предполагает использование данных и аналитических методов для предоставления результатов, которые соответствуют целям лиц, принимающих решения [47]. Этот принцип тесно связан с принципом исчисления решений (decision calculus), который подчёркивает значимость моделирования и количественных методов для решения сложных задач в сфере принятия решений [48].

Также важно, чтобы СППР проектировались с учётом контекста и потребностей пользователя, гарантируя, что системы будут интуитивно понятными и удобными в использовании. Zarate и др. [49] указывают, что успешные СППР адаптированы под конкретные нужды пользователей, а O'Brien и Marakas [50] подчёркивают важность согласования возможностей СППР с

процессами управления информацией в организации для повышения качества решений.

Применение принципов системного дизайна дополнительно усиливают эффективность СППР. Примером может служить методология "House of Quality" [51], которая помогает соотнести требования клиентов с возможностями компании, что улучшает проектирование СППР и учитывает многочисленные переменные в процессе принятия решений.

Возможность для коллаборации и коммуникации лиц, принимающих решение имеет ключевое значение в разработке СППР. Авторы [52] демонстрируют важность этого аспекта на примере систем управления лесными пожарами, где интеграция мнений различных заинтересованных сторон увеличивает надежность системы и приводит к более практичным и результативным решениям.

Интерфейс системы также играет ключевую роль в развитии СППР. Nevner и др. [53] предлагают алгоритм разработки СППР, основанный на итеративном процессе создания и оценки интерфейса. Такой подход помогает сохранять актуальность и эффективность систем с учетом нужд пользователей.

Дополнительно, авторы [54] указывают на необходимость интеграции СППР и других информационных систем, используемых в процессах предприятия для улучшения качества принимаемых решений при моделировании сценариев развития организаций.

### **1.1.2. Основные положения архитектур СППР**

Архитектура СППР — это не просто совокупность технологических решений, но и концептуальная модель, определяющая, как различные компоненты системы взаимодействуют друг с другом. Эти взаимодействия в конечном итоге определяют эффективность и функциональность системы.

Современная СППР состоит из нескольких ключевых элементов, каждый из которых играет свою роль в обеспечении ее возможностей.

Система управления базами данных (СУБД) — это центральный компонент, обеспечивающий управление данными, полученными как из внутренних, так и из внешних источников. Этот компонент поддерживает:

- Хранение как структурированных данных (например, реляционные базы данных), так и неструктурированных данных (тексты, изображения, видео).
- Интеграцию с хранилищами данных и обработку потоков в реальном времени.
- Применение технологий, включая SQL, NoSQL и облачные платформы [55] [56].

Система управления моделями (СУМ) предоставляет инструменты для проведения анализа, моделирования и оптимизации. Она включает:

- Статистические модели и алгоритмы машинного обучения.
- Инструменты анализа «что, если» и сценарного планирования.
- Технологии, такие как R, Python, платформы оптимизации (например, CPLEX) [49] [57].

Пользовательский интерфейс (UI) служит связующим звеном между пользователем и системой. Важные аспекты:

- Визуальные панели и инструменты интерактивной визуализации.
- Доступность для пользователей с минимальными техническими знаниями благодаря удобному и интуитивному дизайну.
- Технологии, включающие веб-интерфейсы, мобильные приложения и обработку естественного языка [58].

Компонент управления знаниями дополняет архитектуру СППР, способствуя эффективному кодированию и применению экспертных знаний через:

- Использование онтологий и графов знаний.
- Применение экспертных систем и систем на основе правил.
- Технологии семантической сети, НКК, фреймворки представления знаний [59].

### **1.1.3. Типы архитектур СППР**

Централизованная архитектура подразумевает хранение данных и выполнение вычислений в едином репозитории. Это архитектурное решение обладает высокой согласованностью данных и упрощенным обслуживанием, однако страдает от ограниченной масштабируемости и наличия единой точки отказа [49].

Децентрализованная (распределенная) архитектура распределяет данные и вычислительные ресурсы по разным локациям. Она улучшает масштабируемость и устойчивость системы, но усложняет синхронизацию и обслуживание [55].

Облачная СППР, которая размещена на облачных платформах с использованием распределённых вычислений. Её преимуществами являются масштабируемость, экономичность и простота доступа, а недостатками зависимость от интернет-соединения и надежности провайдера [60].

Гибридная архитектура сочетает централизованные и децентрализованные подходы, что позволяет объединить сильные стороны обеих моделей. Однако сложность начальной настройки может быть значительным барьером [58].

### **1.1.4. Технологические тренды, формирующие архитектуры СППР**

1. Интеграция ИИ и машинного обучения. Эти технологии позволяют проводить более глубокий анализ данных, автоматизировать рекомендации и предлагать сценарии на основе прогнозов [57].

2. Аналитика в реальном времени. Поддерживает принятие решений в условиях временной чувствительности через обработку потоковых данных [60].

3. Граничные вычисления. Уменьшает задержку за счет обработки данных ближе к источнику данных [55].

4. СППР для принятия коллективных решений. Способствуют групповому принятию решений через инструменты и платформы для совместной работы [49].

5. Интероперабельность через API. Обеспечивает бесшовную интеграцию СППР с другими системами предприятия улучшая общую операционную эффективность.

### **1.1.5. Проблемы проектирования архитектур СППР**

- Качество данных: интеграция данных из множества источников требует обеспечения их согласованности и полноты.
- Масштабируемость. С ростом объема и скорости данных необходимо адаптировать архитектуру для сохранения производительности.
- Удобство использования. Интерфейс должен быть интуитивно понятным для пользователей с разным уровнем технической подготовки.
- Безопасность и конфиденциальность. Обеспечение защиты данных и соблюдение нормативных требований являются ключевыми аспектами.

Таким образом, архитектура СППР — это сложная, но крайне важная часть современных систем управления. Ее развитие подталкивают новые технологии, растущие требования бизнеса и стремление к повышению эффективности принятия решений.

### **1.1.6. Использование СППР**

СППР находят широкое применение в различных отраслях, таких как бизнес, здравоохранение, городском планирование, управлении ресурсами, логистика и во многих других.

В сфере бизнеса СППР поддерживают предприятие решений в стратегическом планировании анализируя рыночные тенденции, оценивая риски и оптимизируя операционные процессы [55]. Особенно полезны такие системы в маркетинге, где понимание предпочтений клиентов может существенно повлиять на разработку стратегии продвижения продукции.

Так же эти системы оказались особенно важны в здравоохранении, где они помогают в клиническом принятии решений, повышая точность диагностики, улучшают результаты лечения и снижают нагрузку на медицинский персонал [41] [61]. Wasylewicz и соавторы [62] подчёркивают, что эти системы играют важную роль в клиническом принятии решений, помогая медицинским

специалистам более точно диагностировать заболевания, рекомендовать эффективные методы лечения и управлять уходом за пациентами. Благодаря интеграции данных пациентов с медицинскими знаниями, СППР улучшают как точность, так и эффективность медицинской помощи, что в конечном итоге ведёт к более положительным результатам для пациентов.

Помимо здравоохранения, СППР также успешно используется в других отраслях. В строительстве СППР помогают улучшить проектное управление благодаря возможности оценки стоимости работ, планирования процессов и оценки рисков. Minhas и Potdar [63] отмечают, что такие системы с помощью анализа данных в реальном времени позволяют получать прогнозы развития систем, помогая руководителям проектов эффективно управлять рисками и оптимально распределять ресурсы. Интеграция СППР в строительные проекты способствует повышению качества результатов и продуктивности всех участников проекта. В сельском хозяйстве и логистике такие системы значительно повышают продуктивность и эффективность процессов, применяя современные модели для оптимизации урожайности и улучшения прогнозирования спроса [38] [39].

Нечеткие когнитивные карты (НКК) расширяют возможности СППР, моделируя сложные системы и взаимосвязи между переменными [64]. НКК позволяют количественно оценивать экспертные знания, что помогает принимать решения в условиях неопределенности, моделируя различные сценарии и визуализируя потенциальные последствия этих решений [65]. Одно из конкретных применений НКК — управление при катастрофах. Alexander [66] применяют НКК для сценариев землетрясений, демонстрируя, как эти модели могут улавливать сложные взаимосвязи между факторами, влияющими на реагирование и восстановление в условиях катаклизма. Благодаря моделированию различных исходов, НКК помогают менеджерам по чрезвычайным ситуациям оценивать стратегии и улучшать подготовку к бедствиям.

В управлении энергопотреблением методы, основанные на НКК, оптимизируют использование энергии в жилых зданиях. Ketipi, Karakasis, Koulouriotis и Emiris [67] предлагают метод многокритериального принятия решений, использующий НКК, который сосредоточен на стоимости, эффективности и устойчивости, что позволяет принимать обоснованные решения в соответствии с целями устойчивого развития.

В работах [33] [68] авторы предлагают системы поддержки принятия решений с использованием НКК, предназначенную для оценки устойчивости проектов городского развития. Эти системы предоставляют возможность сбалансировать экологические, экономические и социальные аспекты, что способствует устойчивому городскому развитию. Nunes и другие [69] описывают использование НКК для оценки факторов развития умных городов в Корее при планировании инвестиций в инфраструктуру. Lombardi и Ferretti [70] показывают, что интеграция географической информации с СППР существенно помогает в планировании землепользования и экологических оценках. Визуализируя пространственные данные, специалисты могут разрабатывать стратегии, учитывающие географические и демографические факторы, что ведёт к более обоснованным и устойчивым решениям.

Petukhova и Fachada [31] рассматривают применение НКК для моделирования сценариев развития систем розничной торговли, подчеркивая их роль в анализе и прогнозировании изменений в потребительском поведении. В своей другой работе Петухова [32] решает обратную задачу моделирования для предприятий розничной торговли с использованием теории НКК, что позволяет оптимизировать стратегическое планирование. Авторы [26] изучают риски использования НКК при управлении бизнес-процессами, выявляя потенциальные ограничения и пути их преодоления.

НКК позволяют представить сложные системы в динамике с учетом обратной связи и возможностью симуляции внешних воздействий на систему [71] что привело к широкому распространению НКК в различных областях и показывает актуальность проблемы их детального изучения.

## 1.2. НКК Коско. Правило активации НКК. Функция активации

Нечеткие когнитивные карты состоят из узлов и взвешенных дуг, которые графически можно представить как когнитивный ориентированный взвешенный граф с обратной связью. Направленные взвешенные дуги, соединяющие концепты, представляют причинно-следственную связь, существующую между объектами системы. В целом концепты НКК представляют ключевые факторы и характеристики моделируемой сложной системы и могут включать в себя события, цели, входы, выходы, состояния, переменные и тенденции системы. Визуальное отображение в виде НКК четко показывает, какие концепты влияют на другие концепты и какова эта степень влияния.

На Схеме 1 изображена простая НКК, состоящая из пяти (5) концептов и девяти (9) взвешенных дуг. НКК представляют собой взвешенные направленные графы, которые могут моделировать связи или причинно-следственные отношения, существующие между показателями системы. Концепты и связи причинно-следственного характера являются основными элементами НКК. Концепты отображены в виде узлов, например  $C_1, C_2, C_3, C_4$  и  $C_5$ , как показано на Рисунке 1.

Связь всегда направлена от концепта причины в сторону концепта следствия. Например, как показано на Рисунке 1, при  $C_1 \rightarrow C_2$ , как говорят,  $C_1$  оказывает влияние на  $C_2$ , поскольку  $C_1$  является причинным концептом, тогда как  $C_2$  является концептом следствия. Каждый концепт характеризуется числом  $A_i$ , которое представляет его значение, и является результатом преобразования реального значения переменной системы в интервал  $[0,1]$ . Веса причинно-следственной связи варьируются в интервале  $[-1,1]$ . НКК моделирует систему как одноуровневую сеть, где узлам присвоены значения понятий, а веса над дугами представляют собой причинно-следственные связи между понятиями.

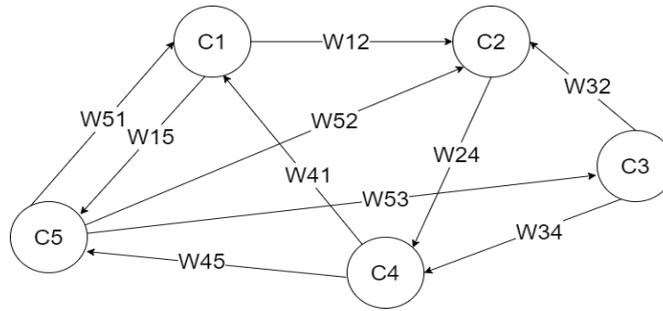


Рисунок 1. Схема простой нечеткой когнитивной карты

Модель, представленная на Рисунок 1 характеризуется набором из компонент  $(C, W, A, f)$ , где  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  – множество концептов  $m$  нечетких множеств,  $W : C \times C \rightarrow [-1, 1]$  матрица с весами  $w_{ij} \in [-1, 1]$  для каждой пары концептов  $(C_i, C_j)$ , которая определяет знак и вес дуги причинного концепта  $C_i$  и концепта следствия  $C_j$ . Кроме того,  $A : C \rightarrow A_i^{(t)}$  – это отношение вычисляет величину активации  $A_i \in R$  каждого  $C_i$  в дискретный временной шаг  $t = \{1, 2, \dots, T\}$ ,  $f$  – функция активации. При этом причинно-следственная связь  $w_{ij}$  для каждой пары концептов  $(C_i, C_j)$ :

- Если  $w_{ij} > 0$ , то наблюдается прямая зависимость, т.е. усиление концепта  $C_i$  приведет к усилению концепта  $C_j$  с интенсивностью  $|w_{ij}|$ , и наоборот, ослабление концепта  $C_i$  приведет к ослаблению концепта  $C_j$  с интенсивностью  $|w_{ij}|$ ,

- Если  $w_{ij} < 0$ , то наблюдается обратная зависимость, т.е. усиление (ослабление) одного концепта приводит к ослаблению (усилению) другого с соответствующей интенсивностью,

- Если  $w_{ij}$  близко к нулю то, наблюдается отсутствие причинно-следственной связи между концептами, поэтому дуга отсутствует.

Правило активации Коско для НКК представлено (1), где  $w_{ij}$  — вес причинно-следственной связи между концептами, а  $A_i^{(t)}$  характеризует величину

активации концепта  $C_i$  на дискретном временном шаге  $t$ . Это правило применяется повторно, пока не будет достигнуто условие окончания. На каждой итерации  $t$ , НКК производит выходной сигнал, включающий информацию обо всех величинах активаций.

$$A_i^{(t+1)} = f \left( \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M w_{ji} A_j^{(t)} \right) \quad (1)$$

В большинстве информационных систем, основанных на использовании нейронных клеточных сетей, применяется стандартное правило обновления (1). Тем не менее, в альтернативной версии этого правила (2), описанной в источнике [72], концепты учитывают не только веса и активацию других концептов, но и свои предыдущие активации. Это особенно эффективно для обновления тех концептов, которые не находятся под влиянием других концептов, что косвенно преодолевает ограничения  $i \neq j$  Коско.

$$A_i^{(t+1)} = f \left( \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M w_{ji} A_j^{(t)} + A_i^{(t)} \right) \quad (2)$$

Дополнительная модификация правила обновления (3), которая помогает устранить конфликты, связанные с присутствием неактивных концептов, описана в исследовании [73]. Этот подход, основанный на нормализованном логическом выводе, эффективен в ситуациях, где нет данных о начальном состоянии концептов, и способствует избежанию проблемы перенасыщения. Стоит также упомянуть, что в некоторых случаях эти проблемы можно решить, подстроив параметры функции активации.

$$A_i^{(t+1)} = f \left( \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M w_{ji} (2A_j^{(t)} - 1) + (2A_i^{(t)} - 1) \right) \quad (3)$$

Выбор подходящих правил обновления определяется конкретной задачей и требует тщательного осмысления специфики предметной области. В работе [74] показано, что устранение ограничения  $i \neq j$  в уравнениях (1) и (2) не всегда

приводит к улучшению прогнозных оценок.

Следует также отметить, что возможность анализа топологии нечётких когнитивных карт является одной из их наиболее ценных особенностей. К тому же, НКК могут быть представлены в виде интерпретируемых рекуррентных нейросетей с элементами нечеткого вывода. НКК опираются на принцип работы выходной активности согласно правилу МакКалока-Питтса, где концепты соответствуют элементам нейросети.

В ряде исследований (например, работы Папакостаса и др. [75], Наполеса и др. [76]) (НКК) рассматриваются как аналог искусственных нейронных сетей (ИНС), несмотря на то что некоторые НКК базируются на биологически обоснованных теориях, как, например, алгоритмы обучения Хебба. Это связано с концептуальными различиями между ними. Классические ИНС часто воспринимаются как «черные ящики», в которых ни скрытые нейроны, ни их связи не несут смысловой нагрузки в процессе решения задачи (согласно Наполесу и др. [77]). В отличие от этого, нейроны и связи в нечетких когнитивных картах способствуют формированию точных выводов для принятия решений. Нечеткие когнитивные карты не используют скрытые нейроны, так как такие элементы сложно интерпретировать, и они не способствуют пониманию принципов принятия решений. Вывод заключается в том, что НКК обладают более высоким представительным потенциалом по сравнению с ИНС, что объясняет их широкое применение в моделировании сложных реальных сценариев.

### **1.3. Динамические свойства систем, основанных на НКК**

Как было отмечено ранее, НКК на каждом временном шаге генерируют новый выходной сигнал. Этот процесс продолжается до достижения стабильности системы или до выполнения определенного критерия остановки.

Если нейронная когнитивная сеть стремится к сходимости, то в итоге она выдаст одинаковый выходной сигнал, и уровень активации концептов останется стабильным (или изменения будут минимальны). В циклических НКК генерируются различные сигналы, за исключением некоторых периодически повторяющихся состояний. Другой тип - хаотические НКК, где сеть создает разнообразные выходные сигналы.

Если наблюдается хаотическое или циклическое поведение НКК, процесс обновления останавливается после достижения установленного предела итераций. Затем, исходя из последнего полученного результата, формируется выходной сигнал. Однако из-за отсутствия стабильности в системе, этот сигнал может оказаться ненадежным. Обычно предпочтительна сходимость, так как она обеспечивает стабильность и предсказуемость сигналов, делая поведение системы более понятным для специалиста. Тем не менее, существуют сценарии, например, такие как прогнозирование временных рядов, где сходимость системы не является обязательной.

Проблемы сходимости в системах, основанных на нечетких когнитивных картах (НКК), вызваны рядом факторов:

- Особенности матрицы весов,
- Методикой обновления значений концептов,
- Видом функции активации, применяемой в правиле обновления [78].

Исследование Коттаса и др. [79] показало, что при определенных условиях весовой матрицы обеспечивает сходимость к одному и тому же решению, не зависящему от исходных значений. В исследовании, проведенном Найтом и другими [80], было изучено, как параметр угла наклона сигмоидной функции влияет на сходимость нечетких когнитивных карт, подчеркивая, что сходимость модели не зависит от весовой матрицы.

В работах [81] и [82] предложен алгоритм обучения, улучшающий сходимость системы без изменения весов. Данный алгоритм уменьшает величину ошибки, определяя коэффициент угла наклона сигмоидной функции для каждого нейрона. Наполес и его коллеги внесли усовершенствования в

функцию ошибки и аналитически сужали область поиска, что улучшило процесс обучения алгоритма.

Результаты, представленные в работе Наполеса и др. [78], показали, что без изменения весовой матрицы сложно достичь баланса между точностью и сходимостью. Они также указали, что простая корректировка параметров сигмоидной функции не всегда обеспечивает сходимость к области минимальной ошибки. В системах на основе НКК, где замкнутым активационным подпространством ограничены решения, данный ответ может быть приемлемым.

### 1.3.1. Функция активации

Функция активации  $f:R \rightarrow I$  является монотонно неубывающей и ограничивает активацию каждого концепта  $I$  в диапазоне, где  $I=[0,1]$  или  $I=[-1,1]$ , в зависимости от конкретной предметной области задачи. Активационные функции в существующих моделях можно разделить на дискретные или непрерывные, исходя из размерности пространства состояний. Самыми распространенными из них являются пороговая, знаковая пороговая, гиперболический тангенс и сигмоидная функции.

1. Пороговая функция активации (см. Уравнение (4)) порождает только два вида реакций, ограничивая тем самым систему небольшим количеством возможных состояний. Это связано с тем, что НКК представляет собой детерминированную систему. Если она достигает уже встречавшегося состояния, то начинает циклически повторяться. В результате дихотомическая НКК либо стабилизируется в одном аттракторе, либо формирует циклические паттерны (в худшем случае с экспоненциальным периодом), но никогда не переходит в хаотичное состояние и не генерирует хаотические сигналы.

$$f_1(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

2. Функция активации с использованием знакового порога, как описано в (5), также представляет собой дискретную функцию активации, которая

порождает ограниченное количество разнообразных состояний. В результате сеть будет либо стремиться к одному стабильному состоянию (точечному аттрактору), либо показывать циклические модели поведения, но хаотическое поведение исключается. Основной проблемой дискретных функций активации является их ограниченный репрезентативный потенциал, поскольку они способны моделировать только сценарии с ограниченным количеством состояний (например, с двумя или тремя различными состояниями).

$$f_2(x) = \begin{cases} -1, x < 0 \\ 0, x = 0 \\ 1, x > 0 \end{cases} \quad (5)$$

3. Гиперболическая функция активации (см. Уравнение (6)) является непрерывной и способна создавать бесконечное множество состояний внутри ограниченного  $[-1,1]^M$  гиперкуба. В отличие от дискретных функций, она не ограничивается только равновесными точками и циклическими паттернами, но также может генерировать хаотические выходные сигналы [83]. Эта гибкость делает гиперболическую функцию подходящей для моделирования как качественных, так и количественных сценариев.

$$f_3(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (6)$$

4. Сигмоидная функция, как указано в уравнении (7), представляет собой непрерывную функцию, которая создает ограниченное количество разнообразных состояний, равномерно распределенных внутри  $[-1,1]^M$  гиперкуба. Параметры  $\lambda > 0$  и  $h > 0$  в этой функции контролируются пользователем и определяют наклон и сдвиг функции соответственно. Повышение значений этих параметров увеличивает крутизну кривой, делая результаты более чувствительными к изменениям в  $x$ , и приводит к увеличению значения производной с увеличением уровня активации.

$$f_4(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(x-h)}} \quad (7)$$

С возрастанием количества выходных сигналов НКК способна обрабатывать больше характеристик. Однако это также увеличивает вероятность возникновения циклов с экспоненциально увеличивающимися периодами. Этот риск можно минимизировать или полностью исключить, если весовая матрица соответствует определенным условиям, гарантирующим сходимость к одному стабильному состоянию. Более детальная информация по этому вопросу представлена в исследованиях [76], [79] и [84].

Также было установлено, что использование пороговых функций увеличивает эффективность НКК [83]. Выбор пороговой функции зависит от требований системы и роли, которую каждый концепт выполняет в процессе моделирования исследуемой системы.

#### **1.4. Обучение НКК Коско. Подходы, основанные на алгоритмах Хебба. Подходы, зависящие от ошибки. Подходы, зависящие от данных. Гибридные подходы**

Задача обучения НКК состоит в формировании весовой матрицы, опираясь на знания экспертов и/или на данные из прошлых наблюдений. Большинство методов обучения исходят из предположения, что эксперт заранее определяет набор ключевых концептов [85], и фокусируются исключительно на обучении весовой матрицы.

Существующие алгоритмы обучения НКК часто заимствуют принципы из сферы нейронных сетей. В зависимости от метода обучения их классифицируют на три основных типа: алгоритмы обучения, основанные на правилах Хебба, алгоритмы обучения по методу Силова и алгоритмы, основанные на минимизации ошибки.

##### **1.4.1. Подходы, основанные на хеббовских алгоритмах**

Алгоритмы обучения, основанные на правиле Хебба относятся к методам

обучения без учителя, которым не нужна тренировочная выборка или заранее известные показатели для целевых концептов. Главной целью обучения НКК с использованием адаптивных алгоритмов Хебба является создание весовых матриц на основе экспертных знаний и улучшение точности уже установленных весов.

Первым алгоритмом обучения Хебба, который был назван "дифференциальным методом обучения Хебба" был описан в исследовании Дикерсона и Коско [86]. Дифференциальный метод обучения Хебба заключается в том, что если активации причинного концепта  $C_i$  и следственного концепта  $C_j$  меняются одновременно, то вес между ними  $w_{ij}$  должен увеличиться на фиксированное значение. В противном случае вес на данной итерации не изменяется. Уравнение (8) демонстрирует правило обновления весов в этом методе  $\Delta A_i^{(t)} = A_i^{(t)} - A_i^{(t-1)}$ , где  $A_i^{(t)}$  — величина активации концепта  $C_i$  на  $t$  шаге,  $\eta_t$  — скорость обучения, которая корректируется на каждом шаге.

$$w_{ij}^{(t+1)} = \begin{cases} w_{ij}^{(t)} + \eta_t (\Delta A_i^{(t)} \Delta A_j^{(t)} - w_{ij}^{(t)}), & \Delta A_i^{(t)} \neq 0 \\ w_{ij}^{(t)}, & \Delta A_i^{(t)} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Отсутствие учета системы в целом является главной проблемой такого подхода, как дифференциальный метод обучения Хебба. Этот метод ограничивает обновление весов только между парами концептов, игнорируя взаимодействие с остальными элементами системы.

В качестве решения этой проблемы был разработан улучшенный метод, названный «сбалансированным дифференциальным алгоритмом» [87]. Он устраняет ограничения предыдущего метода, учитывая изменения всех концептов, происходящие одновременно с обновлением весов. Этот подход учитывает синхронные изменения всех концептов.

В дополнение к уже существующим методам, были предложены два инновационных алгоритма обучения, вдохновленных принципами синаптической пластичности. Эти алгоритмы получили названия "активный

алгоритм обучения Хебба" и "нелинейный алгоритм обучения Хебба". Активный алгоритм уникален тем, что он предполагает асинхронное обновление всех концептов в системе, что способствует сходимости к точечному аттрактору с учетом активности концептов на различных этапах. Этот подход особенно эффективен в системах, где последовательность обновления концептов строго определена экспертами. Отличительной особенностью активного алгоритма является то, что он учитывает все веса в системе, исключая только веса петель. В рамках этого алгоритма концепты классифицируются на уже обновленные и те, которым требуется обновление, причем активация первых напрямую влияет на обновление последних. Механизм обновления весов в этом алгоритме описывается в Уравнении (9), где  $A_j(t)$  включает значение  $j$ -го концепта и  $\gamma^{(t)}$  корректировку на  $t$  шаге. Скорость обучения и коррекция весов, постепенно уменьшаются. Основным недостатком этого метода является его зависимость от экспертных оценок.

$$w_{ij}^{(t+1)} = [1 - \gamma^{(t)}] w_{ij}^{(t)} + \eta^{(t)} A_i^{(t)} [A_j^{(t)} - w_{ij}^{(t)} \check{A}_j^{(t)}] \quad (9)$$

Нелинейный алгоритм обучения Хебба представляет собой модификацию оригинального. На начальном этапе необходимо экспертное вмешательство для определения характеристик концептов, их диапазонов значений и знаков каждой взвешенной связи. Этот алгоритм сохраняет первоначальную структуру графа, заданную экспертами, на протяжении всего процесса обучения для поддержания его физической интерпретации [85]. Однако зависимость от экспертных критериев является одним из основных недостатков этого подхода.

В нелинейном алгоритме обучения Хебба используются два критерия остановки обучения: когда достигнуто решение, близкое к целевому значению, либо когда найден точечный аттрактор.

Правило обновления весов в этом алгоритме демонстрируется в Уравнении (10).

$$w_{ij}^{(t+1)} = w_{ij}^{(t)} + \eta^{(t)} A_i^{(t)} [A_j^{(t)} - A_j^{(t)} w_{ij}^{(t)}] \quad (10)$$

Авторы исследования Папагеоргиу и др. [88] предложили

дополнительную модификацию, введя фактор корректировки веса  $\gamma$ . Эта модификация привела к созданию нового правила обновления весов, описанного в Уравнении (11). В этом правиле используется знаковая пороговая функция активации  $sgn(\cdot)$ , что позволяет авторам сохранить направленность весов.

$$w_{ij}^{(t+1)} = \gamma w_{ij}^{(t)} + \eta^t A_j^{(t)} \left[ A_j^{(t)} - \operatorname{sgn}\left(w_{ij}^{(t)}\right) A_j^{(t)} w_{ij}^{(t)} \right] \quad (11)$$

В исследовании [89] был предложен усовершенствованный вариант нелинейного алгоритма обучения Хебба. Для предотвращения застревания в локальных минимумах на плато функции ошибки авторы включили в правило обновления дополнительное условие, известное как «импульс». В уравнении (12) представлено измененное правило обновления, где  $\alpha \in (0,1]$  обозначает добавленное ускорение, помогающее более эффективно спускаться по поверхности функции ошибки.

$$w_{ij}^{(t+1)} = \alpha^{(t+1)} \Delta w_{ij}^{(t)} + \eta^{(t+1)} \left( \zeta^{2t} \right) \left[ 1 - \zeta^{(t)} \right] \left[ A_j^{(t)} - A_j^{(t)} w_{ij}^{(t)} \right], \quad (12)$$

где

$$\zeta(t) = \frac{1}{1 + e^{-A_i^{(t)}}} \quad (13)$$

В более позднем исследовании, проведенном Стахом и его коллегами [90], была представлена улучшенная версия нелинейного алгоритма обучения Хебба, названная "нелинейным алгоритмом обучения Хебба, зависящим от данных". Основная идея, выдвинутая авторами, заключается в интеграции дополнительной информации с целью улучшения эффективности обучения и более точного моделирования. Этот алгоритм, хотя и использует те же принципы, что и другие хеббовские алгоритмы, отличается от них тем, что включает в себя доступные системные данные в дополнение к текущей модели в процессе обучения. В данном методе начальная весовая матрица может быть создана случайным образом. Результаты ряда экспериментов указывают на то, что при наличии ретроспективных данных, данный алгоритм демонстрирует лучшие результаты по сравнению с обычным нелинейным алгоритмом обучения

Хебба. Однако, более глубокий анализ, проведенный Папакостасом и его командой, показал, что даже улучшенный вариант алгоритма не демонстрирует достаточно эффективных результатов при решении задач классификации.

#### 1.4.2. Подходы, основанные на алгоритме Силова

В подходах, основанных на алгоритме Силова [2], связи между концептами в сетях когнитивных карт сходны с подходом Коско, где главными элементами являются веса  $w_{ij} \in [-1,1]$ . Различие заключается в том, что в алгоритме Силова эти веса рассматриваются в контексте нечеткой матрицы смежности в графе когнитивных карт. Эта нечеткая матрица учитывает, что веса могут иметь как положительные, так и отрицательные значения, а учитывая, что операции с нечеткими множествами определены только для положительных значений функции принадлежности  $[0,1]$ , возникает сложность в учете отрицательных взаимодействий между концептами. В алгоритмах, разработанных Силовым, этот вопрос решается путем удвоения количества концептов: положительные и отрицательные влияния обрабатываются отдельно и интегрируются на заключительной стадии алгоритма.

Дополнительные концепты создаются для отслеживания отрицательных взаимодействий, что приводит к переходу от исходной НКК с разными знаками нечетких связей  $\mathbf{W} = |w_{ij}|$  к нечеткой матрице положительных связей  $\mathbf{R} = |r_{ij}|$  размером  $2n \times 2n$  (где  $n$  – количество концептов), согласно определенному правилу:

$$\begin{cases} r_{2i-1,2j-1} = w_{ij}, r_{2i,2j} = w_{ij}, \text{—если —} \circ w_{ij} > 0 \\ r_{2i-1,2j} = -w_{ij}, r_{2i,2j-1} = -w_{ij}, \text{—если —} \circ w_{ij} < 0 \\ r_{2i-1,2j-1} = 0, r_{2i,j-1} = 0, \text{если —} \circ w_{ij} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Где для определения латентных концептов в НКК осуществляется транзитивное замыкание  $R : \bar{R} = R \vee R^2 \vee \dots :$

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} \circ \mathbf{R} \quad (15)$$

Поскольку НКК являются классическими примерами нечетких систем, для построения транзитивного замыкания используются типичные операции t-норм

в нечеткой логике, что приводит к изменяющимся нечетким значениям весов и входных концептов, определяющим причинно-следственные связи. В рамках задач, связанных с нечеткими когнитивными картами, особенно распространено использование операций минимума ( $\min$ ) и алгебраического умножения (algebraic product). При применении операции минимума передача прямого воздействия от одного концепта  $A_i$  к другому  $A_j$  происходит следующим образом:

$$A_j^{(t+1)} = \min(A_i^t, w_{ij}) \quad (16)$$

После того как в НКК определены скрытые положительные и отрицательные влияния, предлагается создать матрицу  $\mathbf{V} = (v_{ij}, \overline{v_{ij}})$ , которая позволит оценить как прямое, так и обратное воздействие компонентов на систему. Это достигается с помощью следующего преобразования:

$$\begin{cases} v_{ij} = \max(r_{2i-1,2j-1}, r_{2i,2j}) \\ \overline{v_{ij}} = -\max(r_{2i-1,2j}, r_{2i,2j-1}), \end{cases} \quad (17)$$

где  $v_{ij}$  представляет силу положительного воздействия, а  $\overline{v_{ij}}$  силу отрицательного.

В реальных сложных системах связи между концептами не всегда однозначны, и любой концепт может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на целевую функцию. В матрице взаимодействий для каждой причинно-следственной связи в исходной системе существуют два веса: один представляет меру положительного влияния, а другой - меру отрицательного влияния. Каждая связь характеризуется степенью согласования (консонанса) между её положительной и отрицательной составляющими взаимодействия.

В русскоязычной литературе описываются различные методы прогнозирования развития ситуации при анализе матрицы скрытых влияний. Максимов [3] и др. предлагают метод прогнозирования в НКК, основанный на суммировании приращений, как описано Робертсом [91]. В этом подходе вектор

состояния системы создается путем объединения начального значения (в начальный момент времени) и суммирования всех изменений, произошедших до определенного момента времени. Значение вектора состояния системы в определенный момент времени представляет собой результат суммирования всех приращений, произошедших за период времени до этого момента – Кулинич А.А. и соавторы [92] [4] изучают метод прогнозирования без суммирования приращений, где для определения значений концептов используются оценочные шкалы приращений, не фиксируя текущее значение концептов.

### **1.4.3. Методы обучения, зависящие от ошибки**

Методы обучения, зависящие от ошибки, направлены на создание матриц, которые минимизируют функцию ошибки. Это достигается путем сравнения целевых значений выходных концептов с результатами, полученными от карты на текущем шаге. Эти алгоритмы считаются более ресурсоемкими вариантами оптимизации, поскольку они нацелены на адаптацию модели к набору исторических данных. Ключевым аспектом данных алгоритмов является определение целевой функции, которую необходимо оптимизировать, и это представляет собой основную задачу в процессе обучения. В данной секции рассматриваются разнообразные целевые функции и их формальные модели.

На примере Кулуриотиса и его коллег [93] можно увидеть, как для настройки структуры модели на основе имеющихся данных можно применять генетический алгоритм. Этот метод оперирует парами входных и выходных векторов, которые называются "примерами". Алгоритм стремится найти оптимальный набор весов, который преобразует входные векторы в соответствующие выходные. Уравнение (18) представляет собой функцию ошибки, которую необходимо минимизировать в данном контексте. В данной формуле символ  $x$  обозначает набор весов,  $K$  число примеров,  $M$  количество концептов, а  $A_{ik}$  и  $\tilde{A}_{ik}$  обозначают текущие и желаемые значения, соответственно.

$$E(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M |A_{ki} - \tilde{A}_{ki}| \quad (18)$$

Также, в исследовании [94] был предложен метод обучения, использующий оптимизацию с помощью алгоритма роя частиц. Этот алгоритм, подобно ранее описанному, вычисляет набор весов, опираясь на исторические данные (результаты предыдущих симуляций выходных сигналов), которые соответствуют ожидаемому итоговому состоянию. Для этого подхода также необходимы экспертные знания для установления таких соответствующих ограничений, что связи внутри модели НКК будут соответствовать физическому смыслу. Каждая частица представляет возможное решение кластеризации и перемещается в поисковом пространстве, корректируя свою скорость на основе своей наилучшей позиции ( $pBest$ ) и глобальной наилучшей позиции ( $gBest$ ), найденной роем. Обновление скорости выполняется по формуле:

$$v_i^{(t+1)} = wv_i^{(t)} + c_1r_1(pBest_i - x_i^{(t)}) + c_2r_2(gBest - x_i^{(t)}) \quad (19)$$

Основными параметрами метода являются  $w$  - вес инерции,  $c_1$  и  $c_2$  - когнитивные и социальные компоненты,  $r_1$  и  $r_2$  - случайные числа. Эти параметры играют важную роль в эффективности и точности алгоритма. Формула (19) определяет функцию ошибки, которую следует минимизировать для  $k$ -го примера, где  $A_{ik}^*$  - это уровень активации  $i$ -го целевого концепта,  $H(x)$  - функция Хевисайда [95], а  $L_i$  и  $U_i$  - нижняя и верхняя границы приемлемого диапазона активации соответственно.

$$E_k(x) = \sum_{i=1}^M H(L_i - A_{ik}^*) |L_i - A_{ik}^*| + \sum_{i=1}^M H(A_{ik}^* - U_i) |A_{ik}^* - U_i| \quad (20)$$

Еще один способ обучения структуры сети на основе одного набора ретроспективных данных направлен на улучшение надежности систем, использующих НКК, в ситуациях многокритериального принятия решений. В этом методе веса пересчитываются с целью увеличения надежности системы, которая основана на НКК. Для достижения многокритериальной оптимизации, в

диссертации использовался модифицированный генетический алгоритм, который вычисляет матрицу весов, удовлетворяющую нескольким критериям одновременно, где выражение (21) определяет функцию ошибки модели,  $\tilde{A}_i$  - это целевое значение выходного параметра для  $i$ -го концепта,  $A_i^t$  - текущий уровень активации, а  $T > 50$  обозначает максимальное количество временных шагов.

$$E(x) = \sum_{i=1}^M \left| \tilde{A}_i - \sum_{t=1}^{50} \frac{A_i^{(T-t)}}{50} \right| \quad (21)$$

Сташ и соавторы в исследовании [96] предложили генетический алгоритм обучения с одним циклом симуляции. В (22) представлена используемая в диссертации функция ошибки, где  $p \in \{1, 2, \infty\}$ , а  $c$  означает коэффициент нормализации, то есть  $c = \frac{1}{(T-1)}$  для  $p \in \{1, 2\}$  и  $c = \frac{1}{T-1}$  для  $p = \infty$ . Данный алгоритм разбивает последовательность входных сигналов на не более, чем  $K = T - 1$  пар вида  $\{A^{(t)}, A^{(t+1)}\}$ , таких, что  $A^{(t)}$  является вектором начального состояния, а  $A^{(t+1)}$  - целевого. Повторяющиеся пары, не учитываются, поскольку, когда рекуррентная система достигает состояния, которое уже было сгенерировано ранее, она начинает повторять свои предыдущие действия, независимо от предыдущих вычислений. Поэтому, все выходные сигналы, сгенерированные после достижения равновесной точки или предельного цикла, не учитываются.

$$E(x) = \frac{1}{KM(T-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \left( A_{ki}^{(t)} - \tilde{A}_{ki}^{(t)} \right)^2 + p_s \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |w_{ij}| \quad (22)$$

Выражение (21) является наиболее распространенным при обучении НКК. Однако, с увеличением числа концептов, его эффективность быстро уменьшается. Для улучшения масштабируемости этого метода, Шаш и его коллеги [97] исследовали, как можно использовать параллелизм генетических алгоритмов с вещественным кодированием. Их предложенный метод параллелизации "ведущий — ведомый" позволяет обучать НКК-модели,

состоящие из множества концептов.

