

На правах рукописи

Бутусов Андрей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПО
ДИАГНОСТИКЕ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ ВНЕБОЛЬНИЧНОЙ
ПНЕВМОНИИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОНЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ
КЛАССИФИКАТОРОВ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2023

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Филист Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Истомина Татьяна Викторовна**
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
«МЭИ», кафедра основ радиотехники,
профессор кафедры (г. Москва)

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пензенский государственный
университет»
(г. Пенза)

Защита диссертации состоится «15» декабря 2023 года в 14⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета 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: 305000, 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/611/u8xs1x89fmo0u1kym3b6cv8ptc3mwwov/Disser-tatsiya-Butusov-A.V..pdf>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В клинической практике наряду с заболеваниями сердечно-сосудистой системы достаточно актуальной и социально значимой проблемой является патология легочной системы в форме внебольничной пневмонии (ВБП), которая занимает лидирующее положение среди болезней органов дыхания в связи с высоким уровнем заболеваемости и смертности во всех возрастных группах. В России частота ВБП составляет 5...8 человек на 1000 человек в год среди лиц старше 18 лет.

Лечащему врачу необходимо принимать важные решения, связанные с ведением больного ВБП, включая вопрос о его госпитализации. Для формализации решения о госпитализации в современной медицинской практике предлагается ряд шкал оценки степени тяжести ВБП. Однако они либо включают множество факторов риска (ФР), которые трудно контролировать в процессе ведения больного, либо в шкалах риска слишком завышен вес ФР «возраст». Это приводит к переоценке степени тяжести ВБП у лиц старшего возраста и недооценки степени тяжести у лиц молодого возраста, что может привести к катастрофическим последствиям. Кроме того, ни одна из известных шкал не учитывает динамику коморбидного заболевания в процессе лечения ВБП, удовлетворяясь фиксированием его наличия.

В связи с вышеизложенным, возникает необходимость в повышении качества классификации степени тяжести больных ВБП, что может быть реализовано посредством широко используемых в настоящее время систем поддержки принятия врачебных решений (СППВР).

Таким образом, поиск новых технологий получения и обработки сырых данных и новых компьютерных методов их классификации при интеллектуальной поддержке принятия решений по определению степени тяжести ВБП является актуальной и важной для практического здравоохранения задачей.

Степень разработанности темы исследования. Цифровые технологии продемонстрировали значительные возможности для повышения качества диагностики и лечения различных заболеваний и все чаще используются в качестве инструментария для создания СППВР. Число пациентов, использующих системы удаленного мониторинга, оценивается 7,1 млн человек в мире (Berg Insight, 2017 г.), отмечается все возрастающее количество публикаций по данной тематике (Wooton R., 2012 г.).

Телекоммуникационные системы удаленного интеллектуального мониторинга функционального состояния (ФС) пациента активно развиваются в Российской Федерации. Развитию домашнего мониторинга здоровья пациентов и анализ проблем включения его в существующую систему здравоохранения посвящены работы Гельмана В.Я. (2022 г.), Юлдашев З.М. (2017 г.), Vegesna A. (2017 г.). Вместе с тем, при практическом внедрении подобных систем обнаруживается большое количество нерешенных вопросов: перегруженность врачебного персонала и

снижение эффективности работы при увеличении количества наблюдаемых пациентов, нежелание пациентов следовать предписанному протоколу мониторинга, зависимость реализации систем от наличия связи по сети Интернет (Agarwal S., 2010 г.; Velardo C., 2017 г.).

Основной проблемой при удаленном мониторинге больного ВБП является определение тактики лечения, которую определяет степень тяжести ВБП. В связи с неоднозначной ее оценкой, связанной с использованием множества шкал риска, отсутствием данных по некоторым ФР и сложностью интерпретации ряда ФР, возникает необходимость в интеллектуальной поддержке таких решений, используя классификацию в рамках машинного обучения (МО). На выходе врач получает заключение о группе медицинского риска (МР) (Петрунина Е.В., Филист С.А., Шаталова О.В., 2022 г.). Однако, хотя некоторые модели прогнозирования и пытаются предсказать МР, но большинство этих исследований имеют существенные недостатки (высокая систематическая ошибка и высокие экономические затраты), которые делают такие СППВР непригодными для использования в широкой медицинской практике. Эти недостатки могут быть устранены путем использования систем искусственного интеллекта, основанных на нейронечетких сетях, которые позволяют использовать, как априорный опыт врачей-экспертов, так и обобщать накопленные знания посредством МО.

Таким образом, научно-техническая задача диссертационного исследования заключается в разработке нейронечетких моделей принятия решений для интеллектуальных систем удаленного мониторинга ФС больных ВБП.

Целью диссертационной работы является повышение качества контроля за процессом лечения и оценки степени тяжести больных внебольничной пневмонией посредством использования нейронечетких моделей классификаторов в системах поддержки принятия врачебных решений в условиях дистанционного мониторинга.

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо решить следующие **основные задачи**:

- выполнить анализ путей создания математических, алгоритмических и технических средств поддержки принятия врачебных решений по оценке степени тяжести состояния больного и контроля эффективности его лечения;
- разработать метод и средства для дистанционного мониторинга функционального состояния пациента в системе поддержки принятия решений при ведении амбулаторных больных;
- разработать гибридный нейросетевой классификатор, предназначенный для классификаторов степени тяжести внебольничной пневмонии с учетом риска сопутствующих заболеваний;
- разработать нейронечеткий классификатор, позволяющий моделировать шкалы риска внебольничной пневмонии и осуществлять мониторинг эффективности ее лечения;

- разработать структуру системы поддержки принятия врачебных решений, предназначенной для оценки степени тяжести внебольничной пневмонии и мониторинга эффективности ее лечения;

- произвести апробацию предложенных методов и средств классификации и дистанционного мониторинга степени тяжести больных внебольничной пневмонией на репрезентативных контрольных выборках.

