

На правах рукописи

Комлев Игорь Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ИШЕМИЧЕСКИХ РИСКОВ С ДУБЛИРОВАНИЕМ РЕШЕНИЙ И
АССОЦИАТИВНЫМ ВЫБОРОМ**

Специальность 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск 2019

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре биомедицинской инженерии

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Титов Дмитрий Витальевич

Официальные оппоненты:

Разинкин Константин Александрович,
доктор технических наук, доцент,
Воронежский государственный технический университет, кафедра систем информационной безопасности, профессор кафедры (г. Воронеж)

Петрунина Елена Валерьевна,
кандидат технических наук, Московский государственный гуманитарно-экономический университет, факультет прикладной математики и информатики, декан (г. Москва)

Ведущая организация: **Тверской государственный технический университет** (г. Тверь)

Защита диссертации состоится «28» августа 2019 года в 13⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.099.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте университета
<https://swsu.ru/upload/iblock/cd3/dissertatsiya-komlev-i.a.pdf>

Автореферат разослан « ____ » июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. По данным Европейского кардиологического общества смертность от ишемической болезни сердца (ИБС) лиц в возрасте от 35 до 64 лет в нашей стране оказалась самой высокой в Европе, составляя у мужчин более 350 и для населения в целом 100 на 100 тыс. человек в год. Несмотря на успехи в инструментальной диагностике и в лечении, ИБС остается наиболее частым заболеванием среди лиц трудоспособного возраста, вызывая высокую инвалидизацию и смертность.

Важнейшей общенаучной прикладной задачей считается прогнозирование заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС), которое при использовании математических моделей и методов позволяет определить степень толерантности организма человека к воздействию различных факторов с целью уточнения его предрасположенности к тому или иному сердечно-сосудистому заболеванию (ССЗ), а если оно уже возникло, то предсказание особенностей его течения в будущем и исход. На сегодняшний день поиск усовершенствованных методов и алгоритмов остается актуальным.

Необходимость прогнозирования ССЗ выдвигает требования к организации массовых обследований населения и диктует актуальность широкого внедрения в медицинскую практику мониторинга состояния больных с высоким риском ИБС при помощи телекоммуникационных автоматизированных систем. Своевременное выявление пациентов с повышенным и высоким риском возникновения осложнений с целью проведения профилактических мероприятий, направленных именно на снижение риска, а также облегчения тяжести уже имеющих последствия, является основным направлением в улучшении общей ситуации по заболеваемости в целом.

Степень разработанности темы исследования. С развитием компьютерной техники и информационных технологий предпринимаются попытки внедрения программированного прогнозирования в медицинскую практику (М.М. Батюшин, Ю.Л. Шевченко), которое нашло применение в практической медицине в виде систем поддержки принятия решений (СППР) и, как правило, основано на анализе электрокардиографических сигналов (ЭКС) и позволяет осуществлять неинвазивную оценку диагностических показателей и получение предварительного диагноза о наличии или возможном развитии заболевания при отклонении показателей от их нормальных значений. В этом направлении в России и за рубежом активно развиваются научные школы под руководством таких выдающихся российских ученых, как Бокерия Л.А., Баевский Р. М., Гельфанд И. М., Гуляев Ю. В., Рощевский М.П., Рубин А.Б., Самойлов А. Ф., Селищев С. В. и др., а также зарубежных ученых Noble D., Holter N.J., Рангайян Р.М., de Luna A.B., Mandel W.J., Katz L., и др., которые внесли значительный вклад в развитие СППР по прогнозированию и диагностике ССЗ.

Современные средства поддержки принятия решений на различных этапах оказания кардиологической помощи реализуют алгоритмический подход

обработки и анализа регистрируемых данных, согласно которому все процессы в сердце происходят по строгим правилам и для получения диагностических сведений о его состоянии необходимо выполнить ряд последовательных преобразований ЭКС. Такой подход не учитывает вероятностные и хаотические закономерности, свойственные сложным динамическим системам. Поэтому существующие методы требуют совершенствования учета латентных связей между факторами ишемического риска при диагностике состояния сердца в условиях свободной двигательной активности. Следовательно, для решения одной из важнейших проблем современного здравоохранения - повышения качества прогнозирования заболеваний сердца актуально создание методов поиска новых предикторов ССЗ.

Научно-технической задачей исследования является разработка методов прогнозирования ССЗ, основанных на автоматизации процесса анализа факторов риска (ФР) ИБС и математических моделях, позволяющих формировать из этих ФР решающие правила.

Цель работы. Повышение качества прогнозирования ишемических рисков посредством разработки методов, моделей, алгоритмов и программного обеспечения для интеллектуальной поддержки принятия решений врача-кардиолога.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выбрано и обосновано пространство информативных признаков для прогнозирования ишемической болезни сердца;
- разработаны математические модели ишемических рисков для частных решающих правил по вычислению коэффициентов уверенности для формирования решений в дублирующих классификаторах;
- разработана структурно-функциональная схема принятия решений по прогнозу ишемических рисков с дублированием решений и ассоциативным их выбором;
- разработаны модули классификаторов в дублирующих каналах и алгоритм ассоциативного выбора наиболее подходящего решения;
- разработано программное обеспечение для реализации классификаторов в дублирующих каналах автоматизированной системы прогнозирования ишемической болезни сердца;
- проведена апробация предложенных методов, моделей и алгоритмов для автоматизированной системы прогнозирования ишемической болезни сердца в клинических условиях.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- в результате разведочного анализа получено пространство информативных признаков, состав которого был минимизирован с использованием методов экспертного оценивания, статистической меры Кульбака в сочетании с моделью Г. Раша теории измерения латентных переменных и методом группового учёта аргументов, отличающееся использованием трёх групп предикторов, оценивающих различные уровни

регулирования сердечно-сосудистой системы, что позволяет синтезировать надёжно работающие решающие правила с минимальным набором исходных данных;

- математические модели прогнозирования возникновения и оценки степени тяжести ишемической болезни сердца, отличающиеся агрегацией специфических признаков и интегральных показателей, характеризующих различные стороны функционирования сердечно-сосудистой системы, позволяющие обеспечивать уверенность в принимаемых решениях при их совместном использовании на уровне 0,9.

