

на правах рукописи

Титова Анна Владимировна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ЗАБОЛЕВАНИЙ, ПРОВОЦИРУЕМЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАДИОЧАСТОТНОГО
ДИАПАЗОНА, НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Курск – 2022

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

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
Корневский Николай Алексеевич

Официальные
оппоненты: **Чопоров Олег Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
Воронежский государственный технический университет,
кафедра систем информационной безопасности, профессор
(г. Воронеж)

Коржук Николай Львович
кандидат технических наук, доцент, Тульский
государственный университет, кафедра приборов и
биотехнических систем, профессор (г. Тула)

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования **«Поволжский
государственный технологический университет»**
(г. Йошкар-Ола)

Защита состоится «3» июня 2022 года в 11⁰⁰ часов на заседании
объединенного диссертационного совета Д 99.2.029.03, 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: [https://swsu.ru/upload/
iblock/f79/ax53unu038k0809oobdqdmjtxbblduc/Dissertatsiya-A.V.Titova.pdf](https://swsu.ru/upload/iblock/f79/ax53unu038k0809oobdqdmjtxbblduc/Dissertatsiya-A.V.Titova.pdf)

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследованию влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМПРЧ) посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых. Причем основная масса этих работ посвящена исследованию влияния электромагнитных полей (ЭМП) с высокоинтенсивной энергетической экспозицией на здоровье человека. Для такого типа ЭМП установлены их опасные уровни, требующие проведения социально-гигиенических мероприятий, направленных на предупреждение появления и развития профессиональных заболеваний (Городецкий В.Н., Григорьев Ю.Г., Мясоедова М.А., Пальцев Ю.П., Пресман А.С).

Вредное воздействие электромагнитных полей малой интенсивности подтверждается многочисленными исследованиями, но научно-обоснованных мероприятий, ориентированных на ограничения этого воздействия, практически не разработано, причем получение соответствующих моделей оценки состояния здоровья, меняющегося под воздействием ЭМПРЧ, значительно осложняется тем, что в реальных условиях организм человека чаще всего подвергается сочетанному и смешанному воздействию ЭМП различных частотных диапазонов и различной интенсивности в сочетании с другими экзогенными и эндогенными факторами риска, способствующими появлению и развитию заболеваний, трудно поддающимися достаточно точному количественному анализу (Городецкий В.Н., Григорьев Ю.Г., Корневский Н.А., Мясоедова М.А., Пресман А.С., Филист С.А.).

Одним из эффективных методов повышения качества оказания медицинской помощи людям, находящимся под вредным воздействием ЭМПРЧ, является раннее обнаружение и определение характера начинающихся патологических процессов с последующей оптимизацией схем профилактики и лечения профессиональных заболеваний исследуемого контингента работников. При этом, как показал анализ отечественной и зарубежной литературы, проблемам эффективного решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний, провоцируемых воздействием ЭМПРЧ, особенно малой интенсивности, в современной научной литературе уделяется недостаточно внимания.

С учетом сказанного разработка и исследование методов прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых воздействием ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими разнородными факторами риска, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Анализ работ, посвященных исследованию влияния производственных факторов риска, включая ЭМПРЧ, на состояние здоровья, показал, что наиболее часто используются два подхода: по гигиеническим критериям, основанным на

сравнении параметров ЭМП, действующих на обследуемого с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) и по медико-биологическим критериям, в основе которых лежит индекс заболеваемости.

Для построения такого типа моделей требуются хорошо проверенные статистические данные с подтвержденными диагнозами по заболеваниям, вызываемым действием исследуемых факторов риска, что создает определенные сложности при синтезе надежно «работающих» решающих правил для прогнозирования и выявления ранних стадий исследуемых классов заболеваний.

Кроме этого, большинство информативных признаков, включая разнородные по своей природе факторы риска, характеризуются нечеткой природой с пересекающейся и плохо формализуемой структурой классов. Такая структура данных значительно затрудняет использование классических нейросетевых технологий и технологии Big Data, которые предполагают наличие априори размеченных экспертами репрезентативных обучающих выборок.

В реальных задачах прогнозирования и ранней диагностики такая разметка практически невозможна в силу того, что в современной медицине сложно установить четкие границы между здоровьем и болезнью, между предболезнью и болезнью.

В таких условиях рекомендуется использовать методы мягких вычислений и, в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) (Корневский Н.А., Филист С.А., Устинов А.Г., Быков А.В.).

В рамках МСГНРП под управлением инженера-когнитолога реализуется объединение клинического мышления врачей специалистов с методами искусственного интеллекта (ИИ). Клиническое мышление, являясь носителем опыта, знаний и интуиции врачей, компенсирует недостаток статистического материала, позволяя строить достаточно точные аналитические модели для плохоформализуемых задач. Инженер-когнитолог, используя данные разведочного анализа, подбирает математические модели, адекватные структуре данных решаемых задач. Взаимодействие естественного интеллекта клиницистов с элементами ИИ реализуется в рамках методической части МСГНРП. Такой подход даёт возможность создавать качественно новые экспертные системы (ЭС), позволяющие решать более широкий круг задач повышения качества ведения пациентов в условиях неполноты и неопределённости исходных данных.

Цель работы. Повышение качества принятия решения о состоянии здоровья людей, заболевания которых вызываются электромагнитными полями радиочастотного диапазона в сочетании с разнородными факторами риска за счет разработки методов, гибридных нечетких моделей и алгоритма прогнозирования и диагностики исследуемого класса заболеваний, реализуемых соответствующей системой поддержки принятия решений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ структуры исходных данных и классов заболеваний, возникающих под воздействием ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими существенными факторами риска, и выбрать математический аппарат исследования.

