

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-1-221-241>

УДК 004.89

Гибридные технологии искусственного интеллекта и биоимпедансной спектроскопии для классификации функционального состояния органов и систем человека

Н. А. Корсунский¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: cor.nick2013@yandex.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке метода многоотведённой биоимпедансной спектроскопии грудной клетки, ориентированного на объективную и доступную оценку функционального состояния дыхательной системы и дифференциальную диагностику патологий лёгких.

Методы. В работе предложен метод регистрации и обработки биоимпедансных характеристик грудной клетки, основанный на использовании восьми контактных электродов и последовательном формировании двадцати восьми уникальных биоимпедансных отведений. Для каждого отведения выполняется многочастотное зондирование тканей переменным током малой амплитуды с последующей регистрацией амплитудно-фазочастотных характеристик, построением графиков Коула и вычислением диагностических дескрипторов. Обработка данных реализована с применением многоуровневого обучаемого классификатора, включающего нейронные сети первого уровня для анализа отдельных отведений, сети второго уровня - для агрегирования информации по топологическим группам, соответствующим анатомическим зонам грудной клетки, и интегрирующую сеть для формирования итоговой оценки функционального состояния дыхательной системы. Разработан аппаратно-программный модуль, обеспечивающий автоматизированное переключение отведений и формирование признакового пространства.

Результаты. Проведена экспериментальная апробация предложенного метода на группе добровольцев и пациентов с различными нарушениями вентилиционной функции лёгких. Показано, что использование многоотведённой схемы измерений и пространственно ориентированной обработки биоимпедансных данных обеспечивает повышение разделимости диагностических групп по сравнению с традиционными схемами биоимпедансных измерений. Разработанный классификатор продемонстрировал устойчивую работу и высокие показатели точности, чувствительности и специфичности, сопоставимые с результатами традиционных инструментальных методов диагностики. Применение собственного модуля коммутации электродных каналов позволило автоматизировать процесс измерений, снизить влияние артефактов и сократить время обследования.

Заключение. Предложенный метод многочастотной многоотведённой биоимпедансной спектроскопии в сочетании с многоуровневой архитектурой классификации может быть использован при создании систем поддержки клинических решений для диагностики социально значимых заболеваний дыхательной системы, обеспечивая расширение функциональных возможностей и повышение качества классификации.

Ключевые слова: биоимпедансная спектроскопия; классификатор; нечеткий логический вывод; гибридная нейронная сеть, интеллектуальная поддержка принятия медицинских решений.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Корсунский Н. А. Гибридные технологии искусственного интеллекта и биоимпедансной спектроскопии для классификации функционального состояния органов и систем человека // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2026. Т. 16, № 1. С. 221–241. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-1-221-241>

Поступила в редакцию 11.01.2026

Подписана в печать 10.02.2026

Опубликована 31.03.2026

Hybrid artificial intelligence and bioimpedance spectroscopy technologies for classifying the functional state of human organs and systems

Nikita A. Korsunsky¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: cor.nick2013@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a multi-lead bioimpedance spectroscopy method for objective and accessible assessment of the functional state of the respiratory system and differential diagnosis of lung pathologies.

Methods. A method for registering and processing thoracic bioimpedance characteristics is proposed, based on the use of eight contact electrodes and sequential formation of twenty-eight unique bioimpedance leads. For each lead, multifrequency tissue probing with low-amplitude alternating current is performed, followed by registration of amplitude-phase-frequency characteristics, construction of Cole plots, and extraction of diagnostic descriptors. Signal processing is implemented using a multi-level trainable classifier, including first-level neural networks for individual lead analysis, second-level networks aggregating information within topological groups corresponding to anatomical zones of the chest, and a final integrating network forming the overall assessment of the respiratory system functional state. A dedicated hardware-software module was developed to provide automated lead switching and feature space formation.

Results. Experimental validation of the proposed method was carried out on groups of healthy volunteers and patients with various ventilation impairments. The results demonstrate that the use of a multi-lead measurement scheme and spatially oriented bioimpedance data processing improves diagnostic group separability compared to conventional bioimpedance measurement approaches. The developed classifier showed stable performance and high accuracy, sensitivity, and specificity, comparable to those of traditional instrumental diagnostic methods. Integration of a custom electrode channel switching module enabled automation of measurements, reduction of artifacts, and shortening of examination time.

Conclusion. The proposed multifrequency multi-lead bioimpedance spectroscopy method combined with a multi-level classification architecture can be applied in clinical decision support systems for diagnosing socially significant respiratory diseases, enhancing classification quality and expanding the functionality of intelligent medical decision-making systems.

Keywords: bioimpedance spectroscopy; neural network classifier; fuzzy inference; hybrid neural network; intelligent medical decision support.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Korsunsky N.A. Hybrid artificial intelligence and bioimpedance spectroscopy technologies for classifying the functional state of human organs and systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravljenje, vychislitel'naja tehnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2026;16(1):221–241. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-1-221-241>

Received 11.01.2026

Accepted 10.02.2026

Published 31.03.2026

Введение

Вирусные поражения дыхательной системы, включая острые респираторные инфекции и вирусные формы пневмонии, занимают ведущее место в структуре заболеваемости и смертности населения. Наибольшие трудности вызывает раннее выявление патологического процесса и объективная оценка его тяжести, поскольку именно эти этапы определяют эффективность лечения и возможность предупреждения осложнений.

Применяемые в клинической практике методы визуализации (рентгенография, компьютерная томография) позволяют получать подробную информацию о состоянии лёгких, однако сопровождаются лучевой нагрузкой, требуют значительных ресурсов и не всегда подходят для регулярного мониторинга пациента. В последние годы внимание исследователей привлекает метод биоимпедансной спектроскопии, который основан на анализе электрических свойств тканей [1]. Доказано, что параметры биоимпеданса изменяются при воспалении, скоплении жидкости и нарушении вентиляционно-перфузионного равновесия, что открывает возможности для неинвазивной диагностики патологий дыхательной системы [2].

Вместе с тем большинство существующих биоимпедансных систем реализуются с использованием ограниченного числа электродов и фиксированных схем измерений, что приводит к формированию интегральных показателей, слабо чувствительных к пространственной неоднородности электрических свойств лёгочной ткани. Отсутствие учёта анизотропии грудной клетки и направлений протекания зондирующего тока снижает диагностическую информативность метода при локальных и региональных нарушениях вентиляции. Это обуславливает необходимость разработки многоотведённых биоимпедансных способов измерений и интеллектуальных алгоритмов обработки данных, ориентированных на анализ пространственной структуры импеданса дыхательной системы.

Главным преимуществом биоимпедансных технологий является их безопасность и возможность многократного применения без ущерба для пациента. Практическая значимость подобных технологий определяется их применимостью как в условиях интенсивной терапии, так и при проведении амбулаторного мониторинга. Параллельно с этим продолжается активное развитие интел-

лектуальных методов анализа, обеспечивающих автоматизацию обработки крупных массивов биомедицинских данных и снижение нагрузки на персонал.

Параллельно с этим активно развивается направление применения методов искусственного интеллекта, позволяющих автоматизировать обработку больших массивов данных [3]. Использование гибридных систем, сочетающих нейросетевые алгоритмы с методами нечеткой логики, показало эффективность в медицинской диагностике и прогнозировании [4].

