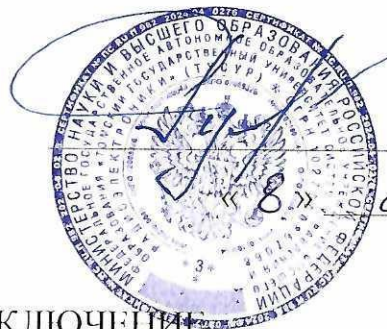




УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ТУСУР

В.М. Рулевский

сентября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Гомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «Методология построения интерпретируемых нечетких классификаторов, основанных на правилах» выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Гомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на кафедре компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП).

В период подготовки диссертации соискатель Сарин Константин Сергеевич работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Гомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на кафедре КСУП в должности доцента. Обучался в докторантуре с 2022 г.

В 2016 г. успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Гибридные алгоритмы анализа данных на основе компактных и точных нечетких систем типа Такаги-Сугено» по специальности 05.13.17 – «Теоретические основы информатики».

Научный консультант – Ходашинский Илья Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры КСУП федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Гомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Оценка выполненной автором работы

В диссертационном исследовании Сарина К.С. разработана методология построения интерпретируемых нечетких классификаторов, основанных на правилах, которую можно квалифицировать как научное достижение в области построения систем объяснимого искусственного интеллекта. Предлагаемые Сариним К.С. решения позволяют осуществлять построение прогностических моделей, на основе нечетких классификаторов, сопоставимых по точности и превосходящих по интерпретируемости известные аналоги.

2. Актуальность темы и направленность исследования

Повсеместное применение систем искусственного интеллекта, основанных на методах анализа данных, выявило необходимость понимания того, как получены решения, выдаваемые данными системами. Особенно это относится к системам, применяемым в критически важных проблемных областях, таких как здравоохранение, оборона, энергетика. Необходимость в способности системой искусственного интеллекта объяснить человеку результат своего решения подтверждена Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утвержденной указом Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 (ред. от 15.02.2024), а также в национальном стандартом РФ ГОСТ Р 59276-2020 «Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия».

В диссертационной работе Сарина К.С. предлагаются решения по построению нечетких классификаторов, представляющих особый класс интеллектуальных систем, применимых в области анализа данных. Благодаря наличию базы продукционных правил нечеткие классификаторы способны выразить закономерности в данных в ориентированной на человека форме, используя термины естественного языка. Такая возможность позволяет, в том числе, объяснить и результат полученного классификатором решения. Известные решения по построению нечетких классификаторов преимущественно сосредоточены на достижении высокой точности результата прогноза.

Таким образом, диссертационное исследование Сарина К.С., направленное на построение интерпретируемых нечетких классификаторов для систем объяснимого искусственного интеллекта является актуальным.

3. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Автором проводилась постановка цели и задач научного исследования. Все результаты работы, составляющие научную новизну и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. В обсуждении результатов активное участие принимал научный консультант Ходашинский И.А.. Автором разработаны методология построения интерпретируемых нечетких классификаторов [1, 2, 3, 4, 5, 14], гибридный алгоритм смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания [1, 5, 24], дискретный алгоритм оптимизации на основе распределения вероятностей с трансформацией целевых значений [1, 3, 14, 25], метод разделения данных для построения прогностических моделей машинного обучения [1, 4], адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров нечетких классификаторов [1, 2], методика построения интерпретируемых нечетких классификаторов [1], выполнен аналитический обзор современных методов построения нечетких классификаторов [7].

Личный вклад автора, выполненный в соавторстве, заключается в следующем. Проведены исследования нечетких классификаторов типа Min-Max [6, 13]. Проведена разработка и исследование метаэвристических методов и алгоритмов для построения нечетких систем [8, 9, 15, 18, 21, 22]. Проведена разработка и исследование методов и алгоритмов отбора информативных признаков для построения нечетких систем [10-12, 16, 17, 20].

