

на правах рукописи

Мяснянкин Максим Борисович

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ
РИСКА КОМОРБИДНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ВАРИАЦИЙ СИСТЕМНЫХ РИТМОВ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия
медицинского назначения

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
Филист Сергей Алексеевич
- Официальные оппоненты: **Чопоров Олег Николаевич,**
доктор технических наук, доцент,
Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко, проректор по цифровой трансформации (г. Воронеж)
- Коржук Николай Львович,**
кандидат технических наук, доцент,
Тульский государственный университет,
кафедра приборов и биотехнических систем,
профессор кафедры (г. Тула)
- Ведущая организация: **Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Южного федерального университета
(ИНЭП ЮФУ, г. Таганрог)**

Защита диссертации состоится «16» декабря 2022 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: 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/f93/kjuk6bvboquwbfm916xdlger88xv0v1s/Dissertatsiya-Myasnyankin-M.B.pdf>

Автореферат разослан « » ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) является одной из основных причин хронической заболеваемости и инвалидизации во всем мире и в настоящее время занимает четвертое место среди причин смерти. В свою очередь, ишемическая болезнь сердца (ИБС), занимающая в списке причин смерти первое место, относится к наиболее частым заболеваниям, сопутствующим ХОБЛ. Общие факторы риска (возраст, курение, гиподинамия, урбанизация) обуславливают высокую частоту встречаемости ХОБЛ в сочетании с ИБС, а общие звенья патогенеза (гипоксия, системное воспаление, окислительный стресс, эндотелиальная дисфункция) – их сложное коморбидное взаимодействие. Наличие у пациента сочетания ХОБЛ и ИБС способно существенно изменить течение каждого из ассоциированных заболеваний, однако особенности течения этих заболеваний в условиях коморбидности ХОБЛ и ИБС недостаточно изучены.

Важной проблемой дифференциальной диагностики этих заболеваний являются затруднения в применении стандартных тестов в силу возраста пациентов или неопределяемого вклада дыхательной недостаточности (ДН), обусловленной ХОБЛ, в сопутствующую патологию. Кроме того, проведение спирографии пациентам с использованием общепринятого критерия приводит к гипердиагностике ХОБЛ.

В связи с вышеизложенными, возникает необходимость в повышении качества дифференциальной диагностики этих заболеваний, что может быть реализовано посредством широко используемого в настоящее время мультимодального подхода, предполагающего использование для классификации функционального состояния (ФС) живой системы результатов мониторинга нескольких биологических сигналов и/или нескольких методов их анализа.

Таким образом, поиск новых технологий получения данных и новых компьютерных методов их обработки для интеллектуальной поддержки дифференциальной диагностики ХОБЛ и ИБС является актуальной и важной для практики задачей.

Степень разработанности темы исследования. Функциональное состояние кардиореспираторной (КР) системы, в состав которой входят сердечно-сосудистая система (ССС) и система дыхания (СД), является наиболее чувствительным предиктором функционального состояния организма в целом. Поэтому в основу построения мультимодального классификатора положены исследования в области кардиореспираторной синхронизации, получившие развитие при мониторинге апноэ [Ingrid Daubechies, с соавторами, 2009]. Анализ изменчивости биоритмов позволяет оценить функциональное состояние системы в целом, особенно на этапах переходных состояний, связанных с обострением одного из коморбидных заболеваний.

Для формирования дескрипторов для классификаторов ФС СД используются сигнал электромиограммы (ЭМГ), снимаемый с мышц,

обеспечивающих движение грудной клетки (ГД) и позволяющий выделять ритм дыхания (РД) не используя спирометрию. Исследования показали, что эти сигналы варьируются от индивидуума к индивидууму, поэтому для формирования дескрипторов необходим переход к относительным показателям, которые могут быть получены на основе спектрального анализа этих процессов или на основе анализа их взаимных спектров [Yu-Chen Huang с соавторами, 2021]. При этом вариабельность ритмов СД проявляется в области медленных волн, что требует длительного мониторинга сигналов для ее надежного анализа [А.Р. Romanchuk с соавторами, 2019].

К сожалению, в условиях реанимации, провести длительный мониторинг такого сигнала не представляется возможным. Например, регистрация параметров легочного газообмена за каждый дыхательный цикл посредством метабологафа Ultima PFX (США) требует осуществления дыхания через лицевую маску, что неприемлемо в условиях реанимации или в процессе активной жизнедеятельности. Выходом из этой ситуации является использование в качестве носителей информации о ФС СД хорошо изученных и легко доступных для длительного мониторинга кардиосигналов и электромиосигналов, которые несут комплексную информацию о КР системе [О.В. Гришин с соавторами, 2012].

Таким образом, научно-технической задачей исследования является разработка мультимодального классификатора для дифференциальной диагностики сердечно-сосудистых и респираторных осложнений, основанного на комплексном анализе электрофизиологических сигналов КР системы.

Цель работы. Повышение качества диагностики коморбидных заболеваний посредством мультимодальных классификаторов, построенных на дескрипторах, полученных на основе анализа синхронности ритмов кардиореспираторной системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ методов интеллектуальной поддержки диагностики коморбидных заболеваний при патологии кардиореспираторной системы;
- разработать метод формирования дескрипторов для классификатора функционального состояния системы дыхания на основе частотно-временного анализа электрокардиосигнала;
- предложить структуру и архитектуру иерархического классификатора функционального состояния системы дыхания, основанного на контроле вариаций системных ритмов на вейвлет-плоскости электрокардиосигнала;
- разработать модульную структуру программного обеспечения параллельной обработки медицинских сигналов в ОС Windows для многоканальной системы сбора данных для мультимодального классификатора коморбидных заболеваний;

- разработать мультимодальный классификатор для дифференциальной диагностики коморбидных заболеваний, основанный на параллельном мониторинге электрокардиосигнала и электромиосигнала;

- провести апробацию предложенных методов и алгоритмов на примере дифференциальной диагностики пациентов с сочетанными ИБС и ХОБЛ.