- метод оперативного контроля за динамикой развития ишемии сердца по энергетическому разбалансу меридианных структур, отличающийся тем, что для оперативной оценки функционального состояния и функционального резерва сердца у пациентов с ишемической болезнью сердца используется анализ динамических электрических характеристик биологически активных точек меридиана сердца при электрических возмущающих нагрузках, позволяющий оперативно и с высокой степенью точности контролировать развитие ишемических процессов;

- метод дублирования решений с ассоциативным выбором, отличающийся использованием трёх математических моделей, полученных по трём блокам информативных признаков, и использованием трёх каналов принятия решения, два из которых являются дублирующими, а третий – каналом ассоциативного выбора, позволяющий построить автоматизированную систему прогнозирования ишемической болезни сердца;

- алгоритм ассоциативного выбора решений, отличающийся формированием обучающей выборки для классификатора дублирующих каналов на основе результатов классификации дублирующих каналов на контрольной выборке, позволяющий синтезировать классификатор дублирующих каналов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что изложена технология синтеза дублирующих решений и ассоциативного выбора, предназначенная для автоматизации процессов прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний и ориентированная на врача-кардиолога и врача-терапевта. Технология позволяет, используя блочную структуру гетерогенного пространства информативных признаков, включающего как новые, так и известные факторы ишемического риска, сформировать решающие модули прогнозирования ишемической болезни сердца как на верхнем иерархическом уровне в виде дублирующих решений, так и на нижнем иерархическом уровне в виде математических моделей ишемического риска, построенных по трем блокам информативных признаков. Разработанные математические модели, алгоритмы и решающие модули составили основу построения автоматизированной системы прогнозирования ишемических рисков, статистические и клинические испытания которой показали целесообразность ее использования в практике прогнозирования и профилактики ишемической болезни сердца.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» («Проведение прикладных научных исследований в области биоинформационных технологий»), уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0071) и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Результаты работы внедрены в учебном процессе Юго-Западного государственного университета при подготовке магистров по направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» и прошли испытания в отделении медицинской реабилитации клинического научно-медицинского центра «Авиценна», г. Курск.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы: теории биотехнических систем медицинского назначения, математической статистики, теории управления, математического моделирования, теории нейронных сетей, теории нечетких множеств. При разработке нейросетевых моделей и модулей нечеткого логического вывода в качестве инструментария использовался MATLAB 2008b с графическим интерфейсом пользователя для Neural Network Toolbox и со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox.

Положения, выносимые на защиту. 1. Пространство информативных признаков для классификации ишемических рисков, отличающееся использованием трёх групп предикторов, оценивающих различные уровни регулирования сердечно-сосудистой системы, позволяет синтезировать надёжно работающие решающие правила с минимальным набором исходных данных; 2. Метод оперативного контроля развития ишемии сердца по результатам анализа динамических электрических характеристик биологически активных точек меридиана сердца при электрических возмущающих нагрузках позволяет оперативно и с высокой степенью точности контролировать развитие ишемических процессов; 3. Метод дублирования решений с ассоциативным выбором позволяет повысить диагностическую эффективность автоматизированной диагностики ишемических рисков на 10...16% по сравнению с известными методами; 4. Алгоритм ассоциативного выбора решений в дублирующих каналах позволяет повысить диагностическую эффективность автоматизированной диагностики ишемических рисков на 8% по сравнению с принятием решений в отдельных дублирующих каналах.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость нечетким алгоритмам принятия решений и методам нейросетевого моделирования, а также аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Результаты экспериментальных исследований решающих правил по прогнозированию ишемических рисков согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 15 Международных, Всероссийских конференциях, конгрессах и семинарах: «Современные информационные технологии в управлении качеством» (Пенза – 2016); «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», (Новороссийск –2017, 2018); «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии» (Саратов – 2017); «Актуальные вопросы неврологии и соматоневрологии» (Пенза – 2017); «Актуальные направления научных исследований XXI века» (Воронеж – 2017); «Медико-экологические информационные технологии» (Курск – 2017, 2019); «Перспективы и технологии развития в области технических наук» (Нижний Новгород – 2018); «Современные направления развития управления, экономики и образования» (Пенза – 2018); «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир–Суздаль – 2018); Proceedings of articles the III International scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary - Russia, Moscow, 2018; «Международный Славянский конгресс по электростимуляции и клинической электрофизиологии сердца (Санкт-Петербург-2018); «Мотивационные аспекты физической активности» (Великий Новгород – 2019); «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования» (Тамбов – 2019); на семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск – 2016-2019).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 19 научных работах, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, включающего 136 отечественных и 36 зарубежных наименований. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяются цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе показана актуальность процедуры прогнозирования в медицине, рассмотрены способы определения ишемических рисков и их недостатки, показана возможность и перспективы использования нечеткого логического вывода для определения функционального состояния органов и систем человека, рассмотрены примеры компьютерных диагностических систем медицинского назначения.

В заключении первого раздела формулируются цель и задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке математических моделей ишемических рисков, предназначенных для построения автономных интеллектуальных агентов (АИА) нижнего иерархического уровня.

С учетом структуры данных в качестве базового математического аппарата была выбрана нечеткая логика принятия решений. На первом этапе

исследований экспертами было отобрано более 100 признаков, состав которых был минимизирован с использованием методов экспертного оценивания, статистической мерой Кульбака в сочетании моделью Г. Раша и метода группового учета аргументов. В ходе минимизации было сформировано **пространство информативных признаков**, которое эксперты разбили на три блока, позволяющих описывать различные аспекты риска ИБС: 1) данные опросов, осмотров, лабораторных инструментальных исследований; 2) параметры компьютерных электрокардиологических исследований; 3) параметры, характеризующие энергетические характеристики меридианных структур организма, «связанных» с сердечно-сосудистой системой (ССС).