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

- метод и алгоритм локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах мониторинга состояния здоровья пациента, включающие четыре этапа, отличающиеся тем, что первый этап выявляет релевантные маркеры, характеризующие изменение адаптационного потенциала живой системы при воздействии экзогенного фактора; на втором этапе осуществляется доказательство надежности кластеризации уровней адаптационного потенциала; на третьем этапе анализируются результаты классификации на динамических обучающих выборках, а на четвертом этапе осуществляется анализ статистической неоднородности и/или гетерогенности выделяемых кластеров, позволяющий синтезировать решающие модули для систем поддержки принятия врачебных решений по определению степени тяжести заболевания;

- гибридный нейросетевой классификатор с гибридной нейронной сетью, содержащей три макрослоя, первый из которых состоит из блоков вероятностных нейронных сетей, число которых определяется числом сегментов, выделенных в пространстве информативных признаков, а второй и третий макрослои состоят из блоков двухслойных нечетких нейронных сетей, отличающихся тем, что первый слой осуществляет агрегации свидетельств за и против выбора данного кластера, а второй - осуществляет нечеткую операцию, построенную на основе схемы Шортлиффа, позволяющий учитывать риск сопутствующих заболеваний при оценке степени тяжести внебольничной пневмонии;

- нейронечеткий классификатор, основанный на модели нечеткого логического вывода Мамдани-Ларсена, отличающийся использованием макрослоев, основанных, как на нечетком логическом выводе, так и на моделях полностью связанных нейронных сетей прямого распространения сигнала, позволяющий моделировать шкалы степени тяжести внебольничной пневмонии, и на их основе строить многомерное кластерное пространство для мониторинга динамики функционального состояния пациента;

- модуль контроля эффективности лечения внебольничной пневмонии, основанный на шкале PSI, и включающий две группы факторов риска, входящих в эту шкалу, отличающийся наличием двух линейных моделей динамики риска внебольничной пневмонии, по которым построено двумерное кластерное пространство, отражающее процесс эффективности лечения внебольничной пневмонией, апробация которого осуществлена на пациентах из экспериментальной группы больных внебольничной пневмонией различной степени тяжести;

- система поддержки принятия врачебных решений, предназначенная для оценки степени тяжести внебольничной пневмонии, включающая три модуля принятия решений, в первом из которых решается вопрос о целесообразности направления амбулаторного больного на стационарное лечение, во втором - определяется эффективность плана лечения ВБП, а в третьем - осуществляется дифференциальная диагностика ВБП, отличающаяся тем, что модуль контроля степени тяжести ВБП работает совместно с модулем оценки риска коморбидного заболевания, что позволило повысить качество оценки степени тяжести ВБП более чем на 10% по всем показателям качества.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в развитии теории многоагентных классификаторов, нечеткой логики принятия решений и нейросетевого моделирования, включая гибридные и нейронечеткие структуры, позволяющей синтезировать классификаторы степени тяжести внебольничной пневмонии для телекоммуникационных систем поддержки принятия врачебных решений.

Разработанные гибридные нейронечеткие модели классификаторов позволяют осуществлять дистанционный мониторинг степени тяжести и эффективности лечения внебольничной пневмонии. Полученные в работе метод, модели и алгоритм составляют основу СППВР, применение которой в медицинской практике позволит повысить качество оказания медицинской помощи пациентам с внебольничной пневмонией и находящимся на амбулаторном лечении.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

Результаты работы внедрены в образовательный процесс Юго-Западного государственного университета при подготовке магистров по направлению 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» и прошли испытания в Клиническом Научно-Медицинском центре «Авиценна» г. Курска. Испытания показали целесообразность их использования в системах поддержки принятия решений при диагностике респираторных заболеваний.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, теории биотехнических систем медицинского назначения, моделирования, теории синтеза сложных информационных систем, теории нейросетевого моделирования, нечеткого логического вывода, прикладной математической статистики, экспертного оценивания. При разработке гибридных нечетких моделей принятия решений в качестве инструментария использовался MATLAB 2018b со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод и алгоритм локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах мониторинга состояния здоровья пациента, позволяющие синтезировать решающие модули для систем поддержки принятия врачебных решений по определению степени тяжести заболевания и эффективности плана его лечения.

2. Гибридный нейросетевой классификатор с гибридной нейронной сетью, содержащей три макрослоя, построенных на разных парадигмах распознавания образов, позволяет выделять кластеры тяжести состояния больного и повысить показатели качества классификации степени тяжести внебольничной пневмонии при наличии коморбидности, в среднем, на 12%, по сравнению с классификатором, в котором не учитывалась коморбидность.

3. Нейронечеткий классификатор, основанный на моделях нечеткого логического вывода Мамдани-Ларсена, позволяет моделировать шкалы степени тяжести внебольничной пневмонии с диагностическими показателями качества, сопоставимыми с известными регрессионными моделями, и осуществлять мониторинг эффективности ее лечения в многомерном кластерном пространстве.

4. Модуль контроля эффективности лечения внебольничной пневмонии, основанный на шкале PSI, построенный на основе двух групп факторов риска, входящих в эту шкалу, позволяет контролировать динамику степени тяжести внебольничной пневмонии в двумерном кластерном пространстве.

Степень достоверности и апробации результатов. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, отсутствие противоречий относительно нечетких алгоритмов принятия решений и методов нейронечеткого моделирования, а также аналогичных результатов, полученных другими исследователями. Результаты экспериментальных исследований, полученных в работе решающих модулей согласуются с опубликованными ранее 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: «Медико-экологические информационные технологии» (Курск – 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), «Интеллектуальные информационные системы» (Воронеж – 2021), «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы» (Рязань – 2022), «Лазерно-информационные технологии» (Новороссийск – 2022, 2023), «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (Пермь - 2022); «Биотехнология и биомедицинская инженерия» (Курск – 2022); «Биотехнология и биомедицинская инженерия» (Курск – 2022), «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова ФРЭМЭ'2022» (Владимир-Суздаль – 2022); «Моделирование и прогнозирование развития отраслей социально-