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

1. Метод формирования дескрипторов для классификатора коморбидных заболеваний, заключающийся в проведении априорных процедур определения спектрального диапазона ритма дыхания пациента и дискретизации кардиосигнала пациента на апертуре не менее 3 минут, отличающийся тем, что для получения дескрипторов используют вейвлет-плоскость кардиосигнала, на которой выделяют область строк, соответствующую спектру ритма дыхания, определяют показатели вариабельности этих строк по времени и по частоте, и используют их в качестве дескрипторов для обучаемого классификатора функционального состояния системы дыхания, позволяющий формировать дескрипторы как для классификаторов функционального состояния системы дыхания, так и для классификаторов функционального состояния сердечно сосудистой системы.

2. Структура и архитектура иерархического классификатора функционального состояния системы дыхания, включающие три иерархических нейронных сети, отличающиеся тем, что дескрипторы первой нейронной сети отражают вариации ритма дыхания во времени, дескрипторы второй нейронной сети определяются вариацией ритма дыхания по частоте, а третья нейронная сеть использует в качестве дескрипторов выходы первых двух нейронных сетей и является агрегатором их решений по классификации функционального состояния системы дыхания, позволяющие осуществлять классификацию коморбидных состояний.

3. Метод обработки и графического отображения многоканальных медицинских сигналов в квазиреальном времени, основанный на дроблении общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями, отличающийся алгоритмом работы ступени визуализации данных, позволяющий осуществлять конвейерную обработку многоканальных медицинских сигналов в операционной системе Windows.

4. Мультимодальный классификатор с двухуровневой иерархической структурой, включающий классификатор риска ХОБЛ, классификатор риска ИБС и два классификатора наличия коморбидного заболевания, отличающийся использованием для вычисления дескрипторов параметров спектральных характеристик системных ритмов, позволяющий осуществлять дифференциальную диагностику коморбидных заболеваний кардиореспираторной системы.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что изложенные методы и алгоритмы построения и функционирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике коморбидных заболеваний кардиореспираторной системы, основанные на анализе полисигналов, несущих комплексную информацию о функциональном состоянии кардиореспираторной системы. Разработанные методы и алгоритмы составили основу системы поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике больных ХОБЛ и ИБС.

Работа выполнена при поддержке РФФИ научный проект № 20-38-90058, регистрационный номер НИОКТР АААА-А20-120100890024-1 (2020-2022гг.) и в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета «Разработка медико-экологических информационных технологий».

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

Методы и средства исследований. Для решения поставленных задач использовались теория биотехнических систем медицинского назначения, математический аппарат цифровой обработки сигналов, статистический анализ, теория нейронных сетей, теория спектрального анализа, теория вейвлет-анализа, методы экспертного оценивания и принятия решений. При разработке модулей мультимодального классификатора в качестве инструментария использовался MATLAB 2018b с графическим интерфейсом пользователя для Neural Network Toolbox.

Положения, выносимые на защиту. 1. Метод формирования дескрипторов для классификатора коморбидных заболеваний, основанный на анализе вейвлет-плоскости кардиосигнала в области строк, соответствующих ритму дыхания, позволяет формировать дескрипторы как для классификаторов функционального состояния системы дыхания, так и для классификаторов функционального состояния сердечно-сосудистой системы. 2. Классификатор функционального состояния системы дыхания, построенный на основе анализа вариации ритма дыхания по времени и по частоте, позволяет повысить качество дифференциальной диагностики коморбидных заболеваний кардиореспираторной системы на 10...14% по основным показателям качества классификации. 3. Мультимодальный классификатор с двухуровневой иерархической структурой, включающий классификатор риска ХОБЛ, классификатор риска ИБС и два классификатора наличия коморбидного заболевания, позволяет осуществлять классификацию риска коморбидных заболеваний кардиореспираторной системы с основными показателями качества, не опускающимися ниже 80% с доверительными интервалами, не превышающими 5% от среднего значения.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования показали их воспроизводимость в различных условиях, непротиворечивость концепциям теории цифровой обработки и классификации электрофизиологических сигналов, а также аналогичным результатам, полученным другими исследователями. Методы и алгоритмы параллельного анализа и классификации электромиосигналов и кардиосигналов построены на теории цифровой обработки сигналов и согласуются с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 11 Международных и Всероссийских конференциях: «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (Пермь – 2020, 2021); «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир - Суздаль – 2020, 2022); «Нейроинформатика, её приложения и анализ данных» (Красноярск – 2021); «Информационные технологии и интеллектуальные системы принятия решений» (ITIDMS 2021) (Москва – 2021); «Лазерно-информационные технологии» (Новороссийск – 2021); «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы)» (Рязань – 2020, 2021); «Интеллектуальные информационные системы» (Воронеж – 2021), «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов – 2021), на научно-технических семинарах кафедры биомедицинской инженерии ЮЗГУ (Курск – 2019, 2020, 2021, 2022).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 18 научных работах, включающих 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, и 4 статьи в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников, включающего 96 отечественных и 15 зарубежных наименований. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе рассмотрена роль интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений в дифференциальной диагностике кардиореспираторных заболеваний. Очерчены проблемы диагностики этих заболеваний, связанные с коморбидностью и проведен анализ методов диагностики коморбидных заболеваний при патологии кардиореспираторной системы. Из анализа научно-технической литературы по этому направлению установлено, что проблемы коморбидности заболеваний дыхательной системы могут быть решены посредством анализа синхронности ритмов в дыхательной и сердечно-сосудистой системах. С этой целью могут быть

использованы частотно-временные преобразования, в частности, вейвлет-преобразование. Установлено, что на его основе могут быть построены системы поддержки принятия врачебных решений.

В заключение первого раздела формируются цель и задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке классификаторов ФС СД на основе анализа кардиосигналов в многомерном пространстве.