Через некоторое время был разработан метод, основанный на генетических алгоритмах с использованием кодирования вещественных чисел "разделяй и властвуй" [98]. Этот метод применяет стратегию разделения входных данных с целью ускорения процесса обучения. В уравнении (23) представлена функция приспособленности, которую необходимо максимизировать, где  $\alpha$  и  $\beta$  — положительные константы масштабирования.

$$F(x) = \frac{\alpha}{\beta \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^M \left( A_i^{(t)} - \tilde{A}_i^{(t)} \right)^2 + 1} \quad (23)$$

В исследовании, проведенном Чейном и его коллегами [99], была использована функция ошибки, которая требовала нескольких итераций симуляции для улучшения способности обучаемой модели к обобщению. Уравнение (24) представляет эту функцию, где параметр  $a$  указывает на количество обучающих последовательностей, а  $n$  — количество временных шагов. Важно подчеркнуть, что данная функция ошибки является расширением Уравнения (22), которое предполагает выполнение всего одной итерации.

Для минимизации этой функции ошибки каждый вес связи был разбит на последовательность дискретных переменных  $P+1$ , у которых знак и целочисленные значения  $P$  указывают на требуемую точность. Этот метод успешно использовался для настройки полно связной сети с сорока концептами в её структуре.

$$E(x) = \frac{1}{KM(T-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \left( A_{ki}^{(t)} - \tilde{A}_{ki}^{(t)} \right)^2 \quad (24)$$

В последующей работе, Чейн и его коллеги [100] представили алгоритм обучения, основанный на принципах роевого интеллекта и осуществленный с применением декомпозиции. Через некоторое время был разработан метод, использующий генетические алгоритмы с кодированием вещественных чисел, для настройки генных регуляторных 100 узловых сетей. В дальнейшей исследовательской работе [101] было предложено улучшенное выражение для

функции ошибки, учитывающее потери в сети из-за ее разреженной структуры, как отражено в Уравнении (25). Здесь процесс оптимизации проводился с применением метода декомпозиционного генетического алгоритма с вещественным кодированием (RCGA). Результаты экспериментов подтвердили, что этот алгоритм успешно обучает крупномасштабные сети с числом концептов, достигающим 300. На основе доступной информации можно заключить, что этот метод дает лучшие результаты в обучении сложных НКК-сетей по сравнению с предыдущими исследованиями.

$$E(x) = \frac{1}{KM(T-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \left( A_{ki}^{(t)} - \tilde{A}_{ki}^{(t)} \right)^2 + p_s \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |w_{ij}| \quad (25)$$

В своей статье [5] российские ученые представили метод верификации когнитивной карты, который предоставляет возможность оценить правильность модели при установке начальных весов в ней и выявить потенциальные ошибки. Для проведения этой верификации можно воспроизвести модель на определенном этапе  $(t-1)$ , имея информацию об исходных весах НКК и целевой функции прогноза на шаге  $(t-1)$ . В данном методе учитываются лишь тенденции развития влияний концептов, так как учтены некоторые упрощения, которые не учитывают задержки в распространении влияния между концептами. Этот алгоритм позволяет отслеживать динамику развития концептов и сравнивать её с реальными данными.

Также в данной работе был предложен метод, который помогает избежать начальных ошибок при создании НКК. Этот метод использует абсолютные лингвистические значения концептов и модель для прогнозирования значений без суммирования. Первый метод позволяет избегать неточностей, связанных с оценками экспертов, так как он использует "абсолютные" точные значения концептов, а второй метод гарантирует наличие минимального прогнозного значения влияния концепта, которое он может иметь.

#### **1.4.4. Сравнение алгоритмов обучения НКК**

Каждый тип алгоритма обучения обладает своими преимуществами и ограничениями, которые влияют на его применимость в разных задачах, учитывая доступные исторические данные и экспертные знания. Выбор наилучшего метода является сложной задачей в каждом случае и может существенно влиять на точность и теоретическую обоснованность полученной модели [35].

Алгоритмы на основе правила Хебба позволяют точно настраивать веса с небольшими отклонениями от исходной конфигурации, предоставленной экспертом. Это означает, что скорректированные веса могут сохранять смысловое значение причинно-следственных связей, что не всегда возможно при использовании алгоритмов, основанных на минимизации ошибки. Однако у этих скорректированных весов есть ограничения в обобщении, что ограничивает их применимость в задачах прогнозирования, особенно в случаях, где нужно учитывать более двух категорий. Исключение составляют случаи, когда начальные веса близки к оптимальным значениям и имеется обширный объем обучающих данных. В таких ситуациях возможно использование алгоритмов обучения, зависящих от ошибки, чтобы улучшить работу когнитивных карт. Это позволит карте лучше учитывать взаимодействие между концептами и их воздействие на целевые концепты. Однако следует учитывать, что такие методы не всегда учитывают полностью динамические и нелинейные характеристики реальных систем. Они также могут иметь свои недостатки, такие как высокая вычислительная сложность и необходимость выполнения множества симуляционных циклов.

Важно отметить, что алгоритмы обучения, зависящие от ошибки, могут создавать сложности при интерпретации полученных результатов, что может привести к неправильному статическому анализу. Пока нет убедительных доказательств их способности создавать достоверные причинно-следственные связи, которые бы отражали поведение изучаемых физических систем. Кроме того, они могут приводить к когнитивным картам с плохой сходимостью.

Из вышеизложенного анализа видно, что алгоритмы, основанные на правиле Хебба, могут быть эффективными в задачах управления, особенно когда известны ограничения предметной области. Когнитивные карты Силова могут быть полезны в случаях, когда матрица весов содержит связи с отрицательным знаком. Алгоритмы, характеризующиеся оценкой ошибки, плохо интерпретируемы обычно, но хорошо подходят для задач классификации и прогнозирования.

### **1.5 Нечеткие когнитивные карты, разработанные российскими исследователями**

Российские коллективы исследователей фокусируются на разработке структуры НКК для сложных систем. Такие системы используются при решении актуальных задач моделирования комплексных систем и характеризуются свойствами типичными сложных систем выделенными John Holland [102], а именно нелинейностью, наличием потоков, позитивными и негативными циклами, а также адаптивностью и разнородностью. Описание и структурирование этих систем играет большую роль в развитие системного подхода и позволяет проводить сценарное моделирование. В этой работе рассмотрены карты в порядке их публикации и с точки зрения особенностей примененных алгоритмов.

В статье “Построение и анализ когнитивной модели процесса выбора профессии выпускниками в системе начального-среднего профессионального образования”, авторов Д. Г. Лагерев и Е. А. Ларичевой [10] описана проблема снижения числа учащихся. В исследовании авторы использовали методологию когнитивного моделирования слабоструктурированных систем и процессов Р. Аксельрода [71]. В процессе применения данной методологии эксперты вывели причинно-следственные зависимости, с помощью которых была построена НКК

процесса выбора учебного заведения, с учетом факторов как микросреды, так и макрофакторов. На основе построенной НКК были получены сценарии развития ситуации с применением метода импульсных процессов. Это позволило оценить последствия принимаемых решений и выбрать оптимальную стратегию.

Строкова Л. А. [11] предложила применить НКК при проектировании оснований инженерных сооружений. В работе проведена оценка связанности когнитивного графа и рассмотрен процесс распространения возмущений. Данное исследование позволило определить способы повышения эффективности проектировочных отделов строительных организаций.

В статье Мешалкина В. П. и Белозерского А. Ю. [12] проанализированы особенности функционирования промышленных предприятий с точки зрения процесса развития рискованной ситуации. Авторы приводят пример построения системы риск-менеджмента, используя систему нечетких когнитивных карт и описывают 9 этапов построения модели анализа и принятия решений. Этапы процесса включают в себя анализ исследуемой системы, оценку взаимосвязей между системными факторами, выявление влияния этих факторов на источники рисков, анализ воздействия выявленных опасностей на риски, оценку и классификацию мероприятий на основе анализа степени риска и потенциальных последствий. Затем производится выбор мероприятий для снижения риска в рамках выделенного класса и оценка влияния выбранных мероприятий в пределах этого класса, моделирование динамики и анализ возможных сценариев управления рисками, мониторинг рисков.

Альтернативный подход для построения НКК был предложен Гинис Л.А. в статье “Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем” [8], суть которого в объединении различных показателей в подсистемы как по объекту исследования, так и по природе. Это позволило построить как качественный, так и количественный прогноз развития системы. Для построения нечетких ориентированных графов было предложено использовать минимаксный базис и конъюнктивную прочность пути.

Авторы статьи “Анализ когнитивной карты системы обучения на основе

экспертных оценок” [13] рассмотрели использование НКК в образовании. Информация для построения НКК была получена путем опроса экспертов по специально разработанной анкете. Далее был произведен системный анализ НКК и определена средняя сложность алгоритма для задачи оценки эффективности системы обучения. Результаты влияния всех концептов отобраны по 4 признакам, где наглядно представлено какой концепт положительно влияет на систему обучения, какой отрицательно и который усиливает или ослабляет процесс обучения студентов. Среднее число попаданий вычислительного процесса в состояния вершин графа было найдено путем решения системы линейных алгебраических уравнений, что позволило вычислить среднюю трудоемкость вычислительного процесса по формуле, представленной в Уравнении (26):

$$\theta = \sum_{i=1}^{11} N_i n_i \quad (26)$$

Еще один подход к построению НКК был предложен в работе Оськина А. Ф. и Оськина Д. А. [9]. Суть подхода заключается в увеличении формализации отдельных шагов процесса построения НКК путем использования балльной шкалы интенсивности предпочтений, описанной Т. Саати [103]. По мнению авторов, использование совместно построенной НКК позволило естественным образом объединить усилия группы экспертов, упростило выработку консолидированного представления о процессах, протекающих в моделируемой системе, что в итоге повысило точность моделирования, поскольку параметры модели в меньшей степени зависят от субъективного мнения отдельных экспертов.

Авторами статьи “Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования” [6] был предложен подход решения, основанный на гибридной системе, интегрирующей НКК и нейро-нечеткие сети. В работе авторы рассматривают применение данного подхода на основе решения задачи защиты интересов личности. НКК была использована при построении качественного прогноза показателей и выделении наиболее влияющих на

систему факторов. Такой подход делаем возможным приоритизировать концепты когнитивной карты и подать на входы нейронной сети наиболее значимые. В дальнейшем исследовании [7] была предложена модификация гибридной модели прогнозирования временных рядов, сочетающая три модуля: гибридная нейро-нечеткая сеть выполняющая количественный прогноз с верификацией (оценкой адекватности прогноза); нечеткая когнитивная карта, работающая параллельно с предыдущим модулем, выделяющая факторы влияния на рассматриваемый концепт для получения прогноза; нейронная сеть, агрегирующая выводы предыдущих модулей, и формирующая финальный прогноз.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ**

### **2.1. Операции каузальной алгебры в НКК**

При агрегировании приращений влияния концептов на целевой в работе была применена нечеткая матричная алгебра или каузальная алгебра. Во время формирования транзитивного замыкания для нечеткой матрицы положительных отношений  $R$ , новые Нечеткие значения воздействия на целевой концепт определяются путем применения операций  $T$ -норм и  $S$ -норм [104] [105] [106], типичных для нечеткой логики, к нечетким значениям приращений входных концептов и весам причинно-следственных связей. В задачах, связанных с нечеткими когнитивными картами, обычно применяют операции минимума и алгебраического умножения. Например, при использовании операции минимума

для передачи прямого влияния  $A_i$  на концепт  $A_j$ :

$$A_j^{t+1} = \min(A_i^t, w_{ij}) \quad (27)$$

В методологии, изложенной в исследовании Силова, интеграция новых воздействий от нескольких концептов, оказывающих прямое влияние на рассматриваемый выходной концепт, выполняется с применением  $S$ -норм. Среди  $S$ -норм наиболее широко используется операция взятия максимума. Новое значение концепта  $A_j$ , подверженного воздействию  $N$  входных значений  $A_i$ , вычисляется согласно:

$$A_j^{t+1} = S_{i=1}^N(A_i T w_{ij}) \quad (28)$$

где  $S$  – операция  $S$ -нормы, а  $T$  – операция  $T$ -нормы. Примеры стандартных  $T$ -норм и  $S$ -норм описаны в работах [107] [108] [109] и приведены в Таблица 1.

Таблица 1

**$T$ -нормы и соответствующие им  $S$ -нормы**

| $T$ -норма   | $S$ -норма   |
|--|--|
| Минимум ( min )<br>$M(p, q) = \min(p, q)$  | Максимум ( max )<br>$S_m(p, q) = \max(p, q)$   |
| Произведение ( algebraic product )<br>$\Pi(p, q) = pq$   | Алгебраическая сумма<br>$S_{\Pi(p, q)} = p + q - pq$   |
| Произведение Гамахера<br>$H(p, q) = \begin{cases} 0, \text{ если } p = q = 0 \\ \frac{pq}{p + q - pq} \end{cases}$ | Сумма Гамахера<br>$S_H(p, q) = \begin{cases} 0, \text{ если } p = q = 0 \\ \frac{p + q - 2pq}{1 - pq} \end{cases}$ |

|  |   |
|--|---|
| Произведение Эйнштейна<br>$E(p, q) = \begin{cases} 0, \text{ если } p = q = 0 \\ \frac{pq}{2 - (p + q - pq)} \end{cases}$            | Сумма Эйнштейна<br>$S_E(p, q) = \begin{cases} 0, \text{ если } p \cdot q = -1 \\ \frac{pq}{1 + pq} \end{cases}$                 |
| Усиленное произведение<br>$N(p, q) = \begin{cases} \min(p, q), \text{ если } p + q \geq 1 \\ 0, \text{ если } p + q < 1 \end{cases}$ | Усиленная сумма<br>$S_N(p, q) = \begin{cases} \max(p, q), \text{ если } p + q < 1 \\ 0, \text{ если } p + q \geq 1 \end{cases}$ |
| Разность Лукашевича (bounded diff)<br>$L(p, q) = \max(p + q - 1, 0)$   | Ограниченная сумма<br>$S_L(p, q) = \min(p + q, 1)$  |

Классифицируют параметризованные и непараметризованные  $T$ -нормы. Значения, выдаваемые непараметризованными  $T$ -нормами, являются инвариантными, в то время как результаты, полученные от параметризованных  $T$ -норм могут меняться как в качественном, так и количественном отношении вследствие модификации входящих в них параметров — степеней свободы оператора.

Применение нормы  $\min$  может предоставить определенные преимущества для систем, которые занимаются логической обработкой информации, особенно когда имеется множество логических связей между входными и выходными данными. Тем не менее, из-за некоторых ограничений данного оператора его применение бывает недостаточно широким.

Определение функции принадлежности произведения нечетких множеств посредством оператора algebraic product осуществляется в соответствии со следующей формулой:

$$A \cap B(x) = A(x) \cdot B(x), x \in X \quad (29)$$

При выборе оператора algebraic product, значение  $A \cap B(x)$  количественно зависит от фактических значений  $A(x)$  и  $B(x)$  (кроме случая

равенства нулю одной из функций). Преимущество использование этого оператора в том, что потеря информации менее значительна, чем при использовании оператора  $\min$ .

В литературе обсуждаются разнообразные подходы к выбору наилучшего оператора для задач моделирования нечетких когнитивных карт [110], [111], [112], но до сих пор отсутствует универсального мнения специалистов по данному вопросу. На практике оператор зачастую выбирается путем тестирования различных комбинаций или экспертного мнения о рассматриваемой системе. Наиболее часто в качестве операторов пересечения  $A \cap B$  используются стандартные  $T$ -нормы [113], [114], [115].

Для  $S$ -норм также существует разделение на непараметризованные и параметризованные операторы. Результат применения непараметризованных операторов не зависит от каких-либо переменных и остается неизменным;  $S$ -нормы также могут быть охарактеризованы различной степенью оптимизма, при этом оператор усиленной суммы обеспечит наивысший результат, тогда как оператор максимума даст наинизший. Оператор максимума ( $\max$ ) и алгебраическая сумма были представлены в работе [116] как наиболее подходящие для воплощения концепции объединения в контексте нечетких множеств. Эти операторы легли в основу формирования механизмов агрегирования нечетких данных, что стало значимым шагом в развитии теории нечетких множеств. По мере развития нечеткой логики число операторов, называемых  $T$ -конормами или  $S$ -нормами, увеличивалось. Принимая во внимание, что применение оператора максимума ( $\max$ ) для расчета функции принадлежности множества  $A \cup B$  ведет к минимальному из возможных результатов, все иные операторы  $S$ -норм получили обозначение *super-max*-операторов. Это обусловлено тем, что они превышают по своим результатам операцию максимума, демонстрируя более "оптимистичный" подход к агрегации входящих значений.

В нечеткой логике часто используются  $T$ -нормы\*\* и  $T$ -конормы для моделирования операций конъюнкции и дизъюнкции соответственно. Обычно

выбираются двойственные пары, связанные законом Де Моргана, чтобы обеспечить согласованность вычислений. Однако в некоторых случаях применение недвойственных пар может привести к более подходящим результатам. Например, в работе [117] исследуются решения нечетких реляционных уравнений (НРУ), определенных с использованием максимальной  $T$ -конормы и произвольной  $T$ -нормы. Авторы показывают, что выбор недвойственных пар  $T$ -норм и  $T$ -конорм может приводить к различным интерпретациям и результатам, отличающимся от ожидаемых. Они предлагают условия, при которых такие НРУ дают решения, соответствующие интуитивным ожиданиям. В исследовании [118] анализируется влияние различных пар  $t$ -норм и  $T$ -конорм на работу нечетких контроллеров. Рассматриваются системы, такие как инверсный маятник (Cartpole) и моделирование двумерной функции sinc, с использованием трех различных пар  $T$ -норм и  $T$ -конорм. Авторы обсуждают, как выбор недвойственных пар может повлиять на производительность и обучение адаптивных нечетких систем. В работе [119] рассматривается применение нечетких реляционных уравнений для сжатия изображений. Авторы используют различные  $T$ -нормы и  $T$ -конормы при кодировании и декодировании изображений в цветовых пространствах RGB и YUV. Исследование показывает, что выбор недвойственных пар  $T$ -норм и  $T$ -конорм может улучшить качество восстановленных изображений и эффективность сжатия.

Эти примеры демонстрируют, что использование недвойственных пар  $T$ -норм и  $T$ -конорм может быть полезным в различных приложениях нечеткой логики. Однако важно тщательно анализировать влияние такого выбора на результаты и учитывать специфику конкретной задачи.

## 2.2. Системные показатели НКК

После обучения НКК и построения матрицы положительно- отрицательных связей проводится системный анализ полученной системы. Для этого на основе матрицы положительно-отрицательных связей  $V = \left| \left( v_{ij}, \bar{v}_{ij} \right) \right|$ , полученной методом Силова, определяются системные показатели анализируемой слабоструктурированной системы. В теории НКК консонансом является функция положительного и отрицательного влияния концепта на концепт, характеризующая влияния в системе и уровень доверия или недоверия к результату. При увеличении значения консонанса увеличивается уверенность в знаке воздействия. В Таблица 2 представлены выражения, по которым определяются показатели НКК.

Таблица 2

**Системные показатели НКК**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Консонанс                        | $c_j = \frac{ v_{ij} + \bar{v}_{ij} }{ v_{ij}  +  \bar{v}_{ij} }$  |
| Диссонанс                        | $d_{ij} = 1 - c_{ij}$  |
| Воздействие                      | $P_{ij} = \text{sign}(v_{ij} + \bar{v}_{ij}) \max( v_{ij} ,  \bar{v}_{ij} ),$<br>$v_{ij} \neq -\bar{v}_{ij}$ |
| Влияние i-го концепта на систему | $\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{ij}$  |
| Влияние системы на j-й концепт   | $\tilde{P}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ij}$  |

|   |   |
|---|---|
| Совместное положительное влияние                                  | $P_{ij} = P_{ji} = v_{ij} S v_{ji}$   |
| Совместное отрицательное влияние                                  | $n_{ij} = n_{ji} = - \bar{v}_{ij}  S  \bar{v}_{ji} $  |
| Консонанс влияния <i>i</i> -го концепта на систему                | $\bar{C}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$   |
| Консонанс влияния системы на <i>j</i> -й концепт                  | $\bar{C}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_{ij}$   |
| Диссонанс влияния <i>i</i> -го концепта на систему                | $\bar{D}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}$   |
| Диссонанс влияния системы на <i>j</i> -й концепт                  | $\bar{D}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}$   |
| Консонанс взаимного влияния <i>i</i> -го и <i>j</i> -го концептов | $c_{ij} = c_{ji} = \frac{ (v_{ij} + v_{ji}) + (\bar{v}_{ij} + \bar{v}_{ji}) }{ v_{ij} + v_{ji}  +  \bar{v}_{ij} + \bar{v}_{ji} }$ |

Консонанс и диссонанс — это системные индикаторы в НКК, определяющие уровень уверенности в знаке плюс и минус соответственно в когнитивных отношениях концептов системы [120]. Матрицы  $C = [c_{ij}]_{n \times n}$ ,  $P = [p_{ij}]_{n \times n}$ , сформированные на основе  $c_{ij}$  и  $p_{ij}$  соответственно, именуется как матрицы общего согласования и матрицы взаимоположительного влияния. Создание этих матриц, наряду с другими аналогичными системными метрическими матрицами, является ключевым шагом для осуществления всестороннего анализа разработанной модели и является предметом детального научного исследования. Установление уровня значимости в отношении оценок параметров, зафиксированных в  $\alpha$ -срезе, обозначаемом как уровень

релевантности, который позволяет научно обоснованно идентифицировать критические концепты и формировать кластеризацию концептов в рамках системы. Такой подход обеспечивает точную количественную оценку воздействия каждого отдельного концепта, в том числе в контексте их синергетического взаимодействия, на динамику системы в рамках определенной временной траектории. Под уровнем релевантности понимается уровень в системе значимости влияния связи концептов, задаваемый на отрезке  $[0,1]$ . Метод выделения кластеров позволяет идентифицировать группы схожих концептов и анализировать отношения внутри выделенных кластеров. Задание уровня релевантности позволяет графически оценить исследуемые кластеры и ускорить анализ соответствующих матриц.

### **2.3. Решение прямой задачи моделирования в НКК Силова**

Основа решения прямой задачи – алгоритм Силова, описанный в п. 1.4.2. В результате преобразования НКК получена матрица взаимовлияния  $V$ , которая позволяет отобразить косвенные связи между концептами НКК и обновляет вес ранее определенных экспертами связей. Для выработки прогноза изменения ситуации на основе разработанной когнитивной карты можно применить метод импульсных процессов, относящийся к динамическим методам анализа. Рассмотрим импульсный процесс более подробно. Концепты определенные последовательностью  $A_1, A_2, \dots, A_n$  таким образом, что каждый концепт  $A_i$  принимает значение  $A_i^t$  дискретно  $t=0,1,2,\dots$ . Изменение концепта  $\Delta A_i^t$ , называемое импульсом, определяется разностью  $A_i^t - A_i^{t-1}$ , где  $t > 1$ . Для решения задачи необходимо определить приращение концепта, а также задать начальное состояние при  $t = 0$ .

Описанный импульсный процесс не только позволяет рассчитывать

состояние концептов в определённые дискретные моменты времени, но и предоставляет широкие возможности для оценки эффективности различных стратегий управления. С его помощью можно моделировать воздействие, которое оказывает внешняя среда на систему, и анализировать потенциальные изменения в НКК в ответ на эти воздействия. Благодаря этому становится возможным прогнозировать динамику системы под влиянием определённых внешних и внутренних факторов, а также планировать соответствующие корректирующие действия для достижения желаемых результатов. Дополнительно, импульсный процесс используется для анализа рисков и неопределённости, связанных с принятием решений в условиях изменяющейся среды. Это особенно актуально в сложных многофакторных ситуациях, где необходимо быстро оценивать последствия возможных изменений и принимать взвешенные управленческие решения.

Пусть состояние  $j$ -го концепта в момент времени  $t+1$  определяется внешним воздействием на него в текущий момент времени, состоянием этого же концепта на предыдущем временном шаге, а также влиянием изменений других концептов, влияющих на него в данный момент времени  $t$ . В диссертации используется следующая математическая модель импульсного процесса для анализа изменений параметров когнитивной карты во времени.

$$A_i^{t+1} = S_{j \neq i}^N \left( A_i^t, f \left( q_i^{t+1} \right) + o_i^{t+1} + T \left( w_{ij}, A_j^t \right) \right) \quad (30)$$

где  $q_i^{t+1}$  – внешнее воздействие в момент времени  $(t+1)$  на  $i$ -й концепт, а  $o_i^{t+1}$  управление этим концептом,  $w_{ij} = w(C_i, C_j)$  - связь между концептами  $C_i$  и  $C_j$ ,  $A_j^t$  – приращение значения  $j$ -го концепта в момент времени  $t$ ,  $f$  - функция активации. Операция, связанная с  $T$ -нормой, обозначается как  $T$ , а операция, связанная с  $S$ -нормой, обозначается как  $S$ .

## 2.4. Решение обратной задачи моделирования в НКК

Для влияния на целевые концепты нечеткой когнитивной карты необходимо задать изменение управляющих концептов, что определит состояние системы. Управляющие концепты представляют собой элементы системы, которые непосредственно контролируют или влияют на другие концепты в модели. Эти концепты выступают в роли управляемых переменных, которые могут быть изменены или настроены для достижения определенных целей системы. Целевые концепты являются элементами системы, которые представляют собой желаемые состояния или результаты, к которым стремится система. Эти концепты отражают цели или конечные результаты, которые должны быть достигнуты путем управления другими концептами. Изменение величины управляющего концепта может осуществляться путем его увеличения, уменьшения или поддержания на постоянном уровне, что обеспечивает гибкую возможность реагировать на динамические изменения в системе. Вариации значений при этом могут иметь различную интенсивность в рамках заданной шкалы. Основная задача заключается в поиске вектора целевых значений, к которым должны стремиться соответствующие концепты в ходе динамического моделирования, что предполагает необходимость обновления показателей концептов таким образом, чтобы их итоговое состояние было максимально близким к заданным целевым показателям, что является критерием успешности моделирования. Для начала анализа необходимо задать вес целевого концепта и консонанс (степень уверенности в достижимости).

Для решения ОЗКМ рассмотрим подробно структуру НКК. Выделим из исходной  $\mathbf{W} = |w_{ij}|$  матрицы состояния  $\mathbf{A} = |a_{ij}|_{n_x \times n_x}$ , управления  $\mathbf{B} = |b_{ij}|_{n_x \times n_u}$ , цели  $\mathbf{C} = |c_{ij}|_{n_y \times n_x}$  и прямого влияния  $\mathbf{D} = |d_{ij}|_{n_y \times n_u}$  по правилу:

$$\vec{s}_{k+1} = \mathbf{W}^t \circ \vec{s}_k = \begin{bmatrix} \otimes & \otimes & \otimes \\ \mathbf{B} & \mathbf{A} & \otimes \\ \mathbf{D} & \mathbf{C} & \otimes \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \vec{u}_k \\ \vec{x}_k \\ \otimes \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \otimes \\ \vec{x}_{k+1} \\ \vec{y}_k \end{bmatrix} \quad (31)$$

Правила изменения веса вершин в модели определяется (31). Вектор  $\vec{s}_k$  состоит из  $\vec{u}_k, \vec{x}_k, \vec{y}_k$ , где  $\vec{u}_k$  – управляющие концепты,  $\vec{x}_k$  – вектор состояний,  $\vec{y}_k$  – целевые концепты. Правило: элементы, содержащие 0 в строках  $\mathbf{W}$  относятся к управляющим  $\mathbf{B}$ , содержащие 0 в столбцах  $\mathbf{W}$  – к целевым  $\mathbf{C}$ .

В результате для решения прямой задачи получим:

$$\begin{aligned} \vec{x}_{k+1} &= \mathbf{A} \circ \vec{x}_k \vee \mathbf{B} \circ \vec{u}_k, \\ \vec{y}_k &= \mathbf{C} \circ \vec{x}_k \vee \mathbf{D} \circ \vec{u}_k \end{aligned} \quad (32)$$

или

$$\begin{aligned} \vec{x}_k &= \mathbf{A}^* \circ \mathbf{B} \circ \vec{u}_0, \\ \vec{y}_k &= \mathbf{C} \circ \mathbf{A}^* \circ \mathbf{B} \circ \vec{u}_0 \vee \mathbf{D} \circ \vec{u}_0 \end{aligned} \quad (33)$$

где  $\mathbf{A}^* = \bigcup_{k=0}^{\infty} \vec{A}_k$  — транзитивное замыкание в нечеткой матричной регулярной алгебре,  $\vec{y}_k$  — задан по сценарию,  $\vec{u}_0$  — неизвестный вектор управляющих концептов. Вычисление транзитивной матрицы в НКК несет в себе смысл определения косвенных связей в карте и отображения их с помощью весов в матрице состояний  $\mathbf{A}$  для момента времени  $t$ , в котором система сойдется к устойчивому состоянию при начальном изменении постоянном управляющем векторе.

Используем математический аппарат НРУ для решения ОЗКМ и рассмотрим основные понятия, используемые в теории НРУ.

Пусть  $X, Y, D$  — дискретные четкие множества конечной мощности  $m, n$  и  $k$  соответственно,  $\tilde{O}(X, Y), \tilde{P}(Y, D), \tilde{Z}(X, D)$  — нечеткие соответствия и пусть имеется композиция

$$\tilde{O} \circ \tilde{P} = \tilde{Z} \quad (34)$$

где  $\circ$  – операция нечеткой композиции теории нечеткой логики.

Выражение (33) соответствует уравнению

$$\mathbf{O} \circ \mathbf{P} = \mathbf{Z} \quad (35)$$

где  $\mathbf{O}_{n \times m}$ ,  $\mathbf{P}_{m \times k}$ ,  $\mathbf{Z}_{n \times k}$  — матричные представления  $\tilde{\mathbf{O}}$ ,  $\tilde{\mathbf{P}}$  и  $\tilde{\mathbf{Z}}$

соответственно. Рассмотрим так называемую обратную задачу для нечетких соответствий:

1. определение  $\mathbf{O}$  при известных  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Z}$  и  $\circ$ ,
2. определение  $\mathbf{P}$  при известных  $\mathbf{O}$ ,  $\mathbf{Z}$  и  $\circ$ .

где первое уравнение называется левым нечетким реляционным уравнением, а второе - правым.

Если НРУ содержит композицию неизвестной вектор-строки или вектора-столбца и заданной матрицы, то решение сводится к решению системы нечетких полиномиальных уравнений (СНПУ). Рассмотрим основные понятия, используя пример СНПУ с нормой  $\max - \min$  и обозначим его как:

$$\left\{ \begin{array}{l} (o_{11} \wedge p_{11}) \vee \dots \vee (o_{1n} \wedge p_{1n}) = z_1, \\ \dots\dots\dots \\ (o_{m1} \wedge p_{m1}) \vee \dots \vee (o_{mn} \wedge p_{mn}) = z_m. \end{array} \right. \quad (36)$$

Полный набор решений разрешимой конечной системы левых НРУ определяется максимальным решением и конечным числом минимальных решений.

Максимальное решение уравнения  $\mathbf{b}$  определяется по формулами:

$$p_j = \begin{cases} o_{ij}, & \text{если } o_{ij} > z_j, \\ 1, & \text{иначе} \end{cases} \quad (37)$$

$$p_i = S_{j=1}^N (p_j)_{j \neq i} \quad (38)$$

Множество решений нечетких уравнений выпукло упорядочено, то есть если  $(p_{ij}^1)$  и  $(p_{ij}^2)$  — два различных решения и  $p_{ij}^1 \leq d_{ij} \leq p_{ij}^2$  для любых  $i$  и  $j$ , то решением будет и  $(d_{ij})$ . Следовательно, основной задачей заключается в поиске

основной части уравнения и всех его ветвей. Проверка разрешимости системы НРУ выполняется путем определения наличия максимального решения.

Поскольку для максимального решения существует аналитическое выражение, давайте более подробно рассмотрим алгоритм поиска минимальных решений. Рассмотрим метод решения НРУ, базирующийся на выделении в исходных уравнениях детерминирующих концептов и использовании понятия доминирующих решений в сочетании с операцией перебора списков. Детерминирующие концепты в нечетких когнитивных картах представляют собой ключевые элементы, которые существенно влияют на состояние других концептов. Эти концепты определяют исходы и поведение системы и играют решающую роль в формировании динамики модели.

Для поиска минимальных решений НРУ используются различные методы: алгебрологический подход [121], [122], [123], [124], [125], [126]; характеристическая матрица и декомпозиция [127], [128]; покрытие [129], [130]; переменные связывания [131], [132]. Алгоритмы, которые используют перегородки и неприводимые пути [133], матрицы, основанные на решениях [134], и так далее, обладают экспоненциальной сложностью как по памяти, так и по времени [135]. Предложенный алгоритм в данной работе также имеет экспоненциальную сложность. Однако, он отличается от других алгоритмов в том, что, используя доминирование и опираясь на операции перебора списков, он способен находить минимальные решения более быстро и эффективно по сравнению со всеми доступными алгоритмами за время  $O(2^{n-k})$  vs  $O(2^n)$ . Подход базируется на идеи поиска всех выбранных элементов  $O_{ij}$  в  $\mathbf{O}$ , которые являются решениями  $i$ -го уравнения. Очевидно, что существуют решения, которые не являются ни минимальными, ни максимальным. Чтобы получить только минимальные решения и не учитывать в расчетах промежуточные решения, представлен метод доминирования [122] в сочетании с методом перебора списков. Причем концепция доминирующих решений впервые предложена Папписом и Сугено [127].

Предположим, что система (36) разрешима и  $\mathbf{P}^{\max}$  является наибольшим решением системы. Сначала, используя  $\mathbf{P}^{\max}$ , отметим все коэффициенты, которые вносят вклад в решение системы. Преобразуем систему (36) в:

$$\mathbf{O}^* \circ \mathbf{P} = \mathbf{Z} \quad (39)$$

с помощью выражения:

$$o_{ij}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } o_{ij} < p_i^{\max}, \\ p_i^{\max}, & \text{если } o_{ij} = p_i^{\max}, \\ 1, & \text{если } o_{ij} > p_i^{\max}. \end{cases} \quad (40)$$

Сформируем матрицу  $\mathbf{H}$  включив столбец  $j$  если хотя бы один элемент  $O_j^* > 0$ . Если  $|H_i|$  обозначает число коэффициентов Н-типа в  $i$ -ом уравнении  $\mathbf{O} \circ \mathbf{P} = \mathbf{Z}$ , когда число потенциальных минимальных решений СНПУ (41) не превышает:

$$PN1 = \prod_{i=1}^m |H_i| \quad (41)$$

Коэффициент Н-типа (N-type Coefficient) характеризует степень влияния одного концепта на другой в НКК. Этот коэффициент измеряет силу и направление влияния между концептами, предоставляя количественную оценку воздействия одного элемента системы на другой. После каждому уравнению  $i \in \{1, \dots, m\}$  сопоставим множество  $R_i$ , которое содержит список всех коэффициентов  $O_{ij}$ , которые вносят вклад в решение  $i$ -го уравнения при  $O_{ij}$ ,  $P_j$ ,  $Z_i$  по правилу:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{z_i}{o_{ij}}, & \text{если } h_{ij} = 1, \\ o_{ij} & \\ 0, & \text{если } h_{ij} = 0. \end{cases} \quad (42)$$

Определение 1. Множество  $R_i$ , элементами которого являются индексы  $j \in \{1, \dots, n\}$  (в порядке возрастания) в  $i$ -м уравнении (36), в котором  $o_{ij} \wedge p_j = z_i$ , называется маркировочным множеством для  $i$ -го уравнения (36).

Если  $j$  является элементом  $R_i$ , это означает, что  $o_{ij}$  коэффициент  $H$ -типа, но обратное не всегда верно – может существовать коэффициент  $H$ -типа  $o_{ij}$  и  $j$  не принадлежащий  $R_i$ . Следовательно, имеет место:  $|R_i| \leq |H_i|$ , где  $|R_i|$  – мощность  $R_i$ , а  $|H_i|$  – мощность  $H_i$ .

Определение 2. Пусть  $O_l$  и  $O_k$  –  $l$ -ое и  $k$ -ое уравнения, соответственно, в (39) и  $z_l \geq z_k$ . Уравнение  $O_l$  называется доминирующим по отношению к уравнению  $O_k$  (и  $O_k$  называется доминированным  $O_l$ ), если для каждого  $j \in \{1, \dots, n\}$  имеет место: если  $o_{lj}$  – коэффициент  $H$  – типа, то  $o_{kj}$  также является коэффициентом  $H$  – типа.

Если  $O_l$  является доминирующим уравнением для  $O_k$  в (36), это означает, что всякий раз, когда  $O_l$  удовлетворяет решению (36), это решение также удовлетворяет  $O_k$ . Следовательно,  $O_k$  является избыточным уравнением.

Например, в

$$(O^* : Z) = \left\{ \begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0.9 & 0.9 & 0 & :0.9 \\ 0 & 0.9 & 0.9 & 0 & 0 & :0.9 \\ 0.5 & 0 & 0 & 1 & 0 & :0.7 \\ 1 & 0.7 & 0 & 0 & 0.7 & :0.7 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & :0.5 \end{array} \right\} \quad (43)$$

третье уравнение доминирует над последним, а последнее уравнение является избыточным. Согласно (41),  $PN1 = 2 * 2 * 1 * 3 = 24$  и после удаления последнего избыточного уравнения будет  $PN2 = 12$ .

Вместо прямого использования доминирующих уравнений применим маркировочные множества, обладающие всеми необходимыми свойствами исходных уравнений в части поиска решений. Таким образом, уменьшается временная сложность построения решений, оптимизируя выбор объектов, по которым выполняется поиск.

Определение 3. Пусть  $R_l, R_k$  принадлежат маркировочными множествами для (36) и  $z_l \geq z_k$ . Если  $R_l$  является подмножеством  $R_k$ , то  $R_l$  называется

доминирующим множеством над  $R_k$ , а  $R_k$  называется доминированным множеством  $R_l$ .

Число минимальных решений теперь не превышает оценку

$$PN2 = \prod_{i=1}^m |R_i|, \text{ где } R_i \in \mathbf{R} \quad (44)$$

Если сравнить (41) и (44), очевидно,  $PN1 \geq PN2$ .

Доминированные множества (нулевые строки в матрице  $\mathbf{R}$ ) могут быть удалены и  $\mathbf{O}^*$  будет иметь те же решения, что и  $\mathbf{O}$ .

Алгоритм получение минимальных решений (61).

Шаг 1. Формируем множества  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{R}$ .

Шаг 2. Инициализируем вектор решений  $\hat{p}_0(j) = 0, j \in \{1, \dots, n\}$ .

Шаг 3. Инициализируем вектор строк  $rows(i), i \in \{1, \dots, m\}$ , который содержит все индексы  $i$  для каждого  $R_i$  из  $\mathbf{R}$ .