2. Разработать метод синтеза гибридных нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых действием ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими разнородными производственными, природными и индивидуальными факторами риска.

3. Разработать метод оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние операторов энергонасыщенных систем.

4. Получить математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, вызываемых действием ЭМП радиочастотного диапазона различной частоты и напряженности.

5. Синтезировать математические модели оценки влияния ЭМП радиочастотного диапазона на функциональное состояние операторов энергонасыщенных систем.

6. Разработать структуру системы поддержки принятия решений для врачей, ведущих пациентов, заболевания которых вызываются ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими разнородными факторами риска, и соответствующий алгоритм управления процессами принятия решений.

7. Произвести апробацию предложенных методов и средств на репрезентативных контрольных выборках.

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

- метод синтеза гибридных нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых действием электромагнитных полей радиочастотного диапазона, отличающийся учетом различных составляющих электромагнитных полей, действующих на организм человека, его адаптационных и функциональных резервов в сочетании с разнородными факторами риска другой природы, позволяющий получать нечеткие гибридные математические модели, обеспечивающие требуемое для медицинской практики качество принимаемых решений;

- метод оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние операторов энергонасыщенных систем, отличающийся описанием исследуемых показателей на психологическом и физиологическом уровнях, причем на психологическом уровне используются свойства внимания и памяти, а на физиологическом

уровне – электрические характеристики биологически активных точек в сочетании с другими факторами риска;

- нечеткие гибридные математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у людей, подвергающихся вредному воздействию ЭМП радиочастотного диапазона, которые для задачи прогнозирования заболеваний нервной системы обеспечивают уверенность в правильном прогнозе не менее 0,9, а для задачи определения ранних стадий заболеваний – не ниже 0,95, что позволяет рекомендовать полученные результаты для внедрения в практическую медицину;

- нечеткие модели оценки влияния ЭМПРЧ на функциональное состояние операторов, подвергающихся воздействию исследуемого диапазона частот с уровнем доверия к предложенному типу решающих правил 0,9;

- система поддержки принятия решений с соответствующим алгоритмом управления, отличающаяся оригинальными гибридными нечеткими моделями, объединенными в иерархическую сетевую структуру и позволяющими управлять логикой организации лечебно-диагностического процесса в зависимости от индивидуальных особенностей организма, подвергающегося комбинированному воздействию различных по своей природе факторов риска, включая ЭМП радиочастотного диапазона, что позволило повысить качество медицинского обслуживания пациентов, подвергающихся воздействию исследуемых диапазонов ЭМП.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в развитии теории распознавания образов, нечеткой логики принятия решений, включая методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил при решении задач повышения качества ведения пациентов, подвергающихся действиям ЭМП радиочастотного диапазона в сочетании с другими разнородными производственными, природными и индивидуальными факторами риска за счет разработки нового направления в создании систем поддержки принятия решений (СППР) медицинского назначения.

Разработанные гибридные модели позволяют оценивать уверенность в прогнозе появления и развития заболеваний нервной системы у исследуемой категории пациентов, а также осуществлять оценку влияния ЭМПРЧ на функциональное состояние операторов, подвергающихся воздействию исследуемого диапазона частот.

Полученные в диссертации методы, модели и алгоритм используются в составе СППР, практическое применение которой повышает качество оказания медицинской помощи исследуемой категории пациентов.

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), в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий» и при финансовой поддержке гранта Юго-Западного государственного университета в рамках внутриуниверситетского конкурсного отбора.

Результаты работы внедрены в образовательный процесс Юго-Западного государственного университета при подготовке магистров по направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», на кафедре Военно-полевой терапии Военно-медицинской академии (г. Санкт-Петербург) и прошли испытания в «ООО Класс Клиник Орел» (г. Орел).

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, теории биотехнических систем медицинского назначения, моделирования, теории синтеза сложных информационных систем, теории алгоритмов, нечетких множеств, прикладной математической статистики, экспертного оценивания. При разработке гибридных нейросетевых модулей принятия решений в качестве инструментария использовался «Matlab 8.0» с графическим интерфейсом пользователя для «Neural Network Toolbox» со встроенным пакетом «Fuzzy Logic Toolbox».

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза гибридных нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых действием ЭМП радиочастотного диапазона, позволяет получить нечеткие гибридные математические модели, обеспечивающие повышение качества оказания медицинской помощи выбранной категории пациентов в условиях действия сочетанных и смешанных электромагнитных полей в сочетании с другими разнородными производственными, природными и индивидуальными факторами риска.

2. Метод оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние операторов эргонасыщенных систем обеспечил возможность синтеза соответствующих решающих правил с требуемой для практических приложений точностью.

3. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у людей, подвергающихся вредному воздействию ЭМП радиочастотного диапазона, обеспечили уверенность в правильном прогнозе не менее 0,9, а при наличии ранних стадий заболеваний нервной системы не ниже 0,95, а нечеткие модели оценки влияния ЭМПРЧ на функциональное состояние операторов, подвергающихся воздействию исследуемого диапазона частот, обеспечили уровень доверия к принимаемым решениям не хуже 0,9.

4. Система поддержки принятия решений с соответствующим алгоритмом управления позволяет управлять логикой организации лечебно-диагностического процесса в зависимости от индивидуальных особенностей

организма, подвергающегося комбинированному воздействию различных по своей природе факторов риска, включая ЭМП радиочастотного диапазона, что позволило повысить качество медицинского обслуживания пациентов подвергающихся воздействию исследуемых диапазонов ЭМП.