Материалы и методы

В представленной работе рассматривается разработка и исследование технологий, объединяющих биоимпедансную спектроскопию и алгоритмы искусственного интеллекта, с целью классификации функционального состояния органов дыхания и поддержки принятия решений при диагностике вирусных заболеваний лёгких.

В биоимпедансных исследованиях используются два подхода для выявления патологических морфологических образований. Первый подход основан на абсолютном измерении биоимпеданса с последующей идентификацией сегментов с аномальной электрической проводимостью, а второй включает дифференциальные измерения, основанные на сравнении значений биоимпеданса, полученных в различных условиях измерения. Известны три метода изменения условий измерения.

Первый метод основан на изучении эволюции биоимпеданса во времени – Т-модальный. Этот метод часто используется при мониторинге функционального состояния дыхательной системы, в том числе в отделении интенсивной терапии. Измерительная система может содержать: 8 электродов, 16 электродов, 32 электрода или даже 64 электрода, индивидуально подключенные или размещенные на эластичном поясе или нетканом жилете, размеры которого адаптированы к антропометрическим характеристикам пациента. В случае мониторинга функционального состояния дыхательной системы электроды должны быть размещены в IV-V межреберном пространстве (расположение электродов слишком низко: влияние на значение комплайенса; расположение электродов слишком высоко: ложная гиперинфляция) [5].

Второй метод основан на изменении биоимпеданса в частотной области – F-модальный. Обычно изучаем биоимпеданс на частотах от 1 Гц до 500 кГц. Шаблон биоимпеданса можно получить с помощью массива электродов как пространство абсолютных значений импеданса с последующим наложением биоимпедансных изображений на разных частотах или путем анализа графиков Коула, если для анализа используются региональные измерения импеданса.

Третий метод основан на свойстве анизотропии биоимпеданса – А-модальный. Он связан с изучением направленных свойств проводимости

тканей. В норме биологические структуры характеризуются высокой степенью упорядоченности, что отражается на их электрических и электромагнитных параметрах. При патологических процессах – воспалении, нарушениях иммунного ответа или неопластическом росте – эта упорядоченность снижается, что приводит к росту изотропии и изменению электрических характеристик тканей [6]. Таким образом, снижение анизотропии можно рассматривать как один из биомаркеров нарушений функционального состояния организма.

В исследовании были получены данные об изменении электрического импеданса в различных анатомических областях организма. Проведённый анализ показал, что динамика импедансных характеристик проявляется как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне зондирующих токов. Наиболее выраженные изменения фиксируются у пациентов с деструктивными формами заболевания, что связано с нарушениями водно-электролитного баланса и морфологическими повреждениями как внутриклеточных, так и внеклеточных структур. По мере проведения терапии значения импеданса постепенно стремятся к физиологической норме, что подтверждает клиническую значимость метода.

В [1] авторами были получены данные биоимпеданса у группы добровольцев, не имевших хронической патологии дыхательной системы. Целью эксперимента являлась проверка кор-

ректности применения амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) для формирования информативных признаков, используемых при построении классификаторов функционального состояния организма [7]. Было установлено, что значения биоимпеданса в различных частотных диапазонах изменяются в зависимости от индивидуальных особенностей организма, однако сохраняют устойчивые закономерности. Наибольшие изменения регистрировались в области низких и средних частот, что связано с перераспределением жидкости между внутриклеточным и внеклеточным секторами [8]. При этом использование медианных значений в поддиапазонах частот позволило минимизировать влияние случайных шумов и повысить точность формирования дескрипторов. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения метода: даже при обследовании здоровых добровольцев выявлены стабильные характеристики, которые могут служить основой для построения векторов признаков [9]. Это позволяет рекомендовать предложенный подход в качестве базового при разработке интеллектуальных систем классификации заболеваний дыхательной системы.

Интеллектуальные системы поддержки медицинских решений широко применяются для прогнозирования клинических рисков и анализа данных при социально значимых патологиях

[10]. В рамках проводимого исследования была разработана и протестирована система, включающая базу предикторов риска, извлекаемых из результатов биоимпедансных измерений, в т. ч. из биоимпедансной спектроскопии. Центральной задачей являлось формирование информативного признакового пространства для последующего использования в системе дифференциальной диагностики заболеваний лёгких.

В качестве метода получения исходных данных была выбрана импедансная спектроскопия, описанная ранее в [11]. Метод основан на зондировании биоматериала полигармоническими токами в нескольких взаимно независимых отведениях [12]. Для каждого из отведений формируется амплитудно-фазово-частотная характеристика импеданса, представляющая собой разновидность диаграммы Коула [13]. Получение подобных зависимостей позволяет выделять суррогатные маркеры, преобразуемые в

числовые дескрипторы для дальнейшей классификации [14].

Для проведения измерений используется система из восьми контактных электродов, размещённых на передней, боковых и задней поверхностях грудной клетки пациента. Путём последовательного перебора всех уникальных пар электродов формируется 28 биоимпедансных отведений, различающихся направлением протекания зондирующего тока и пространственной ориентацией области чувствительности (рис. 1). Сформированные импедансные отведения распределяются по шести топологическим группам в соответствии с пространственным расположением электродов и направлениями протекания зондирующего тока. Выделяются передняя верхняя и передняя нижняя группы, правая и левая боковые группы, а также задняя верхняя и задняя нижняя группы отведений, соответствующие основным анатомическим зонам грудной клетки.

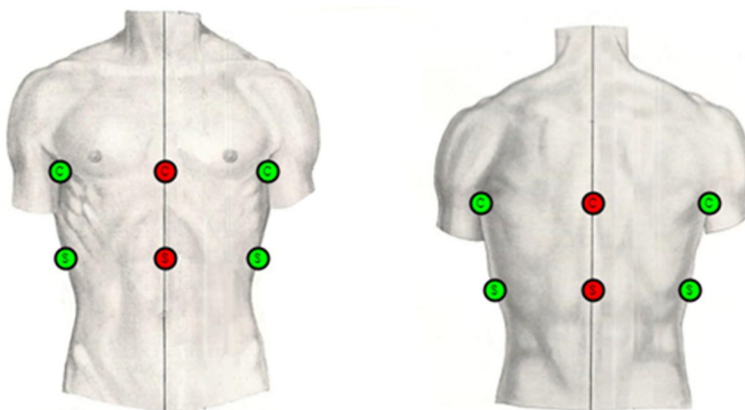


Рис. 1. Топология размещения электродов при проведении биоимпедансных исследований на поверхности грудной клетки с формированием многоотведённой измерительной конфигурации

Fig. 1. The topology of electrode placement during bioimpedance studies on the surface of the chest with the formation of a multi-directional measuring configuration

Такой подход позволяет регистрировать пространственно распределённые изменения электрических свойств лёгочной ткани и учитывать региональные особенности вентиляции. Полученные биоимпедансные сигналы используются для формирования диагностических признаков, отражающих региональные особенности электрических свойств лёгочной ткани, и последующей интеллектуальной классификации функционального состояния дыхательной системы.