Шаг 4. Инициализация  $i$  первого элемента  $rows$ .

Шаг 5. Инициализация  $sols$  - пустого набора векторов - множества всех минимальных решений для текущей задачи.

Шаг 6. Проверяем что  $rows = \emptyset$ . Если да, добавляем  $\hat{p}_{ij}$  в вектор  $sols$  и завершаем алгоритм.

Шаг 7. Для каждого  $i$  в  $rows$  расширяем множество  $R_i$ : для каждого  $j \in R_i$  создаем копию  $\hat{p}_0 - \hat{p}_{ij}$  и присваиваем его  $j$ -му элементу значение  $z_j$ . Удаляем  $i$  из вектора  $rows$ . Возвращаемся на Шаг 6 с новым значением  $rows$  и  $\hat{p}_{ij}$ , полученными на этом шаге.

Полученное максимальное решение соответствует весам входных концептов когнитивной карты для консервативного сценария развития системы, тогда как минимальные решения соответствуют демократичным сценариям управления, предполагающими минимально возможные вмешательства в управляющие концепты системы [30]. Понятие “консервативный сценарий” определяется как подход, при котором учитываются самые неблагоприятные, но

реалистичные условия и предполагаются необходимые воздействия на концепты, чтобы гарантировать, что любые принятые решения и стратегии будут устойчивыми даже в худших возможных условиях. В этом сценарии изменения значений концептов и их взаимодействий оцениваются таким образом, чтобы максимально снизить риски и непредвиденные последствия, обеспечивая стабильность и надежность системы в условиях неопределенности [2]. При демократичных сценариях предполагаются благоприятные условия для системы, равномерное и сбалансированное изменение воздействия на концепты системы. В этих сценариях значения концептов и их взаимодействий оцениваются с учетом справедливого распределения влияния и воздействия, обеспечивая равные возможности для всех элементов системы [2].

#### **2.4.1. Метод минимальных корректировок при отсутствии явного решения обратной задачи моделирования**

При работе с реальными системами, представленными НКК, часто возникают случаи, когда изначально заданные целевые показатели недостижимы, что приводит к неразрешимости системы. На первом шаге поиска решений НРУ важно определить, является ли исходная система разрешимой относительно целевых концептов. При поиске максимального решения для НРУ возможно определить разрешима ли исходная система относительно целевых концептов.

Если  $o_{ij} \wedge p_j = z_i$  (или  $o_{ij}^* \wedge p_j = z_i$ ), коэффициент  $o_{ij}$  ( $o_{ij}^*$  соответственно) называется детерминирующим коэффициентом НРУ.  $\mathbf{O} \circ \mathbf{P} = \mathbf{Z}$  разрешима, если существует, по крайней мере, один детерминирующий коэффициент для каждого  $i \in \{1, \dots, m\}$ , в противном случае она неразрешима.

Для неразрешимой системы возможно определить уравнения, которые являются неразрешимыми.

Алгоритм определение максимального решения и разрешимости [125]:

Шаг 1. Инициализируем вектор  $\hat{\mathbf{P}} = (\hat{p}_{ij})$  с  $\hat{p}_{ij} = 1$  для  $j \in \{1, \dots, n\}$ .

Шаг 2. Инициализируем логический вектор  $IND$  с  $IND_i = FALSE$  для

$i \in \{1, \dots, m\}$  .

Шаг 3. Для каждого  $j \in \{1, \dots, n\}$  и для каждого  $i \in \{1, \dots, m\}$  .

- a. Если  $j$ -ый столбец  $O_j$  содержит такие  $o_{ij}$ , для которых  $o_{ij} = 1$  установим  $IND_i = TRUE$ . Определяем  $z_j$  по формуле:

$$\hat{z}_j = \begin{cases} \min_{i=1}^m \{z_i\}, & \text{если существует } o_{ij} > z_j, \quad i = 1, \dots, m, \\ 1, & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (45)$$

- b. Обновляем  $\hat{\mathbf{P}}$  – присваиваем  $\hat{p}_j = z_j$ . Проверяем, существует ли другое  $i$  такое, что  $o_{ij}$ , для которого  $o_{ij} > z_i$ . Если да, исправляем значение  $IND_i = FALSE$  .
- c. Проверяем, существует ли другое  $i$  такое, что  $o_{ij} = \hat{z}_i$ . Если да, исправляем значение  $IND_i = FALSE$ ,  $\hat{p}_j = \hat{z}_j$ . Переходим к следующему  $j$  .

Шаг 4. Проверяем, что для всех  $i \in \{1, \dots, m\}$  вектор  $IND_i = FALSE$  .

- a. Если  $IND_i = FALSE$  для некоторого  $i$ , система  $\mathbf{O} \circ \mathbf{Z}$  неразрешима. Завершаем алгоритм.
- b. Если  $IND_i = FALSE$  для всех  $i \in \{1, \dots, m\}$ , система  $\mathbf{O} \circ \mathbf{Z}$  разрешима и ее максимальное решение –  $\mathbf{P}^{\max}$  .

При отсутствии решения для заданных целевых показателей найдем скорректированные значения столбца  $\mathbf{Z}$ . Для этого подставим в исходное уравнение полученные значения для максимального решения системы уравнений. В результате получим вектор минимальных корректировок целевых показателей  $\mathbf{Z}^{upd}$ , который всегда  $\mathbf{Z}^{upd} \leq \mathbf{Z}$ .

Рассмотрим работу алгоритма на примере карты транспортной проблемы представленную на Рисунок 1 и в Таблица 3 [2].

### Концепты НКК транспортной проблемы

| Название концепта        | Обозначение на карте |
|--------------------------|----------------------|
| Протяженность поездки    | X1                   |
| Экономия горючего        | X2                   |
| Численность населения    | X3                   |
| Стоимость автомобиля     | X4                   |
| Расход горючего          | X5                   |
| Стоимость проездного     | X6                   |
| Загрязнение атмосферы    | X7                   |
| Число несчастных случаев | X8                   |
| Вероятность опоздания    | X9                   |

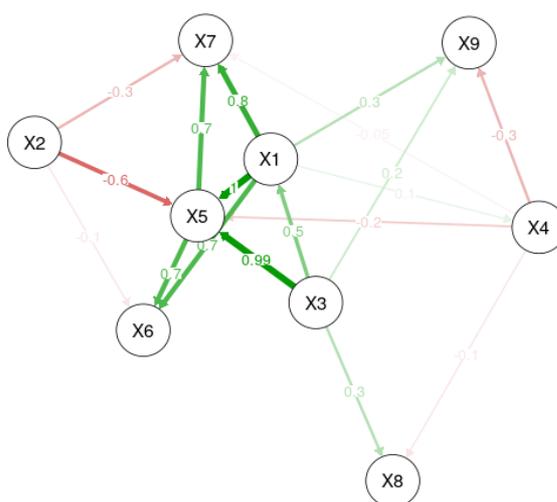


Рисунок 2. НКК транспортной проблемы

Управляющие концепты в этой карте: "Экономия горючего",

"Численность населения", а целевые концепты "Стоимость проездного", "Загрязнение атмосферы", "Число несчастных случаев", "Вероятность опоздания".

$$\mathbf{O} = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.42 & 0.693 & 0.007 \\ 0.42 & 0.00 & 0.007 & 0.693 \\ 0.00 & 0.42 & 0.693 & 0.007 \\ 0.42 & 0.00 & 0.007 & 0.693 \\ 0.00 & 0.00 & 0.300 & 0.005 \\ 0.00 & 0.00 & 0.005 & 0.300 \\ 0.00 & 0.00 & 0.200 & 0.015 \\ 0.00 & 0.00 & 0.015 & 0.200 \end{pmatrix} \quad (46)$$

$$\mathbf{Z} = (0.10 \ 0.082 \ 0.10 \ 0.82 \ 0.10 \ 0.82 \ 0.10 \ 0.082) \quad (47)$$

При такой формулировке целевого вектора решение не существует, так как уравнения (46) неразрешимы. Найдем новый целевой вектор, согласно алгоритму определения максимального решения.

$$\mathbf{Z} = (0.10 \ 0.82 \ 0.10 \ 0.082 \ 0.043 \ 0.035 \ 0.029 \ 0.024) \quad (48)$$

Такая система разрешима и представлена минимальным (Таблица 4) и максимальным (Таблица 5) решением.

Таблица 4

#### Минимальное решение

| Концепт                  | Вес   | Консонанс |
|--------------------------|-------|-----------|
| Экономия горючего X2     | 0.00  | 0.00      |
| Численность населения X3 | 0.144 | 1         |

Таблица 5

#### Максимальное решение

| Концепт | Вес | Консонанс |
|---------|-----|-----------|
|---------|-----|-----------|

|                          |        |   |
|--------------------------|--------|---|
| Экономия горючего X2     | -0.238 | 1 |
| Численность населения X3 | 0.144  | 1 |

Максимальное решение представляет собой консервативный сценарий, который накладывает наибольшие ограничения на изменение управляющих концептов, необходимые для достижения целевого состояния системы. Минимальное решение, напротив, указывает на самые мягкие условия начального воздействия на систему. Кроме того, существует множество решений, которые располагаются между максимальным и минимальным, и в данном примере они находятся в определенном диапазоне 0.238–0 для концепта “Экономия горючего”.

#### **2.4.2. Метод оптимизации структуры НКК для выделения целевых и управляющих концептов в начальной структуре карты**

В начальной структуре карты не всегда выделены матрицы управления и цели, чего требует структура решения НРУ и цели, поставленные экспертом. Для выделения этих матриц предлагается ввести дополнительные концепты в НКК, имеющие единственную единичную связь с целевыми концептами или управляющими концептами, задаваемыми экспертом.

Такие дополнительные концепты будем называть буферными, при расчете они будут сохранять значения показателей и позволят вычленивать из концептов состояний сильно связанной НКК искомые показатели.

Рассмотрим для примера НКК экологической обстановки города, описанной на Рисунок 3 и в Таблица 6.

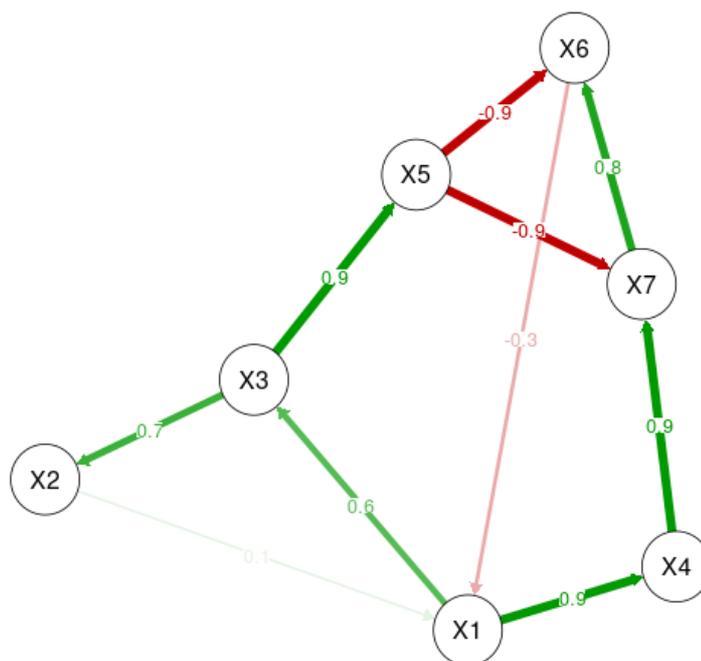


Рисунок 3. НКК экологическая обстановка в городе

Таблица 6

**Концепты НКК экологической обстановки в городе**

| Название концепта             | Обозначение на карте |
|-------------------------------|----------------------|
| Население города              | X1                   |
| Миграция в город              | X2                   |
| Модернизация                  | X3                   |
| Свалки                        | X4                   |
| Санитарное состояние          | X5                   |
| Заболевания на тысячу человек | X6                   |
| Бактерии                      | X7                   |

На рассматриваемой НКК явно не выделены управляющие и целевые концепты. Решим задачу относительно улучшения санитарного состояния X5

путем воздействия на концепт “свалки” X4. Для этого введем в начальную НКК дополнительные узлы (Таблица 7).

Таблица 7

**Дополнительные узлы НКК экологической обстановки в городе**

| Название концепта                  | Обозначение на карте |
|------------------------------------|----------------------|
| Свалки (добавленный)               | X8                   |
| Санитарное состояние (добавленный) | X9                   |

Решим задачу относительно концепта “Свалки” задав целевое изменение - 0.2 с консонансом 0.8. В этом случае максимальное и минимальное решение НРУ совпадают (Таблица 8).

Таблица 8

**Решение обратной задачи для НКК экологической обстановки в городе**

| Концепт              | Вес   | Консонанс |
|----------------------|-------|-----------|
| Санитарное состояние | -0.47 | 1         |

## ГЛАВА 3. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «FUZZYM»

### 3.1. Системы программного обеспечения для разработки и обучения НКК

Программное обеспечение, разработанное для создания и обучения НКК, обычно объединяет как теоретические подходы, так и практические исследования. Эти системы предоставляют как теоретические методы, так и возможности для проведения практических экспериментов встречаются не так часто, подкрепленные хорошо описанной программной реализацией. В данном разделе рассмотрим наиболее значимое программного обеспечение в области НКК.

FCM Modeler [136] — это первый программный инструмент для проектирования систем на основе НКК. Разработанный около 20 лет тому назад, он имеет простой интерфейс и предназначен для коллективного принятия решений на основе качественной статической модели.

Некоторые из характеристик этого программного инструмента:

1. интуитивно понятный пользовательский интерфейс,
2. функциональные возможности для проектирования и хранения систем на основе НКК,
3. логический вывод моделей НКК на основе наблюдаемых концептов и следующих друг за другом выходных сигналов.

FCM Modeler предназначался для использования в качестве инструмента моделирования для широкого круга пользователей, но развития проекта в этом направлении не произошло. Хотя в литературе отсутствуют другие ссылки на этот программный комплекс, его создание заложило основу для других разработок в этой области.

Похожий программный комплекс FCM Designer (Aguilar и Contreras [137]),

развивает FCM Modeler и является более удачной программной реализацией, однако имеет достаточно сложный для работы интерфейс. В число основных функциональных возможностей FCM Designer входят:

1. интерактивная визуализация графа,
2. пользовательский графический интерфейс для проектирования моделей на основе НКК,
3. способность имитировать новые сценарии, используя имеющуюся информацию о причинно-следственных связях.

Также, FCM Designer дает возможность определения правила обновления весов причинно-следственных связей за счет выбора функции активации и критерия останова. Главный недостаток данного программного обеспечения заключается в отсутствии обучающих алгоритмов для вычисления параметров, определяющих систему.

Другой разработанный инструмент, Mental Modeler (Gray и др. [138]), представляет собой веб-приложение с поддержкой коллективного принятия решений, предназначенное для коллективного изложения и тестирования суждений экспертов о системе. Основными пользователями Mental Modeler, вероятно, являются неспециалисты в области ИТ. Как правило, это предметные эксперты или другие заинтересованные лица, у которых есть потребность в разработке простой когнитивной карты (с квалифицированными и взвешенными связями) и проверка ее поведения в некоторых сценариях. Отсутствие обучающих алгоритмов и ограниченный набор экспериментальных средств – вот минусы этого инструмента. Тем не менее, ориентированность на веб-технологии была высоко оценена пользователями.

JFCM — система, реализующая построение нечетких когнитивных карт на языке программирования Java. Она является небольшой и простой библиотекой с открытым исходным кодом [139] и может использоваться для создания разнообразных моделей, основанных на НКК. В JFCM есть возможность загрузки данных из XML-файлов, что повышает удобство пользовательского интерфейса. Основная идея проекта заключается в создании модулей, которые

можно загружать при решении специфических задач. Это означает, что в случае недостаточности набора стандартных компонентов библиотека допускает расширение исходного кода. Данное преимущество превращается в недостаток для пользователей, не владеющих навыками программирования, поскольку требует глубокого понимания исходного кода.

ISEMK — это программное обеспечение, предназначенное для моделирования систем принятия решения на основе НКК и искусственных нейронных сетей (Poczka и др. [140]; Parageorgiou и др. [141]). Программный инструмент ISEMK состоит из четырех основных компонент в этой архитектуре: обработка информации, анализ работы НКК. Состав этого инструментария включает в себя нейросетевые технологии и графический пользовательский интерфейс, модуль когнитивных карт, в качестве алгоритма обучения используется метод градиентного спуска и ретроспективные данные, данные и популяционного подхода к обучению (а именно: генетического алгоритма с вещественным кодированием и генетического алгоритма оптимизации структуры) в качестве оптимизаторов. Модуль нейронных сетей позволяет получать многослойные нейронные сети, используемые при решении задач прогнозирования временных рядов, а также использовать два обучающих алгоритма: алгоритм Левенберга–Марквардта (Hagan и Menhaj [142]) и алгоритм обратного распространения ошибки (Haykin [143]). Кроме того, интерфейс программного продукта ISEMK поддерживает визуализацию результатов моделирования.

FCM Tool был впервые представлен в работе Leon и др. [144] как средство моделирования задач принятия решений в сфере общественного транспорта в Бельгии. Данное программное обеспечение позволяет:

1. разрабатывать сложные модели, основанные на НКК, благодаря интерактивной графической визуализации,
2. кастомизировать правило обновления за счет выбора требуемого вида функцию активации и требуемого критерия останова,
3. анализировать сценарии и их воздействия на систему.

В комплекс FCM Tool входит популяционный обучающий алгоритм, позволяющий автоматически сгенерировать веса причинно-следственных связей на основе ретроспективных данных. Еще одна востребованная функция — это включение агрегационных операторов, позволяющих объединить несколько систем, основанных на НКК, в единую «умную» модель. Впоследствии FCM Tool трансформировался в систему FCM Expert [145], предназначенную для неспециалистов и являющаяся более полной программной платформой для моделирования систем, основанных на НКК. Как уже упоминалось, целью создания FCM Tool было решение определенной задачи принятия решений, поэтому ранее реализованные алгоритмы обучения были ограничены в использовании для более общих задач классификации паттернов. В FCM Expert имеются расширенные функции из инструмента FCM Tool, а также добавлены несколько обучающих алгоритмов, включая неконтролируемые (обучение без учителя) и контролируемые (обучение с учителем) методы для настройки матрицы весов. Это программное средство также включает в себя методы для оптимизации структуры сети [146] и улучшения сходимости системы [77], [82]. Более того, присутствует возможность пользовательской конфигурации параметров модели (например, функции активации, правила логического вывода и критерия останова).

Российскими научными коллективами были созданы программные продукты для использования НКК в процессах управления в реальных организациях. Следует отдельно подчеркнуть программные продукты, изготовленные в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, которые можно делить на несколько блоков.

«Ситуация» и «Ситуация-2» [3] используемые для анализа развития ситуации и тенденций ее развития учитывая совместное влияние внешних воздействий. Вторая версия программы расширила изначальный функционал путем включения возможности выбора стратегий, способствующих развитию сложной системы в заданном направлении, а также добавлением генератора отчетов для систематизации результатов моделирования. Обе программы

позволяют работать с детерминированными НКК применяя метод суммирования приращений концептов.

«Компас» и «Компас-2» [147], которые используются для моделирования нечетких слабоструктурированных систем в различных областях с фокусом на систематизацию рассуждений экспертов о проблемной ситуации. Для этого в программном комплексе была предложена «нечеткая лингвистическая модель ситуации». Дополнительной отличительной особенностью является возможность определить концепты, изменение которых приводит к эффективному развитию системы. «Компас» и «Компас-2» позволяют производить моделирование детерминированных НКК используя метод максимизации приращений. Прогноз развития ситуации представлен в виде цепочки сработавших правил.

Интегрированная система «Курс» [148] объединила подсистемы «Ситуация», «Компас-2» и «КИТ» для задачи моделирования динамики слабоструктурированных ситуаций при решении стратегических управленческих проблем.

Система «Канва» [4]. Для прогнозирования развития системы и тестирования управленческих сценариев в системе был разработан функционал поиска и проверки гипотез. Тестирование системы «Канва» было осуществлено с помощью моделирования социальных, политических и экономических систем. Модуль концептуального анализа добавлен в систему, предложено проектирование стратегий управления и методы их реализации. Кроме того, систему возможно использовать для непрерывного мониторинга состояния. «Канва» работает с детерминированными картам, при построении которых используются абсолютные лингвистические шкалы. Результаты прогноза вербализуются и так же представлены в виде цепочки сработавших правил.

Опишем также исследования других коллективов в этой области. «Космос» [2], система, разработанная компанией «Data C» под руководством В. Б. Силова, которая является первой разработанной системой моделирования НКК в России и во многом определила путь развития теории НКК. В ней были

рассмотрены недетерминированные карты как нечеткие множества и построен прогноз развития ситуации в виде цепочки сработавших правил.

В Южном Федеральном университете группой исследователей под руководством Г. В. Гореловой [14] была создана система когнитивного моделирования, которая имеет возможность определения формата поступающей информации, имеет функцию взаимодействия с базой данных, функцию импульсного моделирования, функцию решения обратной задачи.

Другая описанная в литературе система — «Стратег» [15] была разработана в Волгоградском государственном техническом университете, М.А. Заболотским и др. В программе использован корреляционный анализ статистических данных для определения весов НКК, производится установление начальных тенденций изменения концептов, определение опосредованных влияний и их уровней, Парето-анализ взаимовлияния концептов. Авторы предлагают использовать разработанную программу для построения систем менеджмента качества и решения смежных задач.

В Брянском государственном техническом университете Д. А. Коростелевым и др. была предложена система «ИГЛА» [92], которая относится к системам для моделирования недетерминированных НКК с применением теории нечетких множеств. В системе доступен функционал группового построения и согласования НКК, расчета и анализа системных показателей, а также решения прямой задачи моделирования. Особенностью системы являются механизмы верификации нечетких когнитивных карт, которые позволяют проверить адекватность модели при наличии данных об изменении наиболее значимых концептов за некий период.

Alf-ZDr [107] была представлена в работе Пылькина и др. и является системой интеллектуального управления товарными запасами на основе нечеткого когнитивного анализа. Она состоит из пяти основных блоков: блок статического моделирования, блок сбора, корректировки и выдачи информации, блок преобразования информации для ввода и вывода, блок динамического моделирования, блок управления базой знаний. Предложенная система

позволяет проводить различные виды материального анализа на предприятии, с возможностью расширения функционала на другие предметные области.

В работе Путьято М.М. [16] разработан программный комплекс ПК “ИКС”, который позволяет решать прямую и обратную задачу моделирования НКК и разрабатывать стратегии управления когнитивной системой. Используемые в программном комплексе методы используют функции принадлежности, разработанные в теории дискретных нечетких множеств для объединения результатов опроса экспертов. Реализация алгоритма решения обратной задачи моделирования НКК основана на методе перебора воздействий на зависимые концепты.

В Таблица 9 представлено сопоставление рассмотренных программных продуктов [34]. Сравнение осуществляется на основе нескольких ключевых критериев, которые часто оказываются существенными, включая наличие средств для проведения компьютерных экспериментов, доступность алгоритмов машинного обучения и присутствие пользовательского графического интерфейса.

Таблица 9

**Сопоставительный анализ современных программных средств для реализации НКК**

|                | Год создания | Возможности моделирования | Алгоритмы обучения | Графический пользовательский интерфейс |
|----------------|--------------|---------------------------|--------------------|--|
| FCM Modeler    | 1997         | нет                       | 1                  | Неуд.                                  |
| Mental Modeler | 2013         | ограниченные              | нет                | Норм.                                  |
| ISEMK          | 2015         | Более одного              | Более одного       | Норм.                                  |

|   |      |                      |              |                               |
|---|------|----------------------|--------------|-------------------------------|
| FCM Expert  | 2017 | Более одного         | Более одного | Улучшенный                    |
| Ситуация +<br>Ситуация-2  | 1999 | Более одного         | 1            | нет возможности<br>определить |
| Компас +<br>Компас-2  | 1998 | Более одного         | 1            | нет возможности<br>определить |
| FCM Designer  | 2005 | ограниченные         | нет          | Норм.                         |
| FCM Tool  | 2011 | несколько            | 1            | Улучшенный                    |
| JFCM  | 2013 | для<br>разработчиков | нет          | Отсутствует                   |
| Курс  | 2001 | Более одного         | Более одного | Норм.                         |
| Стратег   | 2007 | Более одного         | 1            | Норм.                         |
| ИГЛА  | 2008 | Более одного         | 1            | Норм.                         |
| Alf-ZDr   | 2012 | Более одного         | 1            | нет возможности<br>определить |
| ИКС   | 2010 | Более одного         | 1            | Норм.                         |
| Канва   | 2002 | Более одного         | 1            | Норм.                         |
| Космос  | 1995 | Более одного         | 1            | Неуд.                         |
| Программа<br>когнитивного<br>моделирования<br>социотехниче<br>ских систем | 2004 | Более одного         | 1            | нет возможности<br>определить |

После проведенной оценки можно сделать следующие выводы: разнообразные программы, такие как FCM Designer, Mental Modeler, FCM Tool, Курс, Канва, Стратег, ИГЛА и ИКС, предоставляют графические пользовательские интерфейсы, удовлетворяющие экспертов анализа сценариев и проведения экспериментов с новыми исходными данными. С другой стороны, JFCM сфокусирован на разработке модулей нечеткой когнитивной карты с возможностью их дальнейшего использования в более сложных сценариях. Однако некоторым из упомянутых программных решений все еще не хватает функциональности для проведения экспериментов и решения задач машинного обучения, что ограничивает их применимость в реальных ситуациях. Среди наиболее удобных инструментов для создания систем на основе нечетких когнитивных карт выделяются FCM Expert и ISEMК. Первый из них предназначен для симуляции и решения задач классификации паттернов, в то время как второй используется для прогнозирования временных рядов. Российские системы, представленные в работе, являются системами с закрытым исходным кодом, что не допускает возможность использования кода повторно. По этой причине новым исследователям в этой области необходимо разрабатывать отдельную систему, что объясняет большое количество программных продуктов с пересекающимся функционалом. Потенциальным направлением развития в этой области будет переход на модульные системы с открытым исходным кодом, что позволит объединить алгоритмы, разработанные российскими коллективами, и ускорит подключение новых исследователей в область. Такой подход позволит сфокусироваться на разработке новых областей применения, методов модернизации структуры и алгоритмов обучения НКК, а также ввести стандартный интерфейс с возможностью его адаптации под конкретные запросы пользователей.

### 3.2. Основные требования к разрабатываемой системе

На основе анализа задач, изложенных во второй главе, можно определить критерии для построения и моделирования нечетких когнитивных карт. Эти критерии должны включать в себя обобщенные свойства уже изученных когнитивных карт и предоставлять расширенный набор инструментов для анализа и моделирования комплексных систем.

1. Существует потребность в применении целиком нечеткой методологии при разработке и вычислительном исследовании когнитивных карт, что подразумевает введение неопределенности во все аспекты и элементы когнитивной карты: начиная с концептов, методов передачи и накопления воздействия от множества концептов на отдельно взятый концепт, и до процессов обучения и имитационного моделирования динамических процессов. Для задач, связанных с созданием и анализом когнитивных карт, такие требования следует детализировать и специфицировать.

2. В процессе решения задач с использованием нечеткого представления концептов требуется принимать во внимание способность к их количественному анализу или, по меньшей мере, к выполнению сравнительного оценивания. Концепты в таком контексте могут быть описаны с помощью нечетких множеств, точных величин или узлов с определенными единичными уровнями принадлежности.

3. Передача воздействия между концептами требует использования механизма нечеткого отображения. Этот механизм устанавливает соответствие между нечетким множеством значений входного концепта и множеством значений выходного концепта, оба обладают степенью неопределенности.

4. В этом контексте необходимо учесть, что можно использовать как нечеткие отображения, так и четкие функции для механизма передачи влияния.

5. В процессе решения задач интеграции отрицательных весов влияния между концептами и суммирования воздействий с разными знаками.

Для этого разумным подходом будет разработать метод, который способен учитывать различные воздействия, выполняемые концептами друг на друга. Этот метод позволит представлять воздействия не только как четкие значения или однозначные принадлежности, но также через функции принадлежности, которые отражают степень неопределенности.

6. Модель должна отображать значительную нелинейность поведения характеристик системы, реализуя интеграцию как текущих состояний, так и инкрементальных изменений, возникающих в результате воздействия входных концептов на выходные. При этом процесс накопления индивидуальных эффектов от действия входных концептов на выходной концепт предполагает аддитивный подход, позволяющий суммировать воздействия, включая в расчет даже минимальные по величине влияния. Это обуславливает возможность формирования общей картины влияний на систему, выявляя значение каждого фактора, вне зависимости от его абсолютной значимости.

7. Указанный процесс аккумуляции должен быть независимым от последовательности учёта действующих концептов, что подразумевает владение такими характеристиками. Кроме того, этот механизм должен учитывать сдвиг функций принадлежности по координате базового множества, наряду с такими важными свойствами, как коммутативность и ассоциативность.

С учетом указанных требований и при использовании предложенных алгоритмов и методов интеллектуальной поддержки принятия решений, основанных на нечетких когнитивных картах, был создан и реализован программный комплекс под названием "FuzzyM". Основные направления развития данной программной системы включают в себя поддержку создания корректных нечетких когнитивных карт, описывающих заданную предметную область или ситуацию. Программный комплекс также предоставляет функционал для выполнения как статического, так и динамического моделирования на основе полученных нечетких когнитивных карт.

Основные функции программы включают в себя создание графического представления модели, выполнение статического анализа и динамического

моделирования, генерацию альтернативных сценариев на основе результатов статического анализа и их отбор на основе динамического моделирования. Результатом работы программы являются рекомендации для принятия решений руководителем.

При создании нечеткой когнитивной модели основной акцент уделяется графическому представлению модели. Программный продукт основан на интерактивном графическом интерфейсе, использующем когнитивные графические элементы. Это обеспечивает пользователям и руководителям набор изображений, которые могут быть динамически изменены, а также создает моделируемую оконную среду, которая может быть адаптирована для последующей работы с программой (см. Рис. 12).

### **3.3. Описание модулей системы «FuzzyM»**

Опишем основные модули и алгоритмы разработанного программного комплекса.

После запуска программы необходимо ввести исходные данные задачи. Для этого есть возможность ввода с помощью загрузки файла в формате *.csv*, либо ручного ввода концептов и связей между ними. Подробнее на Рисунок 4 и Рисунок 5.

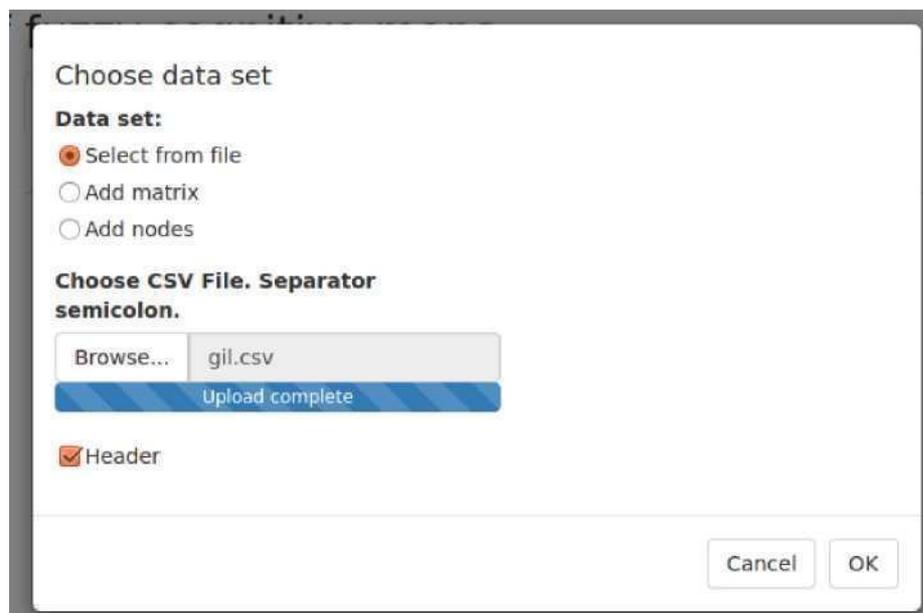


Рисунок 4. Добавление данных в программу из файла

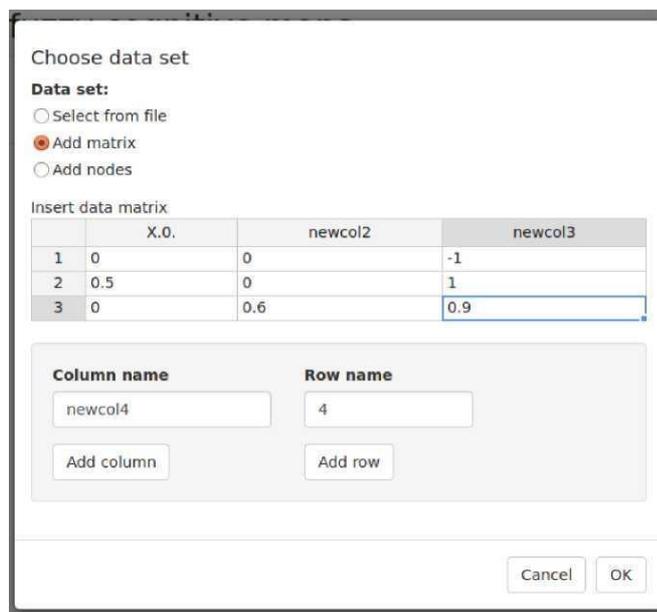


Рисунок 5. Добавление данных в программу путем внесения концептов и прямых связей между ними

Далее производится выбор файла или ввод концептов моделируемой системы и причинно-следственных связей между ними. Программный комплекс отобразит построенную нечёткую когнитивную карту в виде графа, пример такой визуализации представлен на Рисунок 6.

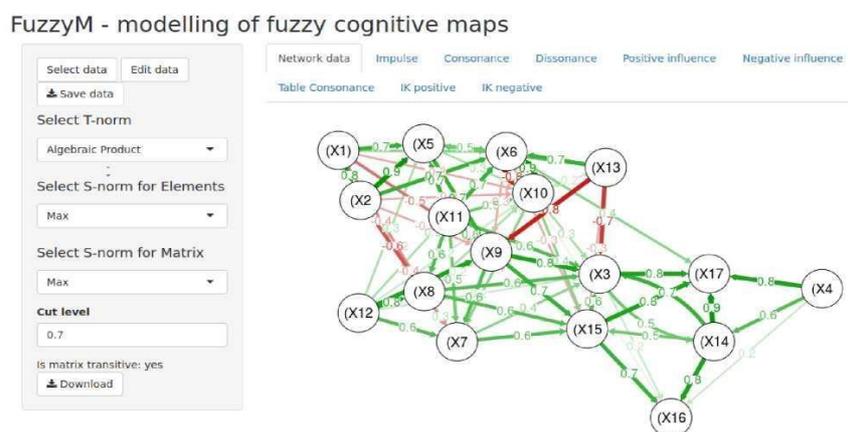


Рисунок 6. Общий вид программы

В программе предусмотрен выбор операций каузальной алгебры ( $T$ -нормы и  $S$ -нормы), используемый для расчетов системных показателей и решения прямой и обратной задачи когнитивного моделирования. Выбрать необходимую для решения системы операцию можно в выпадающих списках в левом меню интерфейса – Рисунок 7.

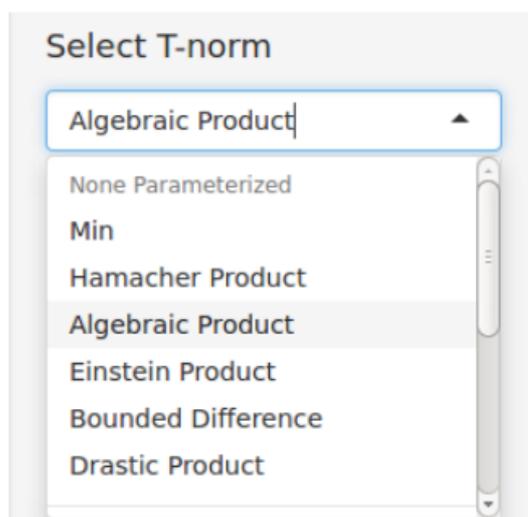


Рисунок 7. Выбор операции нечеткого пересечения ( $T$ -нормы)

Пример решения прямой задачи в НКК представлен на Рисунок 8 и в Таблица 10. Для решения ОЗКМ зададим приращения управляющих концептов. В программе представлены два способа моделирования – без учета значения приращения концепта на прошлом шаге и с учетом этого значения (накопительная сумма приращений).

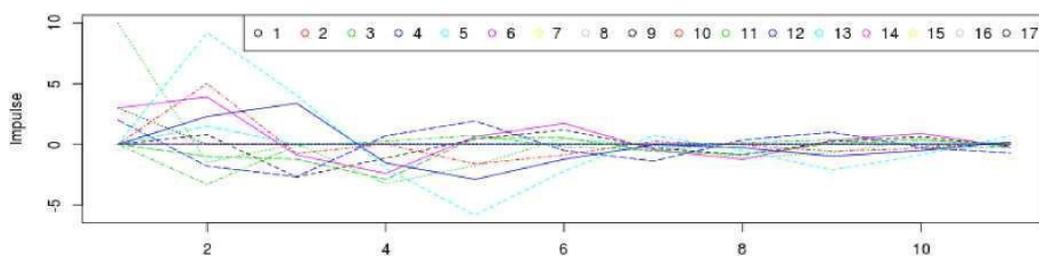


Рисунок 8. Визуализация решения прямой задачи в НКК

Таблица 10

**Результат моделирования прямой задачи в нечеткой когнитивной карте**

|      | Шаг 0 | Шаг 1 | Шаг 2 | Шаг 3 | Шаг 4 | Шаг 5 | Шаг 6 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (X1) | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| (X2) | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| (X3) | 10.00 | -1.50 | 0.04  | -3.23 | -1.76 | 0.50  | -0.11 |

Расчет системных показателей отображен на вкладке “Table consonance” и представлен на Рисунок 9. Значения меняются с изменением операций пересечения и объединения.

|    | System consonance | System dissonance | Element consonance | Element dissonance | System influence | Concept influence | Central consonance | Central influence | Combaned consonance | Combaned dissonance |
|----|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 1  | 0                 | 1                 | 0.199              | 0.801              | 0                | 0.168             | -0.199             | -0.168            | 0.199               | 1                   |
| 2  | 0.059             | 0.941             | 0.201              | 0.799              | 0.047            | 0.152             | -0.142             | -0.105            | 0.201               | 0.941               |
| 3  | 0.573             | 0.427             | 0.294              | 0.706              | 0.349            | 0.135             | 0.279              | 0.214             | 0.573               | 0.706               |
| 4  | 0                 | 1                 | 0.294              | 0.706              | 0                | 0.153             | -0.294             | -0.153            | 0.294               | 1                   |
| 5  | 0.294             | 0.706             | 0.248              | 0.752              | 0.184            | 0.197             | 0.046              | -0.013            | 0.294               | 0.752               |
| 6  | 0.086             | 0.914             | 0.086              | 0.914              | 0.23             | -0.156            | 0                  | 0.386             | 0.086               | 0.914               |
| 7  | 0.228             | 0.772             | 0.294              | 0.706              | 0.076            | 0.124             | -0.066             | -0.048            | 0.294               | 0.772               |
| 8  | 0.235             | 0.765             | 0.302              | 0.698              | 0.019            | 0.204             | -0.067             | -0.185            | 0.302               | 0.765               |
| 9  | 0.201             | 0.799             | 0.353              | 0.647              | 0.121            | 0.214             | -0.152             | -0.093            | 0.353               | 0.799               |
| 10 | 0.069             | 0.931             | 0.086              | 0.914              | -0.22            | 0.106             | -0.017             | -0.326            | 0.086               | 0.931               |
| 11 | 0                 | 1                 | 0.307              | 0.693              | 0                | 0.273             | -0.307             | -0.273            | 0.307               | 1                   |
| 12 | 0                 | 1                 | 0.436              | 0.564              | 0                | 0.307             | -0.436             | -0.307            | 0.436               | 1                   |

Рисунок 9. Интерфейс с таблицей значений системных показателей системы

Во вкладках consonance (Рисунок 10), dissonance (Рисунок 11), positive influence (Рисунок 12), negative influence (Рисунок 13) показаны кластеры

системных показателей концептов, согласно выбранному в программе уровню среза.