В известных методах классификации ФС СД, на основе которых определяется варибельность РД, используется запись пневмограммы. Аналитический обзор показал, что этот метод не позволяет качественно классифицировать ФС СД в случае коморбидных заболеваний, поэтому был предложен метод формирования дескрипторов для классификатора коморбидных заболеваний, который предусматривает параллельную запись пневмограммы и ЭКС и спектральный анализ пневмосигнала и вейвлет-анализ электрокардиосигнала. Устанавливается частотный диапазон, занимаемый пневмосигналом, а на вейвлет-плоскости электрокардиосигнала выделяются строки, принадлежащие частотному диапазону пневмосигнала. Определяются показатели варибельности этих строк по времени и по частоте, которые используются в качестве дескрипторов для обучаемого классификатора ФС СД, выполненного на многослойной нейронной сети прямого распространения. Нейронная сеть является нейронной сетью блочного типа и состоит из двух автономных нейронных сетей, каждая из которых имеет два выхода, показывающих вероятность нахождения СД в заданном ФС и вероятность нахождения СД в индифферентном классе, и третьей нейронной сети, агрегирующей решения первых двух по обоим выходам.

Для вычисления дескрипторов первой и второй автономных нейронных сетей формируют матрицу размером $L \times N$ из строк вейвлет-плоскости, лежащих в области частот РД. На рисунке 1 показан пример вейвлет-плоскости ЭКС. Параметры построения вейвлет-плоскости выбраны таким образом, чтобы вейвлет-плоскость покрывала частотный диапазон РД.

Дескрипторы определяются на основе анализа вариации вейвлет-коэффициентов по времени и по частоте в области РД вейвлет-плоскости. Эти вариации будем оценивать на временной апертуре ЭКС, то есть по оси сдвигов, и по частотной оси вейвлет-плоскости (оси масштабов). При этом вариация оценивается в определенном фрагменте вейвлет-плоскости, примеры которых представлены на рисунке 1. Такой фрагмент дает матрицу вейвлет-коэффициентов, элементы которой используем в качестве сырых данных для определения дескрипторов.

Для построения классификаторов ФС СД были использованы нейросетевые структуры с различными технологиями бустинга. Структурная схема иерархического классификатора представлена на рисунке 2. Он состоит из двух автономных нейронных сетей прямого распространения NET 13-1 и NET 13-2 и агрегирующей нейронной сети NET 13-3.

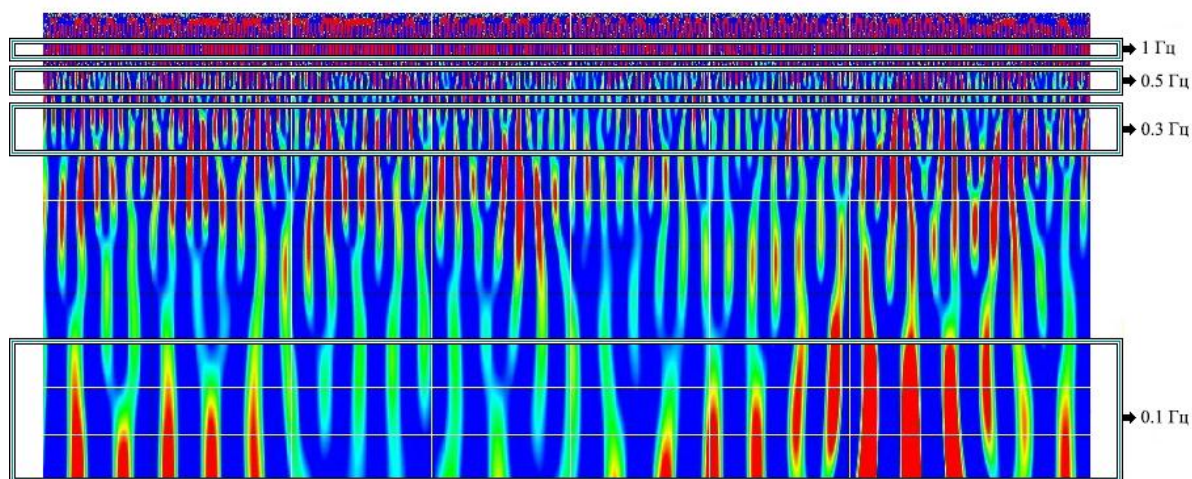


Рисунок 1 - Вейвлет-плоскость электрокардиосигнала с секторами медленных волн первого порядка HF (0,3 Гц) и второго порядка LF (0,1 Гц) с модуляцией их волнами с периодом 10 с и 60 с, соответственно