экономической сферы» (Курск - 2023); «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов - 2023) на научно-технических семинарах кафедр биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск – 2019-2023).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 14 научных работах, среди которых 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка литературы, включающего 104 отечественных и 19 зарубежных наименований. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе выполнен анализ путей создания математических, алгоритмических и технических средств поддержки принятия врачебных решений по оценке состояния больного и контроля эффективности его лечения. Из выявленных задач, решение которых позволяет совершенствовать и эволюционировать процесс оказания медицинской помощи, выделено направление, связанное с автоматизацией планирования и управления процессом лечения и, как следствие, обеспечение доступности медицинской помощи. В последние годы интенсивные мировые усилия ускоряют процесс создания глобальной сети наблюдения для борьбы с пандемиями возникших и вновь возникающих инфекционных заболеваний. Ученые из различных областей, от медицины и молекулярной биологии до информатики и прикладной математики, объединились для быстрой оценки потенциально опасных ситуаций. Для достижения этой цели математическое моделирование играет важную роль в работе по прогнозированию, оценке и контролю потенциальных вспышек.

Математические модели инфекционных заболеваний основаны, в основном, на статистических методах и сводятся к построению регрессионных моделей степени тяжести заболевания. Однако такие модели имеют ряд существенных недостатков, связанных как с бинарной оценкой независимых переменных моделей, так и с неоднозначностью подхода к их выбору. В связи с этим возникает необходимость ввода экспертной оценки в математическую модель, что можно реализовать посредством нейронечетких сетей (NFN). Состояние NFN в настоящее время может быть охарактеризовано как развивающееся и перспективное. NFN показывают превосходные результаты в задачах, где требуется моделирование нечетких и неопределенных данных. Они могут эффективно обрабатывать информацию, которая может иметь различные степени принадлежности к различным классам или категориям.

Однако, существуют и некоторые ограничения NFN. Они могут быть сложными в обучении и требовать большого количества данных для

достижения хороших результатов. Кроме того, интерпретация результатов NFN может быть сложной из-за нечеткой природы их выводов. Поэтому в решении задач моделирования степени тяжести заболеваний целесообразно использовать как системы нечетких правил, так и искусственные нейронные сети (НС), что позволяет одновременно использовать возможности обучения НС и удобное представление и анализ нечетких правил в рамках гибридных классификаторов.

С учётом выявленных проблем в заключении первого раздела сформулированы цели и задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке метода и средств мониторинга состояния здоровья пациента в процессе терапевтических или реабилитационных мероприятий. Разработан метод локализации кластеров адаптационного потенциала в пространстве суррогатных маркеров, включающий четыре этапа. На первом этапе выявляет релевантные маркеры, характеризующие изменение адаптационного потенциала (АП) живой системы (ЖС) при воздействии экзогенного фактора. Структурная схема получения данных от одного пациента на первом этапе осуществления метода представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема получения данных от одного пациента на первом этапе осуществления метода

На втором этапе осуществляется доказательство надежности кластеризации уровней адаптационного потенциала. Структурная схема второго этапа осуществления метода представлена на рисунке 2. В качестве модели АП биологического объекта (БО) предложена импедансная модель в виде цепочки звеньев Войта. Разработан алгоритм ее построения. Импедансная модель строится на основе импедансной диаграммы (графика Коула) за которую принимается амплитудно-фазочастотная характеристика

БО, полученная в результате функциональной пробы, моделирующей функцию Хэвисайда. На основе импедансной модели формируются дескрипторы для классификаторов АП. На каждый кластер предусмотрен свой классификатор, построенный на основе НС прямого распространения. При необходимости решения классификаторов могут быть агрегированы посредством решающего модуля, выполненного на основе обучаемого классификатора или NFN.