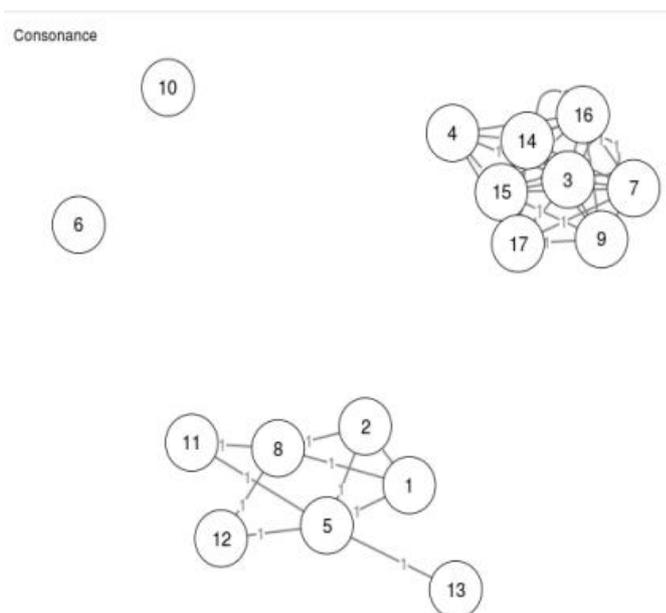


Рисунок 10. Результат расчета консонанса, кластеризация концептов по уровню среза 0.9

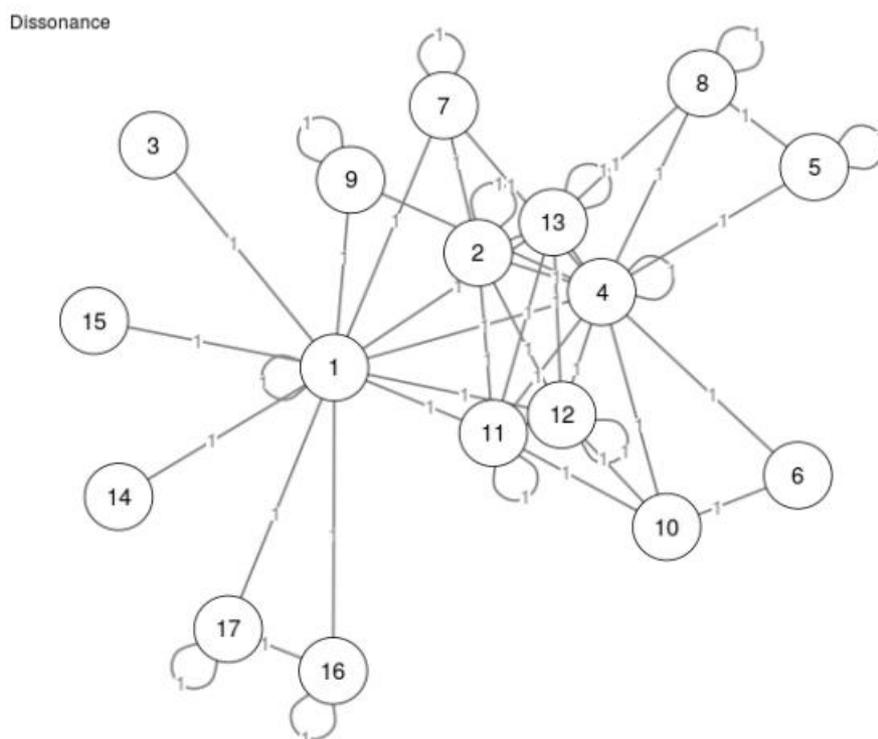


Рисунок 11. Результат расчета диссонанса, кластеризация концептов по уровню среза 0.9



## **ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

### **4.1. Математическая модель предприятия розничной торговли**

Под термином "предприятие розничной торговли" понимается сеть торговых точек одного формата, принадлежащих одному владельцу и обладающих эффективной системой логистики. Основное предположение, лежащее в основе технологий и практик в этой сфере, заключается в том, что все покупатели, независимо от своего уровня дохода, имеют возможность приобрести предлагаемые товары. Розничная торговля на развитых рынках представляет собой медленно растущую отрасль, вызванную насыщенностью рынка, ограниченными доходами клиентов и острой конкуренцией. Компании розничной торговли также подвергаются критике за уровень заработной платы и предоставление льгот сотрудникам.

Процесс работы предприятия розничной торговли представляет собой сложную систему, включающую взаимодействующие компоненты, такие как отношения с поставщиками и клиентами, финансовое и стратегическое планирование, технические операции, управление персоналом и другие. Эта система трудно проектировать, поскольку в нее входит множество нелинейных взаимосвязей и скрытых влияний. Современные процессы стратегического планирования не всегда способны помочь предприятиям в решении проблем, с которыми они сталкиваются. Менеджеры по стратегическому планированию часто сталкиваются с трудностями в полном понимании эффективности предлагаемой стратегии. Они также сталкиваются с проблемами, которые невозможно решить простым сбором дополнительных данных, четким определением проблем или их разбиением на более мелкие. Поэтому описание предприятия розничной торговли как сложной системы включает рассмотрение

его основных характеристик [102]:

1. Этап формирования. Этот этап описывает свойство сложной системы, при котором невозможно прямо описать систему как сумму ее отдельных компонентов. Например, изменение уровня лояльности клиентов может быть представлено как нелинейная связь между качеством продукции, репутацией компании, маржой на товары, расходами на рекламу и другими факторами.

2. Потоки информации. Элементы розничной компании взаимодействуют динамично, обмениваясь информацией и оказывая влияние друг на друга. Некоторые концепции, такие как "техническая готовность поставщика" или "сумма уплаченных налогов", взаимодействуют с ограниченным числом концепций, но их последствия распространяются на всю систему. Изменение одной концепции ведет к изменению всей системы, но из-за сложности системы невозможно оперировать абсолютными значениями изменений. Можно, однако, определить вес (или импульс) изменения в концепции и его влияние на всю систему. Правильное определение концепций и взаимодействий между ними является ключевой задачей моделирования сложных систем.

3. Внутренние модели. Некоторые концепции могут контролировать систему и быть поддающимися изменениям по решению руководства, в то время как другие представляют собой концепции состояния, подверженные внутренним изменениям в ответ на изменения внешней среды. Последняя группа включает целевые концепции, описывающие желаемые состояния системы и отражающие стратегические цели, которых необходимо достичь (например, лояльность клиентов или мотивация сотрудников).

4. Нелинейность. Взаимодействие компонентов сложной системы не линейно со временем и может изменять вес влияния при изменении состояния системы. Например, уровень лояльности клиентов может различаться в зависимости от затрат на рекламу, стоимости продукции и уровня обслуживания клиентов. Статистический анализ этих процессов является чрезвычайно сложной задачей из-за эффектов нелинейных взаимодействий, представляющих собой комбинацию состояний и начальных условий, определяющих поведение в

сложной системе [149].

5. Непредсказуемость с ограничениями. Неожиданные изменения в сложных системах, таких как розничная компания, могут вынудить систему переходить в другие состояния и переходить от высокой степени стабильности к крайне нестабильному поведению. Даже малые изменения начальных условий могут со временем привести к разнообразной динамике системы. Например, снижение обменного курса валюты может повлиять на операционные расходы, закупочные цены у поставщиков и, следовательно, на общую прибыль компании. Это изменение сохранится в системе, и его последствия будут распределены по всей системе, а не сосредоточены в определенном месте. Для менеджеров, занимающихся планированием сценариев и анализом стратегии для розничной компании, важна оценка истории и текущего состояния системы, чтобы иметь возможность моделировать потенциальные изменения в поведении.

Сфера розничной торговли характеризуется интенсивной конкуренцией, постоянным расширением ассортимента продуктов и наличием различных категорий клиентов с разными уровнями дохода, и географическими распределениями. Управление сотнями магазинов, разбросанных по всей стране, и даже тысячами различных магазинов в мировом масштабе, при обеспечении однородного качества обслуживания в каждом магазине, представляет собой сложную задачу. Когда крупные предприятия розничной торговли сотрудничают с поставщиками, каждый независимый процесс становится сложной системой с тысячами подсистем.

#### **4.1.1. Методы исследования**

Отрасль розничной торговли является динамической системой, моделирование которой сложная задача, связанная с неопределенностью и неточностью. Моделирование длительное время остается одним из наиболее широко распространенных методов стратегического планирования в управлении [150], поскольку цель бизнес-моделирования – помочь менеджеру анализировать сложные проблемы и принимать решения более научным и объективным образом. Модели корпоративного планирования [151]

использовались для поддержки принятия решений еще до того, как компании значительно расширились и моделирование стало неотъемлемой частью управленческих решений. В нашей работе мы представляем построение модели предприятия розничной торговли с применением методологию нечетких когнитивных карт и описываем различные подсистемы компании, включая технический уровень развития, взаимодействие с клиентами и сотрудниками, отношения с поставщиками, состояние рынка и финансы компании. Каждая из этих подсистем имеет различные компоненты, изменение которых влияет не только на связанные уровни, но и на всю модель.

Некоторые концепты в модели являются физическими или измеримыми, другие – нематериальными, например, лояльность сотрудников или репутация компании. Так же концепт может быть организационной способностью, встроенной в распорядок дня, процессы и культуру компании. Примером может служить скорость внедрения инновационных технологий и уровень взаимодействий департаментов. Концепты нельзя оценивать изолированно, потому что их ценность определяется взаимодействием с другими компонентами системы.

В ходе первого этапа построения модели [31] были выделены общие концепты, определяющие розничные процессы внутри компании, после чего были выявлены взаимосвязи между этими концептами. Эти концепты были адаптированы из существующих моделей [152], стратегических рекомендаций [153] и общего описания отрасли розничной торговли [154], [155]. Затем концепты были распределены по 6 подсистемам с наибольшим влиянием: технологии, сотрудники, клиенты, финансы, маркетинг и внешние факторы. Для оценки воздействия одного концепта на другой были определены лингвистические эквиваленты, такие как "Очень низкий", "Низкий", "Средний", "Высокий", "Очень высокий", а также указано направление влияния – положительное или отрицательное. Влияния были собраны в результате интервью с тремя экспертами, знакомыми с отраслью розничной торговли. Некоторые концепты, такие как «лояльность сотрудников» [156], [157], [158],

«уровень обслуживания клиентов» [159], «условия труда» [160] и другие [161] были дополнительно получены в результате исследований корреляции между концептами.

Для определения окончательных соотношений между параметрами, статистическая модель, управляемая данными, и экспертные оценки предметной области были объединены. Использование статистического подхода позволяет нам определить отношения между параметрами и процессами компании. Интервью с экспертами помогают нам определить взаимосвязи сложных для измерения концептов, на которые не влияет статистический анализ (например, удовлетворенность клиентов или расширение сети). Учет этих параметров важен, так как менеджеры розничной сети стараются развивать компанию быстрее, но сотрудники, клиенты и другие заинтересованные стороны могут иметь разные интересы, и не все из них разделяют цели компании. Каждая группа обладает способностью в той или иной степени влиять на выбор стратегии и итоговые результаты работы компании, что необходимо учитывать при планировании сценария. Таким образом, неопределенность в объяснении поведения розничной системы может быть устранена.

#### **4.1.2. Результаты численного эксперимента**

Полученная система представлена на Рисунок 14 в виде нечеткой когнитивной карты, определяющей концепты и связь между ними с весом влияния.

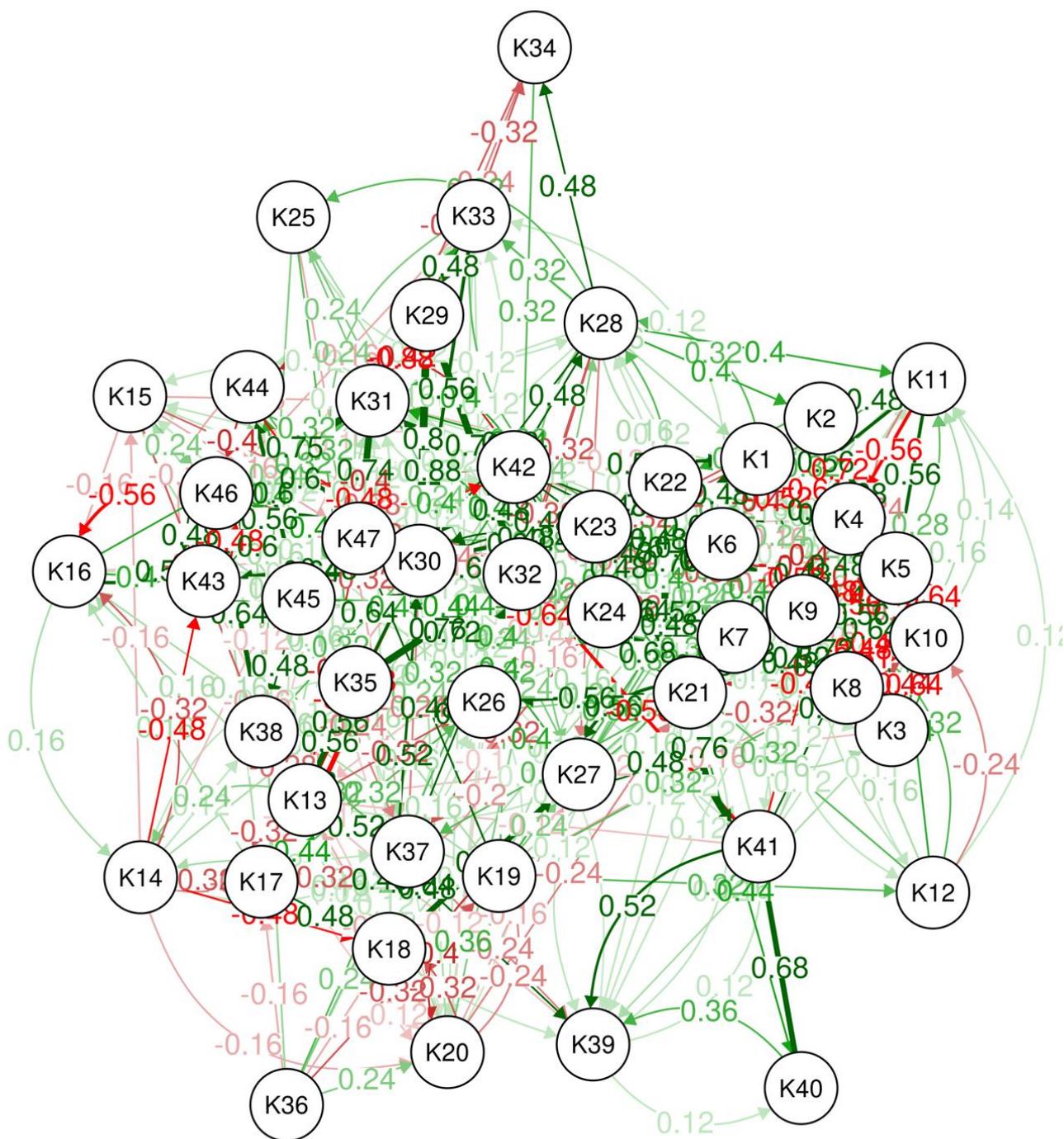


Рисунок 14. Нечеткая когнитивная карта предприятия розничной торговли

После объединения концептов и влияний между ними исследуем свойства полученной системы. Определим концепты, оказывающие положительное влияние друг на друга (или циклы положительной обратной связи). Для этого рассмотрим детальнее подсистему взаимоотношений с сотрудниками. В этой подсистемы присутствует петля положительной обратной связи: "Уровень

взаимодействий департаментов" в компании путем упрощения процессов и предоставления сотрудникам возможности сосредоточиться на текущих задачах, система повышает "Производительность труда", что, в свою очередь, способствует увеличению "Лояльности сотрудников" и помогает им выполнять задачи вовремя, что усиливает "Уровень взаимодействий департаментов" как положительная практика в компании.

Предприятие розничной торговли также является само адаптивной системой, которая способна изменять поведение в соответствии с текущей конфигурацией и восприятием среды, в которой она работает. Рассмотрим, как в системе розничной торговли разрабатываются новые стратегии, в ответ на изменения условий окружающей среды. Снижение «процентной ставки по кредитам» увеличивает «инфляционные ожидания» и чем выше инфляционные ожидания в стране, тем меньше будет «политическая стабильность». Снижение «политической стабильности» в стране потребует повышения «процентной ставки по кредитам».

Проанализировать управляемость системы можно определив внешний вход (вектор управляющих переменных) и отследив изменение внутреннего состояния системы из любого начального состояния в любое другое конечное состояние за конечный интервал времени по формуле (30). Принимая во внимание то, что НКК является нечеткой системой, с целью выявления скрытых отношений между концептами необходимо также определить оператор нечеткой композиции для обучения исходной карты. Выбор оператора нечеткого взаимодействия позволяет получать прогнозы разного уровня – от оптимистических прогнозов с нечетким оператором  $\min$  - drastic sum (как  $T$ -норма и  $S$ -норма) до пессимистических прогнозов с оператором drastic product -  $\max$ . В литературе чаще всего используется оператор композиции  $\min$  -  $\max$  [149], который обычно применяется, когда система требует консервативных решений. Как будет рассмотрено позже, этот оператор не применим для описываемой системы предприятия розничной торговли, поскольку он не добавляет дополнительной ценности анализу налагая строгие ограничения на

систему.

Определим в качестве возможного сценария изменение управляющих концептов "Качество продуктов" и "Уровень лояльности сотрудников" и рассмотрим их влияние на концепт "Уровень лояльности клиентов". На первом шаге оценим развитие системы при изменении только одного из управляющих концептов – "Качество продуктов" (Таблица 11).

Таблица 11

**Изменения концептов системы для сценария увеличения концепта  
«Качество продуктов»**

| Концепт                            | Шаг 0 | Шаг 1 | Шаг 2 | Шаг 3 | Шаг 4 | Шаг 5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Уровень лояльности сотрудников     | 0     | 0.05  | 0.08  | 0.24  | 0.62  | 1.52  |
| Текучесть кадров                   | 0     | 0     | -0.07 | -0.09 | -0.34 | -0.82 |
| Уровень спроса                     | 0     | 0     | 0     | 0.01  | 0.01  | 0.02  |
| Качество товара                    | 0.1   | 0     | 0.07  | 0.10  | 0.26  | 0.63  |
| Уровень обслуживания клиентов      | 0     | 0     | 0.07  | 0.10  | 0.25  | 0.55  |
| <b>Уровень лояльности клиентов</b> | 0     | 0.06  | 0.01  | 0.14  | 0.36  | 0.85  |
| Репутация компании                 | 0     | 0.07  | 0.04  | 0.29  | 0.65  | 1.62  |
| Ассортимент товаров                | 0     | 0     | 0.01  | 0.01  | 0.03  | 0.08  |

|                  |   |      |      |      |      |      |
|------------------|---|------|------|------|------|------|
| Товарная наценка | 0 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.14 |
| Прибыль          | 0 | 0    | 0.02 | 0.17 | 0.15 | 0.67 |

Повышение качества продуктов само по себе не оказывает существенного влияния на "Уровень лояльности клиентов" до 3-го шага по времени. Возможно, это связано с увеличением наценки на товары и возможным повышением цены.

Таблица 12

**Изменения концептов системы для сценария увеличения концептов  
"Качество продуктов" и "Уровень лояльности сотрудников"**

| Концепт                            | Шаг 0 | Шаг 1 | Шаг 2 | Шаг 3 | Шаг 4 | Шаг 5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Уровень лояльности сотрудников     | 0.1   | 0.05  | 0.19  | 0.40  | 1.08  | 2.57  |
| Текучесть кадров                   | 0     | -0.05 | -0.11 | -0.21 | -0.57 | -1.40 |
| Уровень спроса                     | 0     | 0     | 0     | 0.01  | 0.01  | 0.03  |
| Качество товара                    | 0.1   | 0     | 0.09  | 0.19  | 0.43  | 1.08  |
| Уровень обслуживания клиентов      | 0     | 0.03  | 0.08  | 0.17  | 0.40  | 0.94  |
| <b>Уровень лояльности клиентов</b> | 0     | 0.06  | 0.06  | 0.23  | 0.63  | 1.42  |
| Репутация компании                 | 0     | 0.13  | 0.08  | 0.51  | 1.08  | 2.75  |
| Ассортимент товаров                | 0     | 0     | 0.01  | 0.03  | 0.04  | 0.13  |
| Товарная наценка                   | 0     | 0.06  | 0.02  | 0.04  | 0.10  | 0.23  |
| Прибыль                            | 0     | 0.01  | 0.04  | 0.26  | 0.30  | 1.09  |

Ситуация изменится, если вместе с качеством продукции будет повышена лояльность сотрудников (Таблица 12). Эта стратегия имеет гораздо более сильное влияние на целевой концепт и запустит цикл усиления уровня лояльности клиентов, что приведет к увеличению прибыли компании.

Анализ информации в транзитивно замкнутой когнитивной матрице, содержащей положительные и отрицательные связи, позволяет рассмотреть стратегии, приведшие к определенным зависимостям между концептами. Также возможно определить максимальный положительный или отрицательный путь на нечетком ориентированном графе НКК. Структурный анализ НКК предоставляет информацию для "реструктуризации" проблемы, выявляя противоречивые места и предоставляя возможность изменить структуру и веса причинно-следственных связей в исходной матрице.

Проведем анализ системных показателей НКК, таких как влияние концепта на систему, влияние системы на концепт, консонанс и диссонанс. Концепт "Репутация компании" усиливает систему, а система, в свою очередь, усиливает целевой концепт. Диссонанс усиления находится ниже среднего, что указывает на тенденцию к стабилизации репутации компании. Концепт "Прибыль" немного усилен системой, при этом его консонанс находится ниже среднего, что отражает пессимистическую тенденцию развития системы по отношению к данному концепту. Модель показывает, что без внешнего воздействия на систему прибыль в розничной торговле имеет тенденцию к снижению из-за высокой конкуренции и низкой маржи в секторе.

Концепт "Уровень обслуживания клиентов" сильнее всего усиливает систему по сравнению с другими концептами (положительное влияние концепта на систему составляет 0.16), а система, в свою очередь, усиливает этот концепт слабее. Это отражает на системном уровне факт, что обслуживание клиентов всегда будет одним из главных факторов, влияющих на то, как клиенты воспринимают розничные бренды. Покупатели возвращаются в магазины при получении положительного опыта при покупке и важно настроить процессы так, чтобы был обеспечен он был постоянный и ориентированный на клиента.

Консонансы системы и концепта примерно равны, поэтому концепт «Уровень обслуживания клиентов» обеспечивает усиление системы. Следующими по степени усиления системы являются: «Качество продукции» и «Стандарты производства».

Концепты оказывают меньшее влияние на систему «Выручка от продаж» и «Лояльность сотрудников» однако растут под влиянием системы. Система в наибольшей степени, по сравнению с другими концептами, ослабляет концепт «текучесть кадров», что является отрицательным концептом в рассматриваемой модели. «Процентная ставка по кредитам» негативно действует на систему, в то время как система также ослабляет это концепт. В этом случае консонансы системы и концепта лежат в одном диапазоне. Это показывает нам, насколько чувствительна система розничной торговли к повышению процентной ставки. Потребители могут сокращать расходы по мере роста ставок по ипотечным кредитам и у предприятий розничной торговли также может увеличиться задолженность ввиду имеющихся кредитов. Концепт «банковский кредит» является противоречивым: система ослабляет его, но он оказывает слабое положительное влияние на систему.

Анализ НКК продолжим, используя кластеры общего консонанса, диссонанса, положительных и отрицательных влияний. Для этого проведем группировку системных показателей карты, выявив активные концепты, в большей степени влияющие на развитие системы, а также пассивные концепты. После сравним сформированные кластеры концептов с помощью различных операторов композиции казуальной алгебры. Такой подход позволяет выделить классы связанных понятий и оценить взаимосвязи в выделенных кластерах.

В каждой группе можно выделить концепты, имеющие сильное влияние как внутри подсистемы и так на всю систему в целом, а также концепты, которые менее важны и имеют слабые связи (Рисунок 15).



Consonance

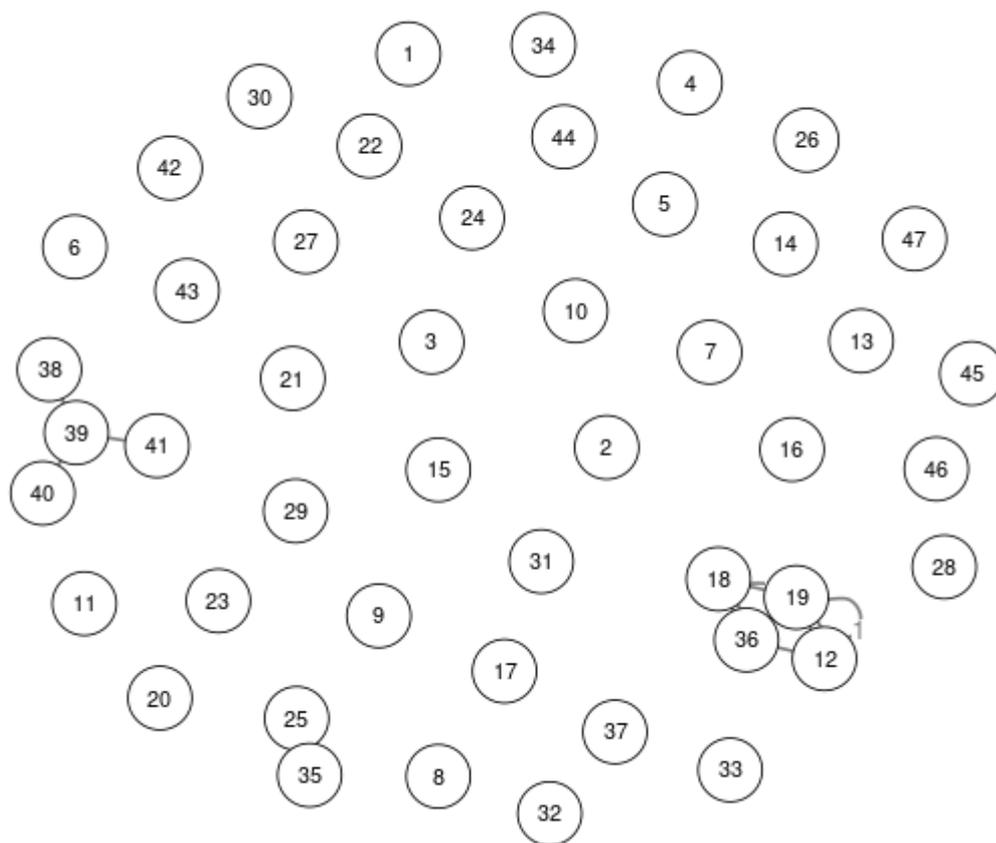


Рисунок 16. Консонанс общего влияния концептов при использовании оператора  $\max$  - algebraic product и уровне среза 0,85

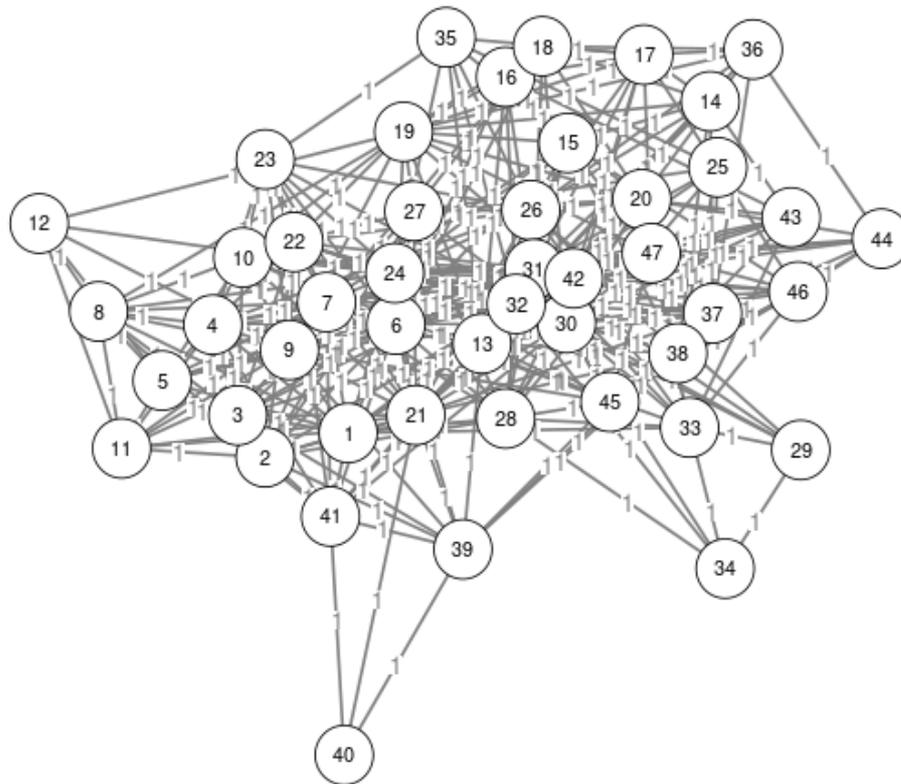


Рисунок 17. Консонанс общего влияния концептов при использовании оператора  $\max$  - drastic product и уровнем среза 0,85

На Рисунок 17 показаны концепты, объединённые совместным консонансом:

1. «Политическая стабильность», «Открытость общения с сотрудниками», «Уровень доходов потребителей», «Курс обмена валюты» формируют кластер безопасности клиентов на рынке.
2. «Условия закупки поставщика», «Эффективность выбора поставщика», «Техническая готовность поставщика», «Интеграция систем с поставщиками», формирование кластера взаимоотношений с поставщиками.
3. «Ассортимент товаров», «Расходы на рекламу» – кластер маркетинга в системе розничной торговли.

Еще одна формация связана со связью положительных влияний концептов Репутация компании ~ Уровень лояльности клиентов ~ Уровень обслуживания клиентов, которые образуют положительную петлю. Поскольку единственный

концепт в этом петле, уровень обслуживания клиентов, может напрямую контролироваться компанией важной задачей любой компании розничной торговли является постоянное улучшение качества обслуживания. Хорошим примером бизнес-стратегии, ориентированной на обслуживание клиентов, может быть служба поддержки клиентов Amazon, где процесс покупки и возврата настроен на минимизацию усилий клиентов и максимизацию скорости ответа.

Сравнивая Рисунок 16 и Рисунок 17, можно заметить, что при использовании другого оператора композиции в нечетких картинах меняется количество кластеров и увеличивается количество связей между концептами.  $S$  - норма «*max*» [162] обычно используется, когда система требует консервативных решений, т. е. когда качество одного концепта не может компенсировать низкое качество другого концепта. Однако в реальных системах, существуют ситуации, которые позволяют компенсировать значения вектора решения. В этом случае либеральная  $min T$  - норма – не лучший выбор для пересечения нечетких множеств.

Таблица 13

**Зависимость количества связанных элементов для показателя консонанса от выбора нечеткого оператора при уровне среза 0,85**

|                | max -<br>min | max -<br>hamacher<br>product | max -<br>algebraic<br>product | max -<br>einstein<br>product | max -<br><i>drastic</i><br>product |
|----------------|--------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Консонанс 0.8  | 0            | 0                            | 16                            | 39                           | 47                                 |
| Консонанс 0.85 | 0            | 0                            | <b>10</b>                     | 33                           | 47                                 |
| Консонанс 0.9  | 0            | 0                            | 3                             | 32                           | 47                                 |

В данной работе предпочтительна композиция max-algebraic product ,

потому что она может дать лучшие или, по крайней мере, эквивалентные результаты. Некоторые способы выбора подходящего нечеткого оператора композиции приведены в [163], [164]. Анализ различных операторов нечеткой логики для системы розничной торговли представлен в Таблица 13. Операторы композиции были упорядочены по уменьшению связности концептов. В рассматриваемой системе оптимальная  $T$ -норма – алгебраическое произведение, поскольку с помощью этого оператора можно формировать кластеры и оценить показатели системы, в то же время не усложняя анализ системы введением большого количества кластеров.

Для определения наиболее подходящего нечеткого оператора для данной системы предлагается использовать метод, аналогичный методу локтя для задачи кластеризации. Суть метода в нанесении на график количества несвязанных понятий для индикатора консонанса и определении по изгибу кривой оптимального оператора композиции (Рисунок 18).

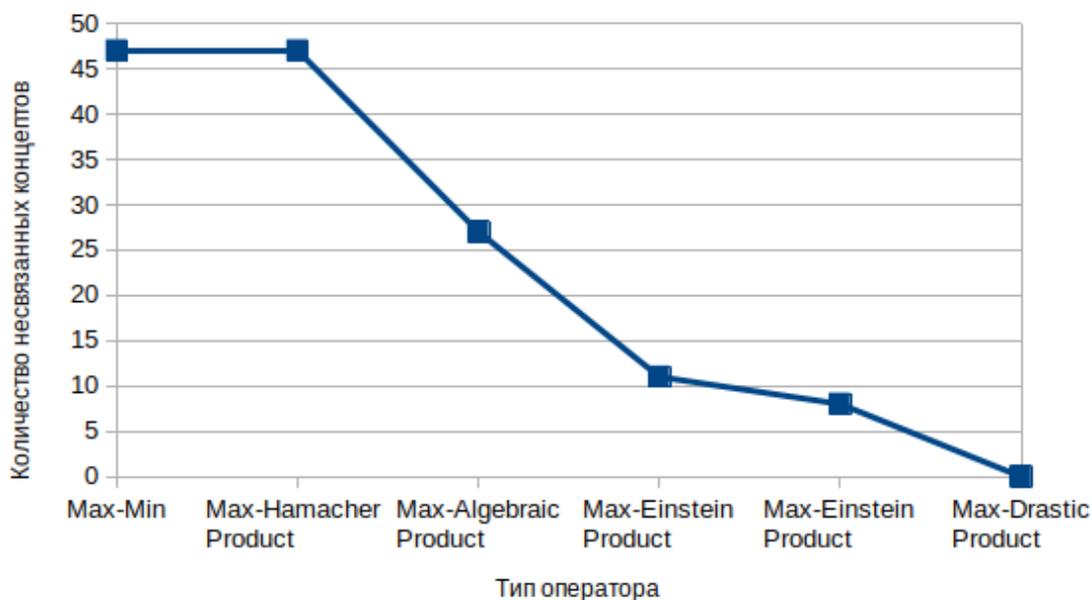


Рисунок 18. Количество несвязанных концептов при использовании различных операторов композиции для НКК розничной торговли

Решим задачу разработки стратегии развития розничной системы, определяемой изменением уровня ключевых концептов системы [32]. Для этого

получим начальные значения векторов управления системой, приводящие к заданным целевым показателям. Целевой вектор был вычислен с использованием решения нейтрософских нечетких уравнений. Определим стратегию увеличения прибыли и улучшения репутации компании в качестве целевой. Для решения этой задачи мы разработаем вектор значений приращений управляющих концептов и проведем анализ воздействия различных операторов нечеткой композиции на формирование стратегий. Целевые изменения концептов представлены в Таблица 14:

Таблица 14

**Необходимое увеличение целевых концептов и степени уверенности  
(консонанса)**

| Концепт            | Изменение | Консонанс |
|--------------------|-----------|-----------|
| Прибыль            | 0.1       | 0.1       |
| Репутация компании | 0.1       | 0.1       |

Таблица 15

**Полученные приращения управляющих концептов с  
использованием композиции  $\max - \min$**

| Тип решения  | ИТ<br>инфраструктура | Ассортимент<br>товаров | Курс<br>валют | Инвестиции |
|--------------|----------------------|------------------------|---------------|------------|
| Максимальное | 0.08                 | 0                      | 0             | 0          |
| Минимальное  | -0.08                | 0                      | 0             | 0          |
| Минимальное  | 0                    | 0.08                   | 0             | 0          |
| Минимальное  | 0                    | -0.08                  | 0             | 0          |
| Минимальное  | 0                    | 0                      | 0.08          | 0          |

|             |      |      |       |       |
|-------------|------|------|-------|-------|
| Минимальное | 0    | 0    | -0.08 | 0     |
| Минимальное | 0    | 0    | 0     | 0.08  |
| Минимальное | 0    | 0    | 0     | -0.08 |
| Минимальное | 0.08 | 0.08 | 0.08  | 0.08  |

Таблица 16

**Полученные приращения управляющих концептов с  
использованием композиции max – algebraic product**

| Тип решения  | ИТ<br>инфраструктура | Ассортимент<br>товаров | Курс<br>валют | Инвестиции |
|--------------|----------------------|------------------------|---------------|------------|
| Максимальное | 0.21                 | 0.42                   | -1.0          | 0.52       |
| Минимальное  | 0                    | 0.42                   | 0.87          | 0.52       |
| Минимальное  | 0.21                 | 0.42                   | 0.87          | -0.43      |
| Минимальное  | -0.17                | 0.42                   | 0.87          | 0.52       |
| Минимальное  | 0.21                 | 0.42                   | 0.87          | 0          |
| Минимальное  | 0                    | 0.42                   | 0             | 0.52       |
| Минимальное  | 0.21                 | 0.42                   | 0             | -0.43      |
| Минимальное  | -0.17                | 0.42                   | 0             | 0.52       |
| Минимальное  | 0.21                 | 0.42                   | 0             | 0          |

Анализируя данные из Таблица 15 и Таблица 16, можно отметить, что система проявляет большую устойчивость при использовании композиции – алгебраическое произведение. В то время как при применении композиции – система не реагирует на вектор управления и может достигнуть целевого

состояния при минимальных воздействиях. Также были проведены вычисления с использованием наиболее консервативной композиции – радикальный продукт. В данном случае отсутствует стратегия, при которой система перейдет в целевое состояние. Этот оператор не предоставляет конструктивной информации для анализа и моделирования стратегий развития системы.

Анализ Таблица 16 позволяет сделать вывод, что полученное максимальное решение определяет необходимость в незначительном увеличении «Товарного ассортимента». Эта тактика предполагает увеличение значения концепта как в максимальном, так и в минимальном решении, подчеркивая важность разнообразия товаров для увеличения прибыли и улучшения репутации компании. В данном сценарии другие управляющие концепты находятся в противоречии друг с другом, предоставляя руководителям возможность принимать решения о повышении одного управляющего концепта за счет уменьшения другого. Путем использования разработанной модели и результатов оптимизации нечеткой когнитивной карты можно имитировать динамику розничной системы, изменяя значения управляющих концептов. Этот подход помогает менеджерам в стратегическом планировании, облегчая определение перспектив развития компании и прогнозирование возможных результатов управленческих решений. Модели были получены с использованием разработанного программного обеспечения «FuzzyM» [36], [37].