Степень достоверности и апробации работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, отсутствие противоречий относительно нечетких алгоритмов принятия решений и методов математического моделирования, а также аналогичных результатов, полученных другими исследователями. Результаты экспериментальных исследований решающих правил по прогнозированию и ранней диагностики заболеваний, вызываемых действием сочетанных и смешанных электромагнитных полей в сочетании с другими разнородными производственными, природными и индивидуальными факторами риска, согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на Международных и Всероссийских научных конференциях: 6-ой ВНК «Интеллектуальные информационные системы» (Курск, 2019); 5-ой НПК «Прикладная математика и информатика» (Тольятти, 2019); 15-ой МНТК «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений» (Курск, 2019); ВНК «Медиация в современном мире: проблемы и перспективы развития» (Курск, 2019); 2-ой МНК молодых ученых «Исторические, философские, методологические проблемы современной науки» (Курск, 2019); ВНТК «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2019); XXXII ВНТК «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – БИОМЕДСИСТЕМЫ-2019» (Рязань, 2019); 14-ой МНК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ 2020» (Владимир-Суздаль, 2020); 23-ей МНТК «Медико-экологические информационные технологии – 2020» (Курск, 2020); 26-ой МНТК «Расознавание – 2021» (Курск, 2021), а также на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии и кафедры программной инженерии ЮЗГУ (Курск, 2018-2022 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 13 научных работах, среди которых 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка литературы, включающего 103 отечественных и 28 зарубежных наименований. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков и 22 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе изучается влияние электромагнитных полей радиочастотного диапазона на появление и развитие заболеваний, провоцируемых этими полями. Анализируются возможности современных математических методов и информационных технологий для решения поставленных в работе задач и делается вывод о целесообразности использования технологии мягких вычислений и, в частности, методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (Корневский Н.А., Филист С.А., Шуткин А.Н.).

Во втором разделе определяются объект и методы исследования, раскрываются особенности использования методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний, возникающих и развивающихся под воздействием ЭМПРЧ, уточняются списки информативных признаков комплексных и интегральных показателей, необходимых для решения поставленных в работе задач.

В ходе проведенных исследований было установлено, что значительное число профессий связано с воздействием на организм человека совокупности сочетанных и смешанных ЭМП в сочетании с факторами риска, связанными с экологией, эргономикой и индивидуальными особенностями организма. В таких сложных условиях прямое применение методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил не обеспечивает качественного решения поставленных в работе задач. С учетом этого в рамках общих рекомендаций МСГНРП была поставлена задача разработки нового **метода синтеза гибридных нечетких моделей прогнозирования и диагностики заболеваний, провоцируемых воздействием ЭМП радиочастотного диапазона**, учитывающего специфику структуры данных и способов их обработки.

Предлагаемый метод реализуется следующей последовательностью действий.

1. Формируется экспертная группа, компетентная в области взаимодействия ЭМП с биообъектами и имеющая опыт синтеза гибридных нечетких решающихся правил. При необходимости решается задача подготовки экспертов к процессу синтеза нечетких решающих правил. Качественный и количественный состав группы выбирается в соответствии с требованиями квалиметрии.

2. В рамках выбранных для анализа радиочастотных диапазонов определяются диапазоны частот f_i , где наблюдаются схожие биологические эффекты с выбором соответствующих органов и систем мишеней. При этом необходимо учитывать, что электромагнитные поля радиочастотного диапазона «напрямую» воздействуют на нервную и иммунную системы

человека. Снижение иммунитета совместно с другими факторами риска с наибольшей вероятностью провоцируют заболевания сердечно-сосудистой системы, системы дыхания, желудочно-кишечного тракта, мочеполовой системы, а также появление и развитие онкологических заболеваний.

3. При наличии медико-технологических возможностей организуются дополнительные медико-биологические исследования с использованием независимых от принятых в работе диагностических методов и средств, включая аппаратуру для рефлексодиагностики и психофизиологических исследований, что позволяет провести углубленный разведочный анализ по исследованию структуры данных и сформировать рекомендации по синтезу прогностических и диагностических решающих правил.

При наличии обучающих выборок достаточного объема и выполнении методических ограничений в процессе обучения рекомендуется использовать нечеткую модификацию метода группового учета аргументов (МГУА), ориентированного на выявление нелинейных связей различных типов между исследуемыми диапазонами частот f , энергетическими экспозициями Q , временем воздействия T и исследуемыми классами состояний ω_ℓ . При этом каждый класс ω_ℓ описывается набором моделей M_{lrf} , M_{lrp} , M_{lri} , по которым вычисляются исследуемые модельные переменные:

$$f = M_{lrf}; Q = M_{lrg}; T = M_{lri}. \quad (1)$$

При переходе к нечеткой модификации МГУА относительно каждой полученной модели синтезируются функции принадлежности к исследуемым классам состояний ω_ℓ с базовой переменной, вычисляемой как расстояние между расчетными параметрами f , Q , T и этими же параметрами, определяемыми для анализируемой обстановки вокруг конкретного обследуемого f^* , Q^* , T^* .

Уверенность UEP_{ℓ_i} в появлении и развитии заболевания ω_ℓ определяется агрегацией соответствующих функций принадлежности по всем r моделям класса ω_ℓ

$$UEP_\ell = \max_r (\mu_{lr}(d_{lr})), \text{ где } d_{lr} = \sqrt{(f - f^*)^2 + (Q - Q^*)^2 + (T - T^*)^2}. \quad (2)$$

Если синтез моделей типа (2) осуществляется для нескольких диапазонов частот Δf_j , каждый из которых одинаково влияет на организм человека, то синтез моделей (2) выполняется для каждого диапазона без переменной f .

