

Формирование информативных характеристик импеданса биоматериала для алгоритмов программно-аппаратных комплексов

Н. А. Корсунский¹, Р. А. Томакова¹ ✉, А. В. Брежнев²

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

² Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
Стремянный пер., д. 36, г. Москва 115054, Российская Федерация

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в оценке точности и надежности методов измерения импеданса биоматериала и выработке рекомендаций по совершенствованию алгоритмов для разработки программно-аппаратных комплексов в области биомедицинской диагностики. Значительное внимание уделено анализу данных, полученных *in Vivo*.

Методы. Проведено 400 измерений на группе из 20 добровольцев с использованием электрических тестовых воздействий для получения амплитудно-фазовых частотных характеристик импеданса биологических тканей. В ходе эксперимента применен метод Коула для определения коэффициентов, отражающих ключевые параметры испытуемой ткани и ее импедансные характеристики. Для генерации тестовых сигналов использовались последовательности одночастотных синусоидальных сигналов, управляемых программным обеспечением на платформе E20-10, специально разработанной для оцифровки данных и анализа переходных процессов в живых тканях.

Результаты. На базе системы сбора данных E20-10, произведенной ЗАО «L-Card», был разработан комплекс для получения и обработки данных импеданса, включая программное обеспечение, реализованное на языке Delphi, предназначенное для генерации и обработки тестовых сигналов. Полученные результаты *in Vivo* показали средние расхождения в пределах 4% между измеренными и ожидаемыми значениями, что подтверждает высокую точность и надежность предложенного подхода к измерению импеданса биологических тканей.

Заключение. Реализация ПО для измерения импеданса биоматериала с помощью разработанных алгоритмов и применяемых амплитудно-фазовых частотных характеристик обеспечивает более точную оценку диссипативных свойств биологических тканей. Анализ данных показал возможности и перспективы разработки высокоточных классификаторов для системы поддержки принятия решений ранней диагностики медицинских рисков. Эти классификаторы особенно могут быть полезны для выявления предрасположенности к легочным заболеваниям, таким как пневмония и туберкулез. Дальнейшие исследования в данной области могут привести к значительному прогрессу в создании эффективных программно-аппаратных комплексов для биомедицинской диагностики, способствующих улучшению профилактики и лечения различных патологий с учетом индивидуальных особенностей пациента.

Ключевые слова: медицинский риск; фантом; биоимпеданс; программно-аппаратный комплекс; импеданс; амплитудно-фазовая частотная характеристика.

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

Для цитирования: Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Брежнев А. В. Формирование информативных характеристик импеданса биоматериала для алгоритмов программно-аппаратных комплексов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 117–130. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-117-130>

Поступила в редакцию 21.01.2025

Подписана в печать 18.02.2025

Опубликована 31.03.2025

Formation of informative characteristics of biomaterial impedance for algorithms of software and hardware complexes

Nikita A. Korsunsky¹, Rimma A. Tomakova¹ ✉, Alexey V. Brezhnev²

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies
19 Revolution Ave., Voronezh 394036, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny side-street, Moscow 115054, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to evaluate the accuracy and reliability of methods for measuring the impedance of a biological material and to develop recommendations for improving algorithms for the development of software and hardware complexes in the field of biomedical diagnostics. Considerable attention is paid to the analysis of data obtained in Vivo.

Methods. 400 measurements were performed on a group of 20 volunteers using electrical thermal effects to obtain amplitude-phase frequency characteristics of the impedance of biological tissues. During the experiment, the Cole method was used to determine coefficients reflecting the key parameters of the test tissue and its impedance characteristics. To generate the test signals, sequences of single-frequency sinusoidal signals were used, controlled by software on the E20-10 platform, specially designed for digitizing data and analyzing transients in living tissues.

Results. Based on the E20-10 data acquisition system manufactured by L-Card CJSC, a complex for receiving and processing impedance data was developed, including software implemented in the Delphi language designed to generate and process test signals. The in Vivo results showed average discrepancies within 4% between the measured and expected values, which confirms the high accuracy and reliability of the proposed approach to measuring the resonance of biological tissues.