Для оценки вклада приложения FuzzyM в процессы стратегического планирования в компании розничной торговли был использован подход на основе сравнения «до» и «после» внедрения.

До внедрения FuzzyM стратегическое планирование в компании осуществлялось в основном с использованием электронных таблиц, дашбордов и экспертных оценок. Такой подход имел несколько ограничений: не было формализованного моделирования взаимосвязей между факторами, использовались упрощённые линейные модели, а возможности для анализа альтернативных сценариев были ограничены. Экспертное мнение учитывалось

неявно и несистемно, что снижало точность принимаемых решений. Также наблюдалась низкая прозрачность причинно-следственных связей и обратных эффектов, что затрудняло предсказание долгосрочных последствий решений.

На основе анализа архивных данных, внутренних документов и опросов были выделены следующие ключевые метрики базовой эффективности:

- Среднее время на принятие решения о выборе стратегии управления.
- Количество проанализированных сценариев.
- Уровень уверенности в прогнозе среди экспертов по вербальной шкале (низкий, средний, высокий) нормализованный по шкале 1-10, где низкий соответствует 1, средний - 5, высокий – 10. После метрика была усреднена среди экспертов.

- Количество повторных согласований между отделами.

Сценарии, в которых был протестирован FuzzyM:

1. Анализ воздействия изменений цен на прибыль при различных уровнях лояльности клиентов.

2. Оценка влияния изменения курса валют на стоимость импорта и ценовую политику.

3. Анализ эффектов от внедрения новых технологий или инноваций в процесс производства и их влияние на себестоимость товаров.

4. Моделирование изменений в конкуренции на рынке и их воздействия на рыночную долю компании.

5. Оценка последствий сокращения затрат на персонал и влияние этого на уровень обслуживания клиентов и общую эффективность предприятия.

В эксперименте принимали участие 11 экспертов представляющие 4 департамента – ценообразования, закупок, информационных технологий и управления персоналом. Средние результаты сравнения по ключевым метрикам представлены в Таблица 17.

**Сравнение средних показателей стратегического планирования до и после внедрения FuzzyM для 5 сценариев**

| Метрика                                 | До внедрения | После внедрения | Эффект            |
|---|--------------|-----------------|-------------------|
| Время на принятие решения               | 20 дней      | 9 дней          | На 45% быстрее    |
| Сценариев на один цикл                  | 2            | 7               | В 3.5 раза больше |
| Уверенность экспертов (1–10) в прогнозе | 6.2          | 8.7             | +40% уверенности  |
| Повторные согласования                  | 3 раунда     | 1 раунд         | На 66% меньше     |

Для обоснования полученных результатов использовались:

- Анализ внутренних KPI за периоды до и после внедрения.
- Опросы и интервью с ключевыми пользователями FuzzyM.
- Лог-файлы системы (число сценариев, моделей и запусков симуляций).

После внедрения FuzzyM процесс стратегического планирования претерпел существенные изменения. Появилась возможность наглядно отображать сложные взаимосвязи между ключевыми факторами, такими как цены, клиентская лояльность и логистика, и оценивать их влияние на общий доход компании. Кроме того, стало возможно проводить симуляции и анализ сценариев по принципу «что если» с учётом неопределённости, что позволило глубже прорабатывать альтернативные решения. Это также способствовало повышению прозрачности процесса принятия решений и активному вовлечению различных подразделений в совместную работу над стратегией.

Сравнительный анализ показал значительное повышение эффективности

стратегического планирования после внедрения FuzzyM. Приложение позволяет не только ускорить процесс принятия решений, но и повысить их обоснованность и согласованность между подразделениями. Таким образом, FuzzyM выступает в роли интеллектуального усилителя коллективной экспертизы и адаптивности розничной компании.

#### **4.2. Использование НКК для задачи развития муниципальных образований**

В условиях быстрой урбанизации общества моделирование процессов устойчивого развития городов привлекает значительное внимание ученых. В этой главе представлено модель НКК для имитации процессов городского развития. Такая модель подчеркивает универсальность НКК в интеграции экспертных знаний и количественной оценке влияния показателей, которые формируют городское пространство, от инфраструктуры и жилья до экологической устойчивости и благополучия общества. В этой главе используется синтез обширного обзора литературы и экспертных мнений с целью создания и уточнения когнитивной карты, адаптированной для развития муниципальных образований. Изложенная методология формулирует систематический подход к выбору концептов, присвоению весов и проверке модели. Благодаря сотрудничеству с межотраслевыми экспертами исследование подтверждает ценность НКК для выявления каскадных эффектов в процессе принятия решений при формировании стратегий развития города. Признавая ограничения, присущие экспертным методам и нечеткий характер данных, приводятся доводы в пользу эффективности НКК не только в выявлении, но и в решении возникающих проблем урбанизации.

Интеграция НКК в муниципальное планирование и развитие городов становится все более важным аспектом создания умной и устойчивой городской

среды. В городском планировании НКК использовались для понимания и прогнозирования городской динамики, позволяя проводить анализ, включающий социальные, экономические и экологические аспекты. В литературе описано применение НКК для анализа пробок на дорогах [165], планирования землепользования [166] и оценки устойчивости городов [167]. Исследования [168] и [169], продемонстрировали полезность НКК в стратегическом планировании и анализе политики, подчеркнув их роль в обеспечении ясности в сложных процессах принятия решений.

Несмотря на достигнутый прогресс, НКК, используемые в городском развитии, сталкиваются с проблемами, связанными с субъективным характером привлечения экспертов, масштабируемостью моделей и необходимостью надежных методов проверки. Тем не менее, растущее количество литературы указывает потенциал НКК для внесения значимого вклада в проектирование будущих городов. Ожидается, что достижения в области вычислительных методов и повышение доступности данных будут способствовать дальнейшему использованию НКК при принятии управленческих решений в области городского развития.

#### **4.2.1. Методы исследования**

Дизайн исследования для создания и использования НКК для развития города предполагает систематический подход к сбору и синтезу как качественной, так и количественной информации из широкого спектра источников. Этот смешанный подход сочетает в себе тщательный обзор литературы и привлечение экспертов в предметной области для построения и уточнения карт.

Этап 1: Сбор концептов из литературы. Начальный этап состоит из обширного обзора научной литературы, политических документов, планов городского развития и других соответствующих источников. Целью данного обзора является определение ключевых идей, традиционно рассматриваемых в городском развитии и проектировании городов (например, инфраструктура, землепользование, экономическое развитие).

Этап 2: Первоначальное построение НКК. На основе этих идей определяется первоначальный набор концептов и их связей для создания предварительного НКК. На этом этапе карта является в основном теоретической, с отношениями и весами, присвоенными в соответствии с данными литературы. Например, влияние инфраструктуры на экономическое развитие можно определить количественно на основе эконометрических исследований, которые пытались измерить эту взаимосвязь в прошлом. Веса карты представляют собой действительные числа  $[-1,1]$ , представляющие силу и характер (положительный или отрицательный) влияния.

Этап 3: Привлечение экспертов. После обзора литературы первоначальная версия НКК предоставляется группе экспертов в предметной области, которые приносят практический опыт в концептуальную основу НКК. Эксперты отбираются на основе их знаний и опыта в различных аспектах городского развития, включая городское планирование, гражданское строительство, экологию, социологию, экономику и государственное управление.

Этап 4: Сбор весов. Экспертов просят проанализировать и уточнить первоначальную НКК, предоставив вес и направление связей между каждой парой концептов. Они могут использовать методы парного сравнения, прямую оценку или другие специализированные методы выявления для количественного определения весов. На этом этапе использовались интервью для систематического сбора мнений и предпочтений экспертов.

Этап 5: Интеграция и адаптация экспертного вклада. Результатом обратной связи экспертов является адаптированная НКК, в которой связи и сила этих связей (веса) отражают медианную оценку всех мнений. Двойной подход, заключающийся в сочетании тщательного обзора литературы и привлечения экспертов, гарантирует, что НКК одновременно основана на фактических данных и отражает практический опыт. Этот дизайн исследования необходим для разработки реалистичных и прикладных НКК, которые можно использовать для стратегического планирования и моделирования развития муниципальных образований.

#### 4.2.2. Результаты численного эксперимента

На основе обзора литературы были определены концепты для НКК городского развития, которые в совокупности определяют городскую среду. Эти концепты представляют собой как материальные, так и нематериальные элементы, которые взаимодействуют, формируя городскую жизнь. В Таблица 18 представлены выбранные концепты НКК и их описание.

Таблица 18

#### Концепты, влияющие на развития г. Краснодара

| Об-<br>ние | Концепт                                    | Описание  | Тип<br>концепта      |
|------------|--|---|----------------------|
| X1         | Валовой<br>региональный<br>продукт         | Концепт относится к общему экономическому объему производства или добавленной стоимости всех производителей в регионе. В контексте развития города такие показатели часто рассматриваются для понимания экономического вклада города или региона в общую экономику страны [170].  | Концепт<br>состояния |
| X2         | Объем<br>промышленно<br>го<br>производства | Объем промышленного производства охватывает продукцию обрабатывающей, горнодобывающей, электрической и газовой промышленности в пределах определенной территории. Часто считается, что этот показатель отражает экономическое состояние региона и его способность создавать рабочие места и обеспечивать экономический рост [171].  | Концепт<br>состояния |
| X3         | Объем<br>производства<br>услуг             | Объем производства услуг является важным фактором развития города, поскольку он отражает масштаб сектора услуг, который может включать такие сегменты, как финансы, образование, здравоохранение, розничная торговля и информационные технологии. Рост или спад производства услуг может оказать глубокое влияние на городскую экономику, занятость и общую эволюцию характера и функциональности города [172]. | Концепт<br>состояния |

|    |                                      |   |                   |
|----|--------------------------------------|---|-------------------|
| X4 | Конкурентоспособность продукции      | Конкурентоспособность продукции означает способность города производить товары и услуги, соответствующие ожиданиям мирового рынка по качеству и цене. Высокий уровень конкурентоспособности продукции может привлечь инвестиции, способствовать диверсификации экономики и обеспечить устойчивый рост города за счет создания рабочих мест и укрепления репутации города как центра инноваций и передового опыта [173].   | Концепт состояния |
| X5 | Уровень социальной безопасности      | Этот концепт включает в себя предотвращение преступности, общественное здравоохранение, готовность к стихийным бедствиям и общее чувство безопасности для жителей, что имеет решающее значение для здоровой городской жизни [174].  | Концепт состояния |
| X6 | Уровень спроса и потребления         | Уровень спроса и потребления внутри города может существенно повлиять на траекторию его развития, поскольку более высокие потребительские расходы стимулируют рост бизнеса и привлекают новые инвестиции. Кроме того, понимание местных моделей потребления позволяет городским планировщикам и политикам адаптировать инфраструктуру и услуги для лучшего удовлетворения растущих потребностей городских жителей, тем самым поддерживая устойчивое городское развитие [175]. | Концепт состояния |
| X7 | Эффективность использования ресурсов | Концепт эффективность использования ресурсов направлен на минимизацию отходов и оптимизацию воздействия городской деятельности на окружающую среду. Оптимизируя потребление энергии, воды и материалов, города могут улучшить свое воздействие на устойчивое развитие, сократить расходы и повысить комфортность жизни своих жителей [176].   | Концепт состояния |
| X8 | Объем инвестиций                     | Размер инвестиций, направляемых в городскую инфраструктуру, благоустройство и технологии, часто   | Концепт состояния |

|     |                                 |  |                   |
|-----|---------------------------------|--|-------------------|
|     |                                 | служит источником жизненной силы для развития города, катализируя экономический рост и улучшая качество жизни жителей. Крупномасштабные инвестиции могут изменить городские ландшафты, стимулировать создание рабочих мест и привлечь бизнес, в то время как недостаточные инвестиции могут тормозить развитие и привести к упадку городов [177].  |                   |
| X9  | Уровень развития инфраструктуры | Инфраструктура относится к физическим активам, необходимым для функционирования города, включая транспортные системы, коммунальные услуги и сети связи. Развитие и поддержание инфраструктуры напрямую влияет на мобильность, экономический рост и качество жизни [178].   | Концепт состояния |
| X10 | Уровень загрязнения             | Уровень загрязнения играет важную роль в развитии города, поскольку высокий уровень загрязнения окружающей среды может отпугивать инвестиции, наносить вред здоровью населения и снижать общее качество жизни, тем самым препятствуя росту и привлекательности города. И наоборот, эффективное управление и сокращение загрязнения может повысить комфортность жизни в городах, привлечь экологически сознательных жителей и предприятия, а также укрепить репутацию города как чистого и желательного места для жизни и работы [179] [180]. | Концепт состояния |
| X11 | Средняя заработная плата        | Более высокая средняя заработная плата в городе может повысить покупательную способность потребителей, стимулируя местную экономику и потенциально привлекая квалифицированную рабочую силу, что, в свою очередь, может способствовать дальнейшим городским инновациям и развитию. Однако, если не принять меры наряду с корректировкой стоимости жизни, это может усугубить социально-экономическое неравенство и повлиять на доступность жилья [180].  | Концепт состояния |

|     |  |   |                     |
|-----|--|---|---------------------|
| X12 | Объем финансирования здравоохранения           | Адекватное финансирование здравоохранения имеет решающее значение для обеспечения здоровья рабочей силы и населения, способствуя общей производительности и привлекательности города как для новых жителей, так и для предприятий, в то время как недостаточные инвестиции в здравоохранение могут привести к системным проблемам со здоровьем и затруднить долгосрочную перспективу. демографический рост. | Концепт состояния   |
| X13 | Объем социального финансирования               | Благосостояние сообщества связано с социальным капиталом, культурной деятельностью и местами отдыха, которые способствуют качеству жизни в городских условиях [180].  | Концепт состояния   |
| X14 | Уровень безработицы                            | Низкий уровень безработицы обычно указывает на устойчивую городскую экономику с широкими возможностями трудоустройства, что может привлечь соискателей работы и поддержать динамичное развитие города, тогда как высокий уровень безработицы может создать нагрузку на социальные услуги и ограничить экономический прогресс.   | Концепт состояния   |
| X15 | Уровень развития технологий                    | Передовое технологическое развитие в городе стимулирует инновации, эффективность и часто приводит к созданию высокооплачиваемых рабочих мест, способствуя созданию атмосферы прогресса и экономического роста. Городу, отстающему в технологиях, может быть трудно сохранить таланты и конкурировать на мировом уровне, что ограничивает перспективы его развития.  | Концепт состояния   |
| X16 | Социальная напряженность                       | Этот концепт направлен на создание социально инклюзивной и справедливой среды для всех жителей города, включая доступ к услугам, удобствам и возможностям [181].  | Концепт состояния   |
| X17 | Уровень обеспеченности "зелеными" территориями | Города с обширными «зелеными» территориями, такими как парки и природные пространства, часто более привлекательны для жителей и туристов,   | Управляющий концепт |

|     |   |   |                     |
|-----|---|---|---------------------|
|     |   | предлагая преимущества для здоровья и отдыха, которые улучшают качество жизни и могут способствовать устойчивому городскому развитию. Пренебрежение зелеными насаждениями может снизить привлекательность города и способствовать ухудшению состояния окружающей среды и проблемам общественного здравоохранения.                     |                     |
| X18 | Политическая стабильность                                 | Этот концепт определяет процессы принятия решений в городе и степени участия жителей в формировании городского развития [182].  | Управляющий концепт |
| X19 | Численность населения                                     | Растущее население может сигнализировать о процветании города, увеличении спроса на товары, услуги и жилье, что стимулирует экономическую активность и возможности развития; и наоборот, сокращение численности населения может привести к экономическому спаду и недостаточному использованию инфраструктуры.                        | Концепт состояния   |
| X20 | Трудовой потенциал  | В городах с высоким трудовым потенциалом имеется рабочая сила с разнообразными навыками и высокой производительностью, которая привлекает работодателей и способствует экономическому росту, в то время как нехватка квалифицированной рабочей силы может удерживать предприятия от инвестиций и ограничивать инновации и расширение. | Концепт состояния   |
| X21 | Прибыль предприятий                                       | Здоровая норма прибыли предприятий в городе может указывать на сильную экономику и обеспечивать средства для реинвестирования в местное развитие, занятость и инновации; недостаточная прибыльность может привести к закрытию предприятий, потере рабочих мест и экономической стагнации.   | Концепт состояния   |
| X22 | Обеспеченность объектами соц., культ. и спорт. назначения | Этот концепт подробно описывает управление и планирование земельных ресурсов, а также то, как они распределяются для жилых, коммерческих, промышленных и  | Концепт состояния   |

|     |  |  |                     |
|-----|--|--|---------------------|
|     |  | рекреационных целей. Планирование землепользования имеет решающее значение для устойчивого городского развития и предотвращения разрастания городов [183].   |                     |
| X23 | Жилой фонд                             | Наличие, доступность и качество жилья в городских условиях имеют решающее значение для обеспечения высокого уровня жизни жителей [184].  | Управляющий концепт |
| X24 | Уровень налогов                        | Конкурентоспособные уровни налогов могут стимулировать бизнес-инвестиции и способствовать процветанию города, однако чрезмерно высокие налоги могут отпугнуть предприятия и жителей, препятствуя экономической жизнеспособности и развитию инфраструктуры.   | Концепт состояния   |
| X25 | Уровень инфляции                       | Инфляция может оказать существенное влияние на развитие города, подрывая покупательную способность потребителей и увеличивая стоимость инфраструктурных проектов, потенциально замедляя экономический рост и приводя к более осторожным инвестиционным стратегиям. Кроме того, неконтролируемая инфляция может усугубить проблемы доступности продуктов потребления для жителей города, что приведет к большему неравенству доходов и создаст проблемы для местных органов власти в предоставлении справедливых государственных услуг. | Концепт состояния   |
| X26 | Экономическая стабильность             | Экономическая стабильность является центральным аспектом городского планирования. Оно включает в себя создание рабочих мест, поддержку инноваций и предпринимательства, а также содействие инвестициям и торговле [185].   | Концепт состояния   |
| X27 | Эколого-ресурсный потенциал территории | Этот концепт описывает создание городского дизайна, который способствует энергоэффективности, сокращению отходов и сохранению природных ресурсов [186].  | Концепт состояния   |

|    |  |  |                 |
|----|--|--|-----------------|
| У1 | Туристическая привлекательность города | Города, являющиеся важными туристическими направлениями, получают выгоду от внешних инвестиций, создания рабочих мест в секторе услуг и повышения культурной активности, что способствует городскому развитию; отсутствие туризма может привести к упущенным экономическим возможностям и недостаточному использованию культурных ценностей. | Целевой концепт |
| У2 | Уровень социального благополучия       | Концепт описывает общий уровень социального благополучия города, включая его инфраструктуру, образование и управление, служит основой для поддержания текущего роста и привлечения будущих инвестиций, тогда как недостаточная развитость может создавать препятствия для прогресса и снижать благосостояние жителей.                        | Целевой концепт |
| У3 | Эколого-экономическая эффективность    | Акцент города на экологической и экономической эффективности может привести к устойчивому росту, сохранению ресурсов для будущих поколений, сохраняя при этом экономический импульс, тогда как неэффективность может привести к отходам, загрязнению окружающей среды и финансовым проблемам, которые препятствуют долгосрочному развитию.   | Целевой концепт |

На этапе отбора экспертов была тщательно выбрана группа экспертов в предметной области, чтобы обеспечить всесторонний и разнообразный спектр точек зрения на развитие города. Критерии отбора включают академическое образование, профессиональный опыт, публикации и практическое участие в проектах городского планирования. Участники привлекались из различных областей, таких как городское планирование, архитектура, гражданское строительство, экология, экономика и местное самоуправление, чтобы охватить междисциплинарный характер городского развития. Всего были выбраны 8 экспертов, работающих в Краснодарском крае. Выбранные эксперты

продемонстрировали знание местного и более широкого контекста городского развития, чтобы гарантировать актуальность и применимость их вклада в построение НКК.

На этапе присвоения веса эксперты участвовали в структурированных интервью, призванных выявить их суждения относительно силы и направленности взаимосвязей между выявленными концептами. В ходе этих интервью экспертам предлагалось дать количественные оценки, часто по определенной шкале: не связано, слабо связано, сильно связано и по направлению связи: положительная или отрицательная. Эта шкала позволяет перевести качественные идеи в числовые веса, которые отражают степень влияния одного концепта на другой по шкале  $[-1,1]$ . Собранные данные из этих экспертных интервью были затем агрегированы и нормализованы для формирования соответствующих весов связей в окончательной НКК. Чтобы обеспечить согласованность входных данных различных экспертов, мы использовали медианный вес. Рисунок 19 представляет построенную НКК развития муниципальных образований в формате графика. Матрица взаимосвязей приведена в Приложении 2.

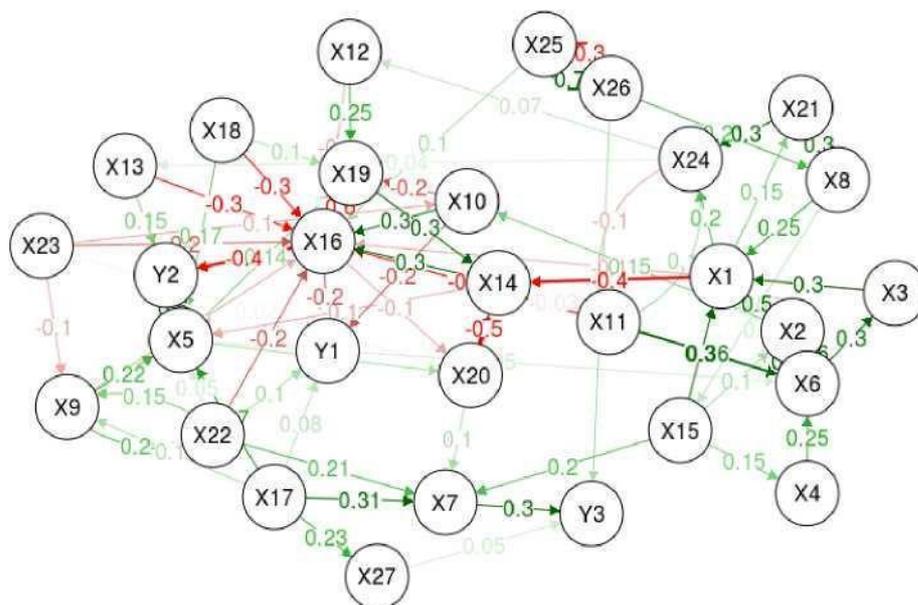


Рисунок 19. Нечёткая когнитивная карта формирования стратегии развития г. Краснодара

Основными целями в НКК «формирование стратегии развития г. Краснодара» являются:

1. Y1 Туристическая привлекательность города
2. Y2 Уровень социального благополучия
3. Y3 Эколого-экономическая эффективность

Было проведено формирование когнитивной матрицы взаимовлияний и согласование отношений взаимовлияния концептов. Из исходной НКК  $W = W_j$  размерностью  $n \times n$ , формируется нечеткая матрица положительных связей  $R(2n \times 2n)$ . В результате расчетов формируется транзитивно замкнутая когнитивная матрица взаимовлияний, которая позволяет произвести расчет системных показателей НКК. Были определены системные показатели влияния концептов на систему и системы на концепты, представленные в Таблица 19.

Таблица 19

**Системные характеристики НКК формирования стратегии развития г. Краснодара**

| Концепт | Консонанс влияния системы | Консонанс влияния концепта | Влияние системы на концепт | Влияние концепта на систему |
|---------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| X1      | 0.716                     | 0.564                      | 0.067                      | 0.003                       |
| X2      | 0.653                     | 0.505                      | 0.044                      | 0.047                       |
| X3      | 0.616                     | 0.564                      | 0.021                      | 0.011                       |
| X4      | 0.677                     | 0.506                      | 0.006                      | 0.019                       |
| X5      | 0.613                     | 0.562                      | 0.025                      | 0.031                       |
| X6      | 0.616                     | 0.506                      | 0.044                      | <b>0.051</b>                |

|     |       |       |               |               |
|-----|-------|-------|---------------|---------------|
| X7  | 0.628 | 0.033 | 0.03          | 0.01          |
| X8  | 0.764 | 0.612 | 0.026         | 0.013         |
| X9  | 0.133 | 0.712 | 0.006         | 0.023         |
| X10 | 0.66  | 0.514 | 0.007         | -0.01         |
| X11 | 0.409 | 0.632 | -0.007        | 0.037         |
| X12 | 0.674 | 0.572 | 0.005         | 0.009         |
| X13 | 0.674 | 0.455 | 0.003         | 0.006         |
| X14 | 0.513 | 0.657 | <b>-0.046</b> | -0.018        |
| X15 | 0.76  | 0.64  | 0.004         | 0.03          |
| X16 | 0.546 | 0.462 | -0.044        | <b>-0.051</b> |
| X17 | 0     | 0.737 | 0             | 0.045         |
| X18 | 0     | 0.598 | 0             | 0.011         |
| X19 | 0.587 | 0.671 | 0.017         | 0.007         |
| X20 | 0.601 | 0.678 | 0.005         | -0.008        |
| X21 | 0.732 | 0.505 | 0.015         | 0.022         |
| X22 | 0.133 | 0.607 | 0.008         | 0.022         |
| X23 | 0     | 0.618 | 0             | -0.005        |
| X24 | 0.674 | 0.509 | 0.032         | -0.003        |
| X25 | 0.044 | 0.461 | -0.017        | 0.024         |
| X26 | 0.044 | 0.476 | 0.016         | -0.004        |

|     |       |       |        |       |
|-----|-------|-------|--------|-------|
| X27 | 0.033 | 0.033 | 0.008  | 0.002 |
| Y1  | 0.591 | 0     | -0.001 | 0     |
| Y2  | 0.597 | 0     | 0.033  | 0     |
| Y3  | 0.705 | 0     | 0.026  | 0     |

Произведен анализ НКК, который показал, что первый целевой концепт система ослабляет, но диссонанс ослабляющего действия выше среднего, поэтому намечается тенденция к стабилизации туристической привлекательности города. Целевые концепты Y2 и Y3 усиливаются системой, при этом консонанс выше среднего, что отображает оптимистичную тенденцию развития системы по этим концептам. Концепт "Уровень спроса и потребления" в наибольшей степени по сравнению с другими концептами усиливает систему (положительное влияние концепта на систему 0,051), а система, в свою очередь, слабее увеличивает этот концепт. Консонансы системы и концепта примерно равны, поэтому концепт сам обеспечивает усиление системы. "Уровень спроса и потребления" — хорошо сбалансированный концепт, он обеспечивает усиление системы в равной степени, как и оно его. Следующими по степени положительного усиления системы являются следующие концепты: X2 "Объем промышленного производства", X17 "Уровень обеспеченности "зелеными" территориями". "Валовой региональный продукт" и "Объем промышленного производства". Система в наибольшей степени, по сравнению с другими концептами, ослабляет концепт X14 "Уровень безработицы". "Социальная напряженность" действует отрицательно на систему, в то время как система также ослабляет этот концепт. При этом консонансы системы и концепта лежат в одном диапазоне. Концепт "Уровень безработицы" противоречивый: система ослабляет его, но он оказывает слабое отрицательное влияние на систему.

Системные показатели, в большинстве случаев не дают информации о валентности взаимодействия концептов с системой, однако характерным

показателем валентности является консонанс. При кластеризации системных показателей можно выделить концепты, имеющие высокий консонанс, — это X5 ~ X29, X25 ~ X26, X2 ~ X6, так называемые хорошие фигуры, и высокий диссонанс — это X16 ~ X19 (плохие фигуры).

Проведенный структурный анализ НКК позволил выявить информацию для “реструктурирования” проблем городского развития и может помочь найти противоречивые места системы с целью изменения структуры и весов причинно-следственных связей в исходной матрице.

Анализ НКК можно продолжить, используя кластеры взаимного консонанса, диссонанса, положительного и отрицательного влияния с учетом задания соответствующего уровня среза. Такой подход позволяет выделить классы связанных концептов, характеризуемых задаваемым уровнем относительно соответствующего свойства. Проведем кластеризацию системных показателей карты, выявление активных концептов, которые влияют на развитие системы в большей мере, а также пассивных концептов, сравнение сформированных кластеров концептов при использовании различных операций каузальной алгебры.

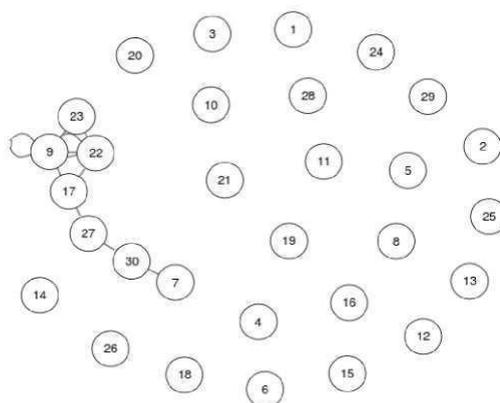


Рисунок 20. Консонанс взаимовлияния концептов при использовании операции  $\max - \min$  и уровне среза 0.9

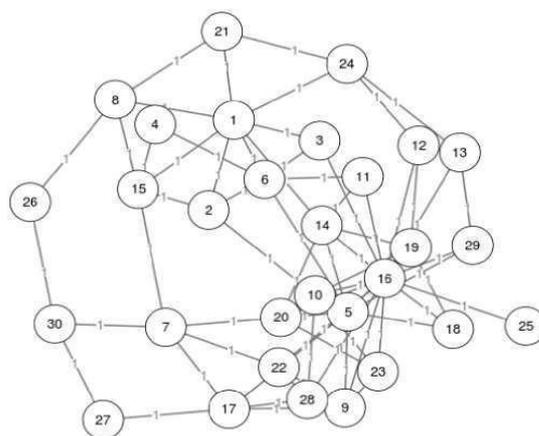


Рисунок 21. Консонанс взаимовлияния концептов при использовании операции  $\max - \text{bounded diff}$  и уровнем среза 0.9

На Рисунок 20 взаимным консонансом объединены концепты: “Уровень развития инфраструктуры”, “Уровень обеспеченности “зелеными” территориями”, “Обеспеченность объектами соц. культ. и спорт. назначения”, “Эффективность использования ресурсов”, образующие кластер “Инфраструктура”, с которым тесно связаны другие концепты “Экономического” кластера – “Жилой фонд”, “Эколого-ресурсный потенциал территории”, “Эколого-экономическая эффективность”. Граф кластеров получен при уровне среза 0.9 и использовании операции  $\max - \min$ . Сравнивая Рисунок 20 и Рисунок 21 можно заметить, что при использовании другой операции пересечения и аккумуляции коалиций становится меньше, а связей между концептами больше. Более того, данные в транзитивно замкнутой когнитивной матрице, учитывающей положительные и отрицательные влияния, обеспечивают основу для анализа стратегий, которые привели к определенным зависимостям между концептами, а также для выявления максимально положительных или отрицательных путей на нечетком ориентированном графе карты, а также для определения максимального консонанса или диссонанса между двумя концептами. Структурный анализ нечеткой когнитивной карты предоставляет всю необходимую информацию для “реструктуризации” проблемы и помогает выявить противоречивые моменты с целью изменения структуры и весов причинно-следственных связей

в исходной матрице.

На следующем этапе произведено решение задачи поддержки принятия решения и формирование стратегий развития системы. Задача решается с целью поддержки принятия решений путем определения вектора начальных состояний системы, которые приводят к заданным целевым показателям. Задача решена используя аппарат теории НРУ. Произведен анализ влияния различных операций композиции на формирование стратегий. Зададим целевые приращения концептов (Таблица 20).

Таблица 20

**Целевые приращения концептов**

| Концепт            | Изменение концепта | Консонанс |
|--------------------|--------------------|-----------|
| Y1 (положительное) | 0.040              | 0.300     |
| Y1 (отрицательное) | 0.022              | 0         |
| Y2 (положительное) | 0.007              | 0.177     |
| Y2 (отрицательное) | 0.005              | 0         |
| Y3 (положительное) | 0.001              | 0.177     |
| Y3 (отрицательное) | 0.000              | 0         |

При решении задачи получаем вектор значений приращений управляющих концептов, представленный в Таблица 21, Таблица 22 и Таблица 23:

Таблица 21

**Приращения целевых концептов при композиции max – min. Здесь реш. – решения, конс. – консонанс.**

| Тип<br>реш. | X17<br>приращение | X17<br>конс. | X18<br>приращение | X18<br>конс. | X23<br>приращение | X23<br>конс. |
|-------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| макс        | 0.0007            | 0            | 0.0007            | 0            | 0.0007            | 0            |
| мин         | 0                 | 0            | 0                 | 0            | -0.0007           | 1            |
| мин         | 0                 | 0            | 0                 | 0            | 0.0007            | 1            |
| мин         | 0                 | 0            | -0.0007           | 1            | 0                 | 0            |
| мин         | 0                 | 0            | 0                 | 0            | 0                 | 0            |
| мин         | -0.0007           | 1            | 0                 | 0            | 0                 | 0            |
| мин         | 0.0007            | 1            | 0                 | 0            | 0                 | 0            |

Таблица 22

**Приращения целевых концептов при композиции max – prod. Здесь реш. – решения, конс. – консонанс.**

| Тип<br>реш. | X17<br>приращение | X17<br>конс. | X18<br>приращение | X18<br>конс. | X23<br>приращение | X23<br>конс. |
|-------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| макс        | 0.011             | 0.177        | 0.058             | 0.177        | 0.087             | 0.177        |
| мин         | 0.011             | 0.177        | 0                 | 0            | 0.087             | 0.177        |
| мин         | 0.011             | 0.177        | 0.058             | 1            | -0.061            | 1            |
| мин         | 0.011             | 0.177        | -0.041            | 1            | 0.087             | 1            |
| мин         | 0.001             | 0.177        | 0.058             | 0.177        | 0                 | 0            |

Таблица 23

**Приращения целевых концептов при композиции max – bounded diff.**

**Здесь реш. – решения, конс. – консонанс.**

| Тип<br>реш. | X17<br>приращение | X17<br>конс. | X18<br>приращение | X18<br>конс. | X23<br>приращение | X23<br>конс. |
|-------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| макс        | 0.96              | 0.01         | 1                 | 0            | 1                 | 0            |
| мин         | 0.96              | 0.01         | 0                 | 0            | 0                 | 0            |

Охарактеризуем результаты, представленные в Таблица 23. Полученная максимальная стратегия направлена на незначительные увеличения “Уровня обеспеченности "зелеными" территориями”, “Политической стабильности” и “Жилого фонда”, что позволит увеличить “Туристическую привлекательность региона” до целевой и даже в незначительной мере увеличив остальные целевые показатели. При этом консонанс управляющих концептов низкий, поэтому в действии на данную систему необходимо стимулировать как положительные, так и отрицательные компоненты стратегии. Анализируя полученные данные из Таблица 21, Таблица 22 и Таблица 23, можно заметить, что является более устойчивой при использовании операции  $\max - \text{bounded diff}$ , самые мягкие условия изменения приращений концептов получены при применении операции  $\max - \min$ , что соответствует свойствам рассмотренных операций каузальной алгебры.

С помощью построенной модели и решения обратной задачи можно моделировать процесс развития путем изменения значений управляющих концептов с целью имитации стратегии развития г. Краснодара.

#### **4.2.3. Ограничения модели**

Одним из ограничений этого исследования является присущая экспертным мнениям субъективность, которая может внести предвзятость и повлиять на объективность НКК, потенциально искажая представленные веса и связи. Отбор участников может не охватывать все соответствующие области или перспективы городского развития, что приводит к неполному представлению сложной городской экосистемы на когнитивной карте. Нечеткий характер данных и

лингвистическая аппроксимация, используемая при присвоении весов, могут привести к нечеткости и неточности структуры карты. Кроме того, из-за быстрого развития и непредсказуемости городских систем НКК может не полностью отражать возникающие тенденции или непредвиденные разрушительные события, которые могут существенно повлиять на развитие города. Наконец, возможность обобщения результатов может быть ограничена, поскольку результаты сильно зависят от контекста и могут быть неприменимы к разным городам с уникальными характеристиками и проблемами.

### **4.3. Математическая модель электродиализной установки на предприятии очистки воды**

Предприятия, занимающиеся электродиализной очисткой воды, стремятся повысить эффективность своих установок за счёт оптимизации технологических процессов. Для этого используются математические модели, позволяющие анализировать влияние различных факторов на производительность и энергопотребление установки по очистки воды. В данной главе представлена математическая модель, разработанная для оценки и оптимизации работы такой установки используя НКК.

#### **4.3.1. Методы исследования**

Цели моделирования:

1. Проверка математических методов описания электродиализа в мембранной системе
2. Анализ позитивной и негативной составляющих связей в модели электродиализа
3. Структурный анализ классов концептов
4. Синтез предполагаемых стратегий повышений эффективности работы предприятия

## Этап 1. Формирование концептуальной модели

На первом этапе проведен опрос экспертов для выявления концептов и их причинно-следственных взаимосвязей. На основе анализа данных составлена матрица весов взаимовлияний концептов. Таблица 24 содержит факторы, входящие в модель электродиализа в мембранной системе очистки воды. Матрица взаимосвязей приведена в Приложении 3.

Таблица 24

### Концепты, входящие в модель электродиализной установки на предприятии очистки воды

| Обозначение                                    | Концепт | Тип концепта |
|--|---------|--------------|
| Скорость течения раствора                      | k1      | Управляющий  |
| Температура воды на входе в камеру             | k2      | Управляющий  |
| Концентрация ионов соли                        | k3      | Управляющий  |
| Качество очистки (степень обессоливания)       | k4      | Управляющий  |
| Электропроводность мембран (сопротивление)     | k5      | Управляющий  |
| Частота регенерации                            | k6      | Управляющий  |
| Срок работы мембраны                           | Y1      | Целевой      |
| Сила тока в системе                            | k8      | Управляющий  |
| Скачок потенциала в системе                    | k9      | Управляющий  |
| Количество парных камер в аппарате             | k10     | Управляющий  |
| Расстояние между мембранами в аппарате         | k11     | Управляющий  |
| Ширина входного отверстия                      | k12     | Управляющий  |
| Длина канала                                   | k13     | Управляющий  |
| Производительность аппарата                    | k14     | Управляющий  |
| Количество солей в растворе                    | k15     | Управляющий  |
| Расход электроэнергии (электродиализ + работа) | Y2      | Целевой      |

|                     |     |             |
|---------------------|-----|-------------|
| КПД насоса          | k17 | Управляющий |
| Размер установки    | k18 | Управляющий |
| Стоимость установки | k19 | Управляющий |

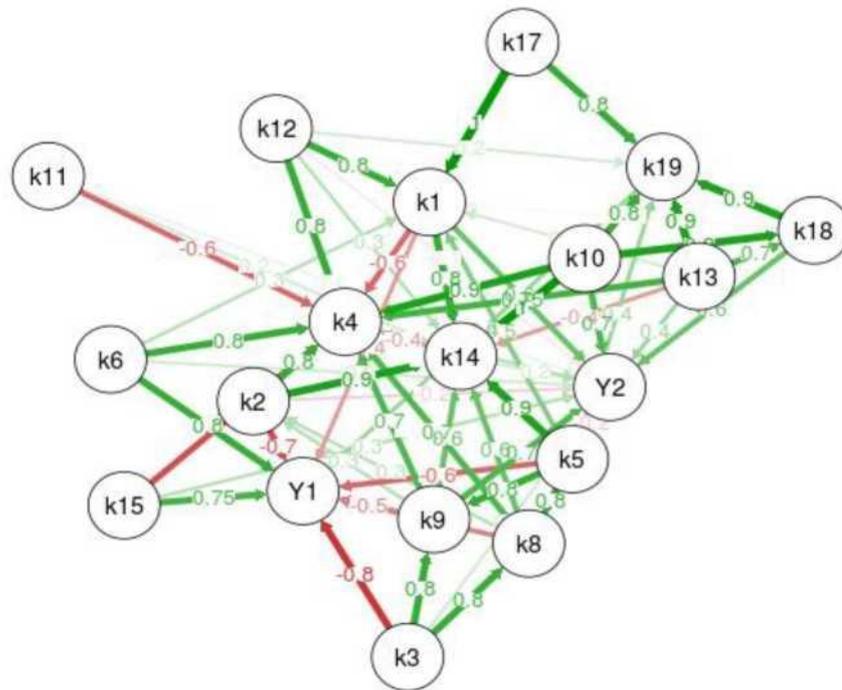


Рисунок 22. НКК электродиализной установки на предприятии очистки воды

## Этап 2. Построение нечёткой когнитивной карты (НКК)

На Рисунок 22 отображена полученная НКК в виде ориентированного взвешенного графа. Основными целями являются:

1. Y1 Срок работы мембраны
2. Y2 Расход электроэнергии (электродиализ + работа насоса)

Далее из исходной НКК сформирована нечёткая матрица положительных связей, а затем рассчитана транзитивно замкнутая когнитивная матрица взаимовлияний.