Использование МГУА для синтеза частных моделей типа (2) дает наиболее точные результаты, но процесс синтеза требует проведения продолжительной и трудоемкой исследовательской работы и наличия кадров соответствующей квалификации.

4. При отсутствии обучающих выборок достаточного объема базовым элементом решающих правил выбирается функция принадлежности $\mu_{\xi i}(z_{\xi i})$ к исследуемым классам ω_ℓ состояний с базовой переменной $z_{\xi i}$ для частотного

диапазона i , определяемой с учетом энергетической экспозиции электрической и магнитной составляющих и общего времени воздействия ЭМП i -того диапазона на организм человека. При условии, что исследуемые частотные диапазоны действуют на обследуемого одно и то же время t_e , базовую переменную для класса заболеваний ω_ℓ предлагается определять по формуле:

$$Z_\ell = f_\ell(Q) \cdot f_\ell^*(t_e), \quad (3)$$

где Q – показатели энергетической экспозиции для воздействующих ЭМП; $f_\ell(Q)$ – нормировочная функция степени влияния ЭМП исследуемых диапазонов на появление и развитие заболеваний ω_ℓ с областью определения $[0, \dots, 1]$; $f_\ell^*(t)$ – нормировочная функция степени влияния времени нахождения обследуемого под воздействием исследуемого диапазона частот ЭМП.

Для ЭМП частотного диапазона от 30 кГц до 300 мГц энергетическая экспозиция электрического ($\mathcal{E}\mathcal{E}_E$) и магнитного ($\mathcal{E}\mathcal{E}_H$) полей ЭМП одного частотного диапазона f_i определяется выражением:

$$Q = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_{Ei}}{\mathcal{E}\mathcal{E}_{E\text{ПДУ}}} + \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_{Hi}}{\mathcal{E}\mathcal{E}_{H\text{ПДУ}}}, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}\mathcal{E}_{Ei} = E_i^2 \cdot T$ – энергетическая экспозиция электрического поля для диапазона частот f_i ; E_i – напряженность электрической составляющей ЭМП; T – время воздействия за смену в часах; $\mathcal{E}\mathcal{E}_{Hi} = H_i^2 \cdot T$ – энергетическая экспозиция магнитного поля для i -того диапазона частот; H_i – напряженность магнитной составляющей ЭМП; $\mathcal{E}\mathcal{E}_{E\text{ПДУ}}$, $\mathcal{E}\mathcal{E}_{H\text{ПДУ}}$ – соответствующие предельно допустимые уровни.

При облучении от нескольких источников ЭМП, работающих в различных частотных диапазонах, для которых установлены различные ПДУ, определяется соответствующей суммой составляющих (4).

Для ЭМП частотного диапазона от 300 мГц до 300 ГГц электрическая экспозиция для выражений (4) определяется по значениям плотности потока энергии ППЭ. При этом $\mathcal{E}\mathcal{E}_E$ заменяется на $\mathcal{E}\mathcal{E}_{ППЭ} = \text{ППЭ} \cdot T$ со «своими» ПДУ ($\mathcal{E}\mathcal{E}_{ППЭ\text{ПДУ}}$). Если несколько источников различных диапазонов «облучают» обследуемого с различной продолжительностью t_i , то определяются различные базовые переменные $Z_{\ell i}$ с построением «своих» функций принадлежности $\mu_{\ell i}(Z_{\ell i})$, которые агрегируются в решающие правила типа:

$$UEP_\ell = F_{\ell Ag}[\mu_{\ell i}(Z_{\ell i})], \quad (5)$$

где $F_{\ell Ag}$ – функция агрегации по анализируемым диапазонам частот; UEP_ℓ – уверенность в появлении и развитии заболеваний ω_ℓ по электромагнитной составляющей.

5. Для нестабильных во времени и (или) пространстве ЭМП радиочастотного диапазона с плохоопределяемыми классами состояний

предлагается использовать нечеткие табличные модели, по строкам которых выписываются характеристики источника излучения, например, классы мобильных телефонов, типы персональных компьютеров, типы роутеров и т.д., а по столбцам определяется время воздействия. Элементами таблицы являются показатели уверенности UF_{ij} появления и развития заболевания ω_ℓ для источника ЭМП с номером i для временного интервала j .

Для нескольких источников с различными временными экспозициями уверенность определяется агрегацией UE_{ij} :

$$UEP_\ell = F_{UE}(UE_{ij}). \quad (6)$$

6. Выбираются показатели для определения адаптационного резерва целостного организма. В данной работе предлагается использовать индекс функциональных изменений (ИФИ), адаптационный потенциал (АП), показатель адаптационного соответствия (ПАС), перекисное окисление липидов (ПОЛ), антиокислительная активность (АОА), адаптационный показатель иммунной системы (АПИС).

С использованием пакета RUMM 2020 производится оптимизация состава информативных показателей для определения адаптационного резерва целостного организма. Используя общие рекомендации МСГНРП, определяются частные функции уровня адаптационного резерва с базовой переменной по выбранному набору параметров адаптационного потенциала и выбираются модели агрегации для решающего правила оценки уровня адаптационного резерва UAR на общесистемном уровне:

$$UAR = F_{AR}[f_{AR}(Y_K)], \quad (7)$$

где $f_{AR}(Y_K)$ – частные функции уровня адаптационного резерва с базовой переменной (Y_K), определяемой как информативные показатели для определения адаптационного резерва; F_{AR} – функция агрегации уровня адаптационного резерва.