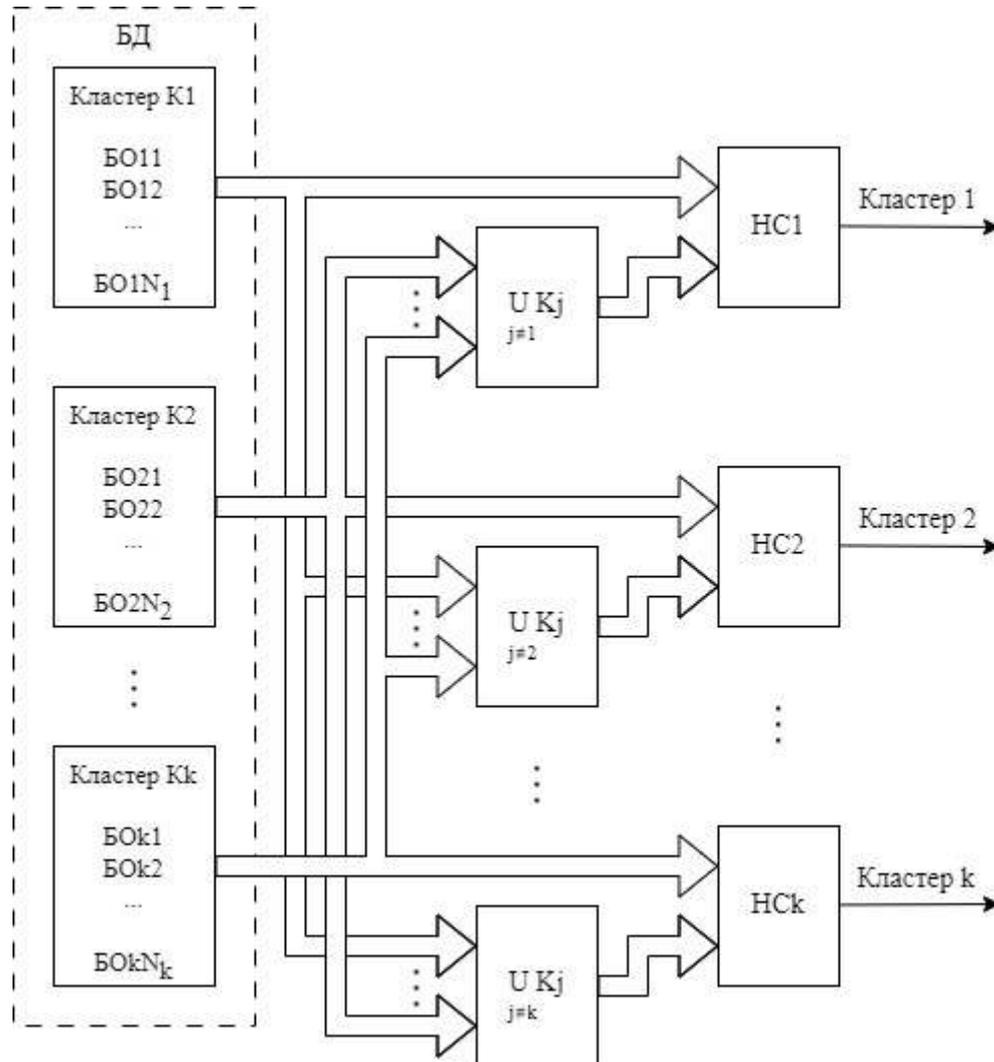


Рисунок 2 – Структурная схема второго этапа осуществления метода

Третий этап предусматривает экзогенное воздействие на БО с последующим контролем запаздывания (лага) между акцией и переходом БО в смежный кластер. После экзогенного воздействия кластеры «рассыпаются». Процесс «рассыпания» зависит от лага, который может быть индивидуальным или общим. Если общий лаг выбран правильно, то «рассыпание» кластеров сводится к минимуму, и они «плавно» переходят из одного в другой. Критерием такого перехода являются показатели качества классификации на этих динамических выборках, обученных на предыдущем этапе НС.

Алгоритм четвертого этапа осуществления метода выполняется по известным схемам и его целью является объяснение различий (вследствие наличия статистической неоднородности).

На примере предикторов, полученных по результатам клинического анализа крови, разработан комплект алгоритмов для компьютерной системы мониторинга эффективности лекарственных назначений по результатам клинического анализа крови, включающий:

- алгоритм анализа динамики межклеточных соотношений в клиническом анализе крови;
- алгоритм заполнения базы данных;
- алгоритм формирования базы решающих правил;
- алгоритм анализа чувствительности решающего правила.

Предложена структура дистанционного мониторинга ФС пациента посредством средств интернет-технологий, основанная на идеологии интерьера. Контроль эффективности терапевтических процедур и/или оценка состояния пациента посредством интерьера реализуется в три этапа. На первом этапе из базы шкал МР выбираются ФР, на основе мониторинга которых принимается решение об эффективности терапевтической процедуры или о состоянии пациента. На втором этапе создается база инструментальных средств, позволяющих контролировать ФР для осуществления мониторинга состояния пациента. Данные для реализации этого этапа могут сниматься как непосредственно с пациента в режиме on-line, так и поступать с медицинских карт пациента, находящихся на сервере поликлиники. На третьем этапе создается программное обеспечение (ПО) интерьера, который осуществляет непрерывный контроль ФС пациента.

Предложены и апробированы конструкции носимых устройств для мониторинга ФС пациента, предназначенных для дистанционного контроля основных биомедицинских показателей амбулаторного больного. Для обработки данных температур и фотоплетизмосигнала используется специальное ПО (СПО), установленное на мобильный телефон (смартфон). Чтобы проектируемое устройство могло взаимодействовать с СПО, в его структуру входит модуль «Bluetooth», с помощью которого происходит обмен данными между микроконтроллером и смартфоном. Такой подход обусловлен требованием мобильности проектируемого монитора.

Предложена концептуальная модель выделения и идентификации динамических параметров дыхания и сердцебиения из радиоволнового сигнала, отраженного от двух и более пациентов, и несущего информацию о движениях грудной клетки и сердечной мышце. В основу модели положена селекция сигнала биорадиорадара по пациентам по строкам двумерной частотной плоскости кардиосигнала. Выделив строки сигнала, соответствующие конкретному пациенту на двумерной частотной плоскости, выделяют на них диапазоны частот, соответствующие сигналу дыхания и кардиосигналу посредством частотной селекции.

В третьем разделе выполнен анализ релевантных ФР на выживаемость больных ВБП и анализ ФР основных заболеваний, сопутствующих ВБП, что позволило сформировать сегменты ФР для классификаторов риска ВБП. Для оценки степени тяжести ВБП и определения эффективности ее плана лечения предложен гибридный классификатор с гибридной нейронной сетью с тремя макрослоями: PNN-FNN-FNN*, в которой были использованы технологии вероятностных нейронных сетей и нечеткой логики принятия решений (рисунок 3).