В первый блок признаков вошли такие показатели как: степень тяжести развития ишемического процесса в центральной гемодинамической системе (ЦГС); показатель степени риска развития ИБС по группе гемодинамических показателей (SR); показатель перекисного окисления липидов (ПОЛ); показатель антиокислительной активности (АОА), показатель степени риска появления и развития ИБС по энергетическому разбалансу биологически активных точек (БАТ), «связанных» с заболеванием сердца (SRB); уровень психоэмоционального напряжения (YP); уровень функционального резерва (YF); время сегрегированной (BC) критической ишемии в месяцах (X_2); интенсивность болевого синдрома сердца (баллы) (X_3), амплитуда T зубца; (X_4) смещение сегмента ST относительно изолинии (X_5); концентрация креатинфосфокиназы (X_6); концентрация тропанина T (X_7).

Аналогично сформированы два других блока информативных признаков.

В сформированном пространстве информативных признаков были синтезированы математические модели **прогнозирования и развитие и оценки степени тяжести ИБС**.

С учетом того, что все факторы риска отбирались экспертами таким образом, чтобы отклонение каждого из них от номинального состояния увеличивало риск развития ИБС, интегральный показатель степени риска появления и развития исследуемой патологии оценивается модифицированной формулой Е. Шортлифа:

$$ISR(q+1) = ISR(q) + \mu_{ИБС}(S_{i+1})[1 - ISR(q)], \quad (1)$$

где $\mu_{ИБС}(S_{i+1})$ - функция принадлежности к классу высокий риск развития ИБС с базовой переменной S_{i+1} ; $ISR(1) = \mu_{ИБС}(S_1)$; $S_1 = ЦГС$; $S_2 = SR$; $S_3 = \delta x_{II}$; $S_4 = \delta x_A$; $S_5 = SRB$; $S_6 = YP$; $S_7 = YF$.

По показателям перекисного окисления липидов (ПОЛ) и антиокислительной активности (АОА) в качестве базовых переменных определены величины отклонения ПОЛ и АОА от их номинальных значений. То есть:

$$\delta x_{II} = \frac{x_{II}^H - x_{II}^T}{x_{II}^H} 100\%, \quad \delta x_A = \frac{x_A^H - x_A^T}{x_A^H} 100\%,$$

где x_{II}^H и x_A^H - ПОЛ и АОА, измеренные на репрезентативной группе здоровых людей; x_{II}^T и x_A^T - ПОЛ и АОА у обследуемого пациента.

В ходе математического моделирования и проверке на контрольной выборке показано, что при пороге в 0,6 уверенность в правильном принятии решения о развитии ИБС превышает величину 0,9.

Для прогнозирования исходов ИБС и выбора рациональных схем профилактики лечения в работе получена модель оценки степени тяжести исследуемого заболевания в виде итерационной формулы

$$ST_c(p+1) = ST_c(p) + f_c(X_{p+1})[1 - ST_c(p)] \quad (2)$$

где ST_c - степень тяжести ИБС; $f_c(X_{p+1})$ - функция степени тяжести ИБС по показателю X_{p+1} ; $ST_c(1) = f_c(X_1)$; X_1 - ЦГС.

На базовой переменной ST_c получены четыре функции принадлежности $\mu_\ell(ST_c)$ к таким классам состояний как: ω_n - нормальное состояние; ω_λ - латентное состояние; ω_p - реверсивное состояние; ω_k - критическое состояние (с=н, л, р, к).

В ходе математического моделирования и экспертизы по методу Делфи было показано, что уверенность в правильной классификации с использованием предлагаемых моделей составляет 0,95, что является хорошим результатом для исследуемого класса задач.

С целью повышения качества ведения больных с ИБС предложен **метод оперативного контроля за динамикой развития ишемии сердца по энергетическому разбалансу меридианных структур.**

В соответствии с этим методом уровень функционального состояния (ФС) ССС по энергетическому разбалансу биологически активных точек (БАТ) определяется по формуле:

$$\text{ЕСЛИ } [\delta R_{C7} > 15\%] \text{ И } (\delta R_{C9} > 15\%) \text{ ТО } \{UFS(j+1) = UFS(j) + UFSB(\delta R_{j+1})[1 - UFSB(j)]\} \text{ ИНАЧЕ } (UFS = UFS^*), \quad (3)$$

где UFS^* - величина, характеризующая минимальное значение уровня ФС; $UFSB(\delta R_{j+1})$ - уровень ФС, определяемый по точке с номером j+1; δR_{j+1} - величина относительно отношения БАТ от номинального значения в %.

Для сердечно-сосудистой системы $UFS^* = 0,9$; $UFS(1) = UFSB(\delta R_{C4})$; $\delta R_2 = \delta R_{C6}$; $\delta R_3 = \delta R_{C7}$; $\delta R_4 = \delta R_{C8}$; $\delta R_5 = \delta R_{C9}$.

Одним из признаков, характеризующих устойчивость органов и систем к появлению и развитию заболеваний, включая ССС, является соответствующий функциональный резерв, который может быть определен по энергетической реакции БАТ на дозированное электрическое возмущение.

С учетом особенностей исследуемого заболевания традиционно используемую нагрузку предлагается заменить на электрическую нагрузку, подаваемую как физический «противоток» естественному току энергии меридиана сердца. В качестве тормозящей нагрузочной пробы выбираются

однополярные прямоугольные импульсы частотой 80 Гц с регулируемой длительностью, заполняемые частотой 700 кГц амплитудой 2V.

Базовую переменную для оценки величины функционального резерва по электрическому разбалансу БАТ предлагается определять по формуле:

$$Z = \frac{UFS^0 - UFS^N}{UFS^0} \quad (4)$$

где UFS^0 – уровень оценки функционального состояния до нагрузки, UFS^N – после нагрузки.

Уровень функционального резерва вычислялся как:

$$UFR = -2Z + 1. \quad (5)$$

По показателям UFS и UFR текущее состояние пациента с ИБС по энергетике БАТ оценивалась выражением:

$$SI = UFS + UFR - UFS \cdot UFR. \quad (6)$$

По блоку параметров компьютерных электрофизиологических исследований получена математическая модель ишемического риска, основанная на анализе ишемических эпизодов электрокардиосигнала, отличающаяся алгоритмом морфологического анализа электрокардиосигнала, алгоритмом классификации кардиоциклов на ишемический и не ишемический, алгоритмом классификации ишемических окон и алгоритмом определения ишемических эпизодов, позволяющий формировать пространство информативных признаков для дублирующих классификаторов автоматизированной системы прогнозирования ишемических рисков.