7. Для выбранных органов мишеней ω_ℓ осуществляется синтез решающих правил для определения показателей функционального состояния и функционального резерва, по которым синтезируются частные модели определения риска появления и развития патологии органов мишеней:

$$UPFS_\ell = F_{FS}(UFS_\ell), \quad UPFR_\ell = F_{FR}(UFR_\ell), \quad (8)$$

где $UPFS_\ell$ и $UPFR_\ell$ – уверенность в появлении и развитии ω_ℓ от уровня функционального состояния и функционального резерва соответственно; URS_ℓ и UFR_ℓ – индивидуальные значения функционального состояния и функционального резерва для системы (органа) мишени ω_ℓ .

8. Для повышения точности принимаемых решений для органов мишеней ω_ℓ определяются сопутствующие факторы риска, связанные с экологией, эргономикой, индивидуальными особенностями организма. В общем виде, используя общие рекомендации по синтезу гибридных нечетких

решающих правил для решения задач прогнозирования ранней и возможно дифференциальной диагностики заболеваний, провоцируемых ЭМПРЧ:

$$UVR_{\ell}^q = FAG_{\ell}^q(UEP_{\ell}^q, UAR, UPFS_{\ell}^q, UPFR_{\ell}^q, UER_{\ell}^q, UEK_{\ell}^q, UD_{\ell}^q), \quad (9)$$

где q – идентификатор решаемой задачи ($q=n$ – прогноз; $q=p$ – ранняя стадия заболевания, ∂ – дифференциальный диагноз, c – степень тяжести заболевания и т.д.); UEP_{ℓ}^q – уверенность в ω_{ℓ} по задаче q – от воздействия ЭМПРЧ; UAR – уровень адаптационного резерва организма в целом; $UPFS_{\ell}^q$ – уверенность в ω_{ℓ} от показателя функционального состояния; $UPFR_{\ell}^q$ – от показателя функционального резерва; UER_{ℓ}^q – уверенность в ω_{ℓ} от уровня эргономики рабочего места; UEK_{ℓ}^q – уверенность в ω_{ℓ} от экологической нагрузки; UD_{ℓ}^q – уверенность в ω_{ℓ} по задаче q от индивидуального состояния здоровья.

9. Строится решающее правило перехода от прогностических к диагностическим решающим правилам вида:

$$\text{ЕСЛИ (НА), ТО (От ПП перейти к ПРД);} \quad (10)$$

$$\text{ЕСЛИ (СМА), ТО (От ПП или ПРД перейти к ДРП),} \quad (11)$$

где НА – неудовлетворительная адаптация; СМА – срыв механизмов адаптации; ПП – прогностические решающие правила; ПРД – правила ранней диагностики; ДРП – диагностические решающие правила.

Уверенность в принимаемых решениях при этом принимается по правилам (9) для выбранной правилами (10) или (11) задачи q .

Анализ литературы и собственные исследования показали, что под влиянием ЭМПРЧ могут происходить существенные сдвиги в функциональном состоянии (ФС) и функциональном резерве (ФР) человека. Данные сдвиги могут в дальнейшем вызвать появление и развитие новых или уже существующих заболеваний.

Для решения задачи **оценки влияния ЭМП радиочастотного диапазона на функциональное состояние в работе предлагается метод**, сущность которого заключается в следующем.

Для получения количественных оценок изменения уровня ФС в целом и его составляющих на психологическом уровне в качестве базовой модели выбрано двумерное отображающее пространство вида:

$$Y1 = (ПВ - ПВ_0) + (КВ - КВ_0); Y2 = УВ - УВ_0,$$

где ПВ, ПВ₀ – текущая переключаемость внимания и переключаемость внимания, измеренная в состоянии спокойного бодрствования; КВ, КВ₀ – соответствующие показатели концентрирования внимания; УВ, УВ₀ – соответствующие показатели устойчивости внимания.

Анализ данных, используемых для формирования разделяющих границ составляющих ФС на психологическом уровне, позволили определить функцию принадлежности для лингвистической переменной:

$$\text{ФС} - \text{НФС} = \mu_{\text{фн}}(Z),$$

где Z – базовая переменная, определяемая как мера близости к началу координат в отображающем пространстве.

С учетом характера разделяющих границ между составляющими ФС величина Z определяется выражением: $Z=|Y1| + |Y2|$.

С учетом того, что воздействие электромагнитного поля радиочастотного диапазона приводит к информативному и достаточно «быстрому» изменению энергетических характеристик БАТ на электромагнитные воздействия для оценки ФС на физиологическом уровне предлагается использовать электрические характеристики биологически активных точек, «связанных» с общесистемной реакцией организма. Оценка уровня ФС по электрическим характеристикам БАТ проводится в 2 этапа. На первом этапе эксперты в области биофизики акупунктуры определяют электрический разбаланс ER_s общесистемных точек в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ} \left[\left(\delta R_{Y_1}^D > \delta R^H \right) \text{И} \left(\delta R_{Y_2}^D > \delta R^H \right), \dots, \left(\delta R_{Y_{ms}}^D > \delta R^H \right) \right], \\ & \text{ТО} \left[ER_s = F_E(EY_j) \right], \text{ ИНАЧЕ} (ER_s = 0), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\delta R_{Y_j}^D$ – величина относительного отклонения сопротивления R_{Y_j} из списка диагностически значимых точек от своего номинального значения для БАТ с идентификатором Y_j ; δR^H – пороговое значение отклонений БАТ от номинального значения.