Использование восьми контактных электродов и последовательная коммутация всех уникальных пар позволяли регистрировать двадцать восемь биоимпедансных отведений, различающихся направлением протекания зондирующего тока и ориентацией чувствительных областей. По результатам

многочастотных измерений для каждого отведения строились комплексные диаграммы биоимпеданса в виде графиков Коула, отражающих взаимосвязь действительной и мнимой составляющих импеданса [15]. На основе анализа формы полученных зависимостей выполнялось формирование векторов диагностических дескрипторов, характеризующих геометрию кривой и её частотные особенности. Для повышения устойчивости последующей классификации диапазон значений действительной части импеданса был разделён на шесть поддиапазонов, что позволило повысить чувствительность признакового пространства к изменению функционального состояния тканей.

Рассмотрим пример формирования вектора информативных признаков на основе графика Коула (рис. 2).

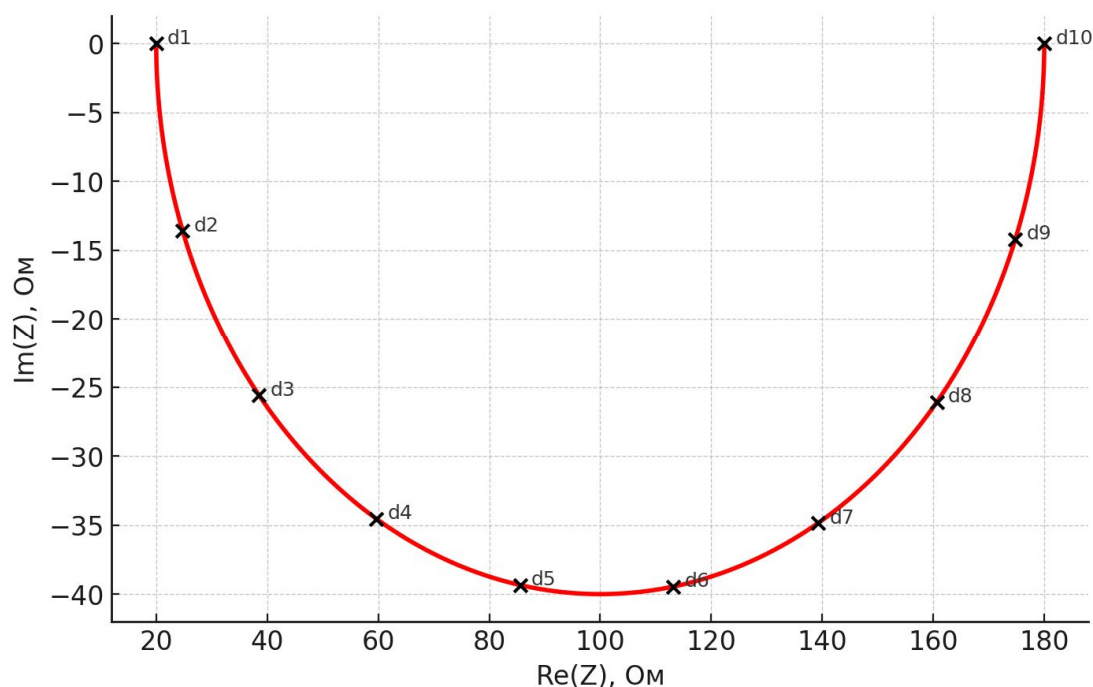


Рис. 2. Пример формирования вектора информативных признаков

Fig. 2. Example of forming a vector of informative features

Из каждого графика выделяется набор диагностических дескрипторов, характеризующих форму кривой, частотные свойства и соотношение действительной и мнимой составляющих импеданса. Полученные дескрипторы формируют вектор признаков, используемый на последующих этапах автоматизированной классификации (см. рис. 2).

В рамках дифференциальной диагностики вирусных заболеваний лёгких система поддержки принятия решений оценивает вероятности альтернативных гипотез, которые могут быть выражены как в балльной форме, так и в процентах. Сравнение этих значений предо-

ставляет лицу, принимающему решение, объективные критерии для выбора диагностической или профилактической стратегии. Таким образом, даже частично неопределённые или нечёткие данные могут быть использованы в качестве диагностических маркеров.

Разрабатываемый классификатор реализован в виде многоуровневой нейросетевой структуры, обеспечивающей поэтапную обработку биоимпедансных данных и формирование интегральной оценки функционального состояния дыхательной системы. Рассмотрим структурную схему предложенного классификатора (рис. 3).

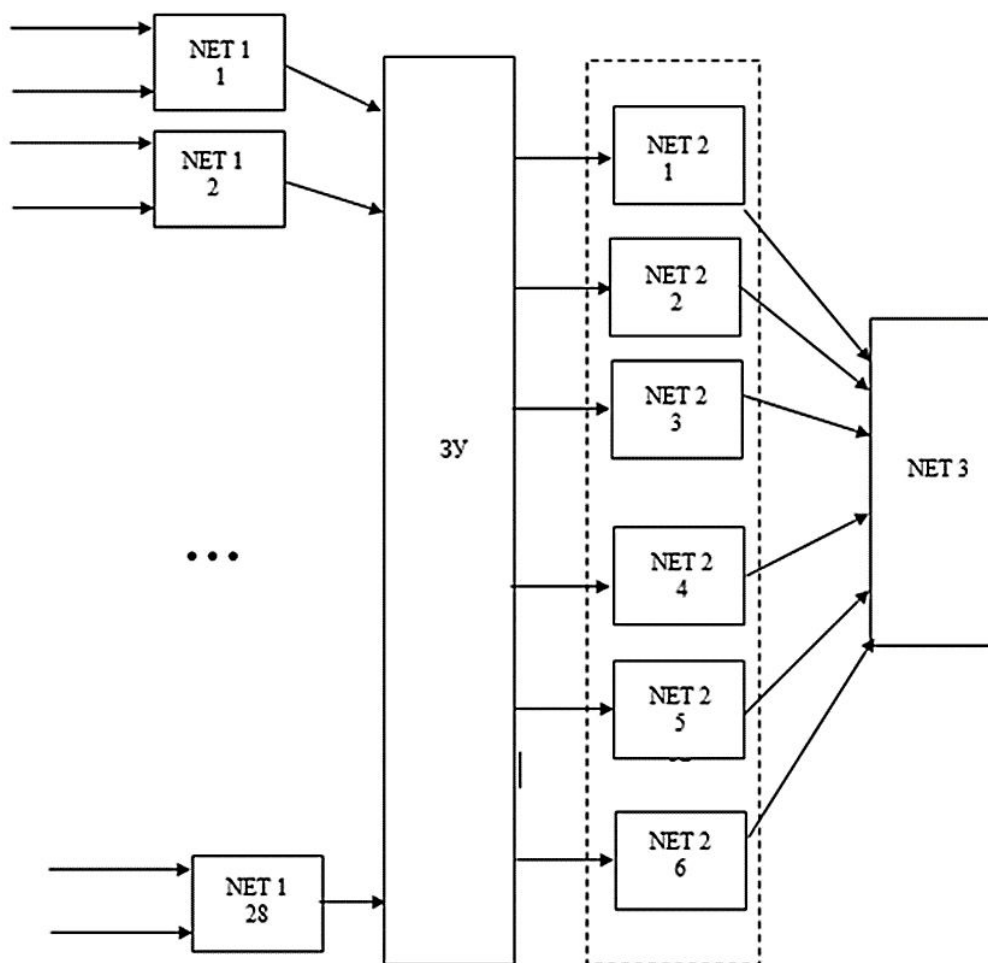


Рис. 3. Структура гибридной системы классификации

Fig. 3. Structure of a hybrid classification system

На первом иерархическом уровне гибридной системы функционируют нейронные сети, каждая из которых ассоциирована с отдельным биоимпедансным отведением и выполняет анализ набора диагностических дескрипторов. Поскольку формирование отведений выполняется последовательно, выходные значения нейронных сетей первого уровня сохраняются в запоминающем устройстве и используются на последующих этапах обработки.