Автором созданы программные средства, реализующие разработанные алгоритмы, метод разделения, методику построения, а также программные средства, осуществляющие синтез цепей согласования и прогнозирования эффективности реабилитации пациентов после перенесенной коронавирусной инфекции COVID-19. Проведены вычислительные эксперименты для оценки эффективности разработанных алгоритмов оптимизации, метода разделения данных, адаптированного алгоритма градиентного спуска и методики построения интерпретируемых нечетких классификаторов. Вычислительный эксперимент для оценивания работы алгоритма смешанной многокритериальной оптимизации при синтезе согласующих цепей выполнен совместно с Черкапиным М.В.. Формирование первичных данных для прогнозирования эффективности реабилитации пациентов после перенесенной коронавирусной инфекции COVID-19 выполнено совместно с сотрудниками Томского научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии [23]. Результаты по отдельным направлениям получены совместно с соавторами научных публикаций.

4. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов обеспечивается следующими основными факторами: 1) строгостью применения математических методов; 2) использованием общепринятых тестов и общедоступных наборов данных для проведения численных экспериментов по оптимизации и построению нечетких систем; 3) проведением экспериментов на лицензионном программном обеспечении MATLAB, результаты которых не противоречат результатам, полученным другими исследователями.

5. Научная новизна

1. Предложена методология построения интерпретируемых нечетких классификаторов, основанных на правилах, определяющая совокупность методов анализа данных и их взаимодействие. Отличительной особенностью методологии является совместное применение методов разделения данных на обучающую и валидационную выборки, метаэвристических методов смешанной многокритериальной оптимизации для одновременной структурной и параметрической оптимизации классификаторов и стратегий выбора классификатора из сформированного Парето-множества.

Методология позволяет разрабатывать интерпретируемые нечеткие классификаторы, сопоставимые по точности с существующими аналогами.

2. Разработан метаэвристический алгоритм многокритериальной оптимизации для поиска в смешанном дискретно-непрерывном пространстве. Отличительной особенностью алгоритма является совместное применение метаэвристики «кукушкин поиск» для формирования непрерывных элементов решения и генетического оператора скрещивания для формирования дискретных элементов решения. Алгоритм позволил статистически значимо (на уровне $\alpha=0,05$) улучшить результаты поиска по сравнению с широко используемым генетическим алгоритмом с недоминируемой сортировкой NSGA II на общепринятых тестах ZDT и DTLZ. Значение обратного расстояния поколений в среднем уменьшилось на 95,47%. Степень доминирования увеличилась в среднем на 70,92%.

3. Разработан метаэвристический алгоритм однокритериальной оптимизации на основе распределения вероятностей значений переменных для поиска в дискретном пространстве. Особенностью алгоритма является построение распределения вероятностей с помощью трансформации целевых значений решений в их весовые коэффициенты. Алгоритм позволил статистически значимо (на уровне $\alpha=0,05$) улучшить эффективность поиска в бинарном пространстве по сравнению с широко используемыми генетическим алгоритмом и алгоритмом роящихся частиц на общепринятых унимодальных и мультимодальных эталонных тестовых функциях. В среднем отклонение от оптимального значения целевой функции уменьшилось в 4,3 раза по сравнению с генетическим алгоритмом и в 10,1 раза по сравнению с бинарным алгоритмом роящихся частиц.

4. Для оптимизации параметров нечеткого классификатора адаптирован алгоритм градиентного спуска, отличительной особенностью которого является представление нечеткого классификатора в виде системы разделяющих функций и нормирование их значений в целевой функции оптимизации. Адаптированный позволил статистически значимо (на уровне $\alpha=0,05$) повысить точность нечетких классификаторов, построенных метаэвристическим алгоритмом смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания на 38 общедоступных наборах данных. Максимальное увеличение точности составило 5,1%.