Conclusion. The implementation of software for measuring biomaterial impedance using the developed algorithms and applied amplitude-phase frequency characteristics provides a more accurate assessment of the dissipative properties of biological tissues. Data analysis has shown the possibilities and prospects of developing high-precision classifiers for a decision support system for early diagnosis of medical risks. These classifiers can be especially useful for identifying predisposition to lung diseases such as pneumonia and tuberculosis. Further research in this field can lead to significant progress in the creation of effective software and hardware complexes for biomedical diagnostics, contributing to the improvement of the prevention and treatment of various pathologies, taking into account the individual characteristics of the patient.

Keywords: *medical risk; phantom; bioimpedance; hardware and software complex; impedance; amplitude-phase frequency response.*

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

For citation: Kalach A.V., Smolentseva T.E., Akatyev Y.A. Model of an information system for data support of smart home assistants. *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.* 2025;15(1):117–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-117-130>

Received 21.01.2025

Accepted 18.02.2025

Published 31.03.2025

Введение

Современная медицинская наука активно ищет новые методы оценки функции внешнего дыхания с целью улучшения диагностики и мониторинга состояния пациентов [1]. Электрический импеданс привлекает внимание исследователей благодаря своим многочисленным преимуществам, включая неинвазивность, высокую чувствительность и возможность быстрого получения данных [2]. Этот метод предоставляет уникальную возможность для изучения базисных физиологических процессов, что особенно важно для выявления ранних признаков патологии, которые могут скрываться при нормальных клинических индикаторах [3].

С увеличением сложности и объема медицинской информации становится актуальным внедрение систем поддержки принятия решений в медицинскую практику [4]. Интеграция биоимпедансных технологий с такими системами может значительно улучшить качество медицинской помощи [5]. Благодаря биоимпедансометрии возможно не только проведение эффективной оценки общего состояния организма, но и изучение состава тканей в различных

областях тела, включая труднодоступные для исследования зоны. Это делает методику незаменимой для ранней диагностики и мониторинга эффективности терапевтического вмешательства [6].

Несмотря на все преимущества, процесс измерения биоэлектрического импеданса остается сложным [7]. Ряд исследований показывает, что высокая точность измерений требует учета морфологической однородности тканей и корректной интерпретации данных на широком диапазоне частот [8]. Современные технологические решения стремятся сократить время измерений и повысить точность результатов, что критично для их успешного внедрения в клиническую практику [9].

Разработка специализированного оборудования, например комплекса на базе устройства E20-10 компании «L-Card», позволяет преодолевать существующие ограничения и предоставляет более точные и надежные данные для анализа [10]. Внедрение таких инновационных технологий открывает новые перспективы для диагностики и лечения социально значимых заболеваний, что делает актуальным дальнейшее изучение и совершенствование методов биоимпедансных исследований в медицине [11].

Цель настоящего исследования заключалась в разработке и апробации методики использования электрического импеданса для неинвазивной оценки вентиляционно-перфузионного соотношения в легких. Планируется определить оптимальные частотные диапазоны для максимальной информативности импедансных измерений, а также оценить потенциал интеграции полученных данных в системы поддержки принятия решений для улучшения диагностики и мониторинга легочных заболеваний.

Для обеспечения своевременной диагностики медицинских рисков важно внедрение систем поддержки принятия решений (СППР) в медицинские информационные системы [12]. Это позволит улучшить процесс принятия решений в медицине и повысить эффективность диагностики [13]. Методика биоимпедансных исследований является одним из инструментов, который может быть использован для достижения этих целей. Применение методов биоимпедансометрии позволяет не только оценить общие показатели организма, но и изучить параметры состава тканей различных частей тела [14], таких как конечности, туловище, молочные железы и местные ткани, включая те, которые находятся близко к коже и слизистым оболочкам.