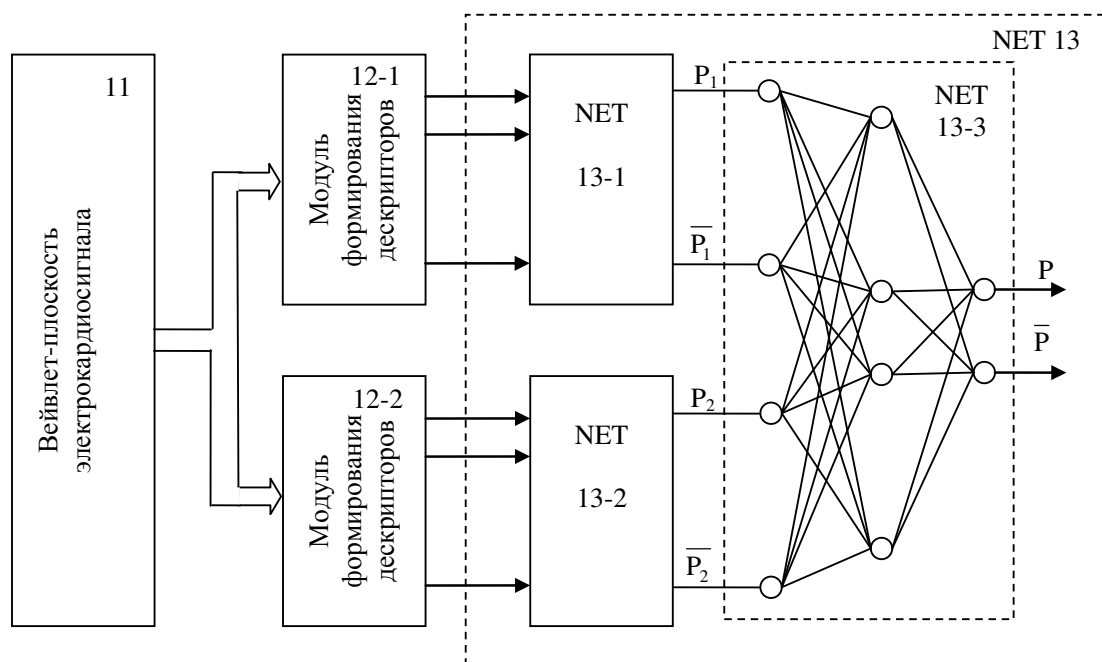


Рисунок 2 - Структурная схема иерархического классификатора

В качестве дескрипторов первой автономной нейронной сети используются показатели варибельности выделенных строк вейвлет-плоскости по времени, а в качестве дескрипторов второй автономной нейронной сети используются показатели варибельности выделенных строк вейвлет-плоскости по частоте.

Вычисления дескрипторов первой автономной нейронной сети NET 13-1 осуществляют посредством анализа строк вейвлет-плоскости, находящихся в области РД. В результате формируется матрица вейвлет-коэффициентов размером $L \times N$, определяются спектры Фурье в строках этой

матрицы. В результате множество вейвлет-коэффициентов $\{w_{\ell n}\}, \ell = \overline{1, L}, n = \overline{1, N}$ трансформируется в множество коэффициентов Фурье

$$\{f_{\ell k}\}, \ell = \overline{1, L}, k = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где в выражении (1)

$$f_{\ell k} = \sum_{n=1}^N w_{\ell n} \cdot \exp(-2\pi kn/N). \quad (2)$$

Путем селекции столбцов спектральных коэффициентов, в каждой строке из N спектральных коэффициентов выбирают M спектральных коэффициентов, принадлежащих диапазону VLF. Матрица спектральных коэффициентов преобразуется из $L \times N$ в $L \times M$ с элементами $\{f_{\ell m}^*\}, \ell = \overline{1, L}, m = \overline{1, M}$. Затем определяют первые разности элементов по строкам матрицы $L \times M$ как:

$$\Delta_{\ell m} = f_{\ell, m}^* - f_{\ell, m-1}^*, \quad m = \overline{2, M} \quad (3)$$

и осуществляют вычисление дескрипторов для NET 13-1:

$$d1_m = \sum_{\ell=2}^L |\Delta_{\ell m}|. \quad (4)$$

Вычисления дескрипторов второй автономной нейронной сети NET 13-2 осуществляется путем анализа строк вейвлет-плоскости, находящихся в области РД. В результате формируется матрица вейвлет-коэффициентов $\{w_{\ell n}\}, \ell = \overline{1, L}, n = \overline{1, N}$ размером $L \times N$. Полученную матрицу транспонируют и получают матрицу вейвлет-коэффициентов $\{w_{n\ell}\}, n = \overline{1, N}; \ell = \overline{1, L}$ размером $N \times L$. В каждой из N строк транспонированной матрицы находят максимальный по абсолютной величине вейвлет-коэффициент и определяют номер строки транспонированной матрицы, которой принадлежит этот вейвлет-коэффициент. В результате этой процедуры формируют вариационный ряд из N номеров столбцов транспонированной матрицы, элементы которого определяют согласно формуле

$$d2_n = \arg\left(\max_{\ell \in \overline{1, L}} (|w_{n\ell}|)\right), \quad (5)$$

На рисунке 3 красным и синим цветами выделены максимальные по амплитуде значения вейвлет-коэффициентов в строках транспонированной

матрицы. Значение элемента вариационного ряда определяется по максимальному значению абсолютной величины вейвлет-коэффициента, лежащему в красной или синей области. Элементу вариационного ряда присваивается значение номера столбца трансформированной матрицы, в котором находится максимальный элемент.