С учётом сформированных групп ИП и структур полученных данных, при разработке автоматизированной системы по прогнозу ИБС используется мультиагентная концепция поддержки принятий решений с тремя автономными интеллектуальными агентами (АИА) на нижнем уровне. Каждый агент выступает в качестве эксперта по риску ИБС с вынесением уверенности по трем группам предикторов $KV1$ (показатели ISR (1), ST_c (2)), $KV2$ (показатели SI ((6) и SRB из (1)), $KV3$ (параметры компьютерных электрокардиографических исследований).

Структурная схема АИА нижнего иерархического уровня, предназначенных для организации автоматизированной системы прогнозирования ИБС, представлена на рисунке 1. Схема включает три решающих модуля, на входы которых подаются ИП из соответствующих групп, полученные от объектов с известным риском ИБС в режиме обучения или от неизвестного образца в режиме классификации. Используя формирователь обучающих выборок для АИА верхнего иерархического уровня, строится таблица объект-признак для обучения классификаторов верхнего иерархического уровня.

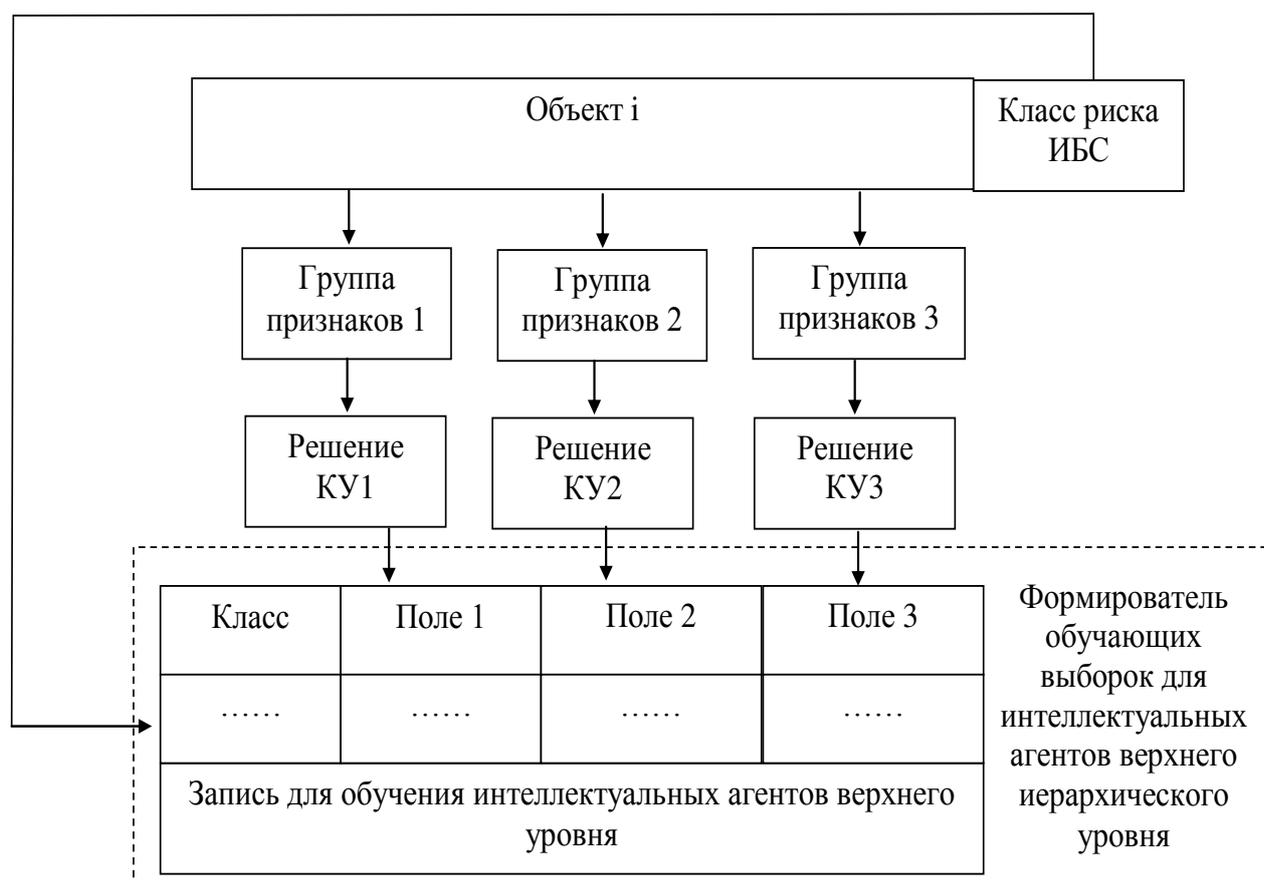


Рисунок 1 - Структурная схема интеллектуальных агентов нижнего иерархического уровня

В разделе 3 разработана структурно-функциональная модель принятия решений по прогнозу ишемического риска, включающая два канала дублирующих решений и третий канал ассоциативного выбора, позволяющая выбрать лучший вариант из двух классификаторов риска, построенных на различных парадигмах.

Сущность метода дублирования решений с ассоциативным выбором состоит в том, что решение принимается на основе анализа решений двух независимых экспертов, построенных на основе парадигм нейросетевого моделирования и нечеткого логического вывода. Структурно функциональная схема модели принятия решений по прогнозу рецидива ИБС представлена на рисунке 2.

Метод принятия решений, реализуемый представленной моделью, отличается тем, что анализ решений классификаторов нижнего иерархического уровня осуществляется посредством двух каналов, реализованных на нейросетевой модели и посредством блока нечеткого логического вывода (БНЛВ). Эти решения поступают на схему квазинечёткого «ИЛИ», посредством которой выбирается наиболее подходящее решение.