Материалы и методы

Следует отметить, что биоимпедансная диагностика становится все более востребованной в медицине благодаря своей неинвазивности и возможности

получения детальной информации о состоянии тканей пациента [15]. Этот метод позволяет выявлять даже незначительные изменения в составе тканей, что особенно важно при раннем выявлении заболеваний. Кроме того, биоимпедансные исследования могут быть полезны не только для диагностики, но и для мониторинга эффективности лечения и коррекции пациентов с различными патологиями [16]. Внедрение СППР в медицинские информационные системы с использованием данных биоимпедансных исследований позволит значительно улучшить качество медицинской помощи и оптимизировать процессы принятия решений в здравоохранении [17].

Процесс измерения проводимости осуществляется путем анализа слабых зондирующих токов. Одним из наиболее эффективных методов измерения является биоимпедансная спектроскопия, которая основана на построении графика Коула. Этот метод позволяет анализировать амплитуду, фазу и частоту (АФЧХ) импеданса биоматериала, включенного в цепь источника зондирующего тока. При проведении биоимпедансных исследований необходимо обеспечивать морфологическую однородность и целостность биоматериала [18]. Это может быть сложной задачей, так как процесс измерения требует учета широкого диапазона частот зондирующего тока и маленького шага для полного охвата этого диапазона и учета диссипативных свойств импеданса биоматериала [19]. В результате процесс измерения может

занимать значительное время, что может представлять проблему при выполнении перечисленных требований. Однако современные технологии исследований в области биоимпедансной спектроскопии направлены на сокращение времени проведения измерений и повышение точности результатов [20].

Для проведения биоимпедансных исследований был создан специальный комплекс, который включает в себя как аппаратную, так и программную части. Этот комплекс использует технологию биоимпеданса для измерения электрической проводимости тканей организма. Он состоит из нескольких ключевых компонентов, включая ЦАП (цифроаналоговый преобразователь) для формирования импульсов, АЦП (аналого-цифровой преобразователь) для интерпретации результатов и вычислительную систему с программным обеспечением для визуализации полученных значений. Для выполнения данных функций было решено использовать устройство E20-10, произведенное компанией ЗАО «L-Card». Оно обладает способностью не только формировать импульсы, но и интерпретировать результаты, что делает его идеальным выбором для нашего комплекса.

Однако модуль E20-10 имеет ограничения по величине входящего и исходящего сигнала, поэтому было необходимо разработать устройства, предназначенные для усиления этих сигналов. С этой целью было разработано специальное устройство, которое увеличивает

выходной сигнал в три раза. Входной сигнал с биообъекта проходит через инструментальный усилитель, где он преобразуется до 3 В и затем поступает на модуль АЦП модуля L-Card. Это позволяет получить более точные и надежные данные для дальнейшего анализа.

В нашем исследовании мы разработали приложение для визуализации полученных значений с использованием программного обеспечения RAD Studio XE8 и библиотек L-Card (Lisbari и LCome). Это приложение позволяет нам работать с АЦП и ЦАП, а также визуализировать информационные данные и масштабировать их. Была выбрана среда RAD Studio XE8, так как она предоставляет готовые приложения для работы с АЦП, ЦАП и визуализации данных. Это упрощает работу и позволяет сосредоточиться на разработке основного функционала нашего приложения.

Интерфейс ПО (программного обеспечения) позволяет пользователям управлять настройками и параметрами приложения, а также отображать полученные данные в удобном виде. Разработанное приложение обладает широкими возможностями визуализации данных, включая масштабирование. Это позволяет пользователям более детально изучать полученные значения и анализировать их. Таким образом, разработанное приложение представляет собой мощный инструмент для работы с данными, полученными с помощью АЦП и ЦАП.

Для расчета реальной и мнимой составляющих биоимпеданса осуществля-

лось проецирование вектора комплексного биоимпеданса на соответствующие оси. Метод вычисления предусматривает определение реальной и мнимой составляющих напряжения на токовом резисторе, и на их основе выполняется расчет разности фаз. Токовый резистор R подбирается так, чтобы на нем возникало как можно меньше напряжения. Ток в образцовом резисторе R равен току в биообъекте. Для вычисления реальной и мнимой составляющих биоимпеданса необходимо определить угол ϕ или проекцию вектора на вектор.

