

На правах рукописи



Хаммуд Ахмад

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНАЯ СИСТЕМА  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ  
ПРЕОБЛАДАЮЩЕГО ТИПА ТОНУСА СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ  
ЧЕЛОВЕКА

Специальность 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского  
назначения

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** **Щукин Сергей Игоревич**,  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Потрахов Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», заведующий кафедрой электронных приборов и устройств;

**Анциперов Вячеслав Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва, г. Зеленоград.

Защита диссертации состоится «20» декабря 2023 г. в 11:30 часов на заседании Диссертационного совета 24.2.331.09 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана в зале Ученого совета по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.09.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Самородов Андрей  
Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной смертности. По данным ВОЗ в 2019 году от ССЗ умерло 17,9 миллиона человек, что составляет 32% от общего числа смертей на планете. Расходы на лечение и диагностику ССЗ почти удвоились на 150% с 1996 в 2016 году (Birger et al., 2021). При этом заболевания периферических артерий (ЗПА) являются важным ранним индикатором ССЗ, но часто остаются недиагностированными. Необходимость исследования в области определения и прогнозирования ЗПА обусловлена тем, что отсутствие своевременного лечения может привести к снижению подвижности, ампутации конечности, ухудшению качества жизни и даже смерти.

Причиной ЗПА часто становятся изменения в сосудистом тонеусе (Safar et al., 2003). Сосудистый тонус – это способность сосудистой стенки к сокращению и расслаблению, что обеспечивает регуляцию кровяного давления и периферического сопротивления (Lerman and Zeiher, 2005). Изменения в сосудистом тонеусе могут приводить к дисфункции эндотелия, что, в свою очередь, связано с развитием многих ЗПА (Deanfield et al., 2007).

Несмотря на широкое признание важности сосудистого тонеуса в патогенезе ЗПА, существующие инструментальные методы его измерения не систематизированы (Kass et al., 2001; Oliver and Webb, 2003). Традиционные методы либо недостаточно точны и чувствительны, либо слишком инвазивны и не подходят для мониторинга (Ashley et al., 2005; Sharman et al., 2006).

Для оценки сосудистого тонеуса используется измерение артериального давления (АД), но метод не позволяет мониторировать АД (Isnard et al., 1989). Метод определения АД на основе измерения времени распространения пульсовой волны (ВРПВ) (O'Rourke et al., 2006). Automated Doppler Ultrasound Recording of PWV (Laurent et al., 2006; Van Bortel et al., 2002). Методы, основанные на обнаружении пульса потока с помощью МРТ (Cavalcante et al., 2011), однако этот метод в настоящее время имеет ограниченное применение (Oliver and Webb, 2003). Система Wall Track System (Pie Medical, Маастрихт, Нидерланды) позволяет измерять СПВ в аорте (Van Bortel et al., 2002). Регионарное определение артериальной жесткости (Laurent et al., 2006; Lekakis et al., 2011).

Анализируя вышеперечисленные методы, можно обнаружить, что они различаются по параметрам, используемым для оценки тонеуса: давление, кровенаполнение, диаметр сосудов, эластичность артерий. Однако до сих пор не существует универсальной методики для общепринятой оценки сосудистого тонеуса системы кровообращения сегментов тела.

Среди методов выделяется электрический импеданс – биоимпеданс, который является биофизически обоснованным методом, связывающим его изменение с изменением объема крови в сосудах исследуемого сегмента.

Биоимпедансный метод характеризуется неинвазивностью, реальным временем мониторинга и возможностью использования нескольких каналов измерения. Анализ биоимпедансного сигнала традиционно определяет

систолические и диастолические пики, инцизуру и другие, часто не формализованные параметры. Параметры кровенаполнения определяют дикротический и систолический индексы, отражающие тонус мелких сосудов и венозный отток, по которым можно отнести тип тонуса сосуда к гипертоническому, нормотоническому или гипотоническому типу (Шамкина Л.А., 2009; Лужнов П.В., 2004).

Вклад в развитие метода использования биоимпеданса для определения сосудистого тонуса был внесен многими учеными, включая Цветкова А.А., 2010; Маркосяна Т.Г., 2012 и в том числе и ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана (Астапенко Е.М., 2012; Шамкина Л.А., 2009; Лужнов П.В., 2004; Кастров А.Ю., 2003; Мерлеев А.А., 1999; Зубенко В.Г., 1994).