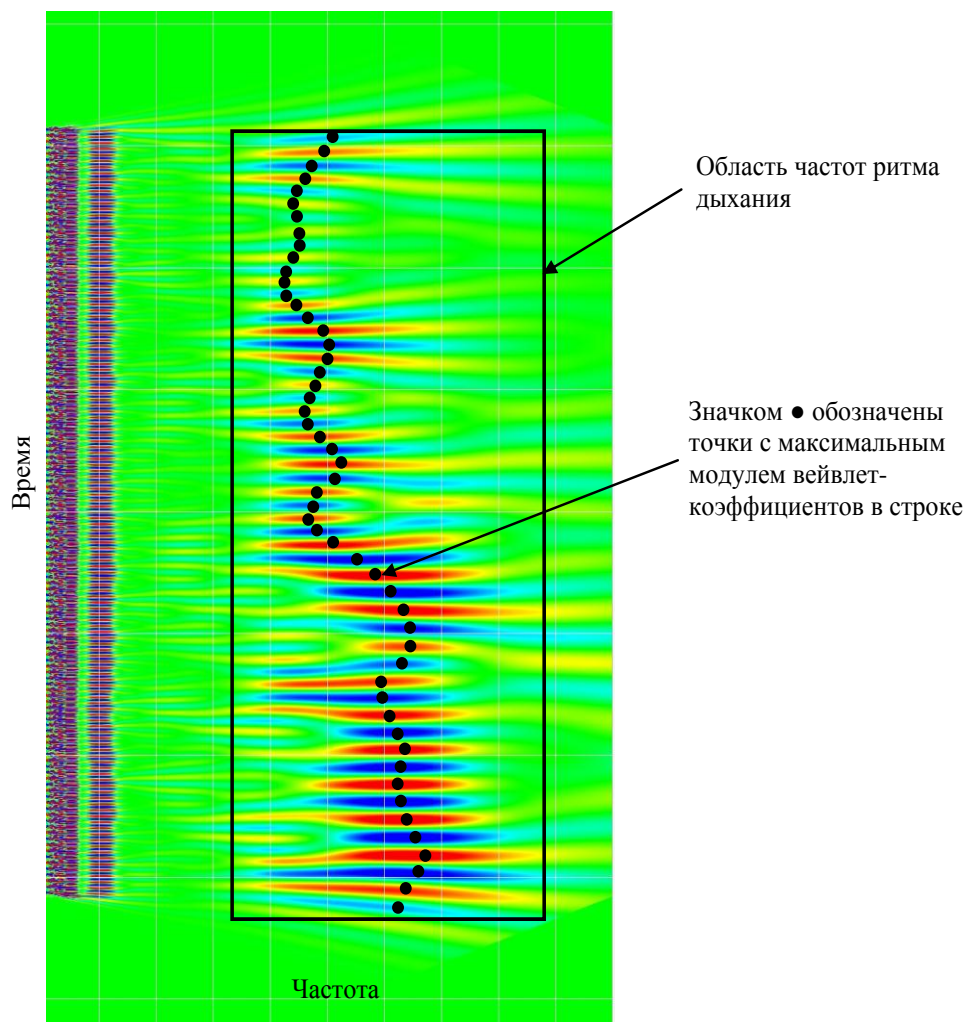


Рисунок 3 – Транспонированная матрица вейвлет-коэффициентов с выделенными в строках максимальными значениями модулей вейвлетов

Спектр полученного вариационного ряда определяется по формуле

$$fd2_k = \sum_{n=1}^N d2_n \cdot \exp(-2\pi kn / N), \quad (6)$$

и из множества $\{fd2_k\}, k = \overline{1, N}$ выбирают множество спектральных коэффициентов $\{fd2_k^*\}, k = \overline{1, \Theta}$, лежащих в диапазоне VLF, и используют значения элементов этого множества в качестве дескрипторов второй автономной нейронной сети.

Для обучения нейронных сетей NET 13-1 и NET 13-2 была сформирована обучающая выборка на основе результатов клинических исследований S пациентов, система дыхания которых находится в одном из двух классов функциональных состояний, одно из которых индифферентное. Из экспериментальной и контрольной групп методом скользящего экзамена формируются контрольные выборки. Deskрипторы определялись для каждой нейронной сети группы NET 13-1 и NET 13-2.

После обучения всех нейронных сетей первого иерархического уровня формируется таблица "объект - признак" для нейронной сети NET 13-3. Строками в ней являются пациенты из экспериментальной и контрольной групп. В качестве независимых переменных в этой таблице выступают выходы нейронных сетей первого иерархического уровня.

В третьем разделе осуществлена разработка программного обеспечения обработки медицинских сигналов в операционной среде Windows для многоканальной системы сбора данных с передачей информации по BlueTooth, предназначенного для получения «сырых» данных для мультимодальных классификаторов коморбидных заболеваний.

Разработан метод, позволяющий вести обработку и графическое отображение многоканальных медицинских сигналов в квазиреальном времени. Метод предполагает осуществление сегментирования программы на легко используемые, дополняемые и изменяемые модули-классы, которые объединены в общую иерархию с использованием объектно-ориентированных принципов наследования, что позволяет строить системы регистрации медицинских сигналов любой сложности в операционной системе Windows. Метод основан на дроблении общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями. На каждую ступень выделяется отдельная часть аппаратных средств, а между ступенями организуется процесс передачи входных-выходных данных. Предложенный метод при передаче данных между ступенями предполагает использование буферов памяти каждой ступени с настраиваемыми указателями на эти буферы таким образом, чтобы у каждой ступени был доступ к входным и выходным данным. Процесс чтения данных синхронизируется мьютексом, который создается в предыдущей ступени и открывается по определенному имени в последующей ступени.

Разработаны алгоритмы визуализации потоковых данных медицинских сигналов в операционной системе Windows. Источниками данных являлось разнообразное медицинское оборудование, такое как усилители биопотенциалов, электрокардиографы, пульсоксиметры, пульсометры и т.п., а также системы для вычисления диагностических показателей. Алгоритмы были реализованы в программном обеспечении, которое проектировалось с использованием объектно-ориентированных принципов наследования, что позволяет внедрять его в новые системы регистрации медицинских сигналов в операционной системе Windows.

Предложенная конвейерная архитектура системы обработки медицинских сигналов позволила осуществлять конвейерную обработку многоканальных медицинских сигналов. Разработана структура ступени регистрации данных, предназначенная для конвейерной архитектуры системы обработки медицинских сигналов, включающая функции конструкторов, деструкторов и процедуры основного функционала, позволяющая согласовать скорости обработки и скорости визуализации данных.

На основе предложенного метода разработана модульная структура программного обеспечения обработки медицинских сигналов в ОС Windows для многоканальной системы сбора данных. Обработка данных в ступенях-обработчиках конвейера включает в себя такие типичные операции, как запись данных на жесткий диск или в отдельный буфер памяти, фильтрация сигнала – удаление постоянной составляющей или подавление определенного спектра частот, вычисление диагностических показателей сигнала, анализ полученных показателей, принятие решений и т.п. Класс конвейерной обработки данных позволяет по нажатию кнопки в реальном времени начать сбор данных в специальный буфер памяти с последующей возможностью записи информации на жесткий диск. Согласно предложенной модульной структуре разработано программное обеспечение обработки многоканальных медицинских сигналов в операционной системе Windows в реальном времени.

В четвертом разделе описаны аппаратно-программная реализация предложенных методов и алгоритмов для построения мультимодальных классификаторов и представлены результаты экспериментов по определению их диагностической эффективности.