Далее электрический разбаланс ER_s общесистемных БАТ выбирается в качестве базовой переменной для функции принадлежности $\mu_{\text{фн}}(ER_s)$ к лингвистической переменной – нормальное функциональное состояние на физиологическом уровне.

Формируются таблицы экспериментальных данных (ТЭД), связывающих величины энергетических экспозиций ЭМПРЧ для выбранных диапазонов частот и время контакта человека с этим полем с уровнем ФС и (или) его составляющих. С использованием рекомендаций МСГНРП синтезируются гибридные модели оценки влияния ЭМПРЧ на ФС человека и его составляющих:

$$UFC_{il} = F_{FCi}^l(Q_i, t); \quad (13)$$

где UFC_{il} – уровень функционального состояния для диапазона частот i по системе (органу) с идентификатором l ; Q_i – энергетическая экспозиция для i -го диапазона частот; t – время воздействия.

В третьем разделе решаются задачи синтеза нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у людей, подвергающихся вредному воздействию ЭМП радиочастотного диапазона, а также получены нечеткие модели оценки влияния ЭМПРЧ на функциональное состояние операторов, подвергающихся воздействию исследуемого диапазона частот.

На первом этапе синтеза получены математические модели типа (3) расчета показателей, характеризующих влияние электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья человека.

На втором этапе синтеза для заболеваний нервной системы на базовых переменных $Z_{\ell i}$ были определены соответствующие функции принадлежности к классу $\omega_H: \mu_H(Z_1), \mu_H(Z_2), \mu_H(Z_3)$ и $\mu_H(Z_{\Pi})$.

Далее в соответствии с выражением (6) была синтезирована модель оценки уверенности в появлении и развитии заболеваний нервной системы вида:

$$UEM_H(i+1) = UEM_H(i) + Q_{i+1}[1 - UEM_H(i)], \quad (14)$$

где $UEM_H(1) = Q_1 = \mu_H(Z_1)$; $Q_2 = \mu_H(Z_2)$; $Q_3 = \mu_H(Z_3)$; $Q_4 = \mu_H(Z_{\Pi})$; Z_1 – для диапазона 30 мГц, ..., 50 мГц; Z_2 – 300 мГц, ..., 3000 мГц; Z_3 – 3 гГц, ..., 30 гГц; Z_{Π} – 50Гц.

На третьем этапе синтеза решалась задача синтеза моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у людей, профессионально использующих персональные компьютеры (ПК) с частым использованием мобильных телефонов (МТ). Для этого с учетом общих рекомендаций МСГНРП была построена табличная модель (7) оценки влияния ПК и МТ на состояние нервной системы, определены дополнительные существенные факторы риска (эргономика ПК, психоэмоциональное напряжение и утомление, индивидуальные факторы риска, разбаланс электрических характеристик БАТ, «связанных» с нервной системой, адаптационный резерв организма).

По полученному набору предикторов и информативных признаков были синтезированы финальные решающие правила типов (11), (12) и (13).

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что уверенность в правильном прогнозе по классу ω_H превышает величину 0,9, а в наличии ранней стадии этого заболевания – величину 0,95.

В четвертом разделе разрабатываются основные элементы системы поддержки принятия решений (СППР) по анализу состояния здоровья у людей, подвергающихся вредному воздействию ЭМП радиочастотного диапазона, и приводятся результаты экспериментальных исследований на репрезентативных контрольных выборках.

Структурная схема системы поддержки принятия решений приведена на рисунке 1.

Управление взаимодействием между модулями, подсистемами, внешним аппаратным обеспечением и лицом, принимающим решение, обеспечивается **алгоритмом управления СППР (АУСППР)**, реализующим две основные ветви: ветвь обучения, решающая задачу синтеза гибридных нечетких решающих правил с их «загрузкой» в базу знаний; ветвь принятия решений в режиме диалога с ЛПР.

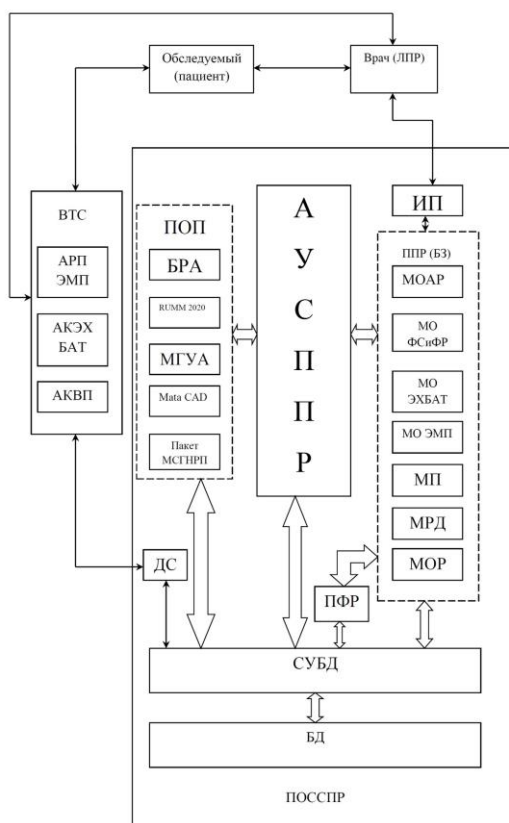


Рисунок 1 – Структурная схема СППР

Для полноценного функционирования СППР с его программным обеспечением (ПОСППР) к стандартным вычислительным средствам подключается дополнительная аппаратура: аппаратура регистрации параметров электромагнитных полей (АРПЭМП); аппаратура контроля электрических характеристик БАТ (АК ЭХБ); аппаратура контроля когнитивных функций внимания и памяти (АКВП).