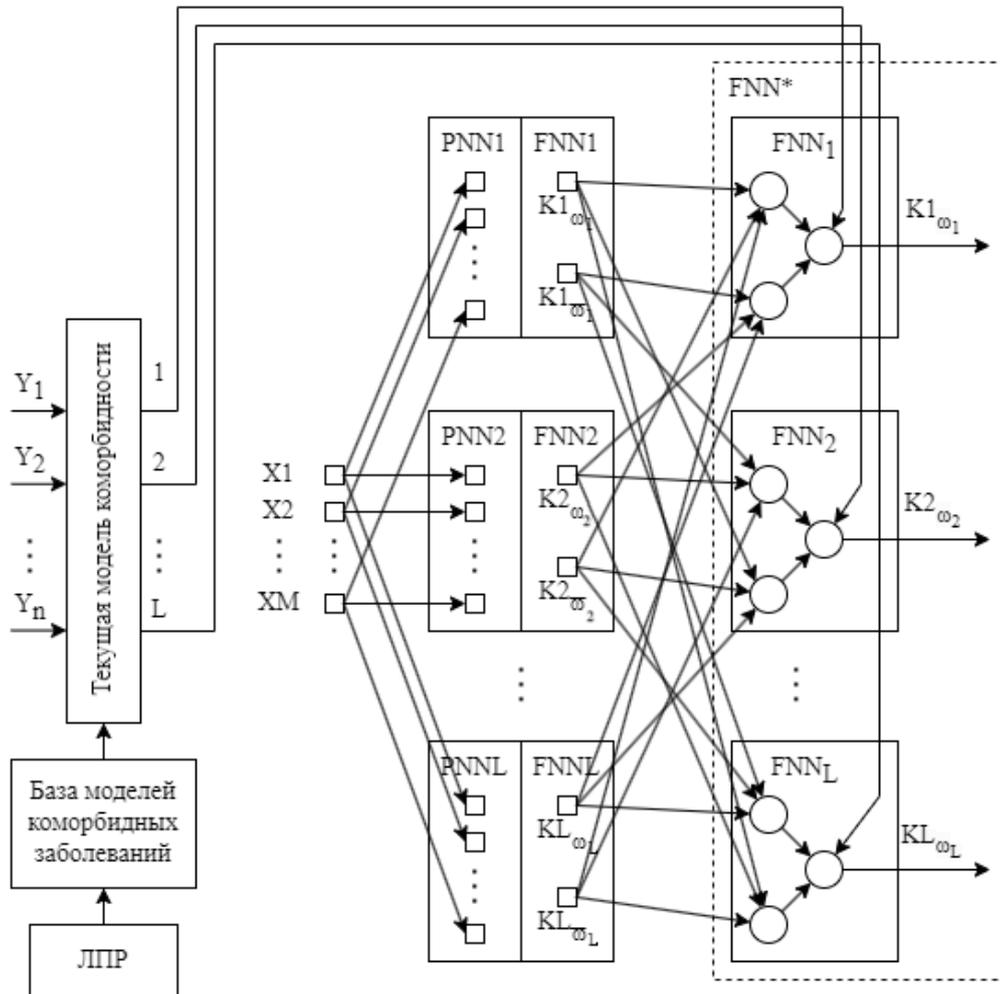


Рисунок 3 - Гибридная нейронная сеть PNN-FNN-FNN*

Первый макрослой PNN состоит из L блоков вероятностных трехслойных нейронных сетей, число которых определяется числом выделенных кластеров. Каждый блок содержит M PNN, число которых определяется числом сегментов, выделенных в пространстве информативных признаков. Второй и третий макрослой состоят из двухслойных нечетких нейронных сетей. Модуль нечеткой нейронной сети со структурой FNN* является макрослоем блочного типа, каждый из блоков которого состоит из двух слоев, первый из которых предназначен для

агрегации свидетельств «за» и «против» выбора данного кластера. Второй слой FNN* агрегирует нечеткую информацию предшествующего слоя (a, b) и выхода модели МР коморбидного заболевания (g) и содержит один нейрон, в котором выполняются следующие нечеткие операции:

$$Cmb(a,b) = \frac{a - b}{1 - \min(a,b)}, \quad (1)$$

$$Cmb(Cmb(a,b), g) = \frac{Cmb(a,b) + g}{1 - \min(|Cmb(a,b)|, g)}. \quad (2)$$

Для контроля степени тяжести ВБП на основе интернет технологий разработан нейронечеткий классификатор, основанный на модели нечеткого логического вывода Мамдани-Ларсена. Структурная схема нейронечеткого классификатора представлена на рисунке 4а. Она включает модули систем нечеткого логического вывода (СНЛВ) и соответствующих блоков нечетких решающих правил (БНРП). Пример СНЛВ для одной из шкал риска ВБП представлен на рисунке 4б.

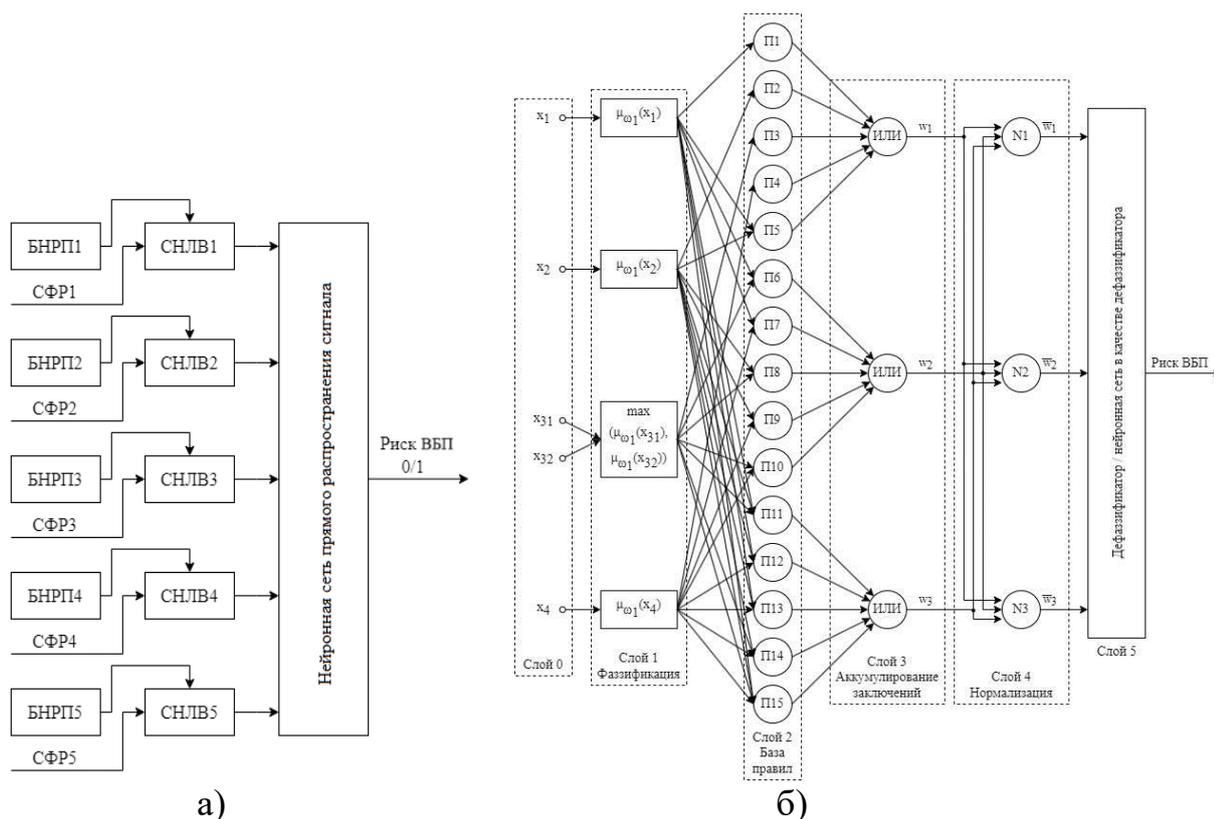


Рисунок 4 - Структурная схема нейронечеткого классификатора (а) и нейронечеткой сети в качестве системы нечеткого логического вывода (б)