На втором иерархическом уровне реализованы нейронные сети, агрегирующие результаты первого уровня в соответствии с топологическими группами отведений, сформированными на основе пространственного расположения электродов и соответствующих анатомических зон грудной клетки. Такое агрегирование позволяет учитывать региональные особенности распределения биоимпеданса и снижать влияние локальных артефактов измерений.

На третьем иерархическом уровне используется интегрирующая нейронная сеть, объединяющая выходные сигналы сетей второго уровня и формирующая итоговую классификационную оценку функционального состояния дыхательной системы.

Применение многоуровневой архитектуры обеспечивает устойчивость классификации, повышение достоверности принимаемых решений и адаптацию к вариабельности биоимпедансных данных. Диагностика заболеваний дыхательной системы требует применения

методов, обеспечивающих дифференциацию состояний со схожей клинической симптоматикой, а также количественную оценку степени функциональных нарушений.

В этой связи при проектировании интеллектуальных систем поддержки принятия медицинских решений широкое распространение получили подходы, основанные на применении многоуровневых нейросетевых моделей и агрегировании информативных признаков, получаемых из измерительных данных [16]. В предлагаемой системе поддержки принятия решений в качестве основного источника диагностической информации используются биоимпедансные характеристики грудной клетки, регистрируемые при многоотведённом зондировании. Анализ данных реализуется на основе многоуровневого нейросетевого классификатора, включающего последовательные этапы обработки отдельных импедансных отведений, их агрегирование по топологическим группам, соответствующим анатомическим зонам грудной клетки, и формирование итоговой классификационной оценки функционального состояния дыхательной системы.

Для проведения биоимпедансных исследований использовалось устройство сбора данных E20-10 производства компании L-Card, которое служило базовым элементом измерительной системы. Структурная схема прибора приведена ниже (рис. 4).

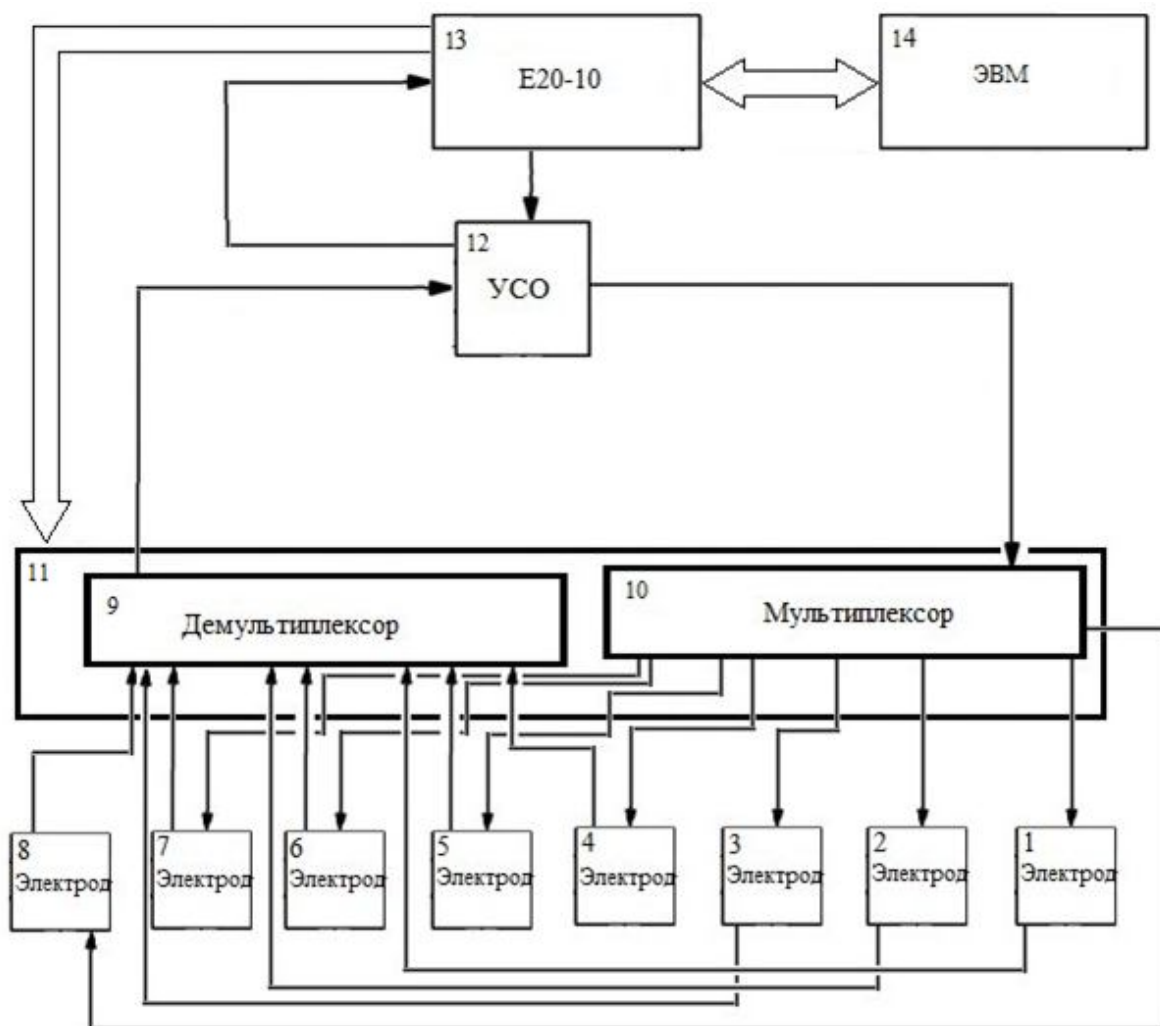


Рис. 4. Структурная схема прибора для биоимпедансной спектроскопии

Fig. 4. Block diagram of a device for bioimpedance spectroscopy

В состав измерительной системы входили три основных блока:

- E20-10 – модуль сбора данных, содержащий каналы АЦП и ЦАП для формирования и регистрации сигналов;
- преобразователь «ток – напряжение», обеспечивающий корректное согласование сигналов между объектом исследования и системой регистрации;
- коммуникационный блок с биологическим объектом, через который осуществлялось подключение электродов к исследуемым тканям.

Такое построение системы позволяет формировать амплитудно-фазово-частотные характеристики биоимпеданса в широком диапазоне частот и создавать пространство информативных признаков для дальнейшего анализа гибридными классификаторами.

Диапазон рабочих частот зондирующего сигнала составлял от 0 Гц до 20 кГц. Амплитуда тока подбиралась индивидуально в пределах 10–20 мкА, что обеспечивало безопасность процедуры и отсутствие искажений, связан-

ных с влиянием силы тока на биообъект. Данные пациентов, а также дата, установленная для обучения нейронных моделей, хранятся в базе данных (БД).