Для оценки метрологических характеристик ПАКАБИ был разработан специальный фантом. Этот фантом представляет собой пассивный RC-двухполюсник, который моделирует биоимпеданс. Кроме того, была создана аналогичная схема в среде Mathlab Simulink для сравнения результатов. Это исследование позволило оценить точность и надежность ПАКАБИ в измерении биоимпеданса. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений позволило выявить возможные расхождения и уточнить параметры ПАКАБИ для достижения более точных результатов.

Дополнительно были проведены измерения на реальных биообъектах, чтобы протестировать работу ПАК в реальных условиях. Для доказательства эффективности и точности разрабатываемой системы в реальных условиях были

проведены дополнительные измерения с использованием биоимпедансной аппаратуры на реальных биообъектах. В экспериментах особое внимание уделялось подбору испытуемых, чтобы результаты были репрезентативными и надежными. Для проведения исследования была сформирована группа, состоящая из 30 человек: 15 мужчин и 15 женщин в возрастном диапазоне от 18 до 40 лет. Каждый участник исследования прошел предварительное медицинское обследование, чтобы подтвердить их общее хорошее состояние здоровья. Особое внимание уделялось отсутствию заболеваний, влияющих на дыхательную систему, таких как астма или хронические обструктивные болезни легких, поскольку размещение электродов планировалось на грудной клетке. Эти предварительные проверки были необходимы для исключения влияния факторов, которые могли бы исказить результаты эксперимента.

Проведенные исследования позволили охватить широкий возрастной контингент и учесть возможные различия в биоимпедансных характеристиках, обусловленные возрастными изменениями организма.

Электроды для биоимпедансного исследования были аккуратно размещены на определенных участках грудной клетки каждого испытуемого (рис. 1).

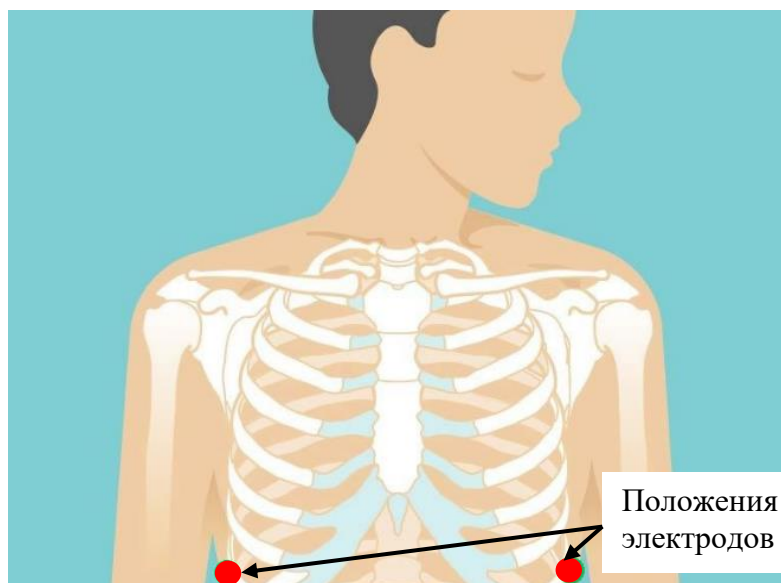


Рис. 1. Схема размещения электродов на участках грудной клетки участников эксперимента

Fig. 1. Diagram of the placement of electrodes on the chest areas of the participants in the experiment

Процедура установки и последующих измерений была стандартизирована для всех участников, чтобы обеспечить сопоставимость и точность получаемых данных. В результате было собрано значительное количество информации, позволяющей оценить работу программно-

аппаратного комплекса (ПАК) в условиях, приближенных к реальной клинической практике.

Сводные результаты экспериментов приведены в таблице 1 для реальной составляющей импеданса, а в таблице 2 – для мнимой.