## Этап 3. Анализ системных показателей НКК.

Рассчитаны системные показатели влияния концептов на систему и системы на концепты.

## Этап 4. Анализ кластеров концептов

На основе рассчитанных значений влияний концептов выделены группы взаимного консонанса и диссонанса. Выявлены основные взаимосвязанные кластеры, такие как:

«Скорость очистки» (электропроводность мембран, температура воды на входе, производительность аппарата)

«Характеристики установки» (качество очистки, длина канала, стоимость установки, размер установки)

«Расход электроэнергии» (скорость течения раствора, КПД насоса)

Также рассмотрены коалиции противоречивых концептов, что позволяет оценить внутренние конфликты в системе.

#### Этап 5. Оптимизация и поддержка принятия решений

На данном этапе сформированы целевые приращения концептов и произведено решение обратной задачи моделирования, что привело к определению вектора значений приращений управляющих факторов.

#### 4.3.2. Результаты численного эксперимента

Таблица 25 содержит системные характеристики НКК, использованные в анализе модели. Анализ системных характеристик НКК показал, что целевой концепт Y1 (срок работы мембраны) ослабляется системой, что указывает на необходимость корректировки управляющих параметров. В то же время концепт Y2 (расход электроэнергии) усиливается системой, что свидетельствует о положительной тенденции.

Таблица 25

#### Системные характеристики НКК, используемые в анализе модели электродиализной установки на предприятии очистки воды

| Концепт | Консонанс влияния системы | Консонанс влияния концепта | Влияние системы на концепт | Влияние концепта на систему |
|---------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| k5      | 0                         | 0.383                      | 0                          | <b>0.219</b>                |
| k11     | 0                         | 0.12                       | 0                          | <b>-0.031</b>               |
| k13     | 0                         | 0.272                      | 0                          | <b>0.154</b>                |

|     |       |       |               |               |
|-----|-------|-------|---------------|---------------|
| k14 | 0.632 | 0.066 | <b>0.354</b>  | <b>-0.011</b> |
| k19 | 0.316 | 0.053 | <b>0.211</b>  | 0.021         |
| Y1  | 0.613 | 0     | <b>-0.065</b> | 0             |
| Y2  | 0.487 | 0     | 0.369         | 0             |

Концепт K5 (Электропроводность мембран) в наибольшей степени по сравнению с другими концептами усиливает систему (положительное влияние концепта на систему 0.219), а система, в свою очередь, не увеличивает этот концепт. Консонанс концепта высокий, поэтому он сам обеспечивает усиление системы.

Следующим концептом по степени положительного усиления системы является концепт k13 (Длина канала). k19 (Стоимость установки) обеспечивается ростом под действием системы, в то время как на систему он оказывают незначительное влияние. Концепт k14 (Производительность аппарата) – противоречивый. Система его увеличивает, а он оказывает сильное негативное влияние на систему. Так как консонанс влияния системы для k14 максимальный в рамках рассматриваемой модели, имеется оптимистичная тенденция развития. Система в наибольшей степени, по сравнению с другими концептами, ослабляет концепт целевой концепт Y1 (Срок работы мембраны).

Рассмотрим имеющиеся в системе кластеры взаимного консонанса, диссонанса, положительного и отрицательного влияния с учетом задания соответствующего уровня среза, представленные на Рисунок 23.

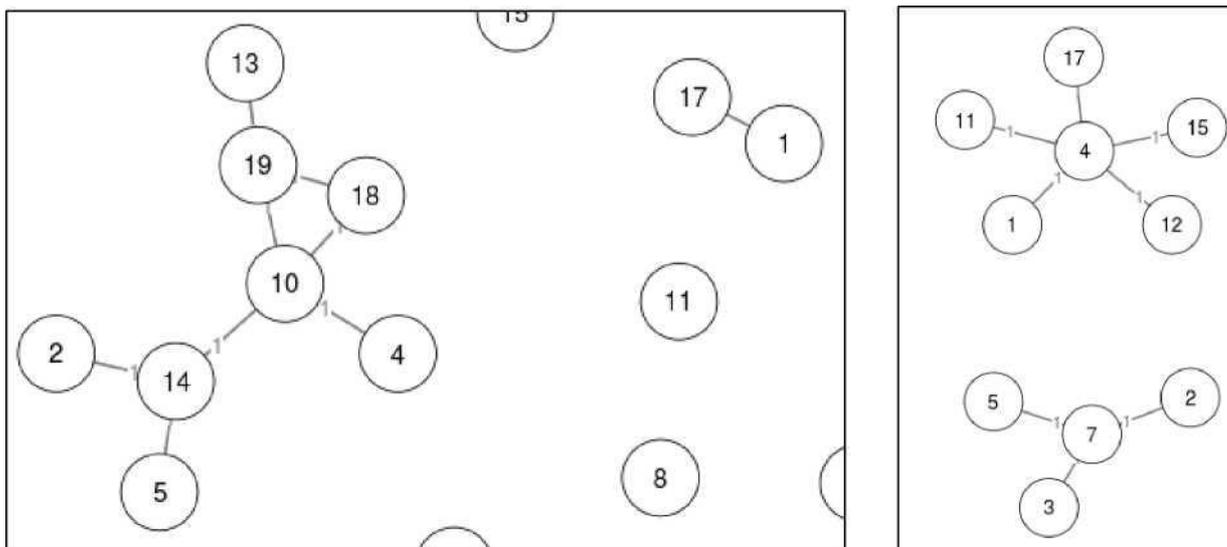


Рисунок 23. а) Взаимное положительное влияние концептов с уровнем среза 0.85 (слева); б) Взаимное отрицательное влияние с уровнем среза 0.6 (справа); операция  $\max - \min$

На Рисунок 23 а) можно условно выделить следующие блоки взаимного усиления концептов: «Электропроводность мембран», «Температура воды на входе в камеру», «Производительность аппарата» – формируют кластер «Скорость очистки», с которым тесно связан другой кластер – «Характеристики установки», включающий концепты «Качество очистки», «Длина канала», «Стоимость установки», «Размер установки», «Количество парных камер в аппарате». Отдельно можно выделить кластер «Расход электроэнергии», с концептами – «Скорость течения раствора», «КПД насоса». Для анализа противоречий в системе рассмотрим Рисунок 23 б), на котором выделены коалиции противоречивых концептов. Первый кластер представлен концептами «Расстояние между мембранами в аппарате», «Скорость течения раствора», «Ширина входного отверстия», «Количество солей в растворе», «КПД насоса» с влиянием на концепт «Качество очистки». Второй кластер «Температура воды на входе в камеру», «Концентрация ионов соли», «Электропроводность мембран» оказывает влияние на концепт «Срок работы мембраны».

В случае задачи моделирования электродиализа стоит также рассмотреть вопрос обучения нечеткой карты, т. к. имеется большой объем ретроспективных

данных по модели.

Для решения задачи поддержки принятия решения и формирование стратегий развития системы зададим целевые приращения концептов, представленные в Таблица 26.

Таблица 26

**Целевые приращения концептов**

| Фактор | Приращение | Консонанс |
|--------|------------|-----------|
| Y1     | 0.1        | 0.4       |
| Y2     | -0.1       | 0.6       |

При решении задачи получаем вектор значений приращений управляющих факторов, представленный в Таблица 27:

Таблица 27

**Приращения целевых концептов при композиции max – min**

| Тип решения | k3     | k5     | k10    | k11    | k12    | k17    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| макс        | -0.125 | -0.125 | -0.132 | 0.250  | -0.174 | -0.134 |
| мин         | -0.125 | 0      | -0.132 | 0      | 0      | 0      |
| мин         | -0.125 | 0      | -0.132 | 0.250  | 0      | 0      |
| мин         | -0.125 | 0      | -0.132 | -0.139 | 0      | 0      |
| мин         | -0.125 | 0      | -0.132 | 0      | 0.052  | 0      |
| мин         | -0.125 | 0      | -0.132 | 0      | -0.174 | 0      |
| мин         | -0.125 | 0      | -0.132 | 0      | 0      | 0.042  |

Охарактеризуем результаты в Таблица 27. Полученное максимальное решение направлено на снижение значений основных управляющих концептов, за исключением концепта «Расстояние между мембранами в аппарате». Действительно, при увеличении концепта «Расстояние между мембранами в аппарате» целевые концепты растут, но значительно снижается концепт

«Качество очистки». Разнообразие минимальных решений позволит экспертам выбрать оптимальные стратегии для оптимизации установки с учетом потребностей системы.

В результате анализа НКК можно заключить, что наиболее значимыми факторами для оптимизации работы установки являются электропроводность мембран, расстояние между ними и производительность аппарата. Улучшение этих параметров может способствовать повышению срока службы мембран и снижению энергозатрат, однако необходимо учитывать баланс между качеством очистки и экономической эффективностью. Использование методов когнитивного моделирования, таких как НКК, помогает выявить ключевые взаимосвязи в системе и определить стратегии развития, позволяя предприятиям принимать более обоснованные решения для повышения эффективности электродиализной очистки воды. Применение программного комплекса «FuzzyM» позволило экспертам оперативно оценить динамику развития системы, выявить проблемные зоны и предложить оптимальные стратегии развития предприятия.

В работе показана применимость метода НКК для анализа системы электродиализа. Построенная модель подтверждает возможность использования алгоритмов НКК, не только для социально-экономических систем, но и для систем, описывающих физико-химические процессы. Показано, что НКК может быть использована для управления процессом электродиализа путем мониторинга и регулировки параметров процесса в режиме реального времени. Результаты показывают, что внедрение НКК может эффективно улучшить производительность процесса электродиализа и снизить эксплуатационные расходы. Для развития текущей работы в дальнейших исследованиях описанная модель может быть обучена на существующих экспериментальных данных с использованием метода обучения, зависящего от ошибки. Другим потенциальным направлением исследований является расширение модели путем добавления задержек влияния концептов, позволяющих описать промежуточные состояния системы и различные скорости изменения факторов.

#### 4.4. Использование больших языковых моделей для построения НКК

Традиционно НКК создавались на основе экспертных знаний, данных или гибридных методов, объединяющих оба подхода [187]. Однако растущие возможности больших языковых моделей (LLM) предлагают новую парадигму построения НКК — основанную на использовании огромных объемов текстовых данных и способности глубокого обучения к выявлению закономерностей.

Большие языковые модели, такие как серия GPT от OpenAI [188], LLaMA от Meta [189] и модель Falcon [190], продемонстрировали выдающиеся способности в извлечении семантических связей, синтезе предметных знаний и понимании сложных контекстов. Эти характеристики делают их особенно подходящими для автоматизированного создания структур НКК, снижая зависимость от ручного экспертного ввода при сохранении интерпретируемости.

У этих моделей разные архитектуры, обучающие данные и способы развертывания, поэтому каждая из них даёт свой взгляд на автоматическое построение нечетких когнитивных карт и выявление причинно-следственных связей. Благодаря такому разнообразию можно систематически сравнивать точность структуры, соответствие тематике и устойчивость к смысловой неоднозначности.

Одним из ключевых преимуществ LLM является их способность решать сложные задачи рассуждения, включая причинно-следственный анализ, аналогии и понимание здравого смысла [191] [192]. Модели GPT от OpenAI демонстрируют высокую эффективность в структурированном рассуждении и извлечении знаний, недавние исследования рассматривают вопросы, как можно дообучать эти модели или изменять запросы (prompts) для задач, требующих интенсивных рассуждений, таких как генерация научных гипотез [193], системы поддержки принятия решений [194] и когнитивное моделирование [195]. В частности, методы, такие как пошаговое рассуждение (chain-of-thought, CoT) [196] и самосогласованное рассуждение (self-consistency reasoning) [197],

значительно улучшили производительность LLM в структурированном принятии решений, что делает их особенно актуальными для генерации НКК. Эти подходы позволяют моделям поэтапно формировать причинно-следственные связи, что хорошо согласуется с принципами построения НКК.

LLM также широко применяются в задачах, связанных с обработкой и структурированием текстовой информации, включая кластеризацию текстов [31], извлечение ключевых понятий [200] и генерацию онтологий [201]. В частности, их способность анализировать семантическую близость и выявлять скрытые паттерны в больших объемах данных делает их мощным инструментом для построения и оптимизации НКК.

Помимо ранее созданных базовых моделей, появилась новая волна современных LLM с открытым доступом, специально адаптированных под конкретные задачи — такие как рассуждение, следование инструкциям, генерация кода и обработка текста на разных языках. Эти модели обладают расширенными возможностями, что позволяет строить нечеткие когнитивные карты точнее и с учетом контекста. Модель Phi-4:14B [198], разработанная Microsoft, выделяется компактностью и высокой производительностью в задачах рассуждения, особенно при использовании метода *self-consistency sampling*. Qwen2.5:14B [199] от Alibaba основана на обучении с инструкциями и обладает мультиязычными возможностями, обеспечивая надёжную генерализацию по различным областям. LLaMA3:8B [200], выпущенная Meta, представляет собой облегчённую версию серии LLaMA3, демонстрируя конкурентоспособные результаты благодаря оптимизированному обучению на разнообразных наборах данных. Mistral-small [201] от Mistral AI ориентирована на эффективность и скорость при сохранении высокого качества рассуждений. Её архитектура поддерживает скользящее внимание (*sliding window attention*) и группированное внимание запросов (*grouped-query attention*), что позволяет масштабировать применение модели в задачах причинно-следственного анализа. Gemma3:12B [202] от Google DeepMind тонко настроена для сбалансированной работы в задачах рассуждения, генерации кода и проверки фактов, при этом её веса

открыты для прозрачного бенчмаркинга. Deepseek-r1 [203] от DeepSeek интегрирует улучшенное долгосрочное рассуждение и согласование с инструкциями, что делает её особенно эффективной для выявления иерархических и отсроченных причинно-следственных связей в НКК.

Модель gpt-4.5 [204] от OpenAI обучена с использованием методов неконтролируемого обучения, что улучшает распознавание паттернов, установление связей и генерацию инсайтов без явного рассуждения. Этот подход сочетается с дообучением под контролем и усилением через обратную связь от человека. Модель o3 [205] — самая мощная модель OpenAI для задач рассуждения, созданная как рефлексивный генеративный трансформер, предназначенный для решения сложных задач и глубокого анализа в широком спектре задач обработки текстов на естественном языке. Способность больших языковых моделей анализировать семантическое сходство и выявлять скрытые закономерности в больших данных делает их мощным инструментом для построения и оптимизации НКК.

Применение LLM значительно повышает масштабируемость, эффективность и адаптивность НКК, открывая новые возможности для поддержки принятия решений и анализа сценариев в различных областях. LLM всё активнее используются для генерации и доработки НКК в самых разных сферах. В работе [206] исследуется автоматическое построение НКК на основе обогащённых текстовых источников, включая обсуждения в Twitter и других онлайн-платформах. Авторы показали, что обогащённые корпуса позволяют улучшить выявление концептов и извлечение отношений, что особенно важно при анализе социальных медиа. Этот подход продемонстрировал способность LLM улавливать общественный дискурс и структурировать его в виде интерпретируемых причинно-следственных карт. Однако были отмечены значительные сложности, связанные с краткостью, неоднозначностью и шумом в соцсетях, что часто приводит к неполным или ложным причинным связям.

В другом исследовании [207] предложены графовые метрики сходства и системы ранжирования в стиле Эло для оценки НКК, сгенерированных LLM.

Несмотря на улучшение согласованности с человеческими оценками после дообучения, авторы отметили трудности точного учёта тонких причинно-следственных семантик. Также был подчёркнут запрос на «мягкие» метрики сходства, способные учитывать частичные и неопределённые совпадения. Дополнительной проблемой оказалась валидация автоматически построенных карт в отсутствии однозначного эталона.

В работе [208] LLM использовались для согласования противоречивых НКК, созданных несколькими экспертами. Подход позволил устранить до 85% выявленных разногласий, что свидетельствует о потенциале LLM для интеграции разнородных точек зрения. Вместе с тем, исследование выявило важное ограничение: модели могут отдавать приоритет консенсусу в ущерб сохранению значимых мнений меньшинства экспертов и контекстных нюансов, что снижает объяснительную ценность итоговых карт.

Все эти исследования подтверждают возможность использования LLM для генерации НКК, одновременно указывая на ряд сохраняющихся проблем — таких как «галлюцинации» нерелевантных концептов и связей, переобучение на лингвистические шаблоны обучающих данных и ограниченная способность учитывать доменно-специфичные ограничения и контекстные нюансы. Кроме того, валидация карт, созданных LLM, остаётся сложной задачей, часто требующей экспертной оценки или использования прокси-метрик, которые не всегда отражают реальную надёжность.

Опираясь на этот предыдущий опыт, в нашем исследовании были применены новые LLM к ранее неизученным задачам и был предложен новый алгоритм автоматического вывода весов связей в НКК. Валидация проводится путём сравнения с картами, созданными экспертами, что даёт структурированную оценку точности и согласованности полученных результатов.

#### **4.4.1. Методы исследования**

После идентификации ключевых концепций экспертами следующим этапом является определение причинно-следственных связей между ними. Этот

процесс задает направленные зависимости и степень влияния между каждой парой выделенных концептов и является затратным по времени. Использование LLM могло бы облегчить эту задачу, анализируя текстовые данные для выявления явных и неявных причинно-следственных связей.

Для повышения точности выявления причинно-следственных связей LLM используются с продуманными структурированными запросами, которые направляют модель на идентификацию таких связей [192]. Одним из ключевых методов является пошаговое рассуждение (Chain-of-Thought, CoT), позволяющее LLM разбивать вывод причинно-следственных связей на последовательные логические этапы, что повышает интерпретируемость и надежность результатов [196]. Для повышения надёжности предсказаний причинно-следственных связей применяется метод self-consistency sampling. Этот подход объединяет несколько ответов, сгенерированных LLM, что снижает разброс результатов [197]. Метод получения взаимовлияний концептов НКК на основе LLM заключается в генерации множества ответов на один и тот же запрос и выборе наиболее часто встречающихся причинных связей, что повышает достоверность выявленных связей. Поэтапный процесс помогает уменьшить ошибки, возникающие при излишне упрощённом извлечении причинно-следственных отношений. Алгоритм разработанного метода показан на Рисунок 24. Все эксперименты проводились на платформе Google Colab [209] с использованием GPU T4 [210]. Для инференса моделей использовалась температура 0 и три различных случайных семени генератора случайных чисел: 123, 345 и 567. Для формирования итогового результата применялся механизм голосования по следующему принципу: если не менее двух из трёх результатов выявляли связь, она включалась в итоговую таблицу. Для существующих связей использовалось медианное значение из полученных результатов.

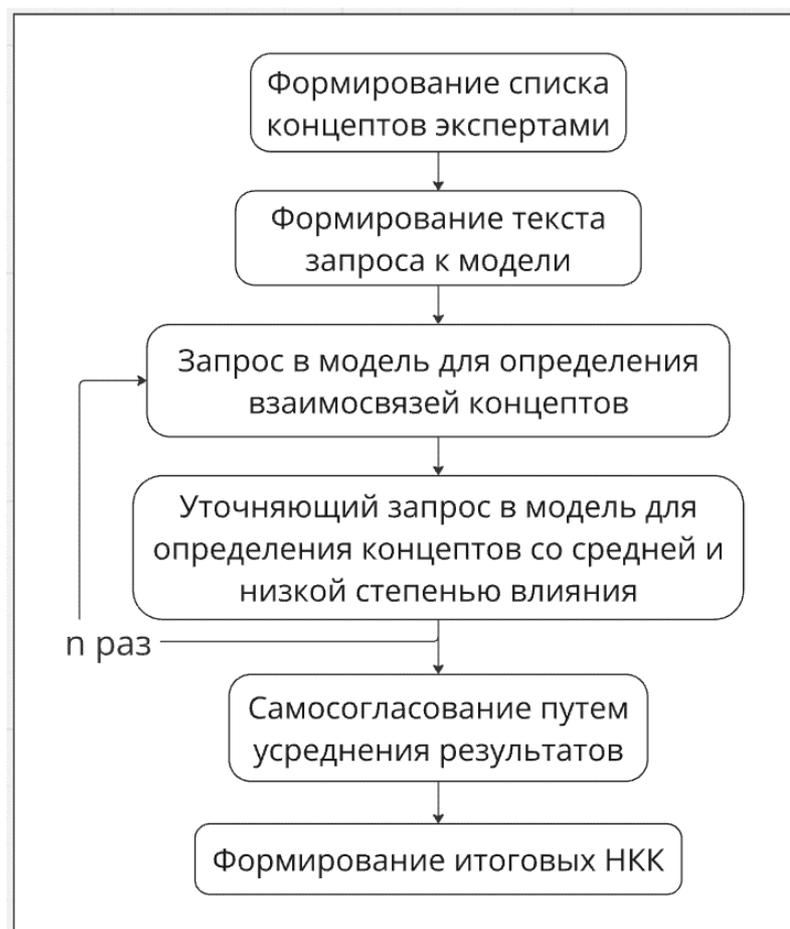


Рисунок 24. Алгоритм определения взаимосвязей концептов в НКК используя LLM

Для выявления причинно-следственных связей между концептами в НКК, был систематически протестирован ряд LLM, включая как проприетарные, так и открытые модели. В тестировании участвовали gpt-4.5, O3, Phi-4:14B, Qwen2.5:14B, LLaMA3:8B, Mistral-small, Gemma3:12B и DeepSeek-R1. Каждой модели предлагалось определить прямые причинные связи между парами концептов на основе описаний на естественном языке. При необходимости названия концептов переводились на английский для обеспечения ясности запросов и согласованности между моделями.

Причина выбора нескольких моделей связана с их различной архитектурой, режимами обучения и специализацией по предметным областям, что может влиять на способность извлекать неявные или специфические для домена причинно-следственные знания. gpt-4.5 и O3 были выбраны за передовые

возможности в области рассуждений, тогда как Phi-4:14B и DeepSeek-R1 — за высокую эффективность в логическом выводе и работе с длинными контекстами. Открытые облегчённые модели, такие как LLaMA3:8B, Mistral-small и Gemma3:12B, использовались для обеспечения воспроизводимости и бенчмаркинга. Сравнивая результаты разных моделей, мы стремились оценить как их индивидуальную, так и относительную эффективность в построении интерпретируемых и точных структур НКК.

Для извлечения причинно-следственных связей из текстов использовался следующий запрос:

```
" Given the following concepts, identify all possible causal relationships between them.
For each identified relationship, determine the direction ( $A \rightarrow B$  or  $B \rightarrow A$ ) and assign a
weight between -1 and 1, representing the strength and polarity of the relationship.
Use Chain-of-Thought reasoning to explain each causal link. You MUST analyse ALL
concept pairs. Include medium and low strength relationships in the analysis.
```

```
Concepts:
{concepts}
```

```
You MUST return ONLY JSON loadable with json.parse().
Provide the output in JSON format with the following structure:
```

```
[{
  "cause": "Caused the influence concept from the list",
  "effect": "Affected concept from the list",
  "weight": "between -1 and 1, the strength and polarity of the relationship"
}]
```

```
Example:
```

```
[{
  "cause": "Concept 1",
  "effect": "Concept 2",
  "weight": "-0.5"
},
{
  "cause": "Concept 1",
  "effect": "Concept 3",
  "weight": "0.1"
}]
... "
```

Перевод:

```
"Даны следующие концепты. Определите все возможные причинно-следственные
связи между ними.
Для каждой найденной связи укажите направление ( $A \rightarrow B$  или  $B \rightarrow A$ ) и присвойте
```

вес от -1 до 1, отражающий силу и полярность влияния.

Обязательно используйте рассуждения в стиле Chain-of-Thought для объяснения каждой связи. Необходимо проанализировать ВСЕ пары концептов, включая связи средней и низкой силы.

Концепты:

```
{concepts}
```

Результат ОБЯЗАТЕЛЬНО должен быть представлен в формате JSON, который можно распарсить через `json.parse()`.

Структура ответа:

```
[  
  {  
    "cause": "Концепт, оказывающий влияние",  
    "effect": "Концепт, на который воздействуют",  
    "weight": "число от -1 до 1, отражающее силу и полярность связи"  
  }  
]
```

Пример ответа:

```
[  
  {  
    "cause": "Концепт 1",  
    "effect": "Концепт 2",  
    "weight": "-0.5"  
  },  
  {  
    "cause": "Концепт 1",  
    "effect": "Концепт 3",  
    "weight": "0.1"  
  }  
]
```

Эксперимент был проведен для НКК предприятия розничной торговли, развития муниципальных образований и НКК характеристик опухолей головного мозга [211]. Эти НКК были выбраны так, чтобы представить разнообразные области применения — экономическую, социально-техническую и медицинскую, каждая из которых обладает уникальной причинно-следственной динамикой и уровнем сложности. НКК розничной торговли моделирует операционные и финансовые процессы принятия решений, что делает её типичным примером для оценки работы LLM в структурированных, ориентированных на бизнес доменах. НКК развития муниципальных образований отражает более широкие социальные и политические взаимодействия, предоставляя возможность проверить способность модели

захватывать абстрактные, высокоуровневые взаимозависимости. НКК характеристик опухолей головного мозга, напротив, относится к области с особо чувствительными и требующими экспертных знаний причинными связями, где критична медицинская точность. Такая разноплановость позволяет всесторонне оценить обобщающую способность и адаптивность LLM в различных доменах с разной структурой данных, терминологией и детализацией концептов. Выявленные причинно-следственные связи были преобразованы в матрицы смежности и сопоставлены с НКК, полученными в результате экспертных опросов, для оценки точности и полноты.

#### 4.4.2. Результаты эксперимента

В Таблица 28 приведены результаты работы восьми LLM в трёх доменах. Оценка проводилась по четырём основным метрикам: количество пропущенных связей, количество правильно предсказанных связей, количество ошибочных связей и правильное определение отсутствия связи между парами. Эти показатели позволяют оценить способность модели выявлять релевантные причинно-следственные связи (чувствительность), отвергать ложные ассоциации (специфичность) и поддерживать баланс между избыточным и недостаточным прогнозированием.

Таблица 28

#### Результаты работы восьми LLM в трёх доменах. МО – муниципальное образование

| Название НКК | Связей в НКК | Модель      | Пропущенные связи | Корректные связи | Не корректные связи | Корректные отсут. связи |
|--------------|--------------|-------------|-------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| Развитие МО  | 85           | phi4:14b    | 59                | 22               | 8                   | 811                     |
| Развитие МО  | 85           | qwen2.5:14b | 65                | 20               | 5                   | 810                     |
| Развитие МО  | 85           | llama3:8b   | 61                | 21               | 17                  | 801                     |

|                       |     |               |     |     |    |      |
|-----------------------|-----|---------------|-----|-----|----|------|
| Развитие<br>МО        | 85  | mistral-small | 50  | 21  | 42 | 787  |
| Развитие<br>МО        | 85  | gemma3:12b    | 53  | 21  | 35 | 791  |
| Развитие<br>МО        | 85  | deepseek-r1   | 59  | 21  | 21 | 799  |
| Развитие<br>МО        | 85  | gpt-4.5       | 43  | 25  | 45 | 787  |
| Развитие<br>МО        | 85  | o3            | 47  | 26  | 30 | 797  |
| Розничная<br>торговля | 403 | phi4:14b      | 285 | 101 | 32 | 1791 |
| Розничная<br>торговля | 403 | qwen2.5:14b   | 294 | 95  | 19 | 1801 |
| Розничная<br>торговля | 403 | llama3:8b     | 288 | 96  | 29 | 1796 |
| Розничная<br>торговля | 403 | mistral-small | 280 | 95  | 43 | 1791 |
| Розничная<br>торговля | 403 | gemma3:12b    | 276 | 101 | 52 | 1780 |
| Розничная<br>торговля | 403 | deepseek-r1   | 290 | 97  | 25 | 1797 |
| Розничная<br>торговля | 403 | gpt-4.5       | 281 | 100 | 36 | 1792 |
| Розничная<br>торговля | 403 | o3            | 286 | 95  | 34 | 1794 |
| Опухоль<br>мозга      | 20  | phi4:14b      | 9   | 3   | 13 | 56   |
| Опухоль<br>мозга      | 20  | qwen2.5:14b   | 13  | 2   | 15 | 51   |
| Опухоль<br>мозга      | 20  | llama3:8b     | 18  | 0   | 9  | 54   |
| Опухоль<br>мозга      | 20  | mistral-small | 7   | 4   | 33 | 37   |

|               |    |             |    |   |    |    |
|---------------|----|-------------|----|---|----|----|
| Опухоль мозга | 20 | gemma3:12b  | 13 | 2 | 14 | 52 |
| Опухоль мозга | 20 | deepseek-r1 | 19 | 0 | 4  | 58 |
| Опухоль мозга | 20 | gpt-4.5     | 3  | 4 | 31 | 43 |
| Опухоль мозга | 20 | o3          | 7  | 4 | 33 | 37 |

Результаты показывают разницу прогнозов моделей LLM среди доменов, что объясняется различной последовательностью в рассуждениях и адаптивностью к разным предметным областям.

gpt-4.5 и o3 стабильно демонстрируют наибольшее число правильных связей во всех доменах, хотя при этом у них выше уровень ложноположительных срабатываний. Это делает их самыми «агрессивными» моделями с упором на полноту (recall) в рамках установленного порога. Они особенно полезны в задачах, где важно уловить все истинные причинно-следственные связи, даже ценой некоторого числа ошибок.

Gemma3:12B показывает хороший баланс между полнотой и точностью, особенно в домене розничной торговли. Mistral-small склонен к избыточному предсказанию связей во всех областях, что может снижать его надёжность.

Таблица 29

**Результаты работы восьми LLM в трёх доменах с порогом 0.5. МО – муниципальное образование**

| Название НКК | Связей в НКК | Модель        | Пропущенные связи | Правильные связи | Неправильные связи |
|--------------|--------------|---------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Развитие МО  | 35           | phi4:14b      | 31                | 2                | 2                  |
| Развитие МО  | 35           | qwen2.5:14b   | 35                | 0                | 0                  |
| Развитие МО  | 35           | llama3:8b     | 32                | 0                | 3                  |
| Развитие МО  | 35           | mistral-small | 24                | 3                | 8                  |
| Развитие МО  | 35           | gemma3:12b    | 27                | 4                | 4                  |

|                    |    |               |    |   |    |
|--------------------|----|---------------|----|---|----|
| Развитие МО        | 35 | deepseek-r1   | 32 | 1 | 2  |
| Развитие МО        | 35 | gpt-4.5       | 17 | 8 | 10 |
| Развитие МО        | 35 | o3            | 21 | 8 | 6  |
| Розничная торговля | 73 | phi4:14b      | 67 | 4 | 2  |
| Розничная торговля | 73 | qwen2.5:14b   | 72 | 1 | 0  |
| Розничная торговля | 73 | llama3:8b     | 72 | 1 | 0  |
| Розничная торговля | 73 | mistral-small | 1  | 4 | 6  |
| Розничная торговля | 73 | gemma3:12b    | 62 | 7 | 4  |
| Розничная торговля | 73 | deepseek-r1   | 71 | 2 | 0  |
| Розничная торговля | 73 | gpt-4.5       | 63 | 7 | 3  |
| Розничная торговля | 73 | o3            | 69 | 3 | 1  |
| Опухоль мозга      | 11 | phi4:14b      | 5  | 3 | 3  |
| Опухоль мозга      | 11 | qwen2.5:14b   | 8  | 2 | 1  |
| Опухоль мозга      | 11 | llama3:8b     | 11 | 0 | 0  |
| Опухоль мозга      | 11 | mistral-small | 4  | 4 | 3  |
| Опухоль мозга      | 11 | gemma3:12b    | 7  | 2 | 2  |
| Опухоль мозга      | 11 | deepseek-r1   | 11 | 0 | 0  |
| Опухоль мозга      | 11 | gpt-4.5       | 1  | 4 | 6  |

|                  |    |    |   |   |   |
|------------------|----|----|---|---|---|
| Опухоль<br>мозга | 11 | o3 | 4 | 4 | 3 |
|------------------|----|----|---|---|---|

В Таблица 29 наблюдается заметное снижение числа правильных предсказаний по сравнению с Таблица 28, что объясняется применением порога по силе связи в 0.5. Такая настройка отсекает слабые влияния и фокусируется только на тех зависимостях, которые существенно влияют на систему. Это особенно важно для реальных приложений НКК, где слабые причинные сигналы могут создавать шум и вводить в заблуждение при принятии решений. Применение порога позволило проверить, насколько LLM способны сохранять точность при выявлении сильных и значимых причинных связей во всех трёх доменах. Для подробного анализа результатов на уровне концептов была выбрана модель gpt-4.5.

### **Развитие муниципального образования**

Для НКК развития муниципального образования лучшими моделями по количеству правильно предсказанных связей стали gpt-4.5 (25 правильных связей) и o3 (26 правильных связей). Однако модель o3 также предсказала 30 ошибочных связей, что отражает компромисс между чувствительностью и точностью. Модель с наименьшим числом ошибочных связей — Qwen2.5:14B (5 ошибок), при этом она предсказала 20 правильных связей, что говорит о консервативном, но точном подходе. В противоположность этому, mistral-small дала наибольшее число ошибочных связей (42), хотя и верно предсказала 21 связь. Phi4:14b показала сбалансированные результаты (22 правильных, 8 ошибочных) и большое количество правильно идентифицированных пар без связи (811), что подчёркивает её осторожный и точный подход к разграничению связей.

Пропуск связей показывают ограниченную чувствительность модели к ключевым макроэкономическим и социальным динамикам. Отсутствующие зависимости:

- Валовой региональный продукт → безработица

- Объём финансирования здравоохранения → социальное напряжение
- Уровень инфляции → уровень спроса и потребления

Ошибочные связи:

- Уровень инфляции → экономическая стабильность
- Валовой региональный продукт → объём промышленного производства
- Политическая стабильность → объём инвестиций

Эти примеры указывают на склонность модели переоценивать значимость некоторых факторов или чрезмерно упрощать сложные многофакторные процессы.

В некоторых случаях модель правильно выявляла связи, но переоценивала их силу. Переоценённые связи:

- Технологический прогресс → эффективность использования ресурсов
- Трудовой потенциал → объём промышленного выпуска
- Объём инвестиций → уровень технологического развития

### **Розничная торговля**

Для НКК розничной торговли — самой большой с 403 связями — модели phi4:14b и gemma3:12b показали максимальное число правильно предсказанных связей (по 101), демонстрируя сильные возможности прогнозирования в более сложных условиях. Однако gemma3:12b также зарегистрировала наибольшее количество ошибочных связей (52), что указывает на тенденцию к избыточному прогнозированию. Модель Qwen2.5:14b выделилась высокой точностью — всего 19 ошибок и рекордным числом правильно идентифицированных пар без связи (1801), хотя при этом число правильных связей было немного меньше (95). Deepseek-r1 показала сбалансированную работу (97 правильных, 25 ошибочных, 1797 правильных без связи), демонстрируя стабильность по всем метрикам.

Подробный анализ выявил, что некоторые причинно-следственные связи были корректно распознаны LLM и совпали с оценками экспертов. Ключевые примеры:

- Технологический уровень оборудования → производительность труда
- Потерянные рабочие часы → производительность труда

- Лояльность сотрудников → текучесть кадров
- Количество обученного персонала → производительность труда
- Инвестиции в развитие → технологический уровень оборудования

Переоценённые связи:

- Репутация компании → уровень лояльности сотрудников
- Арендная плата → все расходы
- Курс валюты → закупочная цена

Это может быть следствием упрощённых или обобщённых предположений, игнорирующих промежуточные факторы. Например, хотя репутация компании влияет на лояльность сотрудников, реальное воздействие может быть более косвенным, так как лояльность сильно зависит от условий труда, дохода и открытости коммуникации.

Ошибочные связи:

- Иностранные инвестиции → инвестиции в развитие
- Кредиторская задолженность → оборотный капитал

Такие ошибки могут быть связаны с недооценкой сложности экономических и организационных процессов.

Отсутствующие связи:

- Технологический уровень оборудования → количество обученного персонала
- Технологический уровень оборудования → качество продукции
- Скорость внедрения технологий → качество продукции
- Интеграция системы с поставщиками → общие расходы
- Ценовой сегмент товаров → стандарты производства
- Качество продукции → репутация компании

Пропуск этих связей может значительно исказить результаты операционного и стратегического планирования компаний.

### **Опухоль головного мозга**

НКК для опухолей головного мозга представляет собой гораздо меньшую

и более чувствительную карту — всего 20 связей, и она оказалась самой сложной для всех моделей. Большинство моделей правильно предсказали лишь несколько связей, а deepseek-r1 был единственной моделью, которая не допустила ошибок пропущенных связей, но при этом не смог предсказать ни одной правильной связи. Это свидетельствует о крайне консервативном поведении — предпочтении минимизировать ложноположительные срабатывания ценой снижения полноты. Напротив, gpt-4.5 и o3 предсказали по четыре правильных связи, но при этом допустили много ошибочных (31–33), что говорит о более агрессивном прогнозировании с меньшей точностью. Интересно, что gpt-4.5 и phi4:14b верно определили 56–58 пар без связи, при этом deepseek-r1 достиг максимума (58), вновь подтверждая осторожный подход модели. Эти результаты подчёркивают возможные ограничения в адаптации моделей к специализированным биомедицинским доменам, особенно при разреженных данных. Из-за низкой точности детальный анализ не проводился.

#### **4.4.3. Выводы по использованию LLM для построения НКК**

Анализ показывает, что большие языковые модели эффективно выявляют многие экономические взаимосвязи, однако им всё ещё сложно учитывать сложные социальные и макроэкономические факторы. Для повышения точности и интерпретируемости причинно-следственного моделирования важно сочетать автоматический анализ с оценкой экспертов.