В составе программного инструментария использовался модуль нечёткого вывода *gusfis*, разработанный на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ, который реализует алгоритмы логического вывода по Мамдани – Заде, предоставляет возможность настройки функций принадлежности, редактирования базы правил и визуализации результата.

Дополнительно применялся программный пакет, предназначенный для параметризации алгоритмов обработки сигналов и моделирования диагностических решений. Также в работе использовался программный комплекс, основанный на гибридном генетическом алгоритме для идентификации параметров нелинейных моделей импеданса биоматериала [10]. Его применение позволило оптимизировать процесс подбора параметров эквивалентных электрических схем и повысить точность аппроксимации экспериментальных данных.

На рисунке 5 приведена схема работы гибридного алгоритма с этапами инициализации, селекции, кроссовера, мутации и локальной оптимизации.

Использование таких инструментов позволило объединить возможности классических нечетких моделей и методов эволюционной оптимизации, что значительно расширяет функциональ-

ность системы поддержки принятия решений.



Рис. 5. Схема алгоритма оптимизации параметров гибридного алгоритма

Fig. 5. Scheme of the hybrid algorithm parameter optimization algorithm

Программный модуль включает специализированный интерфейс для настройки и проведения биоимпедансных измерений, а также визуализации получаемых данных, такие как: выбор формы тока (синусоидальной или пря-

моугольной); начальная и конечная частоты; шаг и частота дискретизации. Такая гибкость конфигурации позволя-

ла адаптировать измерительный процесс под конкретные условия эксперимента (рис. 6).

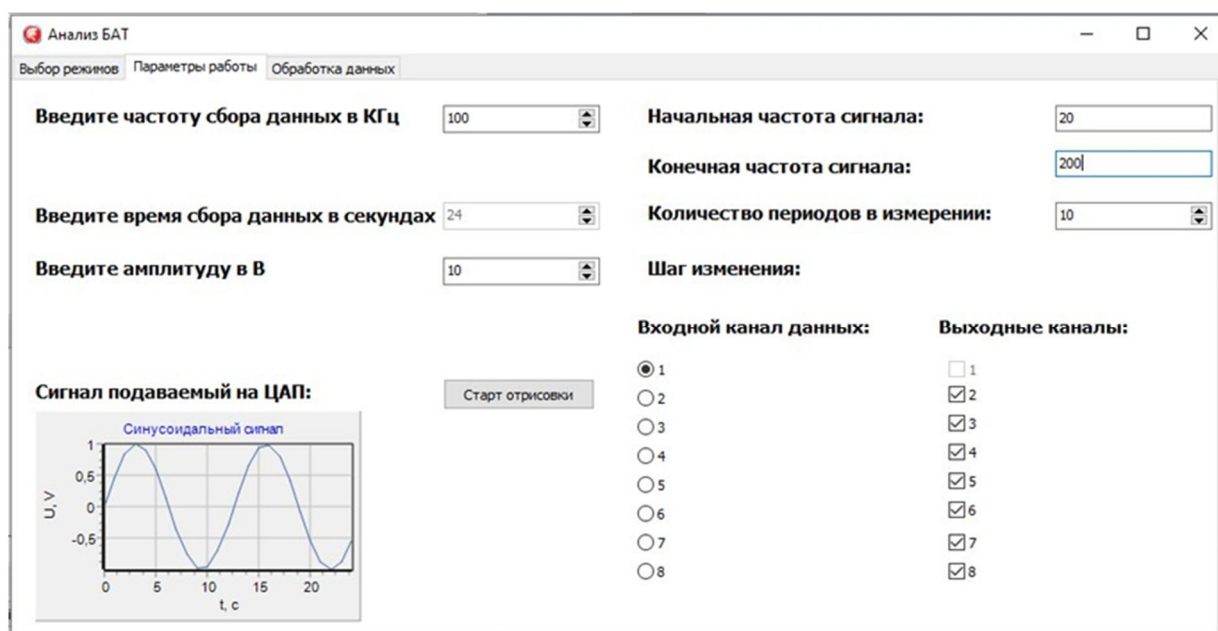


Рис. 6. Окно настройки параметров биоимпедансного исследования в программном модуле

Fig. 6. The window for setting up bioimpedance parameters in the software module

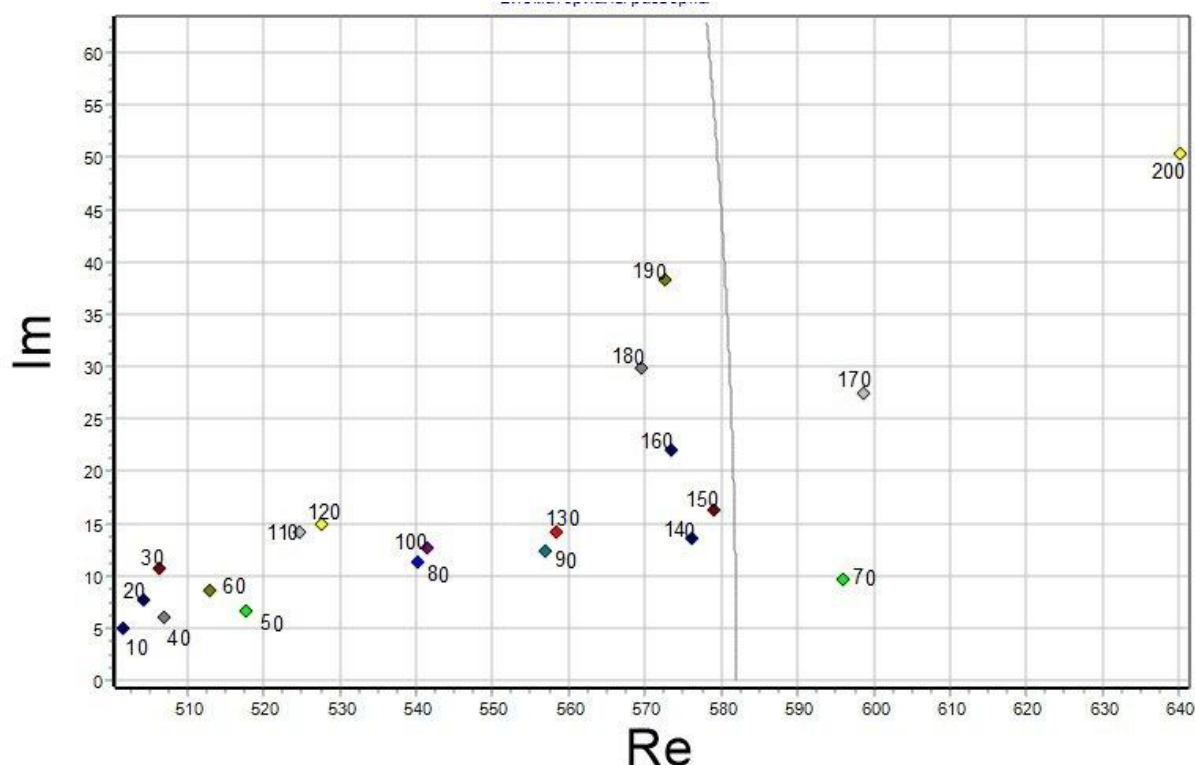


Рис. 7. Детализированный результат биоимпедансного исследования для выбранной пары электродов с инструментами анализа

Fig. 7. Detailed result of a bioimpedance study for a selected pair of electrodes with analysis tools

Интерфейс предоставляет возможность выбора активных каналов мультиплексора (от 1 до 8) для подключения соответствующую

Для детального анализа оператор может выбрать любой из графиков, после чего открывается окно с его увеличенным представлением (рис. 7), содержащее инструменты для масштабирования, измерения точных значений и сравнения с предыдущими или эталонными данными.