Таблица 1. Сводные результаты эксперимента реальной составляющей биоимпеданса

Table 1. Summary results of the experiment of the real component of bioimpedance

Частота сигнала	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Доверительный интервал
1	500,806203	0,289166398	0,035609228
2	501,3672796	0,426155126	0,052478625
3	501,9156316	0,518300693	0,063825837
4	502,6231437	0,846459856	0,104236805
5	502,440884	0,646829613	0,079653456
6	504,1782117	0,688572946	0,084793914
7	504,3454083	1,081684502	0,133203407
8	504,5492398	0,898666879	0,110665809
9	504,2082441	0,807467475	0,099435111
10	504,2683858	0,815245612	0,100392946

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Частота сигнала	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Доверительный интервал
11	504,6326966	0,904293743	0,111358726
12	505,0229638	0,920153638	0,113311783
13	505,3668281	0,955746355	0,117694828
14	505,6646951	0,935864883	0,115246535
15	506,3917394	1,048538047	0,129121606
16	506,612805	1,071738829	0,131978653
17	507,1352746	1,085598338	0,133685374
18	507,5784901	1,03263283	0,127162968
19	507,8899478	1,077533517	0,132692237
20	508,2396133	1,075276314	0,132414275

Таблица 2. Сводные результаты эксперимента мнимой составляющей биоимпеданса**Table 2.** Summary results of the experiment of the imaginary component of bioimpedance

Частота сигнала ЦАП	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение	Доверительный интервал
1	500,806203	0,289166398	0,035609228
2	501,3672796	0,426155126	0,052478625
3	501,9156316	0,518300693	0,063825837
4	502,6231437	0,846459856	0,104236805
5	502,440884	0,646829613	0,079653456
6	504,1782117	0,688572946	0,084793914
7	504,3454083	1,081684502	0,133203407
8	504,5492398	0,898666879	0,110665809
9	504,2082441	0,807467475	0,099435111
10	504,2683858	0,815245612	0,100392946
11	504,6326966	0,904293743	0,111358726
12	505,0229638	0,920153638	0,113311783
13	505,3668281	0,955746355	0,117694828
14	505,6646951	0,935864883	0,115246535
15	506,3917394	1,048538047	0,129121606
16	506,612805	1,071738829	0,131978653
17	507,1352746	1,085598338	0,133685374
18	507,5784901	1,03263283	0,127162968
19	507,8899478	1,077533517	0,132692237
20	508,2396133	1,075276314	0,132414275

Результаты и их обсуждение

1. Тенденция увеличения математического ожидания: от первой до двадцатой измеренной частоты сигнала мы наблюдаем стабильное увеличение математического ожидания. Оно возрастает с 500,81 до 508,24 для частотных значений. Это может говорить о пропорциональном увеличении реальной / мнимой составляющей биоимпеданса с увеличением частоты сигнала, что может отражать изменение свойств испытуемого объекта с изменением частоты.

2. Рост среднеквадратического отклонения: среднеквадратическое отклонение показывает, насколько результаты измерений разнятся от математического ожидания. На протяжении эксперимента наблюдается увеличение этого отклонения с 0,29 до 1,08. Это может свидетельствовать о возрастании вариабельности в измерениях при росте частоты.

3. Увеличение доверительного интервала: доверительный интервал также возрастает от 0,036 до 0,133 с увеличением частоты. Более широкий интервал на более высоких частотах может указывать на большее колебание точности измерений, что следует учитывать при интерпретации данных.

4. Анализ специфических точек: на определенных частотах, таких как 7 Гц и 16 Гц, наблюдаются скачки в математическом ожидании. Это может являться результатом присутствия специфических резонансных характеристик или устойчивых изменений в поведении

материала или компонента, через который измеряется биоимпеданс.

5. Полнота данных: данные из обеих составляющих (реальной и мнимой) биоимпеданса крайне схожи, что может свидетельствовать о хорошей калибровке и точности измерительных инструментов, однако также это может указывать на возможное недопонимание различий между ними, которые стоит учесть при последующих исследованиях.

Выводы

В ходе эксперимента, в рамках которого производилось 20 измерений на фантоме, представляющем реальную и проектную модели, были получены замечательные результаты, демонстрирующие потенциал и точность применяемых методов:

1. Высокая точность и стабильность данных: получена средняя ошибка менее 4% для проектных данных, которая свидетельствует о высокой точности и надежности проведенных измерений и о том, что применяемый ПАК весьма перспективен при проведении точных биоимпедансных исследований.