Управление внешними техническими средствами (ВТС) и передача информации от них в базу данных (БД) СППР осуществляется через драйвер связи (ДС) и систему управления базой данных (СУБД).

Обучение системы производится с помощью пакета обучающих программ (ПОП), в состав которого входят блок разведочного анализа (БРА), пакет интерактивных программ RUMM 2020, пакет МГУА, стандартный пакет MathCAD, пакет МСГНПП.

После обучения полученные математические модели «погружаются» в базу знаний (БЗ), работающую под управлением системы управления базой знаний (СУБЗ).

Оригинальной подсистемой СППР, обладающей новизной, является подсистема принятия решений (ППР), в состав которой входят модуль оценки адаптационного резерва (МОАР), модуль оценки функционального состояния и функционального резерва (МО ФС и ФР), модуль оценки энергетического сопротивления биологически активных точек (МОЭХБАТ),

модуль прогнозирования, модуль ранней диагностики, модуль оценки функционального состояния и функционального резерва (ФС и ФР), модуль оценки влияния ЭМПРЧ на организм человека (МОЭМП), модуль прогнозирования (МП), модуль ранней диагностики (МРД), модуль оценки работоспособности (МОР).

Решение задач формирования рациональных схем воздействия на состояние здоровья и функциональное состояние человека обеспечивается подсистемой формирования рекомендаций по коррекции состояния здоровья и ФС (ПФР).

Взаимодействие ЛПР с СППР осуществляется через интерфейс пользователя.

Для подтверждения достоверности принятия решений предложенными в работе моделями был организован сбор репрезентативных контрольных выборок, объем которых определялся в соответствии с требованиями, принятыми в теории распознавания образов.

Для контроля качества «работы» решающих правил прогнозирования заболеваний нервной системы (НС) был проведен пятилетний эксперимент, начавшийся в 2017 году. Обследовались операторы ПЭВМ, активно использующие мобильную связь. Всего для участия в эксперименте было отобрано 200 человек относительно здоровых людей, людей, имеющих склонность и высокие риски к заболеваниям нервной системы, а также людей, имеющих начальные стадии патологии НС. На предварительном этапе исследования оценка состояния нервной системы осуществлялась по простым тестам оценки состояния периферической и центральной нервных систем, принятых в неврологии.

После каждого года наблюдения производилась фиксация количества заболевших и не заболевших обследуемых.

Результаты работы прогностических решающих правил, приведенные в таблице 1, фиксировались с расчетом различных показателей качества.

Таблица 1 – Оценка качества работы математической модели прогнозирования по классу ω_H

Год наблюдения \ ПК	2017	2018	2019	2020	2021
ДЧ	0,78	0,88	0,92	0,93	0,93
ДС	0,90	0,92	0,92	0,93	0,95
ДЭ	0,84	0,90	0,92	0,93	0,94
ПЗ ⁺	0,87	0,90	0,91	0,92	0,94
ПЗ	0,83	0,91	0,93	0,94	0,94

Примечание: ПК – показатели качества; ДЧ, ДС, ДЭ – диагностическая чувствительность, специфичность и эффективность; ПЗ⁺, ПЗ⁻ – прогностическая значимость положительных и отрицательных результатов.

Анализ таблицы 1 показывает, что все выбранные показатели качества превышают уровень 0,9 после двух лет наблюдения.

При оценке качества работы математических моделей ранней диагностики в каждый из наблюдаемых годов решающие правила сохраняют качество классификации по всем показателям, превышая уровень 0,95.

Анализ результатов статистических испытаний, полученных прогностических и диагностических решающих правил показывает, что они дают результаты, соизмеримые с результатами математического моделирования и экспертного оценивания.

Полученные количественные характеристики позволяют рекомендовать результаты диссертационной работы в медицинскую практику профильных врачей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проведено исследование структуры данных, описывающих исследуемые классы заболеваний и функциональных состояний у людей, подвергающихся воздействию ЭМП радиочастотного диапазона, в ходе которого было обосновано применение методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил для решения поставленных в работе цели и задач.

2. Разработан метод синтеза гибридных нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых действием ЭМП радиочастотного диапазона, который позволяет получить нечеткие гибридные математические модели, обеспечивающие повышение качества оказания медицинской помощи выбранной категории пациентов в условиях действия сочетанных и смешанных электромагнитных полей в сочетании с другими разнородными производственными, природными и индивидуальными факторами риска при нечетком и неполном представлении исходных данных с пересекающейся структурой классов.

3. Разработан метод оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние операторов эргонасыщенных систем, использование которого позволяет синтезировать соответствующие решающие правила, обладающие требуемой для практических приложений точностью.

4. Синтезированы гибридные математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы у людей, подвергающихся вредному воздействию ЭМП радиочастотного диапазона, обеспечивающие уверенность в правильном прогнозе не менее 0,9, а в наличии ранних стадий заболеваний нервной системы не ниже 0,95, а так же нечеткие модели оценки влияния ЭМПРЧ на функциональное состояние и работоспособность операторов подвергающихся воздействию

исследуемого диапазона частот, которые обеспечили уровень доверия к принимаемым решениям не хуже 0,9.