В среде MATLAB разработан модуль *.fis, моделирующий шкалу степени тяжести пневмонии CRB-65 на основе нейронечеткой сети, построены функции принадлежности и сформированы правила нечеткой продукции для этого модуля.

В четвертом разделе Предложена структурная схема СППВР (рисунок 5), предназначенная для мониторинга степени тяжести ВБП, включающая три модуля принятия решений. В первом модуле решается вопрос о целесообразности направления амбулаторного больного на стационарное лечение. Во втором модуле определяется эффективность плана лечения ВБП. В третьем модуле осуществляется дифференциальная диагностика ВБП. Модуль контроля степени тяжести ВБП работает совместно с модулем оценки риска коморбидного заболевания.

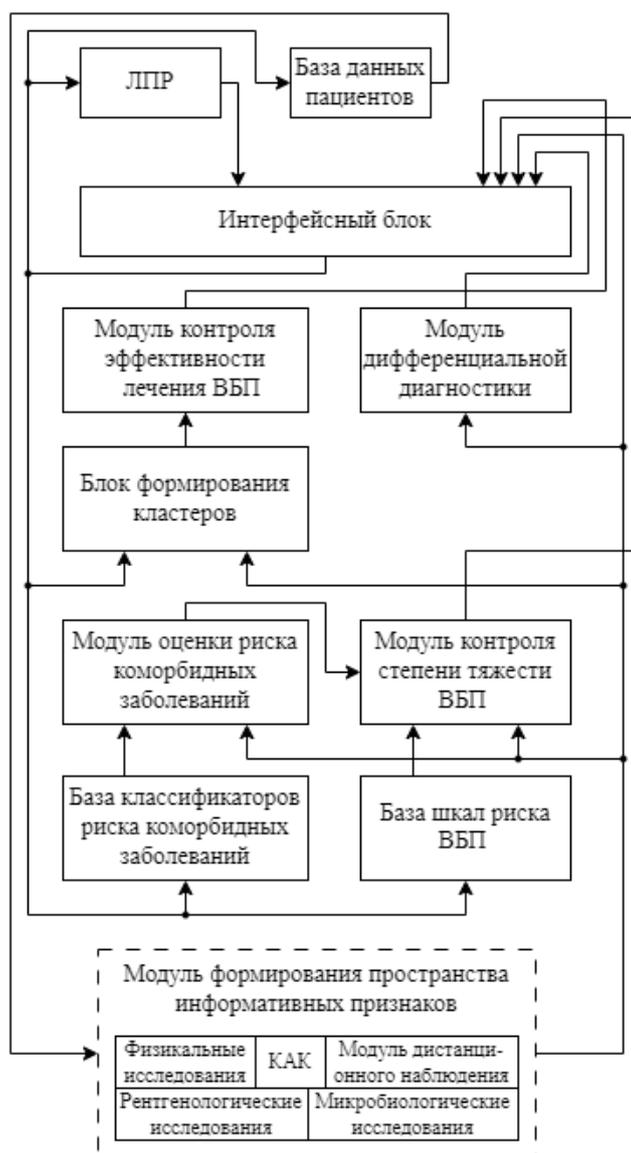


Рисунок 5 - Структурная схема СППВР для мониторинга состояния здоровья пациентов, больных внебольничной пневмонией

Для формирования обучающих выборок проведен ретроспективный анализ историй болезни пациентов лечебных учреждений г. Курска с диагнозом «внебольничная пневмония». Сформирована экспериментальная группа в количестве 300 пациентов больных ВБП различной степени тяжести. Проведены исследования эффективности мониторинга степени тяжести ВБП на основе нейронечеткой модели классификатор NFN,

сформированного по ФР шкалы CRB–65 и шкалы PSI. Определены показатели качества классификатора NFN. Проведено сравнение показателей качества классификации степени тяжести пневмонии классификатором NFN с известным классификатором, выполненным на основе модели логистической регрессии. По результатам ROC - анализа площадь под кривой (AUC) составила 0,88 ($p < 0,001$). Чувствительность и специфичность полученной модели равны 70% и 86%, соответственно. В таблице 1 приведены показатели качества классификации NFN риска ВБП на контрольной выборке. Показатели сопоставляются с аналогичными результатами, полученными на известных моделях классификации степени тяжести ВБП.

Таблица 1 - Экспериментальные данные по классификации степени тяжести пневмонии на контрольной выборке различными моделями классификаторов

Обследуемые	Модель NFN			Регрессионная модель [67]		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_1} = 50$	70%	86%	78%	82%	75%	78%
$n_{\omega_0} = 90$	86%	70%		75%	82%	

Установлено, что оба классификатора имеют сопоставимые показатели качества классификации, однако известный классификатор использует большее количество ФР, и они менее доступные и более трудоемки в получении, чем у разработанного классификатора, что позволяет рекомендовать синтезированный нейронечеткий классификатор для телекоммуникационных систем дистанционного мониторинга степени тяжести ВБП.

Разработан гибридный классификатор (ГК) степени тяжести заболевания (ишемической болезни сердца), сопутствующего заболеванию внебольничной пневмонии, включающий четыре «слабых» классификатора, построенных на основе нечеткой логики принятия решений, и полносвязную нейронную сеть прямого распространения сигнала в качестве агрегатора, и модели виртуальных потоков, позволяющие формировать дополнительные информативные признаки на входах классификаторов на различных иерархических уровнях. Апробация ГК риска ИБС осуществлена на экспериментальной группе постинфарктных больных. Показатели качества классификации синтезированного ГК позволяют рекомендовать его для системы поддержки принятия решений для определения степени тяжести ВБП.