Разработано устройство для считывания и демодуляции электромиосигнала (ЭМГ). Устройство имеет два канала, в первом из которых осуществляется амплитудная демодуляция ЭМГ, а во втором – частотная. В результате амплитудного и частотного детектирования канальных ЭМГ образуются два канала, сигналы в которых оцифровываются и передаются в компьютер, в котором осуществляется их программная обработка. Это позволило осуществить оценку взаимной спектральной плотности между этими каналами, на основе которой осуществлено вычисление дескрипторов для «слабых» классификаторов.

Рисунок 4 иллюстрирует снятие ЭМГ посредством этого устройства с правой груди по трехэлектродной схеме с нормальным электродом посередине с точек, примерно равноудаленных от сердца.

Разработан мультимодальный классификатор с двухуровневой иерархической структурой, включающий классификатор риска ХОБЛ, классификатор риска ИБС и два классификатора наличия коморбидного заболевания, отличающийся использованием для вычисления дескрипторов параметров спектральных характеристик системных ритмов, позволяющий осуществлять дифференциальную диагностику коморбидных заболеваний.

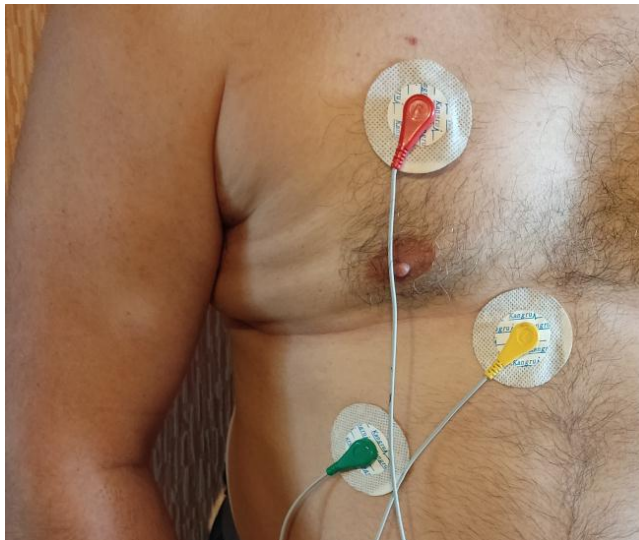


Рисунок 4 – Расположение электродов для регистрации поверхностной ЭМГ дыхательных мышц

Структурная схема мультимодального классификатора (ММК), построенная в соответствии вышеописанным алгоритмом, представлена на рисунке 5. Она имеет четыре классификатора на нижнем иерархическом уровне (NET1...NET4) и один классификатор (NET5) на верхнем иерархическом уровне. На основе ММК (рисунок 5) разработана структурная схема системы поддержки принятия врачебных решений при диагностике коморбидных заболеваний, включающая ЭВМ с программными модулями обработки и анализа данных и ряд вспомогательных технических средств, позволяющих измерять и оцифровывать электрофизиологические сигналы, а также формировать дескрипторы и обучать классификаторы, агрегированные в мультимодальный классификатор.

Для проверки адекватности методов и моделей в исследование было включено 202 пациента (с их согласия): 40 больных с диагнозом ХОБЛ – группа N2 (стадии 2...3 согласно глобальной стратегии GOLD), 69 – ИБС – группа N3, 93 – сочетанием ХОБЛ и ИБС – группа N1. Достоверные различия между группами, выявленные в ходе анализа анамнестических, клинических, лабораторных и инструментальных данных.

Поскольку имелся относительно небольшой контингент пациентов для обучения нейронных сетей иерархического классификатора, для увеличения объема обучающей выборки от каждого пациента было взято по пять трехминутных фрагментов ЭКС и ЭМГ с интервалами от двух до пяти минут, в зависимости от состояния пациента. Это позволило увеличить обучающую выборку до 1010 образцов.

Для тестирования классификатора использовались десять стратифицированных выборок. Для этого из 465 образцов класса N1 формируем десять тестовых выборок по 50 образцов, а из 200 образцов класса N2 - десять выборок по 20 образцов.

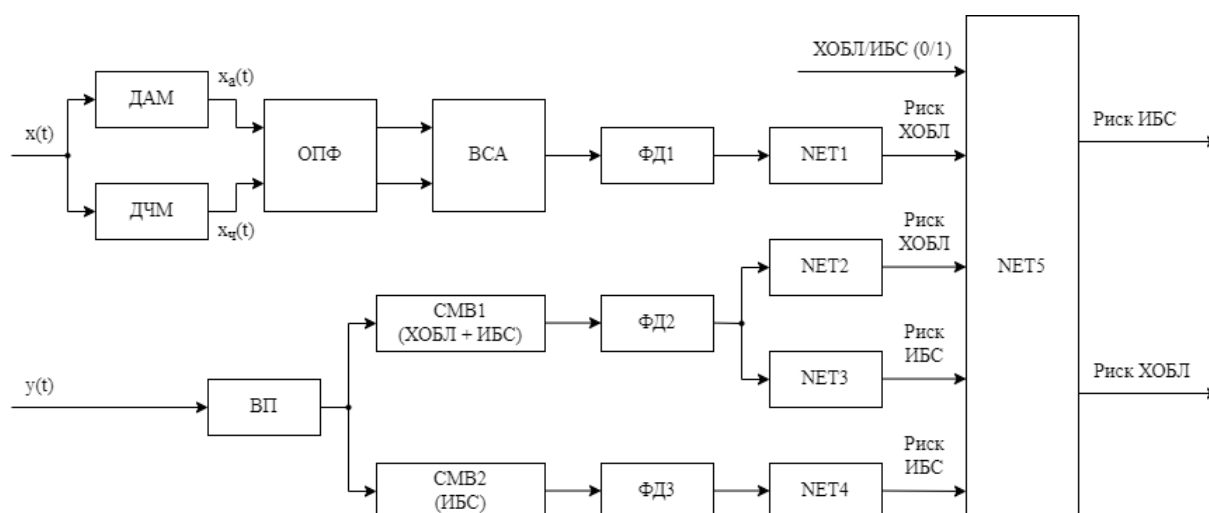


Рисунок 5 – Структурная схема мультимодального классификатора

Тестовую выборку для класса N2 формировали аналогичным образом.