В целом результаты показывают, что производительность моделей значительно варьируется в разных областях. Более крупные модели, такие как phi4:14b и o3, лучше показывают себя в социально-экономических контекстах, демонстрируя более высокую способность предсказывать зависимости. Однако в высокоспециализированных или слабо представленных данных областях, например, в биомедицине, качество работы снижается. Консервативные модели, такие как Qwen2.5:14B и deepseek-r1, обычно демонстрируют высокую точность, избегая ошибочных связей, тогда как более агрессивные модели, например gemma3:12b, делают упор на полноту предсказаний, часто в ущерб точности.

Для улучшения качества построения НКК с помощью LLM необходимо

учитывать несколько факторов. К ним относятся интеграция экспертной валидации для оценки значимости предсказанных связей, разработка специализированных методов корректировки весов связей — особенно в управленческих и экономических моделях, а также расширение данных для предобучения моделей документами, описывающими соответствующую предметную область, особенно в биомедицинской сфере. Кроме того, требуется более глубокий анализ скрытых зависимостей, чтобы минимизировать пропуски важных концепций и связей.

В итоге, LLM показывают большой потенциал как инструменты для автоматизации анализа сложных систем с помощью НКК. Они могут служить полезной отправной точкой для построения первоначальных причинных структур или выступать в роли дополнительного помощника при экспертной оценке. Тем не менее, для достижения высокой точности и надежности моделирования необходимо интегрировать их с экспертными знаниями и адаптировать методы причинного вывода к особенностям каждой конкретной области.

#### **4.5. Риски использования НКК при управлении бизнес-процессами**

Тот факт, что когнитивные карты способны учесть неточности и неопределенности, делает их пригодными для моделирования сложных систем, где существует множество факторов, которые могут оставаться неизвестными или трудно поддающимися количественной оценке. Важным преимуществом НКК является их относительная легкость в построении и возможность модификации по мере поступления новой информации. Также они обладают гибкостью, так как могут вмещать разнообразные входы и выходы. Важно отметить, что когнитивные карты могут предоставить информацию, которую было бы сложно получить с использованием других видов моделей. Например,

они могут помочь выявить, какие концепты имеют наибольшее значение для определения поведения системы и как эти концепты взаимодействуют друг с другом. В сфере управления бизнес-процессами когнитивные карты активно используются в различных областях, включая анализ рынка, разработку продуктов и улучшение процессов. В каждом из этих случаев когнитивные карты предоставляют ясный и краткий способ представления сложных взаимосвязей между различными факторами.

Однако, несмотря на многочисленные преимущества, существуют риски, связанные с использованием НКК. Можно выделить девять видов бизнес-рисков, связанных с использованием когнитивных карт в управленческом планировании:

1. Финансовые риски, связанные с возможными недостатками в финансовом состоянии компании, могут возникнуть из-за использования НКК для представления как качественных, так и количественных данных. Это может привести к неоптимальным решениям, если слишком много внимания уделяется качественным данным.

2. Операционные риски, связанные с повседневной деятельностью компании, могут возникнуть из-за неправильной интерпретации данных НКК и неправильных решений, принятых на их основе.

3. Риски, связанные с безопасностью, могут возникнуть, если НКК используются для анализа чувствительных данных или при недостаточной защите информации.

4. Риски недостоверности данных, могут возникнуть, если НКК используются на основе неполных, неточных или устаревших данных.

5. Риски сложности интерпретации, могут возникнуть, когда НКК создают сложные модели, которые трудно понимать и объяснить.

6. Операционные риски, связанные с повседневной деятельностью компании, могут возникнуть из-за потребности в экспертных знаниях и ресурсах для разработки и обслуживания НКК. Кроме того, сложность интерпретации НКК может затруднить принятие решений.

7. Стратегические риски, связанные с долгосрочным направлением деятельности компании, включают риски неточного представления реальности, обновления карт, упрощения карт и систематической ошибки интерпретации.

8. Репутационные риски, связанные с репутацией компании, могут возникнуть, если НКК используются неправильно, что может привести к чрезмерной самоуверенности и плохой репутации компании.

9. Правовые риски, связанные с правовой средой, могут возникнуть из-за принятия решений на основе НКК без надежных данных и доказательств, несоответствия интересам компании или акционеров, несоблюдения законов и норм.

Для минимизации рисков разработаны следующие рекомендации для предприятий:

- для минимизации финансовых рисков важно сочетать когнитивные карты с количественными моделями, чтобы сбалансировать влияние качественных данных на процесс принятия решений. Дополнительно стоит внедрить механизмы валидации моделей с помощью независимых экспертов, которые смогут выявить возможные ошибки в оценках.

- чтобы снизить операционные риски, следует внедрить процессы регулярной проверки точности данных, используемых в когнитивных картах, а также организовать обучение сотрудников правильной интерпретации их результатов. Важно наладить обратную связь между пользователями карт и их разработчиками, чтобы оперативно корректировать ошибки и неточности.

- при работе с чувствительными данными необходимо использовать надежные механизмы защиты информации, такие как контроль доступа, шифрование и аудит изменений. Это поможет предотвратить риски, связанные с безопасностью, и защитить конфиденциальные данные от утечек или манипуляций.

- недостоверность данных можно минимизировать за счет регулярного обновления информации и применения автоматизированных инструментов проверки данных. Важно учитывать источник информации и проверять его

надежность перед включением данных в карту.

- для упрощения интерпретации моделей необходимо визуализировать ключевые взаимосвязи и использовать интуитивно понятные способы представления информации. Разработка методических рекомендаций по анализу когнитивных карт поможет сотрудникам более эффективно использовать этот инструмент.

- операционные риски, связанные с необходимостью экспертизы, можно сократить путем привлечения специалистов к этапу разработки карт и упрощения их структуры для удобства использования. Регулярные тренинги и повышение квалификации сотрудников также помогут повысить уровень понимания и интерпретации карт.

- стратегические риски требуют четкого планирования процессов обновления карт, а также механизмов выявления возможных системных ошибок. Важно отслеживать, насколько карта отражает реальное состояние системы, и вносить изменения по мере появления новых данных.

- для предотвращения репутационных рисков необходимо внедрить строгие механизмы верификации карт перед принятием важных управленческих решений. Публичные заявления, основанные на когнитивных картах, должны проходить дополнительную проверку, чтобы избежать чрезмерной самоуверенности и негативных последствий для компании.

- правовые риски можно минимизировать путем консультаций с юридическими специалистами перед внедрением решений, основанных на когнитивных картах. Важно следить за соответствием принятых решений правовым нормам и интересам заинтересованных сторон, а также документировать процесс принятия решений для обеспечения прозрачности.

Несмотря на возможные риски, когнитивные карты могут стать полезным инструментом управления, при условии осторожного применения и понимания их ограничений. Они способны помочь в более глубоком понимании сложных проблем, формулировании гипотез о поведении системы и представлении идей тем, кто принимает решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований можно заключить, что были успешно решены поставленные задачи, и цель исследования была достигнута. Возникающие проблемы, связанные с трудноформализуемостью этапов управления, уникальностью задач и множеством факторов и целей со сложной структурой взаимосвязей, могут быть эффективно преодолены с применением современных когнитивных технологий.

Основная задача лидера производственного процесса заключается в эффективном управлении процессами в своей компетентной области и быстром принятии обоснованных решений. Учитывая многофакторность сферы деятельности, организация четкого управления становится необходимой. Когнитивное моделирование демонстрирует потенциал сокращения времени принятия решения и повышения адекватности принимаемых решений.

Применение современных когнитивных технологий является неотъемлемой частью интеллектуальной поддержки принятия решений при стратегическом планировании сложных нелинейных систем. Результаты проведенных исследований включают в себя следующее:

1. Системное исследование подчеркнуло неэффективность архитектуры стандартных технологических информационных систем для анализа больших объемов взаимосвязанных данных сложных технических систем. Определен класс аналитических задач и соответствующий класс систем поддержки принятия решений, использующих когнитивный анализ.

2. Разработана методика построения когнитивных имитационных моделей на основе нечетких когнитивных карт, описывающих сложные многокритериальные информационные системы интеллектуальной поддержки принятия решений.

3. Предложен подход к построению нечеткой когнитивной карты Силова для интеллектуальной поддержки принятия решений, который учитывает различные операции композиции для повышения адекватности принимаемых решений.

4. Разработаны алгоритмы для решения прямых и обратных задач на основе анализа функций принадлежности в интеллектуальной поддержке принятия решений.

5. Создана программная система «FuzzyM», содержащая нечеткие когнитивные модели, которая применима к разработке, исследованию и мониторингу стратегий управления для решения слабоструктурированных задач выбора в нечетких системах.

7. Предложена методика использования нечетких когнитивных моделей и программной системы для разработки и обоснования решений по управлению предприятием розничной торговли, что сокращает сроки принятия решений и повышает эффективность управления.

8. Описана система формирования стратегий развития города Краснодара с использованием методологии нечетких когнитивных карт. Разработанная модель может быть использована в различных муниципальных образованиях инвариантно от географического положения и позволит проводить многофакторный анализ при принятии социально значимых решений.

9. Разработана нечеткая система, описывающая процесс функционирования электродиализной установки на предприятии очистки воды, которая может быть использована для балансировки стоимости, качества, и скорости очистки воды на предприятии и регулировки параметров процесса в режиме реального времени для повышения прибыли и снижения эксплуатационных расходов.

10. Предложен метод использования современных больших языковых моделей для определения взаимосвязей концептов в НКК, позволяющий значительно сократить время разработки НКК и проводить дополнительную валидацию существующих моделей.

11. Описаны риски использования НКК в реальных системах, которые необходимо учитывать при внедрении таких моделей на предприятия.

Эти результаты открывают значительные перспективы для применения когнитивных моделей в реальной практике, включая возможность

использования разработанных моделей и алгоритмов для повышения эффективности управления реальными предприятиями. Использование данных моделей позволит учитывать динамические изменения внешней среды, что повысит точность и адаптивность управленческих решений. Внедрение этих методов в практическую деятельность способствует оптимизации ресурсов, улучшению стратегического планирования и снижению рисков при принятии решений.

Несмотря на преимущества использования НКК, такие как возможность моделирования сложных систем и учета неопределенностей, также необходимо учитывать высокую вычислительную сложность и необходимость выполнения множества симуляционных циклов. Алгоритмы обучения, зависящие от ошибки, могут усложнить интерпретацию результатов, что может привести к неправильному анализу. Кроме того, сложность настройки параметров НКК и необходимость значительных усилий для корректной реализации могут стать серьезными препятствиями при использовании НКК в практике.

Результаты работы используются для мониторинга, многокритериального анализа, представления, визуализации и принятия решений при разработке ситуационных центров различного назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Леденева, Т.М. О согласовании индивидуальных лингвистических шкал в задаче группового выбора / Т.М. Леденева, Н.А. Каплиева // *Современные проблемы механики и прикладной математики: сборник трудов международной школьно-семинарской конференции, Воронеж, 12–17 сентября 2005 года.* – Воронеж, 2005. – Ч. 2. – С. 11–17. – 0,4 п.л. – Библиогр.: с..
- [2] Силон В.Б. *Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке.* — М.: ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.
- [3] Максимов В.И., Григорян А.К., Корноушенко Е.К. Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем // *Междунар. конф. По проблемам управления.* — Москва, ИПУ РАН, 29 июня — 2 июля 1999 г. — М., 1999. — Т. 2. — С. 58–65.
- [4] Кулинич А.А. Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // *Программные продукты и системы.* — 2002. — № 3. — С. 25–28.
- [5] Гамазов И.Н., Терехов В.И. Анализ задач, возникающих при создании нечетких когнитивных карт // *Проблемы науки.* — 2016. — № 6 (7). — С. 12–17.
- [6] Аверкин А.Н., Ярушев С.А., Павлов В.Ю. Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования. — 2017. — Р. 632–642.
- [7] Ярушев С.А., Аверкин А.Н., Ефремова Н.А. Гибридные нечеткие когнитивные карты в задачах поддержки принятия решений и прогнозирования // *Международный журнал Программные продукты и системы.* — 2017. — Vol. 19.
- [8] Гинис Л.А. Развитие инструментария когнитивного моделирования для исследования сложных систем // *Инженерный вестник Дона.* — 2013. — Vol. 26, No. 3 (26). — Р. 66.
- [9] Оськин А. Ф., Оськин Д. А. Применение нечетких когнитивных карт для моделирования плохоструктурированных систем // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки.* — 2017. — № 4. — С. 15–20.
- [10] Ларичева Е. А., Лагерев Д. Г. Построение и анализ когнитивной модели процесса выбора профессии выпускниками в системе начального-среднего профессионального образования // *Экономическая психология инновационного менеджмента: труды межрегион. науч.-практ., Интернет-конф.* — Брянск: БГТУ, 2008. — С. 47–51.
- [11] Строкова Л. А. Использование нечетких когнитивных карт при разработке расчетных моделей оснований // *Известия Томского политехнического университета, Инжиниринг георесурсов.* — 2009. — Vol. 314, No. 5.
- [12] Мешалкин В. П., Белозерский А. Ю. Методологические основы комплексной системы управления рисками промышленного предприятия // *Транспортное дело России.* — 2011. — No. 2. — Р. 189–191.
- [13] Маригодов В. К. Анализ когнитивной карты системы обучения на основе экспертных оценок // *Вісник СевНТУ. Сер.: Педагогіка.* — 2013. — Вип. 144. — С.

77–80.

- [14] Горелова Г.В., Радченко С.А. Программная система когнитивного моделирования социотехнических систем // Изв. ТРТУ. Тем. вып. «Актуальные проблемы экономики, менеджмента и права». — Таганрог, 2004. — № 4 (39). — С. 218–227.
- [15] Заболотский М.А., Полякова И.А., Тихонин А.В. Применение когнитивного моделирования в управлении качеством подготовки специалистов // Управление большими системами. — 2007. — № 16. — С. 91–98.
- [16] Путято М.М. Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных карт // Диссертация кандидата технических наук: 05.13.01 / Путято Михаил Михайлович, [Место защиты: Кубан. гос. технол. ун-т]. — Краснодар, 2010. — 152 с.: ил. — РГБ ОД, 61 11–5/1597.
- [17] Бычков, Е.Д. Использование моделей когнитивных карт для оценки состояний беспроводной сенсорной сети / Е.Д. Бычков, Д.С. Лузан // Известия Транссиба. — 2020. — № 2 (42), URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-modeley-kognitivnyh-kart-dlya-otsenki-sostoyaniy-besprovodnoy-sensornoj-seti>.
- [18] Abbaspour Onari, M., Rezaee, M.J. A fuzzy cognitive map based on Nash bargaining game for supplier selection problem: a case study on auto parts industry // Operational Research. — 2022. — Vol. 22, № 3. — P. 2133–2171. — July, DOI: 10.1007/s12351-020-00623-y.
- [19] Wang, J., Peng, Z., Wang, X., Li, C., Wu, J. Deep fuzzy cognitive maps for interpretable multivariate time series prediction // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2020. — Vol. PP. — P. 1–1. — DOI: 10.1109/TFUZZ.2020.3005293.
- [20] D'Aniello, G., Falco, M., Gaeta, M., Lepore, M. A situation-aware learning system based on fuzzy cognitive maps to increase learner motivation and engagement // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 19–24 July 2020. — DOI: 10.1109/FUZZ48607.2020.9177590..
- [21] Юрин, А.А., Емельяненко, А.С. Применение нечеткого когнитивного моделирования в рамках парадигмы «цифровой двойник» // Скиф. — 2019. — № 12-2 (40), — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-nechetkogo-kognitivnogo-modelirovaniya-v-ramkah-paradigmy-tsifrovoy-dvoynik> (дата обращения: 20.05.2025).
- [22] Nápoles, G., Jastrzębska, A., Mosquera, C., Vanhoof, K., Homenda, W. Deterministic learning of hybrid fuzzy cognitive maps and network reduction approaches // Neural Networks. — 2020. — Vol. 124. — P. 258–268. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020>.
- [23] Vanhoenshoven, F., Nápoles, G., Bielen, S., Vanhoof, K. Fuzzy cognitive maps employing ARIMA components for time series forecasting // In: Czarnowski, I., Howlett, R.J., Jain, L.C. (eds.) Intelligent Decision Technologies 2017, — Cham: Springer International Publishing, 2018. — P. 255–264.
- [24] Papakostas, G., Boutalis, Y., Koulouriotis, D., Mertzios, B. Fuzzy cognitive maps for pattern recognition applications // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. — 2008. — Vol. 22. — P. 1461–1486.
- [25] Петухова, А.В., Коваленко, А.В. Методы прогнозирования развития сложных систем с применением теории нечетких когнитивных карт // IV Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных. — Краснодар, 2022.

- [26] Петухова А.В., Коваленко А.В., Овсянникова А.В. Риски использования нечетких когнитивных карт при управлении бизнес-процессами // Современная математика и концепции инновационного математического образования. — 2022. — № 1. — С. 171–177.
- [27] Петухова, А.В. Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечётких когнитивных карт: дис. канд. техн. наук / науч. рук. А.В. Коваленко. – Ростов-на-Дону, 2024, – 2.3.4 Управление в организационных системах. – ЮФУ, диссертационный совет ЮФУ801.02.01. – Дата защиты: 23.04.2024.
- [28] Петухова, А. В. Системы поддержки принятия решений на основе интеллектуальных технологий. Архитектура, проектирование и использование СППР в различных областях. / Петухова А. В., А. В. Коваленко // Прикладная математика и вопросы управления, Applied Mathematics and Control Sciences. – 2025. – № 1. – С. 47–58. – DOI 10.15593/2499-9873/2025.1.04.
- [29] Petukhova A., Carvalho J. P., Fachada N. Text clustering with large language model embeddings // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. — 2025. — Vol. 6. — P. 100–108. — DOI: 10.1016/j.ijcce.2024.11.004.
- [30] Petukhova A.V., Kovalenko A.V., Ovsyannikova A.V. Algorithm for Optimization of Inverse Problem Modeling in Fuzzy Cognitive Maps // Mathematics. — 2022. — Vol. 10, No. 19. — P. 3452. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10193452>.
- [31] Petukhova A.V., Fachada N. Retail System Scenario Modeling Using Fuzzy Cognitive Maps // Information. — 2022. — Vol. 13. — № 5. — P. 251. — DOI: <https://doi.org/10.3390/info13050251>.
- [32] Петухова, А. В. Решение обратной задачи моделирования для предприятия розничной торговли с использованием теории нечётких когнитивных карт// Инженерный вестник Дона. – 2023. – №.3. – <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8262>.
- [33] Петухова, А.В., Коваленко, А.В., Шарпан, М.В. Использование нечетких когнитивных карт для решения задачи развития муниципальных образований // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 2(110). – С. 238–262, URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9037>.
- [34] Петухова А.В., Коваленко А.В. Методы прогнозирования развития сложных систем с применением теории нечётких когнитивных карт // Информатика. — 2022. — Т. 1, № 1. — С. 81–95.
- [35] Петухова А. В., Коваленко А. В., Теунаев Д.М. Обзор динамических свойств и алгоритмов обучения нечетких когнитивных карт // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2021. — № 167. — С. 43–74.
- [36] Петухова А.В., Кармазин В.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615414 17.05.2018 / Программа моделирования социально-экономических процессов на основе нечётких когнитивных карт «FuzzyM».
- [37] Петухова А.В., Коваленко А.В. Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2020616550 29.06.2020 / Модуль поддержки принятия решений к программе моделирования социально-экономических процессов «FuzzyM».

- [38] Soori, M., Ghaleh Jough, F. K., Dastres, R., Arezoo, B. AI-Based Decision Support Systems in Industry 4.0: A Review // *Journal of Economy and Technology*. – 2024. – ISSN 2949-9488. – DOI: 10.1016/j.ject.2024.08.005.
- [39] Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., Martínez, N. L. Decision support systems for Agriculture 4.0: Survey and challenges // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2020. – Т. 170. – №105256. – ISSN 0168-1699. – DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
- [40] Ocasio, W., Joseph, J. Rise and Fall – or Transformation? The Evolution of Strategic Planning at the General Electric Company, 1940–2006 // *Long Range Planning*. – 2008. – Т. 41. – С. 248–272. – DOI: 10.1016/j.lrp.2008.02.010.
- [41] Sutton, R. T., Pincock, D., Baumgart, D. C., Sadowski, D. C., Fedorak, R. N., Kroeker, K. I. An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success // *NPJ Digital Medicine*. – 2020. – Т. 3. – №17. – DOI: 10.1038/s4174.
- [42] Humphreys, P., Jones, G. The Evolution Of Group Decision Support Systems To Enable Collaborative Authoring Of Outcomes // *World Futures*. – 2006. – Т. 62. – DOI: 10.1080/02604020500509546.
- [43] McBride, N. The Rise and Fall of an Executive Information System: A Case Study // *Information Systems Journal*. – 1997.
- [44] Chen, Y., Argentinis, J. E., Weber, G. IBM Watson: How Cognitive Computing Can Be Applied to Big Data Challenges in Life Sciences Research // *Clinical Therapeutics*. – 2016. – Т. 38. – №4. – С. 688–701. – ISSN 0149-2918. – DOI: 10.1016/j.clinthera.2015.12.
- [45] Zopounidis, C., Doumpos, M., Niklis, D. Financial decision support: an overview of developments and recent trends // *EURO Journal on Decision Processes*. – 2018. – Т. 6. – №1–2. – С. 63–76. – ISSN 2193-9438. – DOI: 10.1007/s40070-018-0078-3.
- [46] Turban, E., Aronson, J. E. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. – Prentice Hall, 1998.
- [47] Power, D. J. *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers* // Greenwood/Quorum Books. – Westport, CT. – 2002.
- [48] Little, J. D. C. Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus // *Management Science*. – 1970. – Vol. 16. – №8. – P. 466–485. – April.
- [49] Zaraté, P., Soubie, J. L. An Overview of Supports for Collective Decision Making // *Journal of Decision Systems*. – 2004. – Т. 13. – №2. – С. 211–221. – DOI: 10.3166/jds.13.211-221.
- [50] O'Brien, J. A., Marakas, G. M. *Management Information Systems*. – McGraw-Hill Education, 2005. – ISBN 978-0-07-111629-9, ISBN 0-07-111629-X.
- [51] Hauser, J. R., Clausing, D. The House of Quality // *Harvard Business Review*. – 1988. – Т. 66. – №3. – С. 63–73.
- [52] Kapucu, N., Garayev, V. Collaborative Decision-Making in Emergency and Disaster Management // *International Journal of Public Administration*. – 2011. – Т. 34. – С. 366–375. – DOI: 10.1080/01900692.2011.561477.

- [53] Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., Ram, S. Design science in information systems research // MIS Quarterly. – 2004. – Т. 28. – №1. – С. 75–105. – DOI: 10.2307/25148625.
- [54] Liu, S., Duffy, A. H. B., Whitfield, R. I., и др. Integration of decision support systems to improve decision support performance // Knowledge and Information Systems. – 2010. – Т. 22. – С. 261–286. – DOI: 10.1007/s10115-009-0192-4.
- [55] Turban, E., Sharda, R., Delen, D. Decision Support and Business Intelligence Systems. – Pearson, 2011. – URL: <https://books.google.kz/books?id=T7WHQgAACAAJ>.
- [56] Marakas, G. M. Decision Support Systems in the 21st Century. – Pearson Education, 2003.
- [57] Provost, F., Fawcett, T. Data Science for Business: What You Need to Know about Data Mining and Data-Analytic Thinking. – O'Reilly Media, 2013.
- [58] Arnott, D., Pervan, G. A critical analysis of decision support systems research // Journal of Information Technology. – 2005. – Т. 20. – №2. – С. 67–87. – DOI: 10.1057/palgrave.jit.2000035.
- [59] Sprague R.H., Carlson E.D. Building Effective Decision Support Systems. — Prentice Hall, 1982.
- [60] Davenport, T. H., Harris, J. G. Competing on Analytics: The New Science of Winning. – Harvard Business Review Press, 2007.
- [61] Hasan, M., Islam, M., Islam, M., Chen, D., Sanin, C., Xu, G. Applications of Artificial Intelligence for Health Informatics: A Systematic Review // Journal of Artificial Intelligence for Medical Sciences. – 2023. – Т. 00. – №00. – DOI: 10.55578/joaims.230.
- [62] Wasylewicz, A. T. M., Scheepers-Hoeks, A. M. J. W. Clinical Decision Support Systems // B: Kubben, P., Dumontier, M., Dekker, A. (ред.) Fundamentals of Clinical Data Science. – Cham (CH): Springer, 2019. – Гл. 11. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books>.
- [63] Minhas, M. R., Potdar, V. Decision Support Systems in Construction: A Bibliometric Analysis // Buildings. – 2020. – Т. 10. – №108. – DOI: 10.3390/buildings10060108.
- [64] Kosko, B. Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Т. 24. – №1. – С. 65–75. – DOI: 10.1016/S0020-7373(86)80040-2.
- [65] Salmeron, J. Supporting decision makers with fuzzy cognitive maps: These extensions of cognitive maps can process uncertainty and hence improve decision making in R&D applications // Research Technology Management. – 2009. – Т. 52. – С. 53–59.
- [66] Alexander, D. Cognitive Mapping as an Emergency Management Training Exercise // Journal of Contingencies and Crisis Management. – 2005. – Т. 12. – DOI: 10.1111/j.0966-0879.2004.00445.x.
- [67] Ketipi, M., Karakasis, E., Koulouriotis, D., Emiris, D. Multi-Criteria Decision Making using Fuzzy Cognitive Maps – Preliminary Results // Procedia Manufacturing. – 2020. – Т. 51. – С. 1305–1310. – DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.182.
- [68] Chen, H., Cheng, S., Qin, Y., Xu, W., Liu, Y. Sustainability evaluation of urban large-scale infrastructure construction based on dynamic fuzzy cognitive map // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Т. 449. – №141774. – ISSN 0959-6526, . – DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141774.
- [69] Nunes, S. A. S., Ferreira, F. A. F., Govindan, K., Pereira, L. F. “Cities go smart!”: A system

- dynamics-based approach to smart city conceptualization // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – T. 313. – №127683. – ISSN 0959-6526, – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127683.
- [70] Lombardi, P., Ferretti, V. New spatial decision support systems for sustainable urban and regional development // *Smart and Sustainable Built Environment*. – 2015. – T. 4. – №1. – C. 45–66. – DOI: 10.1108/SASBE-07-2014-0039.
- [71] Axelrod R. *The structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites*. — Princeton University Press, 1976. — 321 c.
- [72] Stylios C.D., Groumpos P.P. Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps // *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. A Syst. Hum.* — 2004. — Vol. 34. — № 1. — P. 155–162.
- [73] Papageorgiou E.I. A new methodology for decisions in medical informatics using fuzzy cognitive maps based on fuzzy rule-extraction techniques // *Appl. Soft Comput.* — 2011.
- [74] Papakostas G.A., Koulouriotis D.E. Classifying patterns using fuzzy cognitive maps // In: M. Glykas (ed.) *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications*. — Springer Berlin Heidelberg, 2010. — P. 291–306.
- [75] Papakostas G.A., Koulouriotis D.E., Polydoros A.S., Tourassis V.D. Towards Hebbian learning of fuzzy cognitive maps in pattern classification problems // *Expert Syst. Appl.* — 2012. — Vol. 39. — № 12. — P. 10620–10629.
- [76] Napoles G., Papageorgiou E., Bello R., Vanhoof K. Learning and convergence of fuzzy cognitive maps used in pattern recognition // *Neural Process Lett.* — 2017. — Vol. 45. — P. 431–444.
- [77] Napoles G., Papageorgiou E., Bello R., Vanhoof K. On the convergence of sigmoid fuzzy cognitive maps // *Inf. Sci.* — 2016. — Vol. 349–350. — P. 154–171.
- [78] Napoles G., Concepcion L., Falcon R., Bello R., Vanhoof K. On the accuracy-convergence trade-off in sigmoid fuzzy cognitive maps // *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* — 2017. — (submitted).
- [79] Kottas T., Boutalis Y., Christodoulou M. Bi-linear adaptive estimation of fuzzy cognitive networks // *Appl. Soft Comput.* — 2012. — Vol. 12. — № 12. — P. 3736–3756.
- [80] Knight C.J., Lloyd D.J., Penn A.S. Linear and sigmoidal fuzzy cognitive maps: an analysis of fixed points // *Appl. Soft Comput.* — 2014. — Vol. 15. — P. 193–202.
- [81] Napoles G., Bello R., Vanhoof K. Learning stability features on sigmoid fuzzy cognitive maps through a swarm intelligence approach // Springer, Berlin, 2013.
- [82] Napoles G., Bello R., Vanhoof K. How to improve the convergence on sigmoid fuzzy cognitive maps? // *Intell. Data Anal.* — 2014. — Vol. 18. — № 6S. — P. S77–S88.
- [83] Tsadiras A.K. Comparing the inference capabilities of binary, trivalent and sigmoid fuzzy cognitive maps // *Inf. Sci.* — 2008. — Vol. 178. — № 20. — P. 3880–3894.
- [84] Boutalis Y., Kottas T.L., Christodoulou M. Adaptive estimation of fuzzy cognitive maps with proven stability and parameter convergence // *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* — 2009. — Vol. 17. — № 4. — P. 874–889.
- [85] Papageorgiou E.I. Learning algorithms for fuzzy cognitive maps — a review study // *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. C (Applications and Reviews)*. — 2012. — Vol. 42. — № 2. — P. 150–163.

- [86] Dickerson J.A., Kosko B. Virtual worlds as fuzzy cognitive maps // *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. — 1994. — Vol. 3. — № 2. — P. 173–189.
- [87] Huerga A.V. A balanced differential learning algorithm in fuzzy cognitive maps // In: *Proceedings of the 16th international workshop on qualitative reasoning*. — 2002.
- [88] Papageorgiou E.I., Stylios C., Groumpos P.P. Unsupervised learning techniques for fine-tuning fuzzy cognitive map causal links // *Int. J. Hum. Comput. Stud.* — 2006. — Vol. 64. — № 8. — P. 727–743.
- [89] Li S.J., Shen R.M. Fuzzy cognitive map learning based on improved nonlinear Hebbian rule // In: *Proceedings of the 2004 international conference on machine learning and cybernetics*. — Vol. 4. — IEEE, 2004. — P. 2301–2306.
- [90] Stach W., Kurgan L., Pedrycz W. Data-driven nonlinear Hebbian learning method for fuzzy cognitive maps // In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. — IEEE, 2008. — P. 1975–1981.
- [91] Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложением к социальным, биологическим и экологическим задачам. — М.: Наука, 1986.
- [92] Коростелев Д.А., Лагереv Д.Г., Подвесовский А.Г. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГ-ЛА» // *Один-я нац. конф. по иск. интеллекту с межд. участием КИИ—2008*, г. Дубна, 28 сен. — 3 окт. 2008 г. — М., 2008. — Т. 3. — С. 327–329.
- [93] Koulouriotis D., Diakoulakis I., Emiris D. Learning fuzzy cognitive maps using evolution strategies: a novel schema for modeling and simulating high-level behavior // In: *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation*. — Vol. 1. — IEEE, 2001. — P. 364–371.
- [94] Parsopoulos K.E., Papageorgiou E.I., Groumpos P., Vrahatis M.N. A first study of fuzzy cognitive maps learning using particle swarm optimization // In: *Proceedings of the 2003 congress on evolutionary computation*. — Vol. 2. — IEEE, 2003. — P. 1440–1447.
- [95] Papageorgiou E.I., Froelich W. Multi-step prediction of pulmonary infection with the use of evolutionary fuzzy cognitive maps // *Neurocomputing*. — 2012. — Vol. 92. — P. 28–35.
- [96] Stach W., Kurgan L., Pedrycz W., Reformat M. Genetic learning of fuzzy cognitive maps // *Fuzzy Sets Syst.* — 2005. — Vol. 153. — № 3. — P. 371–401.
- [97] Stach W., Kurgan L., Pedrycz W. Parallel learning of large fuzzy cognitive maps // In: *International joint conference on neural networks*. — IEEE, 2007. — P. 1584–1589.
- [98] Stach W., Kurgan L., Pedrycz W. A divide and conquer method for learning large fuzzy cognitive maps // *Fuzzy Sets Syst.* — 2010. — Vol. 161. — № 19. — P. 2515–2532.
- [99] Chen Y., Mazlack L., Lu L. Learning fuzzy cognitive maps from data by ant colony optimization // In: *Proceedings of the 14th annual conference on genetic and evolutionary computation*. — ACM, 2012. — P. 9–16.
- [100] Chen Y., Mazlack L.J., Minai A.A., Lu L.J. Inferring causal networks using fuzzy cognitive maps and evolutionary algorithms with application to gene regulatory network reconstruction // *Appl Soft Comput.* — 2015. — Vol. 37. — P. 667–679.
- [101] Chen Y., Mazlack L.J., Lu L.J. Inferring fuzzy cognitive map models for gene regulatory networks from gene expression data // In: *Proceedings of the 2012 IEEE international*

- conference on bioinformatics and biomedicine (BIBM). — IEEE, 2012. — P. 1–4.
- [102] Holland J. H. Complex Adaptive Systems. Daedalus, A new era in computation // Daedalus. — 1992. — Vol. 121. — P. 17–30.
- [103] Saaty T.L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process // Management science. — 1986. — Vol. 32, No. 7. — P. 841–855.
- [104] Bobillo F., Straccia U. A Fuzzy Description Logic with Product T-norm // In: Proceedings of the IEEE International Fuzzy Systems Conference. — 2007. — P. 1–6. — DOI: 10.1109/FUZZY.2007.4295443.
- [105] Galindo J. Introduction and Trends to Fuzzy Logic and Fuzzy Databases // In: Handbook of Research on Fuzzy Information Processing in Databases / J. Galindo (Ed.), IGI Global, 2008. — P. 1-33. <https://doi.org/10.4018/978-1-59904-853-6.ch001>.
- [106] Garrido A. Triangular Norms, Triangular Conorms, and Some Related Concepts // Brain. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience. — 2011. — Vol. 2.
- [107] Пылькин А.Н., Крошилин А.В., Крошилина С.В. Методология когнитивного анализа в вопросах автоматизации управления материальными потоками // Информатика и Системы управления. — 2012.
- [108] Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. — М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009. — 798 с.
- [109] Замятин Н.В. Нечеткая логика и нейронные сети: учеб. пособие / Н.В. Замятин ; Томский. гос. ун-т АСУ и радиоэл-ки. — Томск: Изд-во. Томск. гос. ун-та АСУ и радиоэл-ки, 2014. — 203 с. — ISBN 978-5-9984-0055-1.
- [110] Pfeiffer B.M. Workshop «Fuzzy Control» // Automatisierungstechnik. — 1996. — Vol. 44, No. 3. — P. 141–142.
- [111] Kahlert J. Fuzzy Control für Ingenieure. — Braunschweig, Germany: Vieweg Verlag, 1995.
- [112] Knappe H. Nichtlineare Regelungstechnik und Fuzzy-Control. — Renningen-Malmsheim, Germany: Expert Verlag, 1994.
- [113] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. An introduction to fuzzy control. — Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [114] Yager R., Filev D. Essentials of fuzzy modeling and control. — New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [115] Yager R., Filev D. Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. — Warszawa, Poland: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1995.
- [116] Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. — 1965. — Vol. 8. — P. 338–353.
- [117] Ghodousian, Amin & Zal, Sara. (2022). Comparison of solutions resulted from direct problems formulated as FRE. 10.48550/arXiv.2207.12183.
- [118] Ahmad, Khurshid & Mesiarova, Andrea. (2007). Choosing t-Norms and t-Conorms for Fuzzy Controllers. Proceedings - Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2007. 2. 641 - 646. 10.1109/FSKD.2007.216.
- [119] Nobuhara, H., Pedrycz, W., Hirota, K. Relational image compression: Optimizations through the design of fuzzy coders and YUV color space // Soft Computing. – 2005. – Vol. 9. – P. 471–479. – DOI: 10.1007/s00500-004-0366-7.

- [120] Cox E.D. Fuzzy Logic for Business and Industry. — Charles River Media, Inc.: Newton, MA, USA, 1995.
- [121] Peeva K., Kyosev Y. Fuzzy relational calculus - theory, applications, and software (with CD-ROM) // Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory. — Vol. 22, World Scientific Publishing Company, 2004.
- [122] Peeva K. Universal algorithm for solving fuzzy relational equations // Italian Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2006. — Vol. 19. — P. 9–20.
- [123] De Baets B. Analytical solution methods for fuzzy relational equations // In: Dubois D., Prade H. (Eds.), Fundamentals of Fuzzy Sets, The Handbooks of Fuzzy Sets Series, vol. 1. — Kluwer Academic Publishers, 2000. — P. 291–340.
- [124] Di Nola A., Lettieri I., Perfilieva I., Novak V. Algebraic analysis of fuzzy systems // Fuzzy Sets and Systems. — 2007. — Vol. 158. — № 1. — P. 1–22.
- [125] Di Nola W., Pedrycz S., Sessa S., Sanchez E. Fuzzy Relation Equations and Their Application to Knowledge Engineering. — Kluwer Academic Press, Dordrecht/Boston/London, 1989.
- [126] Li P., Fang S.-C. A survey on fuzzy relational equations. Part I: Classification and solvability // Fuzzy Optimization and Decision Making. — 2009. — Vol. 8. — P. 179–229.
- [127] Pappis C.P., Sugeno M. Fuzzy relational equations and the inverse problem // Fuzzy Sets and Systems. — 1985. — Vol. 15. — P. 79–90.
- [128] Miyakoshi M., Shimbo M. Lower solutions of systems of fuzzy equations // Fuzzy Sets and Systems. — 1986. — Vol. 19. — P. 37–46.
- [129] Yeh On the minimal solutions of maxmin fuzzy relational equations // Fuzzy Sets and Systems. — 2008. — Vol. 159. — P. 23–39.
- [130] Wu Y.-K., Guu S.-M. An efficient procedure for solving a fuzzy relational equation with max-Archimedean t-norm composition // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2008. — Vol. 16, No. 1. — P. 73–84.
- [131] Lin J.-L. On the relation between fuzzy max-Archimedean t-norm relational equations and the covering problem // Fuzzy Sets and Systems. — 2009. — Vol. 160, No. 16. — P. 2328–2344.
- [132] Lin J.-L., Wu Y.-K., Guu S.-M. On fuzzy relational equations and the covering problem // Information Sciences. — 2011.
- [133] Higashi M., Klir G.J. Resolution of finite fuzzy relation equations // Fuzzy Sets and Systems. — 1984. — Vol. 13, No. 1. — P. 65–82.
- [134] Chen L., Wang P. Fuzzy relational equations (I): the general and specialized solving algorithms // Soft Computing. — 2002. — Vol. 6. — P. 428–435.
- [135] Peeva K. Fuzzy linear systems // Fuzzy Sets and Systems. — 1992. — Vol. 49. — P. 339–355.
- [136] Mohr S. Software design for a fuzzy cognitive map modeling tool. — Tessellar Polytechnic Institute, Troy, 1997.
- [137] Aguilar, J., Contreras, J. The FCM designer tool // Studies in Fuzziness and Soft Computing. — 2010.