В ходе проведения экспериментальных исследований по прогнозированию риска ИБС на контрольной выборке были получены показатели качества для предложенной модели ГК и логистической модели, которая была выбрана в качестве прототипа. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные по прогнозированию риска ИБС на контрольной выборке гибридным классификатором и классификатором - прототипом

Обследуемые	Модель ГК ишемического риска			Логистическая модель [101]		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_1} = 100$	90%	94%	88%	75%	79%	77%
$n_{\omega_2} = 60$	85%	86%		74%	75%	
$n_{\omega_3} = 30$	87%	96%		75%	78%	

В качестве прототипа для ГК МР ИБС была выбрана логистическая регрессионная модель осложнения ИБС.

Экспериментальные исследования гибридного нейросетевого классификатора на базе нейронечеткой сети структуры PNN-FNN-FNN* осуществлялось на коморбидных больных из экспериментальной группы с сопутствующими сердечно-сосудистыми заболеваниями. Контрольная группа формировалась путем случайного выбора по 25 пациентов из каждой экспериментальной группы коморбидных больных. В таблице 3 представлены результаты диагностики контрольной выборки коморбидных пациентов (ВБП + ИБС) двумя нейронечеткими классификаторами.

Таблица 3 – Экспериментальные данные по оценке степени тяжести ВБП в экспериментальной группе ВБП + ИБС на контрольной выборке

Обследуемые	Гибридный нейросетевой классификатор		Классификатор NFN	
	ω_0 (тяжелая)	ω_1 (легкая)	ω_0 (тяжелая)	ω_1 (легкая)
$n_{\omega_0} = 25$	21	4	18	7
$n_{\omega_1} = 25$	3	22	6	19

Экспериментальные исследования классификатора степени тяжести пневмонии с подключенным модулем классификации риска коморбидного заболевания на примере ИБС показали, что агрегация этих двух классификаторов в виде гибридной нейронной сети позволяет повысить качество оценки степени тяжести ВБП в среднем на 12% по всем показателям качества. Гибридная модель классификатора позволяет добавлять автономные интеллектуальные агенты классификации риска коморбидных заболеваний, а также использовать их агрегацию с другими шкалами риска ВБП.

Проведены исследования модуля контроля эффективности лечения ВБП, построенного на шкале PSI. На основе двух групп ФР, входящих в эту шкалу, получены две линейных модели динамики риска ВБП, по которым построено двумерное кластерное пространство, отражающее процесс эффективности лечения внебольничной пневмонией.

В шкале PSI имеются только две группы ФР, позволяющие оценить динамику степени тяжести ВБП. Это физикальные признаки и лабораторные признаки. Так как шкала PSI использует бальную оценку МР, то для каждой группы ФР запишем накопительную формулу для баллов риска в виде линейной модели:

$$y_1 = 20 \cdot КУ_1^{\phi} + 20 \cdot КУ_2^{\phi} + 20 \cdot КУ_3^{\phi} + 15 \cdot КУ_4^{\phi} + 10 \cdot КУ_5^{\phi}; \quad (3)$$

$$y_2 = 30 \cdot КУ_1^{\eta} + 20 \cdot КУ_2^{\eta} + 20 \cdot КУ_3^{\eta} + 10 \cdot КУ_4^{\eta} + 10 \cdot КУ_5^{\eta} + 10 \cdot КУ_6^{\eta}. \quad (4)$$

Коэффициенты $KУ$ характеризуют уверенность в том, что соответствующий ФР достиг своего порогового значения, которое определяется по шкале PSI и лежат в диапазоне от нуля до единицы. Эти коэффициенты являются нечеткими числами и представляются функциями принадлежности.

Апробация модуля мониторинга эффективности лечения ВБП осуществлена на пациентах из экспериментальной группы с затяжной ВБП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены теоретические исследования путей создания математических, алгоритмических и технических средств поддержки принятия врачебных решений в системах дистанционного мониторинга степени тяжести больных внебольничной пневмонией и ее динамики.

2. Разработан метод и алгоритмы локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах дистанционного мониторинга состояния здоровья амбулаторных больных, позволяющие синтезировать решающие модули оценки динамики состояния здоровья пациента в процессе лечения в кластерном пространстве факторов медицинского риска.

3. Разработан гибридный нейросетевой классификатор с гибридной нейронной сетью, содержащей три макрослоя, построенных на основе вероятностных нейронных сетей и нейронечетких сетей, предназначенный для оценки степени тяжести внебольничной пневмонии и определения эффективности ее плана лечения, позволяющий дифференцировать влияние коморбидности в зависимости от тяжести основного заболевания и повысить показатели качества классификации тяжести заболевания по сравнению с показателями качества нейронечеткого классификатора.

4. Для контроля степени тяжести внебольничной пневмонии и контроля эффективности ее лечения посредством интернет технологий разработан нейронечеткий классификатор, основанный на модели нечеткого логического вывода Мамдани-Ларсена, и позволяющий моделировать шкалы степени тяжести внебольничной пневмонии, осуществлять их агрегирование и классифицировать внебольничную пневмонию по классам степени тяжести, а также формировать многомерные кластерные пространства, отражающие процесс динамики эффективности лечения внебольничной пневмонии.

5. Разработана система поддержки принятия врачебных решений, предназначенная для мониторинга степени тяжести внебольничной пневмонии, включающая три модуля принятия решений по основному заболеванию и дополненная модулем оценки риска коморбидного заболевания, что позволило повысить качество оценки степени тяжести внебольничной пневмонии и осуществлять мониторинг эффективности ее плана лечения.