В таблице 1 приведены средние значения и доверительные интервалы показателей качества классификации, полученные на этих контрольных выборках для классов N1 и N2.

Таблица 1 – Средние значения и доверительные интервалы показателей качества классификации, полученные в группе ХОБЛ + ИБС и ХОБЛ на контрольных выборках

Статистические показатели	Среднее	Стандартное отклонение	Доверительный интервал
ДЧ, %	84,26	2,99	84,26±2,04
ДС, %	91,86	2,68	91,86±1,82
ДЭ, %	87,70	2,36	87,70±1,60

В таблице 2 приведены средние значения и доверительные интервалы показателей качества классификации, полученные на контрольных выборках для классов N1 и N3.

Таблица 2 – Средние значения и доверительные интервалы показателей качества классификации, полученные в группе (ХОБЛ + ИБС) и ИБС на контрольных выборках

Статистические показатели	Среднее	Стандартное отклонение	Доверительный интервал
ДЧ, %	80,57	2,24	80,57±1,52
ДС, %	89,73	3,19	89,73±2,16
ДЭ, %	84,40	1,58	84,40±1,07

При диагностике коморбидных заболеваний на примере дифференциальной диагностики ХОБЛ с фоновой ИБС и дифференциальной диагностики ИБС с фоновой ХОБЛ показатели качества дифференциальной

диагностики предложенного ММК позволяют рекомендовать его для клинической практики. Модель классификатора позволяет добавлять автономные интеллектуальные агенты на разных иерархических уровнях классификатора, используя дополнительные предикторы кардиореспираторных заболеваний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ методов и средств интеллектуальной поддержки диагностики коморбидных заболеваний при патологии кардиореспираторной системы, который показал, что повышение эффективности их дифференциальной диагностики требует использование частотно-временного анализа электрофизиологических сигналов, отражающих функциональное состояние системы дыхания.

2. Разработан метод формирования дескрипторов для классификатора коморбидных заболеваний кардиореспираторной системы, заключающийся в проведении априорных процедур определения спектрального диапазона ритма дыхания пациента, дискретизации кардиосигнала пациента на апертуре не менее 3 минут, и последующего его вейвлет-анализа с определением показателей варибельности релевантных строк вейвлет-плоскости, позволяющий формировать дескрипторы как для классификаторов функционального состояния системы дыхания, так и для классификаторов функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

3. Разработана структура и архитектура иерархического классификатора функционального состояния системы дыхания, состоящего из трех автономных нейронных сетей прямого распространения сигнала, в котором дескрипторы первой нейронной сети отражают вариации ритма дыхания во времени, дескрипторы второй нейронной сети определяются вариацией по частоте в столбцах выделенного фрагмента вейвлет-плоскости, а третья нейронная сеть использует в качестве дескрипторов выходы первых двух нейронных сетей и является агрегатором их решений по классификации функционального состояния системы дыхания, позволяющие осуществлять синтез классификаторов функционального состояния системы дыхания.

4. Разработан метод обработки и графического отображения многоканальных медицинских сигналов в квазиреальном времени, основанный на дроблении общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями, позволяющий осуществлять конвейерную обработку многоканальных медицинских сигналов в операционной системе Windows, и на его основе разработана модульная структура программного обеспечения параллельной обработки медицинских сигналов в ОС Windows для формирования дескрипторов для мультимодального классификатора коморбидных заболеваний.

5. Разработан мультимодальный классификатор с двухуровневой иерархической структурой, включающий классификатор риска ХОБЛ,

классификатор риска ИБС и два классификатора наличия коморбидного заболевания, позволяющий осуществлять дифференциальную диагностику коморбидных заболеваний.

6. Разработана структурная схема системы поддержки принятия врачебных решений при диагностике коморбидных заболеваний, включающая ЭВМ с программными модулями обработки и анализа данных и ряд вспомогательных технических средств, позволяющих измерять и оцифровывать электрофизиологические сигналы, а также формировать дескрипторы и обучать классификаторы, агрегированные в мультимодальный классификатор

7. Проведены экспериментальные и статистические исследования показателей качества мультимодального классификатора на примере дифференциальной диагностики ХОБЛ с фоновой ИБС и дифференциальной диагностики ИБС с фоновой ХОБЛ. Основные статистические показатели качества мультимодального классификатора не были ниже 80% с доверительными интервалами, не превышающими 5% от среднего значения, что позволяет рекомендовать его для клинической практики. Модель классификатора позволяет добавлять автономные интеллектуальные агенты на разных иерархических уровнях классификатора, используя дополнительные предикторы кардиореспираторных заболеваний.

Рекомендации. Результаты исследования могут быть использованы для построения интеллектуальных систем медицинского назначения для поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике патологий системы дыхания и сердечно-сосудистой системы.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка интеллектуальных систем прогнозирования осложнений сердечно-сосудистой системы после респираторных вирусных заболеваний.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Ефремов, М.А. Интеллектуальные агенты для исследования адаптационного потенциала обучающихся с нозологическими особенностями / М.А. Ефремов, Е.В. Петрунина, **М.Б. Мяснянкин**, А.В. Мирошников // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т. 9, №1 (30). – С. 119-132.

2. **Мяснянкин, М.Б.** Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М.Б. Мяснянкин, С.А. Филист, А.В. Киселев, А.А. Кузьмин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2020. – Т. 10, №3/4. – С. 8-28.

3. Киселев, А.В. Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона / А.В. Киселев, А.А. Кузьмин, **М.Б. Мяснянкин**, А.А. Маслак, С.А. Филист, А.Ф. Рыбочкин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2022. – Т. 12, №1. – С. 8-32.