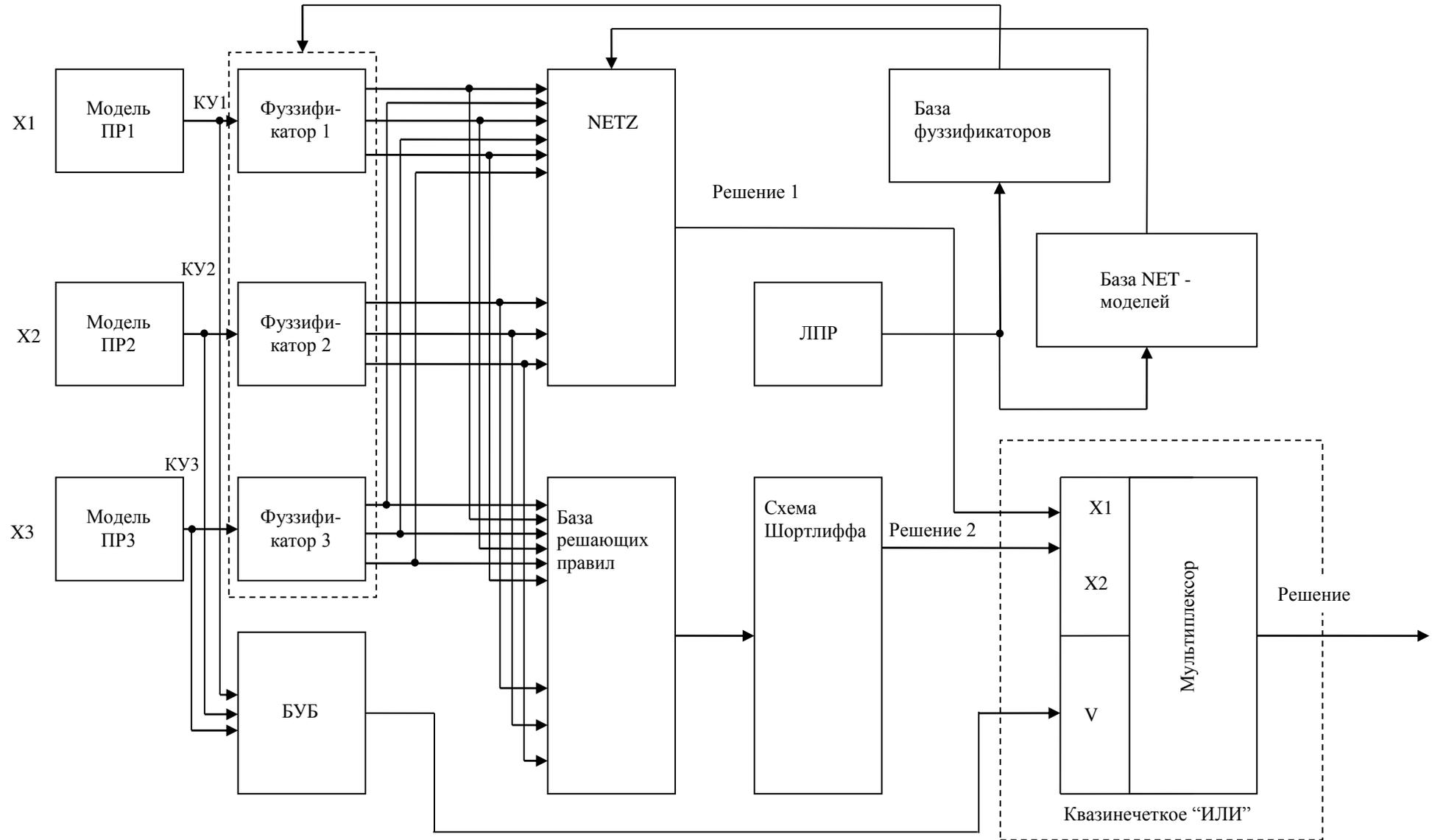


Рисунок 2– Структурно-функциональная схема модели принятия решений по прогнозу ишемического риска

«Решение1» принимает обучаемая НС. На ее входы подаются девять лингвистических переменных, поступающих с трех фуззификаторов. $X = X1 \cup X2 \cup X3$. Фуззификаторы преобразуют четкие числа триады $\{КУ1, КУ2, КУ3\}$ в соответствующие лингвистические переменные. Значение этих лингвистических переменных определяется по соответствующим функциям принадлежности. Построив фуззификаторы для трех моделей, настраиваем нейронную сеть NET на обучающей выборке, представленной множеством

На основе программной оболочки, разработанной на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ, разработано алгоритмическое программное обеспечение для синтеза нейросетевых моделей канала «Решение 1» и для нечёткого логического вывода канала «Решение 2».

Разработан алгоритм ассоциативного выбора решений, который используется в блоке управления бустингом (БУБ), отличающийся формированием обучающей выборки для классификатора дублирующих каналов на основе результатов классификации дублирующих каналов на контрольной выборке, позволяющий синтезировать классификатор дублирующих каналов.

Алгоритмы ассоциативного выбора решений заключается в следующем:

1. Формируется обучаемый классификатор, желательно построенный на парадигме, отличной от парадигмы, используемых в классификаторах, используемых в каналах «Решение 1» и «Решение 2».

2. Формируется контрольная выборка для классификаторов «Решение 1» и «Решение 2».

3. По результатам классификации по контрольной выборке формируется множество целей переменной ass :

$$ass_i = \begin{cases} 0 & \text{при } d1_i \geq d2_i; \\ 1 & \text{при } d2_i > d1_i, \end{cases} \quad (7)$$

где $d1_i = |D_i - Y1_i|$, $d2_i = |D_i - Y2_i|$, D_i - цель для i -го образца, $Y1_i$ - выход канала 1 для i -го образца, $Y2_i$ - выход канала 2 для i -го образца.

4. Формируем новую обучающую выборку для классификатора дублирующих каналов путем объединения множества $\{КУ1_i, КУ2_i, КУ3_i\}$ и множества $\{ass_i\}$, где элементы первого множества являются независимыми переменными, а элемент второго множества являются множеством элементов цели.