Представленная функциональность обеспечивает удобную визуализацию и первичный анализ данных перед их отправкой в гибридный классификатор.

Результаты и их обсуждение

Для проверки работоспособности разработанного метода были сформированы три экспериментальные группы,

включающие пациентов Курской областной клинической больницы. Исследование проводилось в период 2019–2023 гг. Распределение пациентов по группам осуществлялось на основании комплекса диагностических процедур, включавших анализ анамнеза, физикальный осмотр, лабораторные и ультразвуковые исследования, лапароскопию, интраоперационную ревизию и компьютерную томографию. Все участники исследования подписали информированное добровольное согласие на участие в эксперименте и были уведомлены о возможном использовании их обезличенных медицинских данных в научных публикациях.

На рисунке 8 представлен пример проведения эксперимента биоимпедансных исследований в восьми ортогональных отведениях, проведенных на одном из добровольцев.

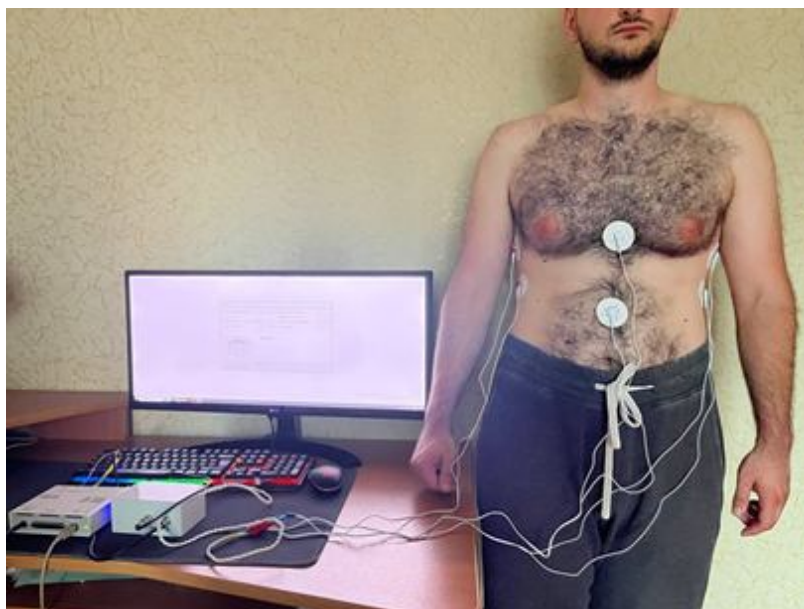


Рис. 8. Фотография проведения измерений биоимпеданса в восьми ортогональных отведениях у одного из добровольцев

Fig. 8. A photograph of the results of bioimpedance measurements in eight orthogonal leads from one of the volunteers

В устройстве, согласно блочной схеме на рисунке 4, использовалось устройство сбора данных E20-10 от L-Card (<https://www.lcard.ru/>), блочная схема которого показана ниже (рис. 9).

В состав модуля входят четыре аналого-цифровых канала с разрядностью 14 бит и максимально допустимой частотой дискретизации до 10 МГц. Переключение между каналами осуществляется встроенным мультиплексором. E20-10 содержит 16 цифровых линий, работающих в соответствии с уровнями логики TTL, а также два цифро-аналоговых канала с 12-разрядным преобразованием и диапазоном выходного напряжения ± 5 В. Такое сочетание

АЦП, ЦАП и цифровых портов делает модуль пригодным как для регистрации многоканальных сигналов, так и для организации управляющих воздействий на внешние устройства. Наличие указанной конфигурации позволяет использовать модуль в составе измерительных комплексов, требующих высокой частоты опроса каналов, например, в задачах биомедицинского мониторинга, экспериментальной электроники и автоматизированного контроля.

В работе E20-10 был дополнен специализированным интерфейсным модулем для взаимодействия с биологическим объектом, архитектура которого показана ниже (рис. 10).

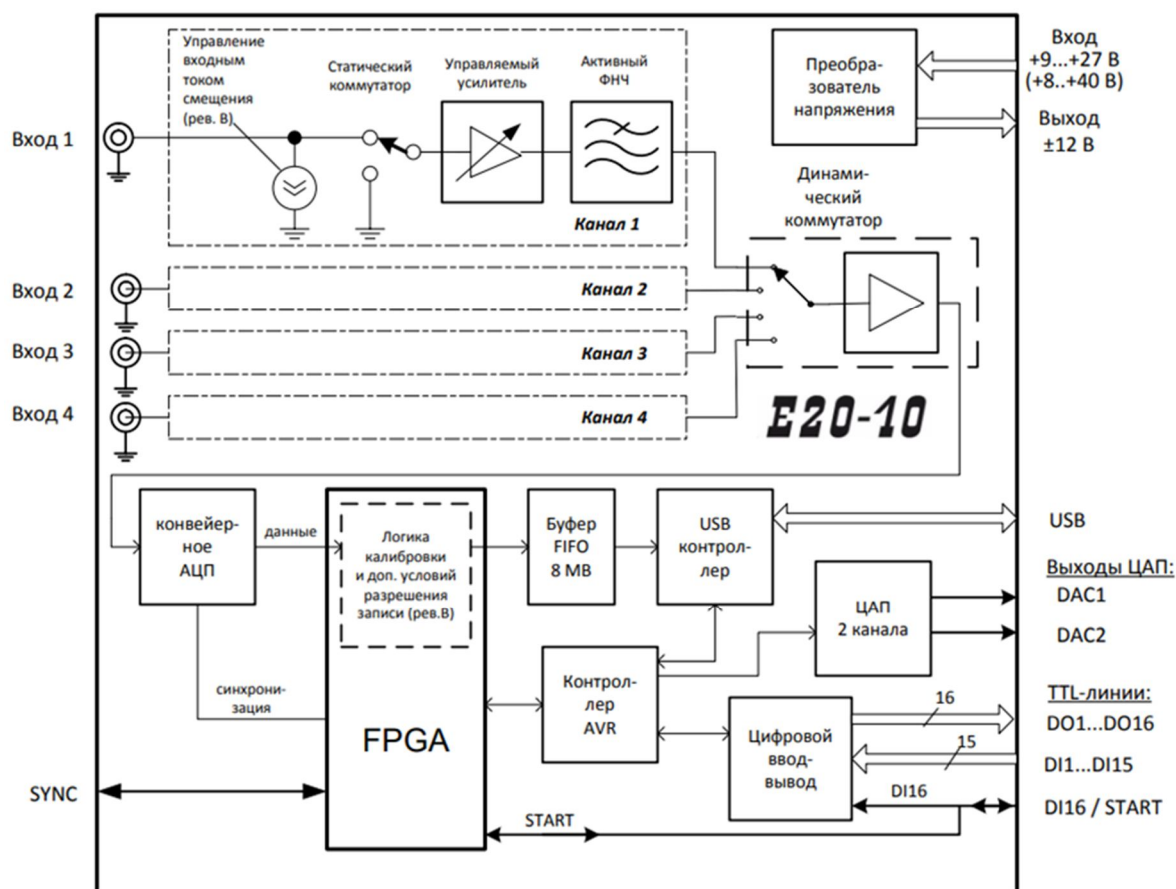
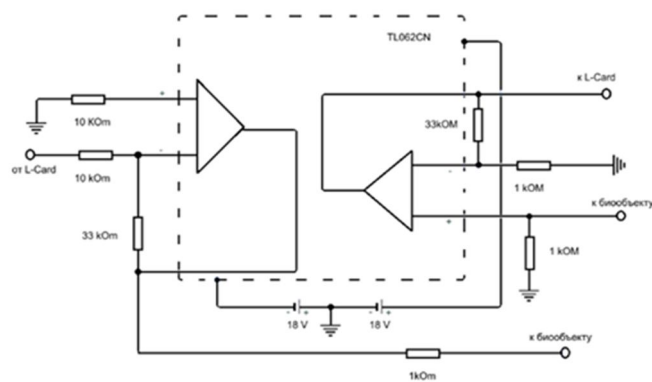