2. Прогрессивный потенциал в интеграции: повышение математического ожидания и стабильный рост параметров на протяжении всего спектра частот указывают на то, что предлагаемый подход не только эффективен для применяемых моделей, но и может быть применен для интеграции в более сложные интеллектуальные системы диагностики и мониторинга.

3. Область применения и оптимизация: возможность оптимизации параметров измерений для снижения влияния на кожу пользователя определяет перспективы более широкого внедрения данной технологии, включая долгосрочные медицинские исследования и мониторинг состояния здоровья. При этом отмечается важность установления периодических пауз во время проведения измерений для обеспечения оптимальной точности без искажения данных.

4. Расширение сферы применения: дальнейшее усовершенствование мето-

дов и разработка новых подходов к измерению биоимпеданса предоставляет новые возможности для реализации технологии, включая инновационные решения в медицине и смежных областях науки.

Таким образом, результаты настоящего эксперимента подтверждают перспективность использования данной методики в биоимпедансных исследованиях, что, в свою очередь, открывает возможности для разработки и совершенствования различных полезных технологий.

Список литературы

1. Анализ нормы ст. 41 УК РФ об обоснованном риске с точки зрения теоретической обоснованности. URL: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska (дата обращения: 11.12.2024).

2. Ростовцев В. Н. Классификация медицинских рисков. URL: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (дата обращения: 11.12.2024).

3. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.

4. Гибридные нечеткие модели для прогнозирования возникновения и осложнений артериальной гипертензии с учетом энергетических характеристик биоактивных точек / М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, Е. А. Старцев, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 104–119.

5. Katherine J. Wu There are more viruses than stars in the universe. URL: <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus> (дата обращения: 12.12.2024).

6. Shatalova O. V., Burmaka A. A., Korovin E. N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic // International Russian Automation Conference. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501668>

7. Вясничев Я. А., Пилюсян Э. А. Нейронные сети в медицине // Актуальные задачи математического моделирования информационных технологий. 2018. Т. 1, № 1. С. 30–39.
8. Зонова Я. А., Пилюсян А. С. Применение искусственных нейронных сетей в медицине // Лучшая студенческая статья. 2018. Т. 1, № 1. С. 59–61.
9. Bai Z., Gong Y., Tian X. The Rapid Assessment and Early Warning Models for COVID-19 // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 21, N 4. P. 272–279. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2018-1-313>
10. Корсунский Н. А., Томакова Р. А., Брежнев А. В. Программное обеспечение, предназначенное для оцифровки переходной характеристики, при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. № 1. С. 50–67.
11. Программно-аппаратный комплекс для формирования дескрипторов в системе поддержки принятия решений по диагностике медицинских рисков / Н. А. Корсунский, А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, А. В. Серебровский // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. № 1. С. 43–54.
12. Мирошников А. В., Шаталова О. В., Стадниченко Н. С. Классификация биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.
13. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, 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.
14. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.
15. Sarvamangala D. R., Raghavendra V. K. Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey // Evolutionary Intelligence. 2022. Vol. 15(1). P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00540-3>
16. Метрологические аспекты автоматизированного метода измерения биоимпеданса / Е. А. Печерская, В. В. Антипенко, О. В. Карпанин [и др.] // Приборы, системы и изделия медицинского назначения. 2020. № 3 (33). С. 78–84.
17. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист, Н. С. Стадниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия:

Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

18. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey / I. A. Oludare, A. Jantan, V. D. Kemi, H. Asrshad // *Heliyon*. 2018. Vol. 4, N 11. P. 160–204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

19. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases // *Medical Decision Making*. 2020. Vol. 6, N 3. P. 415–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5>

20. Begoli E., Bhattacharya T., Kusnezov D. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making // *Nature Machine Intelligence*. 2019. N 1. P. 20–23. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0004-1>

References

1. Analysis of the norm of Article 41 of the Criminal Code of the Russian Federation on reasonable risk from the point of view of theoretical validity. Available at: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_risk (accessed 12.11.2024).