5. Предложен новый метод разделения данных при построении прогностических моделей машинного обучения, основанный на применении бинарного метаэвристического алгоритма для формирования обучающей и валидационной выборок близких по характеристикам к исходным данным. Метод разделения данных при построении нечетких классификаторов многокритериальным метаэвристическим алгоритмом на 38 общедоступных наборах данных позволил статистически значимо (на уровне $\alpha=0,05$) повысить точность и интерпретируемость классификаторов по сравнению с построением без разделения данных. Максимальное увеличение точности

составило 6,5%. Интерпретируемость повысилась путем уменьшения количества правил, количества признаков и общего количества нечетких терминов.

6. Разработана методика построения нечетких классификаторов с соблюдением компромисса «точность – интерпретируемость», отличительной особенностью методики является применение новых методов и алгоритмов, а именно: 1) смешанной многокритериальной оптимизации с алгоритмом на основе совместного применения метаэвристики «кукушкин поиск» и генетического оператора скрещивания для одновременной структурной и параметрической оптимизации классификаторов по критериям точности и интерпретируемости, 2) метода разделения данных на обучающую и валидационную выборки дискретным алгоритмом оптимизации на основе распределения вероятностей с трансформацией целевых значений, 3) адаптированного алгоритма градиентного спуска для параметрической оптимизации классификаторов, настраивающей параметры функций принадлежности. Методика построения нечетких классификаторов на 38 общедоступных наборах данных позволила при сопоставимой точности статистически значимо (на уровне $\alpha=0,05$) повысить интерпретируемость классификаторов путем уменьшения количества правил в среднем на 39,2%, количества признаков в среднем на 8%, общего количества нечетких терминов в среднем на 49,8% по сравнению с нечеткими классификаторами FARC-HD, и количества правил в среднем на 81,9%, количества условий в правиле в среднем на 54,5% по сравнению с классификаторами на основе деревьев решений CART.

6. Теоретическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии технологии построения нечетких систем интеллектуального анализа данных. Методика построения нечетких классификаторов является инструментом извлечения знаний из данных и интерпретации результатов, облегчающих понимание и объяснение процессов принятия решений, связанных с классификацией объектов. Алгоритмы смешанной многокритериальной оптимизации и дискретной оптимизации могут применяться для решения задач глобальной параметрической оптимизации и комбинаторной оптимизации. Метод разделения данных может быть использован для борьбы с переобучением и выбора подходящей по сложности структуры при построении прогностических моделей другого типа, например, нейронных сетей, деревьев решений, моделей на основе дискриминантного анализа и метода опорных векторов.

7. Практическая значимость

Результаты диссертационного исследования были использованы для разработки программных средств и внедрены в следующих организациях. В Томском научно-исследовательском институте курортологии и физиотерапии

для прогнозирования эффективности реабилитации пациентов после перенесенной коронавирусной инфекции COVID-19. В научно-исследовательском институте микросистемных систем и ООО «Микросистемные системы» для синтеза согласующих цепей с заданной формой амплитудно-частотной характеристики. В ООО «50ohm Tech» для разработки экспериментальной версии интеллектуальной САПР «50ohm Tech Circuit Studio». Также результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры КСУИ ТУСУР. Использование результатов подтверждено соответствующими актами о внедрении (использовании).

Разработанные методология, методы и алгоритмы использованы при выполнении следующих проектов.

1. РФФИ, № 24-21-00168 «Методы и алгоритмы построения нечетких адаптивных классификаторов для решения задач кибербезопасности» 2024-2025 гг.

2. РФФИ, № 22-21-00021 «Интерпретируемый нечеткий классификатор рукописных данных для диагностики нейродегенеративных заболеваний» 2022-2023 гг.

3. НИР «Создание информационной системы защищенного управления гетерогенными сетями и устройствами, образующими инфраструктуру «интернета вещей», выполненной в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на 2017-2019 гг., проект № 2.3583.2017/4.6.

4. НИР «Теоретические основы человеко-машинных интерфейсов», выполненной в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на 2017-2019 гг., проект № 8.9628.2017/8.9.