Рис. 9. Структурная схема устройства сбора данных E20-10 с L-Card

Fig. 9. Block diagram of the E20-10 data acquisition device with L-Card



а



б

Рис. 10. Модуль связи с биологическим объектом: а – схема электрическая принципиальная; б – фотография модуля

Fig. 10. Module for communication with a biological object: а – electrical schematic diagram; б – photo of the module

Для расширения возможностей биоимпедансной спектроскопии использовался собственный модуль коммутации электродных каналов. Его интеграция в состав измерительной системы позволила автоматизировать процесс переключения отведений,

уменьшить влияние артефактов и сократить время обследования. Особенность реализации заключается в цифровом управлении переключением каналов и возможности работы с многомерными наборами данных. Его конструкция показана ниже (рис. 11).

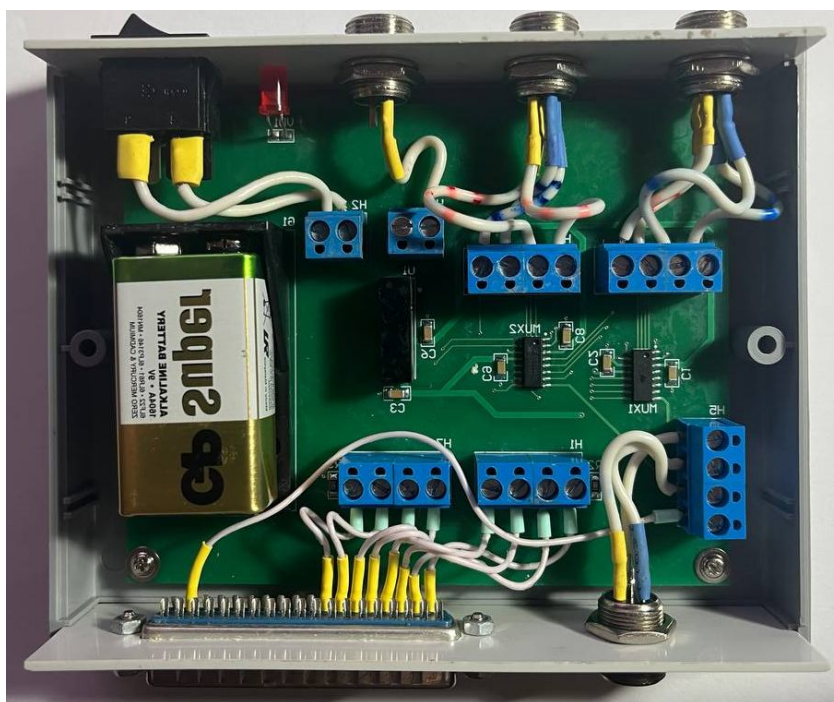


Рис. 11. Фотография компонентов мультиплексора

Fig. 11. Photo of the multiplexer components

Коммутация каналов осуществляется микроконтроллером, благодаря чему мультиплексор интегрируется в состав автоматизированного комплекса регистрации биоимпедансных данных. Включение модуля коммутации в комплекс позволило организовать параллельные измерения в различных отведениях, что дало возможность формировать многомерные выборки данных. Такой подход обеспечивает совместимость экспериментов с методами машинного обучения и повышает устойчивость классификации функциональных состояний.

Для валидации предложенного метода были сформированы три экспериментальные группы пациентов. В исследовании приняли участие больные из Курской областной клинической больницы, а также группа здоровых добровольцев.

Группа I включала пациентов с подтверждённой вирусной пневмонией. У большинства больных наблюдались характерные симптомы: одышка, кашель, гипертермия, снижение сатурации крови кислородом. При биоимпедансных исследованиях у этих пациентов отмечались выраженные изменения активного и реактивного сопротивления тканей грудной клетки, особенно в диапазоне низких и средних частот. Это коррелировало с наличием воспалительного инфильтрата и нарушением вентиляционно-перфузионного баланса.

Группа II состояла из пациентов с острыми респираторными вирусными инфекциями (ОРВИ) лёгкого и среднего

течения. Изменения биоимпедансных показателей у этой категории носили менее выраженный характер, однако статистически значимо отличались от данных контрольной группы. Наиболее заметными были изменения в фазовых характеристиках импеданса, что может свидетельствовать о накоплении жидкости в межклеточном пространстве.

Группа III включала здоровых добровольцев без патологии дыхательной системы. Их биоимпедансные характеристики использовались как эталон для сравнения.

Сравнение усреднённых величин активного сопротивления, зарегистрированных при токах зондирования 10 и 20 мкА, показало статистически значимые различия между пациентами экспериментальных групп и контрольной выборкой. Полученные результаты свидетельствуют о выраженных изменениях электрических свойств тканей грудной клетки при воспалительных заболеваниях дыхательной системы. При этом наблюдалась устойчивая зависимость биоимпедансных показателей от типа патологического процесса, что подтверждает диагностическую информативность многоотведённой биоимпедансной регистрации.

Анализ распределения сопротивлений показал, что у пациентов с вирусной пневмонией значения активной составляющей импеданса характеризуются более широким диапазоном вариаций по сравнению с группой ОРВИ и здоровыми добровольцами. Учёт половых различий позволил выявить сходные

тенденции изменения параметров биоимпеданса при сохранении индивидуальной вариабельности значений.

Для решения задачи классификации функционального состояния дыхательной системы была применена гибридная нейро-нечёткая модель, использующая совокупность дескрипторов, сформированных на основе многочастотных биоимпедансных измерений. Результаты распределения пациентов по диагностическим классам показали высокую разделимость групп «Вирусная пневмония», «ОРВИ» и «Норма». Максимальные значения диагностической специфичности достигали 91 %, при минимальных значениях около 67 %, что сопоставимо с показателями традиционных инструментальных методов исследования, включая ультразвуковую диагностику.