2. Rostovtsev V.N. Classification of medical risks. Available at: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (accessed 12.11.2024).

3. Shatalova O.V. Intelligent monitoring systems for medical risks based on bioimpedance research. Kursk: *Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet*; 2020. 356 p. (In Russ.)

4. Efremov M.A., Filist C.A., Shatalova O.V., Startsev E.A., Shulga L.V. Hybrid fuzzy models for predicting the occurrence and complications of arterial hypertension, taking into account the energy characteristics of bioactive points. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(4):104–119. (In Russ.)

5. Katherine J. Wu There are more viruses than stars in the universe. Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus> (accessed 12.12.2024).

6. Shatalova O.V., Burmaka A.A., Korovin E.N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic. In: *International Russian Automation Conference*. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501668>

7. Vyasnichev Y.A., Pilosyan E.A. Neural networks in medicine. *Aktual'nye zadachi matematicheskogo modelirovaniya informatsionnykh tekhnologii* = *Actual Problems of Mathematical Modeling of Information Technologies*. 2018;1(1):30–39. (In Russ.)

8. Zonova Y.A., Pilosyan A.S. Application of artificial neural networks in medicine. *Luchshaya studentcheskaya stat'ya = The Best Student Article*. 2018;1(1):59–61. (In Russ.)

9. Bai Z., Gong Y., Tian X. The Rapid Assessment and Early Warning Models for COVID-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;21(4):272–279. <https://doi.org/10.26577/ijbch-2018-1-313>

10. Korsunsky N.A., Tomakova R.A., Brezhnev A.V. Software designed to digitize a transient characteristic during bioimpedance research at a biological facility. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;(1):50–67. (In Russ.)

11. Korsunsky N.A., Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Serebrovsky A.V. A software and hardware complex for the formation of descriptors in the decision support system for the diagnosis of medical risks. *Lazery. Izmereniya. Informatsiya = Lasers. Measurements. Information*. 2021;(1):43–54.

12. Miroshnikov A.V., Shatalova O. V., Stadnichenko N.S. Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya 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.)

13. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Efremov M.A., 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'naya 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.)

14. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V., et al. Metrological aspects of an automated method for measuring bioimpedance. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Devices, Systems and Medical Devices*. 2020;3:78–84. (In Russ.)

15. Sarvamangala D.R., Raghavendra V.K. Convolutional neural networks in medical image understanding: a survey. *Evolutionary Intelligence*. 2022;15:1–22. <https://doi.org/10.1007/s12065-020-00540-3>

16. Pecherskaya E.A., Antipenko V.V., Karpanin O.V., et al. Metrological aspects of an automated method for measuring bioimpedance. *Pribory, sistemy i izdeliya meditsinskogo naznacheniya = Devices, Systems and Medical Devices*. 2020;(3):78–84. (In Russ.)

17. Kiselev A.V., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Filist S.A., Stadnichenko N.S. Models of latent predictors in intelligent systems for predicting the state of living systems. *Izvestiya*

Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2020;10(1):114–133. (In Russ.)

18. Oludare I.A., Jantan A., Kemi V.D., Asrshad H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*. 2018;4(11):160–204. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>

19. Agrebi S., Larbi A. Use of artificial intelligence in infectious diseases. *Medical Decision Making*. 2020;6(3):415–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817133-2.00018-5>

20. Begoli E., Bhattacharya T., Kusnezov D. The need for uncertainty quantification in machine-assisted medical decision making. *Nature Machine Intelligence*. 2019;(1):20–23. <https://doi.org/10.1038/s42256-018-0004-1>

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Nikita A. Korsunsky, Post-Graduate Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: cor.nick2013@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-4606-5517

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-0152-4714, Author ID: 739221

Rimma A. Tomakova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-0152-4714, Author ID: 739221

Брежнев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: brezhnev.av@rea.ru, ORCID: 0000-0002-3679-7379

Alexey V. Brezhnev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation, e-mail: brezhnev.av@rea.ru, ORCID: 0000-0002-3679-7379