5. РФФИ, № 16-07-00034 «Методы и инструментальные средства построения самообучающихся систем, основанных на нечетких правилах» 2016–2018г.

8. Ценность научных работ автора, полнота изложения материалов диссертации

По результатам исследования опубликовано 59 печатных работ, из которых в рекомендованных ВАК РФ периодических изданиях – 31. Двадцать работ индексированы в базах научных публикаций SCOPUS и WoS. Получены 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные публикации по материалам исследования

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Сарин К.С. Методика построения интерпретируемых нечетких классификаторов для систем объяснимого искусственного интеллекта // Доклады ТУСУР. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 73–87.

2. Сарин К.С. Адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров нечеткого классификатора / К.С. Сарин //

Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 2(38). – С. 18–31.

3. Сарин К.С. Дискретный алгоритм оптимизации на основе распределения вероятностей с трансформацией целевых значений / К.С. Сарин // Программирование. – 2024. – № 6. – С. 35–47.

4. Сарин К.С. Метод разделения данных для построения прогностических моделей машинного обучения / К.С. Сарин // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 88–96.

5. Сарин К.С. Гибридный алгоритм смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания / К.С. Сарин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2024. – № 2. – С. 87–105.

6. Сарин К.С. Нечеткий классификатор инкрементного обучения типа Min-Max для решения задач кибербезопасности / К.С. Сарин, Р.Е. Коломников, М.О. Светлаков, И.А. Ходашинский // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. – 2024. – № 9. – С. 11–21.

7. Сарин К.С. Нечеткий классификатор типа Min-Max: обзор / К.С. Сарин // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 65–75.

8. Sarin K. Extracting Knowledge from Images of Meanders and Spirals in the Diagnosis of Patients with Parkinson's Disease / K. Sarin, I. Hodashinsky, M. Svetlakov // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2022. – Vol. 32, No. 3. – P. 658–664.

9. Сарин К.С. Метод баггинга и отбор признаков в построении нечетких классификаторов для распознавания рукописной подписи / К.С. Сарин, И.А. Ходашинский // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 833–845.

10. Ходашинский И.А. Отбор классифицирующих признаков с помощью популяционного случайного поиска с памятью / И.А. Ходашинский, К.С. Сарин // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 2. – С. 161–172.

11. Ходашинский И.А. Отбор классифицирующих признаков: сравнительный анализ бинарных метаэвристик и популяционного алгоритма с адаптивной памятью / И.А. Ходашинский, К.С. Сарин // Программирование. – 2019. – № 5. – С. 3–9.

12. Сарин К.С. Метод Чиу для отбора информативных признаков нечетких классификаторов / К.С. Сарин, И.А. Ходашинский // Информатика и системы управления. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 84–95.

Другие работы, опубликованные по теме диссертации

13. Sarin K.S. Fuzzy Min-Max Classifier in Cybersecurity Applications / K.S. Sarin, R.E. Kolomnikov, M.O. Svetlakov, I.A. Hodashinsky // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2024. – Vol. 58, No. 5. – P. 299–309.

14. Sarin K. S. Discrete Optimization Algorithm Based on Probability Distribution with Transformation of Target Values / K.S. Sarin // Programming and Computer Software. – 2024. – Vol. 50, No. 6. – P. 445–456.

15. Sarin K. A three-stage fuzzy classifier method for Parkinson's disease diagnosis using dynamic handwriting analysis / K. Sarin, M. Bardamova, M. Svetlakov, N. Koryshev et al. // Decision Analytics Journal. – 2023. – Vol. 5. – P. 100274.

16. Hancer E. Binary PSO Variants for Feature Selection in Handwritten Signature Authentication / E. Hancer, M. Bardamova, I. Hodashinsky, K. Sarin, A. Slezkin, M. Svetlakov // Informatica. – 2022. – Vol. 33, No. 3. – P. 523–543.