5. Настраиваем классификатор дублирующих каналов по обучающей выборке $\{КУ1_i, КУ2_i, КУ3_i\} \cup \{ass_i\}$ при $i = \overline{1, M}$, где M – число образцов в контрольной выборке, используемой для формирования множества (7).

Разработан классификатор дублирующих каналов, отличающийся формированием базовых элементов в пространстве $[\{КУ1, КУ2, КУ3\} + 1]$ с

последующим их альтернативным наращиванием посредством использования линейного дискриминантного анализа Фишера, позволяющий осуществить альтернативный выбор дублирующих решений.

Для аппроксимации пространства $\{KY1, KY2, KY3, Y\}$ используется аппроксимирующая функция:

$$Y = F (KY1, KY2, KY3), \quad (8)$$

состоящая из суперпозиции функции вида:

$$\{Z_i = a_0^i + a_1^i KY1 + a_2^i KY2 + a_3^i KY3\} . \quad (9)$$

В силу нелинейности (8) зависимости (9) строятся для некоторой области i аргументов $\{KY1^i, KY2^i, KY3^i\}$, в которой с заранее установленной погрешностью выражение (8) может быть адекватно приближению линейной зависимости (8). Таким образом, задача построения БУБ сводится к построению алгоритма кусочно-линейной аппроксимации нелинейной зависимости в четырехмерном пространстве.

Набор аппроксимирующих функций строится последовательно, для обучающих образцов, образующих в многомерном пространстве выпуклые области (базовые элементы), а с поступлением новых наблюдений корректируется в соответствии с алгоритмом, включающим следующую последовательность действий:

1) на основе серии экспериментов определить первый базовый элемент в пространстве данных и включить соответствующие ему точки в базу обучающих образцов, то есть определяем четыре точки в пространстве (8) и строим гиперчетырехугольник;

2) провести новый эксперимент и получить новые данные, следующую точку в четырехмерном пространстве;

3) проверить условие попадания новых данных в область базовых элементов;

4) если новые данные выходят за пределы области базовых элементов, добавить их в базу обучающих образцов и сформировать новую совокупность базовых элементов, расширяя, таким образом, область покрытия функции (8) и перейти к п. 2 алгоритма;

5) если новые данные попадают в область базовых элементов, то провести оценку адекватности базы обучающих образцов по новым данным;

6) если база обучающих образцов адекватна новым данным, то перейти к п. 2 алгоритма;

7) если база обучающих образцов неадекватна новым данным, включить их в базу и провести ее разбиение на новые базовые элементы с учетом этих данных;

8) перейти к п.2 алгоритма и т.д. до обработки всей совокупности таблицы ‘объект – признак’.

Экспериментальные данные представляют собой точки в четырехмерном пространстве, поэтому для построения моделей (9)

необходимо не менее четырех таких точек. Для определения уравнения гиперплоскости используем одно из уравнений множества (9). Из этого множества образуем базовые элементы, которые назовем гиперчетыреугольниками, покрывающие область построения модели (область, определяемую тремя первыми и последним столбцами таблицы экспериментальных данных). При добавлении нового образца из таблицы экспериментальных данных необходимо проверить его попадание в область базовых элементов уже созданных на основе предшествующих данных таблицы. Существует несколько решений такой задачи (методы трассировки луча; суммирование углов; подсчета числа оборотов границы и др.).

В диссертации используется упрощенный способ ее решения, который базируется на свойстве выпуклых многоугольников. Если некоторая точка P_{1234}^0 не принадлежит к области, ограниченной выпуклым гипермногоугольником P_1, P_2, P_3, P_4 , то она всегда может быть разделена с ним в пространстве линией (гиперплоскостью) f-f.

В четвертом разделе разработана структурная схема автоматизированной системы прогнозирования ишемических рисков, включающая систему управления базами данных, ЭВМ и интерфейсные модули, отличающаяся наличием базы математических моделей ишемического риска, как на верхнем, так и на нижнем иерархических уровнях принятия решений, что позволяет ЛПР модифицировать модели и критерия решения в зависимости от доступных исходных данных и осуществить дублирование решений с ассоциативным выбором.

Разработано программное обеспечение для формирования математических моделей прогноза ишемического риска, основанных на анализе ишемических окон и ишемических эпизодов в электрокардиосигнале, и нейросетевых моделях классификации кардиоциклов, отличающиеся моделями и алгоритмом формирования информативных признаков, основанными на морфологическом анализе электрокардиосигнала, позволяющее построить автономные интеллектуальные агенты для принятия решения на нижнем иерархическом уровне по третьему блоку информативных признаков.

Разработано программное обеспечение для формирования моделей ишемического риска, основанных на нечетком логическом выводе, отличающееся интерфейсными окнами и интерактивным управлением формированием и агрегированием правил нечеткой продукции и функций принадлежности, позволяющие синтезировать модель классификации ишемического риска для канала «Решения 2».

Проведены экспериментальные исследования показателей предложенных моделей принятия решений в автоматизированной системе по прогнозированию ишемических рисков. Для оценки качества прогноза ИР определялись диагностические показатели автоматизированной системы при работе в следующих режимах: канал «Решение 1», канал «Решение 2»,

работа системы с ассоциативным выбором каналов. В качестве известного метода прогноза ИР, по сравнению с которым осуществлялось сравнение показателей качества прогнозирования, выбрана шкала SCORE.

Для оценки эффективности принимаемых решений сравнивали результаты прогнозирования ИБС посредством разработанных методов: «Решение 1», «Решение 2» и ассоциативный выбор решений, и двумя известными методами: шкалой SCORE и системой прогнозирования на основе метода миннесотского кодирования и нечеткой логики принятия решений, для одних и тех же контрольных выборках.

Интегральные показатели качества прогнозирования ИБС посредством разработанных и известных методов приведены на диаграммах, представленных рисунке 3.