6. Проведены экспериментальные исследования показателей качества нейронечетких классификаторов в системе поддержки принятия врачебных решений по госпитализации пациентов с внебольничной пневмонией. Использование классификатора риска сопутствующего заболевания в гибридном нейронечетком классификаторе позволило повысить его качество классификации по сравнению с нейронечетким классификатором, в среднем, на 12%. Апробация модуля мониторинга эффективности лечения внебольничной пневмонии показала возможность контроля динамики заболевания на примере больных затяжной внебольничной пневмонией.

Рекомендации. Результаты исследования могут быть использованы в системах поддержки принятия врачебных решений при удаленном мониторинге степени тяжести заболевания внебольничной пневмонией.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений при прогнозировании заболеваний органов грудной клетки после респираторных вирусных инфекций.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. **Бутусов, А.В.** Алгоритмы мониторинга эффективности терапевтических и реабилитационных процедур по показателям клинического анализа крови в системе поддержки принятия врачебных решений / А.В. Бутусов, А.В. Киселев, Е.В. Петрунина, Р.И. Сафронов, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный // Известия Юго-Западного государственного университета. – Серия управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2023. – Т. 13, №1. - С. 170 - 190.

2. **Бутусов, А.В.** Метод и алгоритмы локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья / А.В. Бутусов, А.В. Киселев, Х.А. Хайдер Алавси, Е.В. Петрунина, Р.И. Сафронов, Л.В. Шульга // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, №2. – С. 1 - 20. - URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1333>. - DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.012.

3. **Бутусов, А.В.** Нейронечеткие сети для систем дистанционного мониторинга амбулаторных пациентов с заболеваниями органов дыхания / А.В. Бутусов, А.Х. Алавси Хайдер, Р.А. Карачевцев, А.Ю. Сухомлинов, С.А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. - Т.11, №3. – С. 1 – 16. - URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1425>. - DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.016.

Статьи и материалы конференций

4. **Бутусов, А.В.** Двумерный спектральный анализ кардиореспираторных сигналов в латентном мониторинге функционального состояния группы пациентов / А.В. Бутусов, Р.И. Сафронов, С. Кадырова // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы - 2022): сборник трудов XXXV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов (07 - 09 декабря 2022 г.). – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2022. - С. 400 - 403.

5. Родионова, С.Н. Нечеткая модель прогнозирования возникновения критической ишемии нижних конечностей с учетом защитных механизмов организма / С.Н. Родионова, **А.В. Бутусов** // Медико-экологические информационные технологии - 2022: сборник научных статей по материалам XXV Международной научно-технической конференции (16 - 17 мая 2022 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2022. - С. 150 - 155.

6. **Бутусов, А.В.** Нейросетевой коррелятор для разделения аддитивной смеси кардиореспираторных сигналов двух и более пациентов / А.В. Бутусов, Р.И. Сафронов, С.А. Филист // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сборник статей по материалам Восьмой Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием (25 - 26 октября 2022 г.). – Пермь: ПГНИУ, 2022. – С. 30 - 35.

7. **Бутусов, А.В.** Программное обеспечение для синтеза моделей классификаторов изображений видеоряда / А.В. Бутусов, Д.С. Кондрашов, И.Н. Горбачев, Х.А.Д. Часиб // Медико-экологические информационные технологии – 2022: сборник научных статей по материалам XXV Международной научно-технической конференции (16 - 17 мая 2022 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2022. – С. 8 - 15.

8. **Бутусов, А.В.** Моделирование синхронного мониторинга частоты дыхания двух и более пациентов / А.В. Бутусов, Р.И. Сафронов, С.А. Филист // Биотехнология и биомедицинская инженерия: сборник научных трудов по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием, посвященной 87-летию Курского государственного медицинского университета (27 октября 2022 г.). – Курск: КГМУ, 2022. - С. 87 - 91.

9. **Бутусов, А.В.** Устройство для дистанционного мониторинга температуры тела и частоты сердечных сокращений человека в процессе жизнедеятельности / А.В. Бутусов, С.А. Филист, А.В. Павленко // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии ФРЭМЭ'2022: труды XV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (28 - 30 июня 2022 г.). – Владимир-Суздаль: ООО "Графика", 2022. – С.323 - 327.

10. **Бутусов, А.В.** Алгоритм анализа динамики суррогатного маркера как инструмент контроля состояния здоровья в процессе лекарственных воздействий / А.В. Бутусов, О.Ю. Лукаш, Е.В. Петрунина // Моделирование и прогнозирование развития отраслей социально-экономической сферы: сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции (25 мая 2023 г.) – Курск: КГМУ, 2023. – С.31 - 35.

11. **Бутусов, А.В.** Анализ адаптационных механизмов в обеспечении жизнедеятельности и защите организма от воздействия внешних факторов / А.В. Бутусов, Р.И. Сафронов, Д.А. Фатнев // Медико-экологические информационные технологии - 2023: сборник научных статей по материалам XXVI Международной научно-технической конференции (18 - 19 мая 2023 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2023. - С. 230 - 240.

12. **Бутусов, А.В.** Метод нечеткого логического вывода для системы поддержки принятия решений по эффективности лечения внебольничной пневмонии / А.В. Бутусов, Р.И. Сафронов, А.Ю. Сухомлинов // Медико-экологические информационные технологии - 2023: сборник научных статей по материалам XXVI Международной научно-технической конференции (16 - 17 мая 2023 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2023. - С. 109 - 113.

13. **Бутусов, А.В.** Многоагентная система латентного контроля функционального состояния двух и более пациентов / А.В. Бутусов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития: сборник трудов Восьмой Всероссийской молодежной научной конференции (10 мая 2023 г.). – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – С. 248 - 250.

14. **Бутусов, А.В.** Нейро-нечеткая сеть для определения степени тяжести внебольничной пневмонии / А.В. Бутусов, Хайдер Али Хуссейн Алавси, С.А. Филист, В.В. Песок, А.Е. Пшеничный // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: материалы XXXI Всероссийского семинара (29 сентября 2023 г.). – Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2023. – С. 42 - 49.

Подписано в печать _____ 2023. Формат 60x84 1/16
Печатных листов 1,0. Тираж 80 экз. Заказ _____
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94