17. Hancer E. A wrapper metaheuristic framework for handwritten signature verification / E. Hancer, I. Hodashinsky, K. Sarin, A. Slezkin // Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications. – 2021. – Vol. 25, No. 13. – P. 8665–8681.

18. Sarin K. Linear regression to determine the cluster radius for fuzzy rule base generation / K. Sarin, I. Hodashinsky, I. Filimonenko // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 – Proceedings, Tomsk, 2019. – P. 1–4.

19. Hodashinsky I. Feature selection based on swallow swarm optimization for fuzzy classification / I. Hodashinsky, K. Sarin, A. Shelupanov, A. Slezkin // Symmetry. – 2019. – Vol. 11, No. 11. – P. 1423.

20. Hodashinsky I.A. Feature selection: Comparative Analysis of Binary Metaheuristics and Population Based Algorithm with Adaptive Memory / I.A. Hodashinsky, K.S. Sarin // Programming and Computer Software. – 2019. – Vol. 45, No. 5. – P. 221–227.

21. Sarin K. Feature selection and identification of fuzzy classifiers based on the cuckoo search algorithm / K. Sarin, I. Hodashinsky, A. Slezkin // Communications in Computer and Information Science. – 2018. – Vol. 934. – P. 22–34.

22. Sarin K.S. Identification of fuzzy classifiers based on the mountain clustering and cuckoo search algorithms / K.S. Sarin, I.A. Hodashinsky // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings, Astana, 2017. – P. 1–6.

23. Ходашинский И.А. Метод нахождения подмножеств согласованных признаков при прогнозировании эффективности реабилитации пациентов после перенесенной коронавирусной инфекции / И.А. Ходашинский, И.И. Смирнова, М.Б. Бардамова, К.С. Сарин, М.О. Светлаков, А.А. Зайцев, Е.В. Тицкая, А.В. Тонкошкурова, И.И. Антипова, А.И. Ходашинская, Т.Н. Заринова // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. – 2023. – Т. 38, № 4. – С. 270–279.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668012 Российская Федерация. Программа дискретной оптимизации

на основе распределения вероятностей с трансформацией целевых значений : № 2024667180 : заявл. 23.07.2024 : опубл. 01.08.2024 / К. С. Сарин ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684020 Российская Федерация. Программа смешанной многокритериальной оптимизации на основе метаэвристики "кукушкин поиск" и генетического оператора скрещивания : № 2023682275 : заявл. 27.10.2023 : опубл. 13.11.2023 / К. С. Сарин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

9. Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Сарина К.С. по своему содержанию соответствует научной специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы» по следующим направлениям исследования паспорта специальности: 1) п.1 «Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей и используемого программно-аппаратного обеспечения»; 2) п.7 «Разработка методов обработки, группировки и аннотирования информации, в том числе, извлеченной из сети интернет, для систем поддержки принятия решений, интеллектуального поиска, анализа»; 3) п.13 «Разработка и применение методов распознавания образов, кластерного анализа, нейро-сетевых и нечетких технологий, решающих правил, мягких вычислений при анализе разнородной информации в базах данных».

В диссертационном исследовании Сарина Константина Сергеевича разработана методология построения интерпретируемых нечетких классификаторов, основанных на правилах, которую можно квалифицировать как научное достижение в области построения систем объяснимого искусственного интеллекта. Работа полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 16.10.2024)), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Методология построения интерпретируемых нечетких классификаторов, основанных на правилах» Сарина Константина Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.8 «Информатика и информационные процессы».

Заключение принято на заседании научно-технического семинара кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании.

Присутствовало на заседании 15 чел., в том числе докторов наук – 6, кандидатов наук – 9. Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 68 от «3» сентября 2025 г.

Председатель: зав. каф. КСУП
д-р техн. наук, профессор



Шурыгин Ю.А.

Секретарь: проф. каф. КСУП
д-р техн. наук, доцент



Ганджа Т.В.