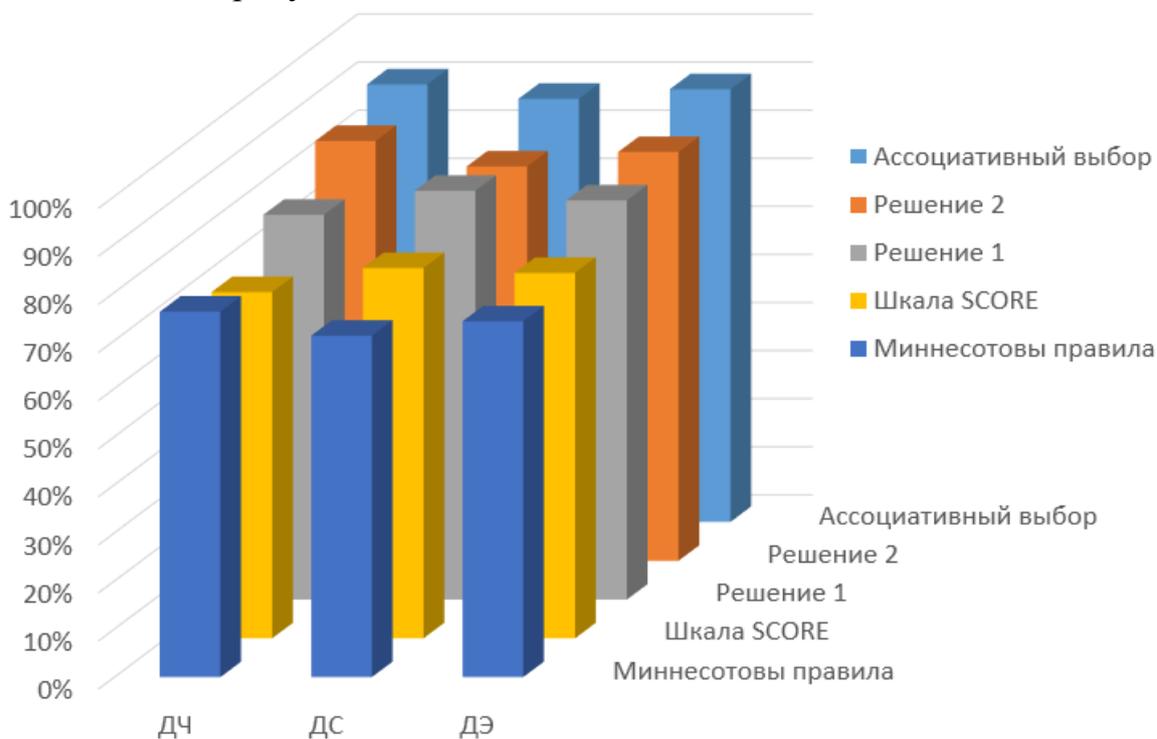


Рисунок 3 – Сравнительная характеристика показателей качества предложенных и известных методов принятия решений

Сравнение результатов прогнозирования модуля классификации с дублирующими решениями и ассоциативным выбором с известными прогностическими моделями показало, что по показателям диагностической эффективности модели с ассоциативным выбором превосходит известные на 10...16%, а использование ассоциативного выбора и дублирующих каналов позволяет повысить диагностическую эффективность на 8% по сравнению с диагностической эффективностью в отдельных дублирующих каналах.

Контрольные испытания показали, что использования прогностической модели рисков ИБС на основе миннесотских кодов и нечеткой логики принятия решений позволяет получить ДЧ = 77%, ДС = 76%, ДЭ = 76,6%.

Анализ диаграмм на рисунке 10 показывает, что качество принятия решений решающих правил, основанных на предложенных методах, близки к экспертным оценкам. При этом показатели качества классификатора с ассоциативным выбором выше на 8% показателей качества классификаторов в двух каналах. При этом по основным показателям качества классификации: диагностической чувствительности, диагностической специфичности и диагностической эффективности предложенные методы превосходят известные на 10...16%.

Полученные сравнительные характеристики экспертных оценок риска ССО и предлагаемых моделей интеллектуальных систем позволяют рекомендовать полученные технические и алгоритмические решения для практического использования в системах прогнозирования ИБС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Выбрано и обосновано пространство информативных признаков для прогнозирования ишемической болезни сердца, включающее три информационных блока, построенных на традиционных факторах риска, на предикторах, характеризующих энергетические характеристики биоактивных точек, и на основе анализа ишемических окон и ишемических эпизодов в электрокардиосигнале, что позволило синтезировать математические модели автономных интеллектуальных агентов нижнего иерархического уровня, предназначенных для построения классификаторов верхнего иерархического уровня автоматизированной системы прогнозирования ишемических рисков.

2. Разработана структурно-функциональная модель принятия решений по прогнозу ишемического риска, включающая два канала дублирующих решений и третий канал ассоциативного выбора решений, позволяющая выбрать лучший вариант из двух классификаторов риска, построенных на различных парадигмах.

3. Разработан метод дублирования решений с ассоциативным выбором, предназначенный для автоматизированной системы прогнозирования ишемической болезни сердца, включающий:

- математические модели для определения ишемических рисков по трем группам информативных признаков на нижнем иерархическом уровне принятия решений;

- алгоритмическое обеспечение для синтеза нейросетевых моделей и для нечёткого логического вывода;

- алгоритм ассоциативного выбора решений, позволяющий синтезировать классификатор дублирующих каналов;

- классификатор дублирующих каналов, позволяющий осуществить ассоциативный выбор дублирующих решений.

4. Проведены экспериментальные исследования показателей качества принятия решений в автоматизированной системе прогнозирования ишемических рисков. Сравнение результатов прогнозирования решающего модуля с дублирующими решениями и ассоциативным выбором с известными прогностическими моделями показало, что по показателям диагностической эффективности модели с ассоциативным выбором превосходят известные на 10...16%, а использование ассоциативного выбора и дублирующих каналов позволяет повысить диагностическую эффективность на 8% по сравнению с диагностической эффективностью в отдельных дублирующих каналах.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для построений интеллектуальных систем поддержки принятия решений по прогнозированию риска сердечно-сосудистых заболеваний и их осложнений.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка методов и алгоритмов мониторинга эффективности лечебно-оздоровительных мероприятий при сердечно-сосудистых осложнениях.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК
Минобрнауки России*

1. Корневский, Н.А. Микропроцессорная система для оценки психофизиологических параметров человека [Текст] / Н.А. Корневский, И.И. Хрипина, **И.А. Комлев** и др. // Биотехносфера. – 2018. – №1 (55). – С. 28-31.