5. Разработаны система поддержки принятия решений с соответствующим алгоритмом управления, которые позволяют управлять логикой организации лечебно-диагностического процесса в зависимости от индивидуальных особенностей организма, подвергающегося комбинированному воздействию различных по своей природе факторов риска, включая ЭМП радиочастотного диапазона, что позволило повысить качество медицинского обслуживания пациентов, подвергающихся воздействию исследуемых диапазонов ЭМП.

6. Проведена экспериментальная проверка результатов исследования на репрезентативных контрольных выборках, которая показала, что для задач прогнозирования заболеваний нервной системы уверенность в правильном прогнозе превышает уровень 0,9, а в наличии ранних стадий этого класса заболеваний составляет 0,95, также было показано, что нечеткие модели оценки влияния ЭМПРЧ на функциональное состояние и работоспособность операторов, подвергающихся воздействию исследуемого диапазона частот, обеспечили уровень доверия к принимаемым решениям не хуже 0,9, что соответствует требованиям современной медицинской практики, предъявляемым к аналогичным классам задач.

Рекомендации. Результаты исследования рекомендуется использовать при разработке нового поколения гибридных медицинских интеллектуальных систем, эффективная работа которых обеспечивается рациональным объединением клинического мышления с помощью искусственного интеллекта и, в частности, при проектировании СППР для врачей, ведущих пациентов, подвергающихся действию электромагнитных полей радиочастотного диапазона.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Использование нечетких гибридных моделей для решения задач повышения качества оказания медицинских услуг пациентам, подвергающимся действию электромагнитных полей радиочастотного диапазона в сочетании с другими факторами риска, позволяет поднять на новый качественный уровень медицинское обслуживание людей с исследуемым классом заболеваний. Дальнейшие исследования в рассматриваемой медицинской области позволят повысить качество ведения пациентов, подвергающихся сочетанному воздействию разнородных факторов риска на организм человека.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. **Титова, А.В.** Метод синтеза математических моделей прогнозирования и диагностики заболеваний, провоцируемых воздействием электромагнитных полей радиочастотного диапазона / Корневский Н.А., Титова А.В. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2020. – №2 (т. 19). – С. 122-128.
2. **Титова, А.В.** Метод синтеза нечетких моделей оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья / Корневский Н.А., Титова А.В. // Известия Юго-Западного государственного университета, Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2020. – №2 (Т. 10). – С. 102-117.
3. **Титова, А.В.** Оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние и работоспособность операторов на основе технологии мягких вычислений / Корневский Н.А., Титова А.В. Сурнина А.И. // Известия Юго-Западного государственного университета, Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – №2 (Т. 11). – С. 120-137.
4. **Титова, А.В.** Экспертная система оценки состояния операторов человеко-машинных систем, подвергающихся воздействию электромагнитных полей радиочастотного диапазона / Корневский Н.А., Титов Д.В., Титова А.В. Родионова С.Н. // Медицинская техника. – 2021. – №5. – С 36-39.
5. **Титова, А.В.** Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы, для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска / Сафронов Р.И., Родионова С.Н., Крикунова Е.В., Стародубцева Л.В., Сергеева С.С., Титова А.В. // Известия Юго-Западного государственного университета, Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – № 4 (Т. 11). – С. 120-137.
6. **Титова, А.В.** Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, провоцируемых электромагнитными полями радиочастотного диапазона малой интенсивности / Корневский Н.А., Титова А.В., Говорухина Т.Н., Медников Д.А. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – №8 (2). – 18 с. (DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.032).

Публикации в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus

7. **Titova, A.V.** Fuzzy Models for Evaluating the Effect of Radio Frequency Electromagnetic Fields on Health MATEC / Anna V. Titova, Nikolay A. Korenevskiy, and Mariia Iu. Goltsova // Web of Conferences 346, 03001. ICMTE. – 2021 (DOI: 10.1051/mateconf /202134603001).

Статьи и материалы конференций

8. **Титова, А.В.** Оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья / Корневский Н.А., Титова А.В. // «Медико-экологические информационные технологии – 2020»: материалы XXIII-ой МНТК. – Курск: ЮЗГУ. – 2020. – Т. 1. – С. 8-11.

9. **Титова, А.В.** Влияние электромагнитных полей радиочастотного диапазона на состояние здоровья / Титова А.В. // «Медико-экологические информационные технологии – 2020»: материалы XXIII-ой МНТК. – Курск: ЮЗГУ. – 2020. – Т. 1. – С. 41-45.

10. **Титова, А.В.** Синтез нечетких математических моделей оценки влияния электромагнитных полей на состояние здоровья человека / Корневский Н.А., Титова А.В. // «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания и обработки изображений. Распознавание 2021»: материалы XVI-ой МНТК. Курск: ЮЗГУ. – 2021. – С. 140-142.

11. **Титова, А.В.** Влияние электромагнитного излучения на развитие различных профессиональных заболеваний / Корневский Н.А., Титова А.В. // Интеллектуальные и информационные системы: материалы ВНТК. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2019. – С. 95-96

12. **Титова, А.В.** Оценка влияния электромагнитных полей компьютерных сетей на организм человека на основе нечетких моделей / Корневский Н.А., Титова А.В. //Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - БИОМЕДСИСТЕМЫ-2019: материалы XXXII ВНТК. – Рязань: Изд-воРГРУ им. В.Ф. Уткина. – 2019. – С. 73-76.

13. **Титова, А.В.** Нечеткие модели оценки влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на организм человека / Корневский Н.А., Титова А.В. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ 2020: материалы XIV МНТК. – Владимир-Суздаль. – 2020. – С. 181-184.