Сравнительный анализ качества классификации показал, что применение многоотведённой схемы измерений и пространственно ориентированной обработки биоимпедансных данных обеспечивает повышение устойчивости распознавания и снижает влияние межиндивидуальной вариабельности. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного подхода для неинвазивной экспресс-оценки функционального состояния дыхательной системы.

Выводы

1. Разработан метод формирования дескрипторов на основе биоимпедансной спектроскопии, позволяющий выделять информативные признаки для классификации функционального состояния дыхательной системы.

2. Предложен гибридный классификатор, основанный на комбинации вероятностных нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики, обеспечивающий высокие показатели чувствительности и специфичности при дифференциальной диагностике вирусных заболеваний лёгких.

3. Проведённые клинические испытания показали, что использование биоимпедансной спектроскопии совместно с интеллектуальными методами анализа данных позволяет достичь качества классификации, сопоставимого с традиционными инструментальными методами, но при этом обеспечивает более высокую скорость и безопасность для пациента.

4. Предложенный подход может быть применён для создания систем поддержки принятия решений в пульмонологии, что открывает перспективы его внедрения в практику ранней диагностики и мониторинга течения вирусных заболеваний лёгких.

Список литературы

1. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4 (31). С. 1–14.

2. Chitturi V., Farrukh N. Spatial resolution in electrical impedance tomography // J. Electr. Bioimp. 2017. N 8. P. 66-78. <https://doi.org/10.2478/joeb-2017-0009>
3. Brazey B., Haddab Y., Zemiti N. Robust imaging using electrical impedance tomography: review of current tools // Proc. Math. Phys. Eng. Sci. 2022. N 478(2258). P. 20210713. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0713>
4. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current–voltage characteristics of acupuncture points / S. Filist, Riad Taha Al-Kasasbeh, O. Shatalova, N. Korenevskiy, A. Shaqadan, Z. Protasova, M. Ilyash, M. Lukashov // J. Integr. Med. 2022. N 20(3). P. 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2022.02.007>
5. Hybrid neural networks with virtual flows in medical risk classifiers / K. Khatatneh, S. Filist, Riad Taha Al-Kasasbeh, A. A. Aikeyeva // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2022. Vol. 43, N 1. P. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-219234>
6. Classifier for the functional state of the respiratory system via descriptors determined by using multimodal technology / S. A. Filist, Riad Taha Al-kasasbeh, O.V. Shatalova, A. A. Aikeyeva, Osama M. Al-Hababbeh, Mahdi Salman Alshamasin // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2023. Vol. 26, is. 12. P. 1-19. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2046656>
7. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing / S. Filist, Riad Taha Al-Kasasbeh, O. Shatalova, A. Aikeyeva, N. Korenevskiy, A. Shaqadan, A. Trifonov, M. Ilyash // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2022. N 25(8). P. 908-921. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1890857>
8. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, М. А. Ефремов, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Павленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 59-75.
9. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах in vivo // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. № 9(1). С. 26-38.
10. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks / O. Shatalova, S. Filist, N. Korenevskiy [et. al.] // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2021. N 24(13). P. 1504-1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1906895>
11. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1801. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/1/012045>

12. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, R. A. Krupchatnikov // CEUR Workshop Proceedings. ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems». Moscow, 2021. Vol. 2843. P. 25.

13. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29-49.

14. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. Е. Суржикова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 3(31). С. 85-95.

15. Oludare Isaac Abiodun 1, Aman Jantan 2, Abiodun Esther Omolara 3, Kemi Victoria Dada 4, Nachaat AbdElatif Mohamed 5, Humaira Arshad // Heliyon. 2018. N 4(11). P. e00938. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

16. Formation of descriptors for medical risk classifiers based on the current-voltage characteristics of biologically active points / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, S. Kadyrova // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2060. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/1/012013>

References

1. Miroshnikov A.V., Stadnichenko N.S., Shatalova O.V., Filist S.A. Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for the diagnosis of infectious diseases. *Modelirovanie, optimizatsiia i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2020;8(4):1-14. (In Russ.)

2. Chitturi V., Farrukh N. Spatial resolution in electrical impedance tomography. *J. Electr. Bioimp.* 2017;(8):66-78. <https://doi.org/10.2478/joeb-2017-0009>

3. Brazey B., Haddab Y., Zemiti N. Robust imaging using electrical impedance tomography: review of current tools. *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.* 2022;(478):20210713. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0713>

4. Filist S., Riad Taha Al-Kasasbeh, Shatalova O., Korenevskiy N., Shaqadan A., Protasova Z., Ilyash M., Lukashov M. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current–voltage characteristics of acupuncture points. *J. Integr. Med.* 2022;(20):252-264. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2022.02.007>

5. Khatatneh K., Filist S., Riad Taha Al-Kasasbeh, Aikeyeva A.A. Hybrid neural networks with virtual flows in medical risk classifiers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2022;43(1):1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-219234>
6. Filist S.A., Riad Taha Al-kasasbeh, Shatalova O.V., Aikeyeva A.A., Osama M. Al-Hababbeh, Mahdi Salman Alshamasin. Classifier for the functional state of the respiratory system via descriptors determined by using multimodal technology. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2023;26(12):1-19. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2046656>
7. Filist S., Riad Taha Al-Kasasbeh, Shatalova O., Aikeyeva A., Korenevskiy N., Shaqadan A., Trifonov A., Ilyash M. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2022;(25):908-921. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1890857>
8. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Efremov M.A., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Y., Pavlenko A.V. An algorithm for optimizing the Voit model in classifiers of the functional state of living systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(2):59-75. (In Russ.)
9. Shatalova O.V. Iterative multiparametric bioimpedance model in in vivo experiments. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2019;(9):26-38. (In Russ.)
10. Shatalova O., Filist S., Korenevskiy N., et. al. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2021;(24):1504-1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1906895>
11. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Zhilin V.V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1801:012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/1/012045>
12. Miroshnikov A.V., Kiselev A.V., Shatalova O.V., Krupchatnikov R.A. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases. In: *CEUR Workshop Proceedings. ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems»*. Vol. 2843. Moscow; 2021. P. 25.
13. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Shulga L.V. Classifications of biological objects based on multidimensional bioimpression analysis. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020;10(3/4):29-49. (In Russ.)

14. Kurochkin A.G., Zhilin V.V., Surzhikova S.E., Filist S.A. The use of hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features. *Caspian Journal: Management and High Technologies.* 2015;(3):85-95. (In Russ.)

15. Oludare Isaac Abiodun 1, Aman Jantan 2, Abiodun Esther Omolara 3, Kemi Victoria Dada 4, Nachaat AbdElatif Mohamed 5, Humaira Arshad. *Heliyon.* 2018;(4):e00938. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

16. Miroshnikov A.V., Kiselev A.V., Shatalova O.V., Kadyrova S. Formation of descriptors for medical risk classifiers based on the current-voltage characteristics of biologically active points. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2060:012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/1/012013>

Информация об авторе / Information about the Author

Корсунский Никита Александрович, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
кафедра программной инженерии, г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru,
ORCID: 0009-0005-4606-5517

Nikita A. Korsunsky, Postgraduate, Southwest
State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru,
ORCID: 0009-0005-4606-5517