2. Быков, А.В. Прогнозирование развития критического состояния кровообращения сердца на основе нечетких моделей [Текст] / А.В. Быков, С.Н. Корневская, **И.А. Комлев** и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2018. – №1 (26). Том 8. – С. 74-87.

3. **Комлев, И.А.** Прогнозирование и оценка степени тяжести ишемии сердца на основе гибридных нечётких моделей [Текст] / И.А. Комлев, О.В. Шаталова, С.В. Дегтярев и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – №1 (30). Том 9. – С. 133-145.

Статьи и материалы конференций

4. Канищев, И.И. Модели электрического сопротивления биоматериалов в аномальных зонах проводимости при циклическом изменении зондирующего тока [Текст] / И.И. Канищев, **И.А. Комлев**, О.В. Шаталова // Современные информационные технологии в управлении качеством: сборник статей V Международной научно-прикладной конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2016. – С.51-55.

5. **Комлев, И.А.** Динамические модели для прогнозирования профессиональных заболеваний [Текст] / **И.А. Комлев**, О.В. Шаталова //

Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте: труды XXV Международной конференции. – Новороссийск: РИО ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2017. – С. 94-95.

6. **Комлев, И.А.** Параметрические модели биоимпеданса в аномальных зонах проводимости [Текст] / И.А. Комлев // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии: сб. материалов VI Всерос. науч. конф. для молодых ученых, студентов и школьников. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 173-175.

7. Мухатаев, Ю.Б. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по прогнозированию инсультов [Текст] / Ю.Б. Мухатаев О.В. Шаталова, **И.А. Комлев** // Актуальные вопросы неврологии и соматоневрологии: сборник статей Международной научно-прикладной конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2017. – С. 62 -67.

8. Жилин, В.В. Прогнозирование артериальной гипертензии на основе гибридных нечетких моделей, учитывающих энергетические характеристики биоактивных точек [Текст] / В.В. Жилин, **И.А. Комлев**, Е.А. Старцев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам заочной научно-практической конференции. №10 (36). – Воронеж: ВГЛТУ, 2017. – С. 194 - 197.

9. **Комлев, И.А.** Модель четырехпроходной вольт-амперной характеристики биоматериалов [Текст] / И.А. Комлев // Медико-экологические информационные технологии: сборник материалов XX Международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2017. – С. 144 - 146.

10. Петрова, Т.В. Автономные интеллектуальные агенты в мониторинге эффективности лекарственных назначений [Текст] / Т.В. Петрова, **И.А. Комлев**, Д.Ю. Савинов // Перспективы и технологии развития в области технических наук: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. №3. – г. Нижний Новгород, 2018. – С. 59-62.

11. **Комлев, И.А.** Теоретико-множественная модель структурирования обучающей выборки, построенного на основе обучения агентов – спутников на фрагментах данных [Текст] / И.А. Комлев, Т.В. Петрова, О.В. Шаталова, // Современные направления развития управления, экономики и образования: сборник статей Международной научно-прикладной конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2018. – С. 109 -112.

12. **Комлев, И.А.** Интернет-интерьеры для мета-анализа эффективности лекарственных назначений и терапевтических процедур [Текст] / И.А. Комлев, Т.В. Петрова, Д.Ю. Савинов// 13-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2018» – Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, Книга 1. 2018. – С.349-354.

13. Петрова, Т.В. Инструментальные средства интернет-технологий для мета-анализа эффективности лекарственных назначений [Текст] / Т.В. Петрова, **И.А. Комлев**, Д.Ю. Савинов // Scientific Discoveries: Proceedings of articles the III International scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary - Russia, Moscow, 2018, January, 30-31 [Electronic resource]. – С.84-86.

14. Быков, А.В. Интеллектуальная система выбора схем профилактики и лечения при сочетанной ишемической патологии [Текст] / А.В. Быков, С.Н. Кореневская, **И.А. Комлев** и др. // Сборник тезисов XIII Международного Славянского конгресса по электростимуляции и клинической электрофизиологии сердца «КАРДИОСТИМ-2018». – СПб., 2018. – С. 58.

15. **Комлев, И.А.** Интеллектуальная система прогнозирования ишемических инсультов на основе мультиагентных принципов [Текст] / И.А. Комлев, Д.Ю. Савинов, Е.С. Шкатова // Сборник тезисов XIII Международного Славянского конгресса по электростимуляции и клинической электрофизиологии сердца «КАРДИОСТИМ-2018». – СПб., 2018. – С. 202.

16. **Комлев, И.А.** Прогнозирование развития сердечных катастроф на основе анализа нечетких моделей данных [Текст] / И.А. Комлев // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте: труды XXVI Международной конференции. – Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2018. – С. 105-106.

17. **Комлев, И.А.** Гибридные нечёткие модели оценки степени тяжести ишемии сердца [Текст] / И.А. Комлев, Д.С. Забанов, М.Б. Мяснянкин и др. // «Мотивационные аспекты физической активности»: Материалы III Всероссийской Междисциплинарной конференция студентов, молодых ученых и преподавателей. - НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2019. – С.42-49.

18. **Комлев, И.А.** Метод дублирования решений с ассоциативным выбором для классификации ишемических рисков [Текст] / И.А. Комлев, Д.В. Титов // Вестник научных конференций. – 2019. – N 5-3(45). – С. 31-32.

19. **Комлев, И.А.** Математические модели оценки уровня психоэмоционального напряжения в гетерогенных классификаторах риска сердечно-сосудистых осложнений [Текст] / И.А. Комлев, Д.В. Титов, А.В. Киселев и др. // Медико-экологические информационные технологии: сборник научных статей по материалам XXII Международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2019. – С. 194 - 201.

Подписано в печать __.__.2019 г. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № ____

Юго-Западный государственный университет,

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Отпечатано в ЮЗГУ