4. **Мяснянкин, М.Б.** Многопоточная архитектура программного обеспечения обработки многоканальных медицинских сигналов / М.Б. Мяснянкин, А.А. Кузьмин, В.В. Серебровский, Е.А. Алдохин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2022. – Т. 12, №2. – С. 76-97.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus

5. **Myasnyankin, M.B.** Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia / М.В. Myasnyankin, А.А. Kuzmin and S.A. Filist // Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference Artificial intelligence and digital technologies in technical systems 2020 (AIDTTS-2020) (20-21 October 2020 y.). – Volgograd: Publ: IOP Publishing Limited, 2021. – Vol. 1801. - Pp. 012046 (1-7). - DOI:10.1088/1742-6596/1801/1/012046.

6. **Myasnyankin, M.B.** Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Spectral Analysis of the Electrocardio Signal [Electronic resource] / М.В. Myasnyankin, А.А. Kuzmin, S.A. Filist and L.V. Shulga // CEUR Workshop Proceedings: Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems: 2021 International Scientific and Practical Conference (ITIDMS 2021) (20 January 2021 y.). – Moscow, 2021. – Vol. 2843. – Pp. 1-8. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2843/shortpaper031.pdf>.

7. Filist, S.A. Multimodal neural network classifier of the functional state of the respiratory system / S.A. Filist, **М.В. Myasnyankin**, R.I. Safronov and А.А. Kuzmin // Journal of Physics: Conference Series: III International scientific conference on applied physics, information technologies and engineering (APITECH-III 2021) (24 September – 03 October 2021 y.). – Krasnoyarsk: Publ: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2021. - Vol. 2094. – Pp. 032064 (1-8). - DOI:10.1088/1742-6596/2094/3/032064.

8. Filist, S.A. Biotechnical neural network system for predicting cardiovascular health state using processing of bio-signals [Electronic resource] / S. Filist, R.T. Al-Kasasbeh, O.V. Shatalova, M.H. Btoush, M. Namazov, А.А. Shaqadan, M. Alshamasin, N. Korenevskiy, S. Aloqeili, **М.В. Myasnyankin** // International Journal of Medical Engineering and Informatics. – 2022. – Vol. 1. - URL: <https://www.scilit.net/journal/2329896>. - DOI: 10.1504/IJMEI.2022.10047451.

Статьи и материалы конференций

9. Трифонов, А.А. Реабилитационная биотехническая система с электромиографическим контуром управления / А.А. Трифонов, А.А. Кузьмин, **М.Б. Мяснянкин**, С.А. Филист // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020: труды XIV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова (01-03 июля 2020 г.). – Владимир-Суздаль: ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2020. - Книга 2. – С.128-133.

10. **Мяснянкин, М.Б.** Нейросетевая система оценки риска внебольничной пневмонии / М.Б. Мяснянкин, С.А. Филист // Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сборник статей по материалам Международной конференции и Шестой Всероссийской научно-практической конференции (12-18 октября 2020 г.); под редакцией Л.Н. Ясницкого. – Пермь: ПГНИУ, 2020. - С. 386-392.

11. **Мяснянкин, М.Б.** Нечеткая нейросетевая модель прогнозирования пневмонии / М.Б. Мяснянкин, Д.В. Краснопивцева // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2020): сборник трудов XXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов (09-11 декабря 2020 г.). – Рязань: ИП Коняхин А.В., 2020. – С. 33-35.

12. Филист, С.А. Классификатор функционального состояния системы дыхания на основе дескрипторов, полученных по спектру Фурье вейвлет-коэффициентов электрокардиосигнала / С.А. Филист, **М.Б. Мяснянкин**, Р.И. Сафронов, А.А. Кузьмин // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: материалы XXIX Всероссийского семинара (24-26 сентября 2021 г.). – Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2021. - С.117-123.

13. **Мяснянкин, М.Б.** Вейвлет-спектр электрокардиосигнала в классификаторе функционального состояния системы дыхания / М.Б. Мяснянкин, А.В. Серебровский, С.А. Филист // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте – 2020: труды XXIX Международной научной конференции (13-18 сентября 2021 г.). – Новороссийск: НФ ФГБОУ ВО «БГТУ», 2021. - С. 150-152.

14. Трифонов, А.А. Виртуальная реальность в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А.А. Трифонов, С.А. Филист, А.А. Кузьмин, **М.Б. Мяснянкин** // Интеллектуальные информационные системы: сборник трудов Международной научно-практической конференции (02-04 декабря 2020 г.): в 2 ч. – Воронеж: Издательство ВГТУ, 2021. – Ч. 2. – С. 98-102.

15. **Мяснянкин, М.Б.** Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вейвлет-спектра электрокардиосигнала / М.Б. Мяснянкин, А.В. Серебровский, С.А. Филист // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития [Электронный ресурс]: сборник трудов

Шестой Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной Дню Радио и связи (12-13 мая 2021 г.). – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021. – С. 328-331. – URL: <https://tstu.ru/book/elib/pdf/2021/mockvitin.pdf>.

16. **Мяснянкин, М.Б.** Мультимодальный классификатор функционального состояния системы дыхания / М.Б. Мяснянкин, А.А. Кузьмин, С.А. Филист // Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сборник статей по материалам Седьмой Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием (21-22 октября 2021 г.). - Пермь, 2021. - С. 80-85.

17. **Мяснянкин, М.Б.** Мультимодальный классификатор функционального состояния системы дыхания / М.Б. Мяснянкин, С. Кадырова, А.Ю. Новоселов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2021): сборник трудов XXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов (08-10 декабря 2021 г.). – Рязань: ИП Коняхин А.В. (BookJet), 2021. - С. 180-183.

18. **Мяснянкин, М.Б.** Метод построения классификатора функционального состояния системы дыхания на основе анализа медленных волн системных ритмов / М.Б. Мяснянкин, А.В. Павленко, С. Кадырова // Вестник научных конференций. – 2022. – № 1-2 (77). - С. 84-88.