- [138] Gray S., Gray S., Cox L.J., Henly-Shepard S. Mental Modeler: A Fuzzy-Logic Cognitive Mapping Modeling Tool for Adaptive Environmental Management // 46th Hawaii International Conference on System Sciences. — 2013. — P. 965–973.
- [139] Franciscis, D. JFCM: A Java library for fuzzy cognitive maps // Intelligent Systems Reference Library. — 2014. — Vol. 54. — P. 199–220.
- [140] Poczeta K., Yastrebov A., Papageorgiou E. Learning Fuzzy Cognitive Maps using Structure Optimization Genetic Algorithm // Federated Conference on Computer Science and Information Systems. — 2015. — P. 547–554. — DOI: 10.15439/2015F296.
- [141] Papageorgiou E., Poczeta K., Laspidou Ch. Hybrid Model for Water Demand Prediction based on Fuzzy Cognitive Maps and Artificial Neural Networks // 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ).
- [142] Hagan M.T., Menhaj M.B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm // IEEE Transactions on Neural Networks. — 1994. — Vol. 5. — № 6. — P. 989–993.
- [143] Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. — 2nd ed. — Prentice Hall PTR, USA, 1998.
- [144] León M., Nápoles G., Rodriguez C., Lorenzo M., Bello R., Vanhoof K. A Fuzzy Cognitive Maps Modeling, Learning and Simulation Framework for Studying Complex System // IWINAC. — 2011.
- [145] Napoles G., Espinosa M.L., Grau I., Vanhoof K. FCM Expert: Software Tool for Scenario Analysis and Pattern Classification Based on Fuzzy Cognitive Maps // International Journal on Artificial Intelligence Tools, — 2018. — International Journal on Artificial Intelligence Tools.
- [146] Napoles G., Grau I., Bello R., Grau R. Two-steps Learning of Fuzzy Cognitive Maps for Prediction and Knowledge Discovery on the HIV-1 Drug Resistance // Expert System with Applications. — 2014. — Vol. 41. — P. 821–830.
- [147] Кулинич А.А., Максимов В.И. Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» // Сб. докл. «Современные технологии управления». Науч.-практ. семинар, «Современные технологии управления». Науч.-практ. семинар «Современные технологии управления для администрации городов и регионов». — М., 1998. — С. 115–123.
- [148] Авдеева З.К., Максимов В.И., Рабинович В.М. Интегрированная система «КУРС» для когнитивного управления развитием ситуаций // Тр. ИПУ РАН. — М., 2001. — Т. XIV. — С. 89–114.
- [149] Christopher W. Johnson, “What are emergent properties and how do they affect the engineering of complex systems?” Reliability Engineering and System Safety Vol. 91, p. 1475-1481, 2006.
- [150] Watson H.J. Computer Simulation in Business. — John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [151] Naylor T.H. Corporate Planning Models. — Addison-Wesley, 1979.
- [152] Buyukozkan G., Vardaloglu Z. Analyzing of CPFR success factors using fuzzy cognitive maps in retail industry // Expert Systems with Applications. — 2012. — Vol. 39. — P. 10438–10455.
- [153] Camillus J.C. Strategy as a wicked problem // Harvard Business Review. — 2008. — Vol. 86. — P. 98.

- [154] Santoro G., Fiano F., Bertoldi B., Ciampi F. Big data for business management in the retail industry // *Management Decision*. — 2018. — Vol. 57. — № 8. — P. 2052–2068.
- [155] Novixoxo J.D. et al. The influence of price on customer loyalty in the retail industry // *Scholars Middle East Publishers*. — 2018. — Vol. 4, № 11. — P. 860–873.
- [156] Tian-Foreman W. Job satisfaction and turnover in the Chinese retail industry // *Chinese Management Studies*. — 2009. — Vol. 3. — P. 356–378. — DOI: 10.1108/17506140911007503.
- [157] Cârstea G., Corbos R.-A., Popescu R., Bunea O.-I. Analysis of the influence of some indicators on the profitability of the FMCG retail market in Romania // *Journal of Business Research*. — 2017. — Vol. 15. — P. 312–325.
- [158] Pritchard M., Silvestro R. Applying the service profit chain to analyse retail performance: The case of the managerial strait-jacket? // *International Journal of Service Industry Management*. — 2005. — Vol. 16. — № 4, — P. 337–356. — DOI: 10.1108/09564230510613997.
- [159] Silvestro R., Cross S. Applying the service profit chain in a retail environment: Challenging the “satisfaction mirror” // *International Journal of Service Industry Management*. — 2000. — Vol. 11. — P. 244–268. — DOI: 10.1108/09564230010340760.
- [160] Economic and Social Development. 23rd International Scientific Conference on Economic and Social Development, Madrid, 15-16 September 2017. — P. 331–342.
- [161] Gawlik D. New York Stock Exchange S&P 500 companies historical prices with fundamental data. — 2017. — URL: <https://www.kaggle.com/dgawlik/nyse>.
- [162] Blumin S.L., Shuikova I.A., Saraev P.V., Cherpakov I.V. Fuzzy logic: algebraic foundations and applications: monograph. — Lipetsk: LEGI, 2002. — 111 c.
- [163] Klir G.J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. — Prentice Hall, 1995.
- [164] Smarandache F., Kandasamy W. Fuzzy Relational Maps and Neutrosophic Relational Maps. — 2014. — DOI: 10.6084/M9.FIGSHARE.1015555.
- [165] Rodrigues C., Lima S.R., Álvarez Sabucedo L.M., Carvalho P. An ontology for managing network services quality // *Expert Systems with Applications*. — 2012. — Vol. 39. — № 9. — P. 7938–7946. — DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.106.
- [166] Glykas M. Fuzzy cognitive maps. Advances in theory, methodologies, tools and applications. — 2010. — DOI: 10.1007/978-3-642-03220-2.
- [167] Assunção E.R.G.T.R., Ferreira F.A.F., Meidutė-Kavaliauskienė I., Zopounidis C., Pereira L.F., Correia R.J.C. Rethinking urban sustainability using fuzzy cognitive mapping and system dynamics // *International Journal of Sustainable Development*. — 2020.
- [168] Papageorgiou K., Ismatullina V.I., Zaleshin M.S., Belova A. Gendernye razlichiya v kognitivnyh sposobnostyah rol stereotipa i ehffekt siblinga [Gender differences in cognitive abilities: The role of stereotype and «sibling effect»]. — 2021.
- [169] Olazabal M., Pascual U. Use of fuzzy cognitive maps to study urban resilience and transformation // *Environmental Innovation and Societal Transitions*. — 2016. — Vol. 18. — P. 18–40. — DOI: 10.1016/j.eist.2015.06.006.
- [170] Solomonov M.P., Pakhomov A.A., Okhlopkov G.N. Analysis of the Influence of Factors

- on the Gross Regional Product of Russian Regions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 666. — P. 062109, — DOI: 10.1088/1755-1315/666/6/062109.
- [171] Juraschek M., Bucherer M., Schnabel F., Hoffschroer H., Vossen B., Kreuz F., Thiede S., Herrmann Ch. Urban Factories and Their Potential Contribution to the Sustainable Development of Cities // Procedia CIRP. — 2018. — Vol. 69.
- [172] Zhang J.X., Cheng J.W., Philbin S.P., et al. Influencing factors of urban innovation and development: a grounded theory analysis // Environ Dev Sustain. — 2023. — Vol. 25. — P. 2079–2104. — DOI: 10.1007/s10668-022-02151-7.
- [173] Jaya P.E.J., Utama M., Yasa I., Yuliarmi N. Improving competitiveness and well-being through human resources quality, local culture, and product performance // Cogent Business & Management. — 2020. — Vol. 7. — Article 1831247, — DOI: 10.1080/23311975.2020.1831247.
- [174] Coaffee J., Ham P. ‘Security branding’: The role of security in marketing the city, region or state // Place Branding and Public Diplomacy. — 2008. — Vol. 4. — P. 191–195. — DOI: 10.1057/pb.2008.11.
- [175] Xiaobing L., Xinxin S., Kuo G. The Relationship between Urbanization and Consumption Upgrading of Rural Residents under the Sustainable Development: An Empirical Study Based on Mediation Effect and Threshold Effect // Sustainability, — 2023. — Vol. 15. — Article 8426. — DOI: 10.3390/su15148426.
- [176] Liu Y., Lu F., Xian Ch., Ouyang Zh. Urban development and resource endowments shape natural resource utilization efficiency in Chinese cities // Journal of Environmental Sciences. — 2023. — Vol. 126. — P. 806–816. — ISSN: 1001-0742, — DOI: 10.1016/j.jes.2022.12.024.
- [177] Kang W., Changcheng Y. Exploring the association between shrinking cities and the loss of external investment: An intercity network analysis // Cities. 2021. 119. 10.1016/j.cities.2021.103351.
- [178] Fistola R., La Rocca R.A. Driving functions for urban sustainability: The double-edged nature of urban tourism // International Journal of Sustainable Development and Planning. — 2016. — Vol. 12. — № 3. — P. 425–434. — DOI: 10.2495/SDP-V12-N3-425-434/008.
- [179] Lu L., Peng G. Urban and air pollution: A multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends // Scientific Reports. — 2020. — Vol. 10. — Article 74524. — DOI: 10.1038/s41598-020-74524-9.
- [180] Ruut V. How do we assess how happy we are? Tenets, implications and tenability of three theories // Happiness, Economics and Politics. — 2009. — Chapter 3. — Edward Elgar Publishing.
- [181] Soja E.W. Seeking Spatial Justice. — University of Minnesota Press, Oxford Academic, 2010. — DOI: 10.5749/minnesota/9780816666676.001.0001.
- [182] Fainstein S. The just city // International Journal of Urban Sciences. — 2013. — Vol. 18. — P. 1–18. — DOI: 10.1080/12265934.2013.834643.
- [183] Middleton J., Samanani F. Whose city? Which sociality? // Urban Geography. — 2022. — Vol. 43. — P. 1–7. — DOI: 10.1080/02723638.2021.2007665.

- [184] Reed R. The significance of social influences and established housing values // Proceedings of the 7th Annual Pacific Rim Real Estate Society Conference. — 2001. — P. 21–24.
- [185] Antonescu D. Liveable City from an Economic Perspective // Journal for Urban and Landscape Planning (JULP). — 2017. — Vol. 2. — DOI: 10.54508/JULP.02.02.
- [186] Pickett S.T.A., Mcgrath B., Cadenasso M., Felson A. Ecological resilience and resilient cities // Building Research and Information. — 2014. — Vol. 42. — DOI: 10.1080/09613218.2014.850600.
- [187] Papageorgiou, E. I. Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms. – Springer Science & Business Media, 2014. – 261 c. – ISBN 9783642412151.
- [188] OpenAI, Achiam, J., Adler, S., Agarwal, S., Ahmad, L., Ak-kaya, I., et al. (2024). \*GPT-4 Technical Report\*. arXiv preprint <https://arxiv.org/abs/2303.08774>.
- [189] Touvron, H., Lavril, T., Izacard, G., Martinet, X., Lachaux, M.-A., Lacroix, T., ... & Jegou, H. (2023). LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models. arXiv preprint arXiv:2302.13971. <https://arxiv.org/abs/2302.13971>.
- [190] Almazrouei, E., Alobeidli, H., Alshamsi, A., Cappelli, A., Cojocaru, R., Debbah, M., Goffinet, É., Hesslow, D., Launay, J., Malartic, Q., Mazzotta, D., Noune, B., Pannier, B., & Penedo, G. (2023), The Falcon Series of Open Language Models. arXiv preprint arXiv:2311.16867. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2311.16867>.
- [191] Talmor, A., Herzig, J., Lourie, N., & Berant, J. (2020). CommonsenseQA: A question answering challenge targeting commonsense knowledge. Transactions of the Association for Computational Linguistics, 7, 414–428. [https://doi.org/10.1162/tacl\\_a\\_00333](https://doi.org/10.1162/tacl_a_00333).
- [192] Kojima, T., et al. (2022). Large language models are zero-shot reasoners. arXiv preprint arXiv:2205.11916.
- [193] Thoppilan, R., Freitas, D., Hall, J., Shazeer, N., Kulshreshtha, A., Cheng, H.-T., ... & Dean, J. (2022). LaMDA: Language Models for Dialog Applications. arXiv preprint, arXiv:2201.08239. <https://arxiv.org/abs/2201.08239>.
- [194] Lawless, C., Schoeffler, J., Le, L., Rowan, K., Sen, S., St. Hill, C., Suh, J., & Sarrafzadeh, B. (2024). "I Want It That Way": Enabling Interactive Decision Support Using Large Language Models and Constraint Programming. arXiv preprint arXiv:2312.06908.
- [195] Binz, M., & Schulz, E. (2023). Turning large language models into cognitive models. arXiv preprint arXiv:2306.03917. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2306.03917>.
- [196] Wei, J., et al. (2022). Chain of thought prompting elicits reasoning in large language models. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 35, 24824–24837.
- [197] Wang, X. и др. Self-consistency improves chain of thought reasoning in language models // arXiv preprint. – 2023. – URL: <https://arxiv.org/abs/2203.11171>.
- [198] Abdin, M., Aneja, J., Behl, H. и др. Phi-4 Technical Report // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2412.08905. – URL: <https://arxiv.org/abs/2412.08905>. – © 2024 Microsoft. Licensed under CC BY 4.0.
- [199] Hui, B., Yang, J., Cui, Z. и др. Qwen2.5-Coder Technical Report // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2409.12186. – URL: <https://arxiv.org/abs/2409.12186>. – © 2024 Alibaba

Group. All rights reserved.

- [200] Grattafiori, A., Dubey, A., Jauhri, A. и др. The Llama 3 Herd of Models // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2407.21783. – URL: <https://arxiv.org/abs/2407.21783>. – © 2024 Meta. Licensed under CC BY 4.0.
- [201] Jiang, A.Q., Sablayrolles, A., Mensch, A. и др. Mistral 7B // arXiv preprint. – 2023. – arXiv:2310.06825. – URL: <https://arxiv.org/abs/2310.06825>. – © 2023 Mistral AI. Licensed under CC BY 4.0.
- [202] Gemma Team, Mesnard, T., Hardin, C., Dadashi, R. и др. Gemma: Open Models Based on Gemini Research and Technology // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2403.08295. – URL: <https://arxiv.org/abs/2403.08295>. – © 2024 Google DeepMind. All rights reserved.
- [203] DeepSeek-AI, Guo, D., Yang, D., Zhang, H. и др. DeepSeek-R1: Incentivizing Reasoning Capability in LLMs via Reinforcement Learning // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2501.12948. – URL: <https://arxiv.org/abs/2501.12948>. – © 2025 DeepSeek-R1.
- [204] OpenAI. OpenAI GPT-4.5 System Card [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://openai.com/index/gpt-4-5-system-card/> (дата обращения: 06.05.2025). – © 2025 OpenAI. All rights reserved.
- [205] OpenAI. OpenAI o3 and o4-mini System Card [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://openai.com/index/o3-o4-mini-system-card/> (дата обращения: 06.05.2025). – © 2025 OpenAI. All rights reserved.
- [206] Maratea, A., Ciaramella, A., Santillo, M. Fuzzy Cognitive Maps Extraction from Enriched Tweets // 2022 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Padua, Italy. – IEEE Press, 2022. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE55066.2022.9882647.
- [207] Berijanian, M., Dork, S., Singh, K., Millikan, M.R., Riggs, A., Swaminathan, A., Gibbs, S.L., Friedman, S.E., Brugnone, N. Soft Measures for Extracting Causal Collective Intelligence // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2409.18911.
- [208] Schuerkamp, R., Ahlstrom, H., Giabbanelli, P.J. Automatically resolving conflicts between expert systems: An experimental approach using large language models and fuzzy cognitive maps from participatory modeling studies // Knowledge-Based Systems. – 2025, – Vol. 313. – Art. 113151. – DOI: 10.1016/j.knosys.2025.113151. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705125001984>.
- [209] Google. Colaboratory [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://colab.research.google.com> (дата обращения: 06.05.2025).
- [210] NVIDIA. NVIDIA T4 Tensor Core GPU [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tesla-t4/> (дата обращения: 06.05.2025).
- [211] Papageorgiou, E.I., Spyridonos, P.P., Glotsos, D.Th., Stylios, C.D., Ravazoula, P., Nikiforidis, G.N., Groumpos, P.P. Brain tumor characterization using the soft computing technique of fuzzy cognitive maps // Applied Soft Computing. – 2008. – Vol. 8, № 1, – P. 820–828. – DOI: 10.1016/j.asoc.2007.06.006. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156849460700066X>.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1.

| Наименование концепта                       |     | K1   | K2   | K3   | K4   | K5   | K6   | K7   | K8   | K9   | K10  | K11  | K12  | K13  | K14  | K15  | K16  | K17  | K18  | K19  | K20  | K21  | K22  | K23  | K24  |
|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Технологический уровень оборудования        | K1  | 0    | 0,32 | 0,1  | -0,6 | 0,72 | 0,48 | 0,28 | 0,48 | 0,24 | 0    | 0    | 0    | -0,1 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,76 | 0    | 0    | 0,12 |
| Производственные стандарты                  | K2  | 0    | 0    | 0    | -0,7 | 0,68 | 0,32 | 0,32 | 0,12 | 0    | 0    | 0,48 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,68 | 0,4  | 0    | 0,12 |
| Количество обученного персонала             | K3  | 0    | 0    | 0    | -0,4 | 0,4  | 0,48 | 0,16 | 0,44 | 0,52 | 0    | 0    | 0    | -0,1 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,52 | 0,52 | 0    | 0,12 |
| Потери рабочего времени                     | K4  | 0    | 0    |      | 0    | -0,5 | -0,5 | 0    | 0    | -0,4 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,4 | -0,1 | 0    |
| Производительность труда                    | K5  | 0    | 0    | -0,5 | 0    | 0    | 0,64 | 0    | 0    | 0,48 | -0,2 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Скорость внедрения технологий               | K6  | 0,16 | 0,12 | 0,1  | -0,4 | 0,12 | 0    | 0,28 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,2 | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,52 | 0    | 0,4  | 0,4  |
| IT инфраструктура                           | K7  | 0,12 | 0,24 | 0    | -0,5 | 0,6  | 0,4  | 0    | 0,48 | 0,4  | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,6  | 0,12 | 0,48 |
| Условия работы                              | K8  | 0    | 0    | 0    | -0,6 | 0,64 | 0    | 0    | 0    | 0,72 | -0,4 | 0,16 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,64 |
| Уровень лояльности сотрудников              | K9  | 0    | 0    | 0    | -0,4 | 0,56 | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,5 | 0,28 | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,3  | 0    | 0,6  |
| Текучесть кадров                            | K10 | 0    | 0    | -0,6 | 0,64 | -0,6 | -0,5 | 0    | -0,5 | -0,6 | 0    | 0,14 | 0,11 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,4 | 0    | 0    | -0,2 |
| Уровень взаимодействия между департаментами | K11 | 0    | 0    | 0    | -0,6 | 0,56 | 0,56 | 0    | 0,16 | 0,32 | -0,2 | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Открытость коммуникации с сотрудниками      | K12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,4  | 0    | 0    | 0,16 | 0,32 | -0,2 | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,32 |
| Уровень конкуренции на рынке                | K13 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,24 | 0    | 0,16 | -0,3 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Процентная ставка по займам                 | K14 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,2 | 0    | -0,2 | 0,3  | 0,3  | -0,5 | 0    | -0,2 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Кредиторская задолженность                  | K15 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,2 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,3 |
| Банковский кредит                           | K16 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,1 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,16 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень спроса                              | K17 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,44 | 0    | 0    | 0,16 | 0    | 0,48 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень дохода покупателей                  | K18 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,16 | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,36 | -0,1 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Политическая стабильность                   | K19 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,36 | 0    | 0,32 | 0,16 | -0,2 | 0    | 0,32 | 0,16 | -0,3 | 0,16 | 0,16 | 0,48 | 0,64 | 0    | -0,4 | 0    | 0,16 | 0    | 0    |
| Уровень инфляции                            | K20 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,2 | 0,16 | 0    | 0    | 0    | -0,3 | -0,2 | 0    | -0,2 | 0    | 0    | 0    |
| Качество продуктов                          | K21 | 0,16 | 0,16 | 0,2  | 0    | 0    | 0,16 | 0,16 | 0    | 0,48 | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,64 | 0,68 |
| Уровень обслуживания клиентов               | K22 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,71 | 0,76 |

|  |      |       |       |   |       |       |       |       |   |       |       |     |   |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |
|--|------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Уровень лояльность клиентов              | K2 3 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0,3 2 | - 0,2 | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,1 6 |       |
| Репутация компании                       | K2 4 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0,4 8 | - 0,3 | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,4 8 |       |
| Ассортимент товаров                      | K2 5 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     |       |       |
| Наценка на товары                        | K2 6 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0,1 2 | 0,1 2 | 0     | 0     | 0     | 0    | 0,1   | 0     | 0,1 6 | - 0,6 | - 0,2 |
| Ценовой сегмент товаров                  | K2 7 | 0,2 4 | 0,2 4 | 0 | 0     | 0     | 0,3 2 | 0,2 4 | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0,4 8 | 0,3 2 | 0     | 0     |
| Доля товаров собственного производства   | K2 8 | 0,1 6 | 0,4   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0,4 | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,2 4 |       |
| Налоги                                   | K2 9 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| Выручка от продаж                        | K3 0 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0,1 6 | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,4   |       |
| Доход                                    | K3 1 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,4   |       |
| Все расходы                              | K3 2 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0,1 2 | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | - 0,2 |       |
| Основные средства                        | K3 3 | 0,1 6 | 0     | 0 | 0     | 0     | 0,3 2 | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0,1   | 0     | 0     | 0     |       |
| Аренда                                   | K3 4 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| Расходы на рекламу                       | K3 5 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0,4 8 | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,4   | 0,1 2 |
| Обменный курс                            | K3 6 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | - 0,2 | - 0,2 | - 0,3 | 0,2  | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| Закупочная цена                          | K3 7 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0,1   | 0     | 0     | 0     |       |
| Условия закупки                          | K3 8 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0,1   | 0     | 0     | 0     |       |
| Эффективность выбора поставщиков         | K3 9 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | - 0,1 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0,1 2 | 0     | 0     |       |
| Технический уровень поставщиков          | K4 0 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     |       |       |
| Уровень интеграции систем с поставщиками | K4 1 | 0,1 2 | 0     | 0 | - 0,5 | 0,4 8 | 0,1 6 | 0,1 2 | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | - 0,1 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0,1 2 | 0,1 2 | 0     | 0     |       |
| Инвестиции в развитие                    | K4 2 | 0,5 6 | 0     | 0 | 0     | 0     | 0,4 8 | 0,4 8 | 0 | 0,4 8 | - 0,2 | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | -0,1 | 0,4   | 0     | 0     | 0,4 8 |       |
| Финансовые инвестиции                    | K4 3 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | -0,1 | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| Иностранные инвестиции                   | K4 4 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | -0,1 | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| Доля рынка                               | K4 5 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0,1 6 | 0,1 6 | 0   | 0 | - 0,2 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0,4 4 |       |
| Рабочий капитал                          | K4 6 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | - 0,6 | 0     | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| Цена акций                               | K4 7 | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0 | 0     | 0     | 0   | 0 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | -0,1 | 0     | 0     | 0     | 0,1 6 |       |

Концепты, описывающие систему предприятия розничной торговли, и связи между ними.

Приложение 1 (продолжение).

| Наименование концепта                       |     | K25  | K26  | K27  | K28  | K29  | K30  | K31  | K32  | K33  | K34 | K35  | K36 | K37  | K38  | K39  | K40  | K41  | K42  | K43  | K44 | K45 | K46  | K47  |      |
|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|
| Технологический уровень оборудования        | K1  |      | 0    | 0    | 0,32 | 0    | 0    | 0    | -0,3 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Производственные стандарты                  | K2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,3 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Количество обученного персонала             | K3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0,16 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Потери рабочего времени                     | K4  | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,1 | 0,48 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Производительность труда                    | K5  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,12 | -0,3 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Скорость внедрения технологий               | K6  | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0,1  | 0,12 | -0,2 | 0,12 | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0,28 |      |
| IT инфраструктура                           | K7  | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | -0,3 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,76 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0,32 |      |
| Условия работы                              | K8  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Уровень лояльности сотрудников              | K9  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,1  | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Текущая текучесть кадров                    | K10 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,03 | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Уровень взаимодействия между департаментами | K11 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Открытость коммуникации с сотрудниками      | K12 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Уровень конкуренции на рынке                | K13 | 0    | -0,3 | 0    | 0    | 0    | -0,5 | 0    | 0    | 0    | 0   | 0,56 | 0   | 0,52 | -0,3 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | -0,6 | 0    | -0,4 |
| Процентная ставка по займам                 | K14 | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,1 | 0,16 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0,12 | 0,12 | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,5 | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Кредиторская задолженность                  | K15 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | -0,2 | 0,16 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | -0,3 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0,24 | -0,2 |      |
| Банковский кредит                           | K16 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,4  | 0,12 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,4  | 0   | 0   | 0,56 | 0    |      |
| Уровень спроса                              | K17 | 0    | 0,32 | 0    | 0    | 0    | 0,6  | 0,16 | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,16 | 0    | 0   | 0   | 0,16 | 0,12 |      |
| Уровень дохода покупателей                  | K18 | 0    | 0    | 0,68 | 0    | 0    | 0,5  | 0,12 | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Политическая стабильность                   | K19 | 0    | 0    | 0,24 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,32 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0,48 |      |
| Уровень инфляции                            | K20 | 0    | 0    | -0,2 | 0,24 | 0    | 0,2  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0,12 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0,1  |      |
| Качество продуктов                          | K21 | 0    | 0,56 | 0,56 | 0    | 0    | 0,1  | 0    | 0,44 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0,32 | 0,24 | 0,12 | 0,44 | 0,12 | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Уровень обслуживания клиентов               | K22 | 0    | 0    | 0,24 | 0    | 0    | 0,5  | 0,44 | 0,32 | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Уровень лояльности клиентов                 | K23 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,6  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Репутация компании                          | K24 | 0    | 0    | 0,24 | 0,32 | 0    | 0,5  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | -0,3 | 0,32 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0,48 |      |
| Ассортимент товаров                         | K25 | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0    | 0    | 0,24 | 0,16 | 0    | 0   | 0,32 | 0   | -0,2 | 0,24 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Наценка на товары                           | K26 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,12 | 0,7  | 0    | 0    | 0,12 | 0   | 0,24 | 0   | 0,16 | 0,16 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |
| Ценовой сегмент товаров                     | K27 | 0,24 | 0,4  | 0    | 0    | 0    | 0,4  | 0    | 0    | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0    | 0    |      |

|  |     |          |          |      |          |          |     |          |          |          |          |   |   |      |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--|-----|----------|----------|------|----------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|---|---|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Доля товаров собственного производства   | K28 | 0,3<br>2 | -0,3     | -0,2 | 0        | 0        | 0,5 | 0,1<br>2 | -0,3     | 0,3<br>2 | 0,4<br>8 | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0        | 0        |          |          |
| Налоги                                   | K29 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | -0,9     | 0,7<br>6 | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |          |
| Выручка от продаж                        | K30 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0,8      | 0   | 0,8<br>8 | 0,6<br>4 | 0        | 0        | 0 | 0 | -0,2 | 0,3<br>2 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,6<br>4 | 0        | 0,3<br>2 | 0,4<br>4 | 0,5<br>2 |          |
| Доход                                    | K31 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0,2 | 0        | 0        | 0,4<br>3 | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0,1<br>2 | 0,1<br>2 | 0,1<br>2 | 0,7<br>5 | 0,7<br>4 |          |
| Все расходы                              | K32 | 0        | 0,2<br>4 | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | -0,3     | -0,2     |          |
| Основные средства                        | K33 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0,4<br>8 | 0,6 | 0        | 0        | 0        | -0,3     | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | -0,2     | 0,2<br>4 |          |
| Аренда                                   | K34 | 0        | 0        | 0    | 0        | -0,2     | 0   | -0,3     | 0,3<br>2 | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| Расходы на рекламу                       | K35 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0,7<br>6 | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| Обменный курс                            | K36 | 0        | 0,1<br>2 | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0,3<br>2 | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0,2<br>4 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| Закупочная цена                          | K37 | 0        | -0,2     | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0,4<br>8 | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0,3<br>2 | -0,2     | 0        | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0        | 0,1<br>2 | 0        | 0        | 0        |          |
| Условия закупки                          | K38 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0,4<br>8 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,6<br>4 | 0        |          |
| Эффективность выбора поставщиков         | K39 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0,1<br>2 | 0        | 0        | 0        | 0,1      | 0        | 0        |          |
| Технический уровень поставщиков          | K40 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0,3<br>6 | 0        | 0,6<br>8 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| Уровень интеграции систем с поставщиками | K41 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0,1 | 0        | -0,6     | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0,5<br>2 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |          |
| Инвестиции в развитие                    | K42 | 0        | 0        | 0    | 0,4<br>8 | 0        | 0   | 0,4      | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | -0,1     | -0,4     | 0,1<br>2 | -0,4     | 0,4      |
| Финансовые инвестиции                    | K43 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,4      | 0        | 0,4      | 0        | -0,5     | 0,5<br>6 |
| Иностраные инвестиции                    | K44 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0,3<br>2 | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | -0,5     | -0,2     | 0        | 0        | -0,4     | 0,3<br>2 |
| Доля рынка                               | K45 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0,6 | 0,1<br>2 | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | -0,2     | 0,4<br>8 | 0,1<br>2 | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0,1<br>2 | 0,6      | 0        | 0,6      | 0,4<br>8 |          |
| Рабочий капитал                          | K46 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,1<br>6 |          |
| Цена акций                               | K47 | 0        | 0        | 0    | 0        | 0        | 0   | 0        | 0        | 0,1<br>2 | 0        | 0 | 0 | 0    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,5<br>6 | 0        |          |

## Приложение 2.

|  |     | X1    | X2   | X3   | X4   | X5   | X6   | X7   | X8   | X9   | X10   | X11  | X12   | X13  | X14  | X15  |
|--|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| Валовой региональный продукт                             | X1  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0,92 | 0    |
| Объем промышленного производства                         | X2  | 0,808 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,81  | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Объем производства услуг                                 | X3  | 0,808 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Конкурентоспособность продукции                          | X4  | 0     | 0,62 | 0    | 0    | 0    | 0,33 | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень социальной безопасности                          | X5  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,06 | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень спроса и потребления                             | X6  | 0     | 0,73 | 0,42 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Эффективность использования ресурсов                     | X7  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Объем инвестиций   | X8  | 0,327 | 0,6  | 0,58 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0,04 |
| Уровень развития инфраструктуры                          | X9  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0,27 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень загрязнения                                      | X10 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Средняя заработная плата                                 | X11 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,54 | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Объем финансирования здравоохранения                     | X12 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Объем социального финансирования                         | X13 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень безработицы                                      | X14 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень развития технологий                              | X15 | 0,423 | 0,04 | 0    | 0,13 | 0    | 0    | 0,23 | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Социальная напряженность                                 | X16 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень обеспеченности "зелеными" территориями           | X17 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0,23 | 0    | 0,44 | 0    | 0,04 | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Политическая стабильность                                | X18 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0,17 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Численность населения                                    | X19 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0,42 | 0    |
| Трудовой потенциал                                       | X20 | 0     | 0,13 | 0,13 | 0    | 0    | 0    | 0,04 | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0,77 | 0    |
| Прибыль предприятий                                      | X21 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0,4  | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Обеспеченность объектами соц. культ. и спорт. назначения | X22 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,25 | 0    | 0,13 | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Жилой фонд   | X23 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,35 | -0,35 | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень налогов  | X24 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0,35 | 0,019 | 0,08 | 0    | 0    |
| Уровень инфляции   | X25 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,73 | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Экономическая стабильность                               | X26 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,52 | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Эколого-ресурсный потенциал территории                   | X27 | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Туристическая привлекательность города                   | Y1  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Уровень социального благополучия                         | Y2  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |
| Эколого-экономическая эффективность                      | Y3  | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    |

**Концепты, описывающие модель развития муниципальных образований, и связи между ними.**

Приложение 2 (продолжение).

|  |     | X16  | X17  | X18  | X19  | X20   | X21  | X22  | X23 | X24  | X25  | X26  | X27  | Y1   | Y2   | Y3   |
|--|-----|------|------|------|------|-------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Валовой региональный продукт                             | X1  | -    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0,13 | 0    | 0   | 0,23 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Объем промышленного производства                         | X2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Объем производства услуг                                 | X3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Конкурентоспособность продукции                          | X4  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень социальной безопасности                          | X5  | -    | 0    | 0    | 0,12 | 0,04  | 0    | 0,06 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,63 | 0    |
| Уровень спроса и потребления                             | X6  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Эффективность использования ресурсов                     | X7  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,62 |
| Объем инвестиций   | X8  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0,42 | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень развития инфраструктуры                          | X9  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0,23 | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень загрязнения                                      | X10 | 0,42 | 0    | 0    | 0,54 | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,98 | -1   | 0    |
| Средняя заработная плата                                 | X11 | -    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0,35 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Объем финансирования здравоохранения                     | X12 | -    | 0    | 0    | 0,33 | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Объем социального финансирования                         | X13 | -    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,13 | 0    |
| Уровень безработицы                                      | X14 | 0,62 | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень развития технологий                              | X15 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Социальная напряженность                                 | X16 | 0    | 0    | 0,94 | 0    | -0,35 | 0    | 0    | 0   | 0    | 0,04 | 0    | 0    | 0,54 | 0,92 | 0    |
| Уровень обеспеченности "зелеными" территориями           | X17 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0,29 | 0,52 | 0    | 0    |
| Политическая стабильность                                | X18 | -    | 0    | 0    | 0,04 | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0,62 | 0    | 0,54 | 0    | 0    |
| Численность населения                                    | X19 | -    | 0    | 0    | 0    | 0,56  | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Трудовой потенциал                                       | X20 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Прибыль предприятий                                      | X21 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0,42 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Обеспеченность объектами соц. культ. и спорт. назначения | X22 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,62 | 0,58 | 0    |
| Жилой фонд   | X23 | -    | 0,54 | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень налогов  | X24 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0,46 | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,33 | 0    |
| Уровень инфляции   | X25 | 0,04 | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Экономическая стабильность                               | X26 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0,73 | 0    | 0    | 0    | 0,42 | 0,04 |
| Эколого-ресурсный потенциал территории                   | X27 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Туристическая привлекательность города                   | Y1  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Уровень социального благополучия                         | Y2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Эколого-экономическая эффективность                      | Y3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0,5  | 0    | 0    | 0    | 0    |

### Приложение 3.

|   |     | k1    | k2  | k3 | k4   | k5 | k6 | k7   | k8  | k9  | k10 | k11 | k12 | k13 | k14  | k15 | k16  | k17 | k18 | k19 |
|---|-----|-------|-----|----|------|----|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|
| Скорость течения раствора                             | k1  | 0     | 0   | 0  | -0,6 | 0  | 0  | -0,4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,8  | 0   | 0,6  | 0   | 0   | 0   |
| Температура воды на входе в камеру                    | k2  | 0     | 0   | 0  | 0,8  | 0  | 0  | -0,7 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,9  | 0   | -0,2 | 0   | 0   | 0   |
| Концентрация ионов соли                               | k3  | 0,01  | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | -0,8 | 0,8 | 0,8 | 0   | 0   | 0   | 0   | -0,1 | 0   | 0,2  | 0   | 0   | 0   |
| Качество очистки (степень обессоливания)              | k4  | 0     | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,3  | 0   | 0   | 0   |
| Электропроводность мембран (сопротивление мембран)    | k5  | 0,5   | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | -0,6 | 0,8 | 0,8 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,9  | 0   | -0,2 | 0   | 0   | 0,4 |
| Частота регенерации                                   | k6  | 0,3   | 0   | 0  | 0,8  | 0  | 0  | 0,8  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,2  | 0   | 0   | 0   |
| Срок работы мембраны                                  | k7  | 0     | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0   |
| Сила тока в системе                                   | k8  | 0,02  | 0,3 | 0  | 0,7  | 0  | 0  | -0,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,6  | 0   | 0,7  | 0   | 0   | 0   |
| Скачок потенциала в системе                           | k9  | 0,02  | 0,3 | 0  | 0,7  | 0  | 0  | -0,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,6  | 0   | 0,7  | 0   | 0   | 0   |
| Количество парных камер в аппарате                    | k10 | 0     | 0   | 0  | 0,9  | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1    | 0   | 0,7  | 0   | 0,9 | 0,8 |
| Расстояние между мембранами в аппарате                | k11 | 0     | 0   | 0  | -0,6 | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2  | 0   | 0,1  | 0   | 0   | 0   |
| Ширина входного отверстия                             | k12 | 0,8   | 0   | 0  | 0,8  | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,3  | 0   | -0,1 | 0   | 0   | 0,2 |
| Длина канала  | k13 | 0,2   | 0   | 0  | 0,75 | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | -0,4 | 0   | 0,4  | 0   | 0,7 | 0,9 |
| Производительность аппарата                           | k14 | 0     | 0   | 0  | -0,4 | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,2  | 0   | 0   | 0   |
| Количество солей в растворе                           | k15 | 0     | 0   | 0  | -0,7 | 0  | 0  | 0,75 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,3  | 0   | 0   | 0   |
| Расход электроэнергии (электродиализ + работа) насоса | k16 | 0     | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0   |
| КПД насоса  | k17 | 1     | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0,8 |
| Размер установки                                      | k18 | -0,05 | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,6  | 0   | 0   | 0,9 |
| Стоимость установки                                   | k19 | 0     | 0   | 0  | 0    | 0  | 0  | 0,4  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0   | 0   |

Концепты, описывающие модель электродиализной установки на предприятии очистки воды, и связи между ними.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018617520

**Программа моделирования социально-экономических процессов на основе нечётких когнитивных карт «FuzzyM»**

Правообладатели: *Петухова Алина Владимировна (RU), Кармазин Владимир Николаевич (RU)*

Авторы: *Петухова Алина Владимировна (RU), Кармазин Владимир Николаевич (RU)*

Заявка № **2018615414**

Дата поступления **17 мая 2018 г.**

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **26 июня 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 *Г.П. Ивлиев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2020618008**

**Модуль поддержки принятия решений к программе  
моделирования социально-экономических процессов  
«FuzzyM»**

Правообладатели: *Петухова Алина Владимировна (RU), Коваленко  
Анна Владимировна (RU)*

Авторы: *Петухова Алина Владимировна (RU),  
Коваленко Анна Владимировна (RU)*

Заявка № **2020616550**

Дата поступления **29 июня 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **15 июля 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Излиев**



**Акт**

о внедрении результатов диссертационного исследования

Петуховой Алины Владимировны

«Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечетких когнитивных карт»,

на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

Управление в организационных системах

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования «Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечетких когнитивных карт» Петуховой Алины Владимировны в проектах компании ООО «Программные технологии».

Основные результаты, полученные в диссертации автора, имеют важное научно-практическое значение. Эти результаты применяются при разработке принципиально новых систем поддержки принятия решений с целью оптимизации процессов планирования и управления организаций.

Руководитель  
ООО Программные технологии  
Сергей Складенко  
12 декабря 2022



**Акт**

о внедрении результатов диссертационного исследования  
Петуховой Алины Владимировны  
«Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях  
розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечетких  
когнитивных карт»,  
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
Управление в организационных системах

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования «Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечетких когнитивных карт» Петуховой Алины Владимировны в проектах компании LTD «Tectum AI».

Основные результаты, полученные в диссертации автора, имеют важное научно-практическое значение. Разработанный программный комплекс «FuzzyM», алгоритмы анализа нечетких когнитивных карт, а также математическая модель системы розничной торговли внедряются в деятельность компаний для оптимизации процессов управления с целью увеличения точности моделирования развитий сложных систем.

Руководитель  
LTD «Tectum AI»  
Iain Felix Cameron  
10 декабря 2022