В абсолютном большинстве случаев исследования проводились с применением одноканальных методов, которые не позволяли проводить исследования пространственных эффектов и оценку сосудистого тонуса в разных сегментах и областях одновременно. Влияние дыхания и различных типов электродных систем на результаты измерения импеданса также не было изучено.

Определение типа тонуса сосуда было основано на такой форме сигнала, где есть только систолическая и диастолическая волны и если в записи появлялись сигналы другой формы, то они исключались из анализа и сегодня не изучено, какова их частота проявления.

Таким образом, разработка многоканальной электроимпедансной системы для пространственно-временного картирования преобладающего типа тонуса сосудистой системы человека представляет собой актуальную медико-техническую задачу.

С появлением в арсенале исследователей системы для многоканальных измерений биоимпеданса появилась возможность научно обосновано ответить на эти вопросы. В связи с чем были сформулированы цель и задачи данной диссертации.

**Цель диссертационной работы:** разработка биотехнической системы мониторинга параметров сосудистого тонуса на основе многоканальных электроимпедансных измерений.

#### **Задачи диссертационной работы:**

1. Исследование влияния параметров электродных систем на параметры электроимпедансных сигналов пульсового кровенаполнения сегментов конечностей.

2. Исследование влияния параметров дыхания на параметры электроимпедансных сигналов пульсового кровенаполнения сегментов конечностей.

3. Разработка программно-методического обеспечения, позволяющего исследовать влияние параметров дыхания на преобладающий тип сосудистого тонуса сегментов конечностей.

4. Разработка системы визуализации временных и пространственных изменений типа сосудистого тонуса в системе мониторинга.

5. Пилотные исследования информативности разработанной системы при внешних воздействиях.

**Научная новизна:**

1. Установлено, что традиционные биоимпедансные методы, при длительном мониторинге в норме, позволяют определить тип сосудистого тонуса в среднем для 64% циклов пульсового кровенаполнения для конечностей человека в целом, для 53% циклов сегментов верхних конечностей и 75% для нижних соответственно.

2. По результатам анализа данных экспериментальных исследований предложена новая классификация на основе 8-ми форм сигналов пульсового биоимпеданса, обнаруживаемых в сегментах конечностей. Впервые, для здоровых добровольцев, численно оценены частоты встречаемости форм сигналов, существенная часть которых ранее не анализировались.

3. На основе экспериментальных исследований установлено, что тип сосудистого тонуса изменяется при смене фазы дыхания у существенной доли добровольцев.

4. На основе результатов анализа многоканальных синхронных измерений пульсового биоимпеданса сегментов конечностей при внешних воздействиях предложен новый метод оценки изменения типа сосудистого тонуса, основанный на положении центра масс состояния в пространстве показателей дикротического и систолического индексов пульсовых сигналов.

**Практическая ценность:**

1. Экспериментально доказано, что суждения о текущем типе сосудистого тонуса на основании сигналов биоимпеданса зависят от параметров используемых электродных систем.

2. На основе результатов экспериментальных исследований показано, что для исследования типа тонуса сосудистой системы сегмента конечности целесообразно использовать 8-ми электродную систему, с определенными в работе параметрами.

3. Предложен, разработан и апробирован многоэтапный алгоритм обработки многоканальных сигналов биоимпеданса с целью мониторинга изменений тонуса сосудов, включающий следующие этапы:

- фильтрацию сигналов от влияния дыхания;
- выделение пульсовых сигналов биоимпеданса сегмента тела с идентификацией фаз дыхания;
- визуализацию пространственно-временных изменений типа сосудистого тонуса.

4. Разработана программа и методика настройки и калибровки алгоритмов, используемых при анализе и обработке сигналов биоимпеданса в системе мониторинга сосудистого тонуса.

5. Результаты работы внедрены в научно-учебный процесс ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» в рамках образовательных программ по направлению подготовки «Биотехнические системы и технологии».

**Методология и методы исследования.** Исследования, представленные в диссертации, опираются на классические труды отечественных и зарубежных ученых, изучавших проблемы неинвазивной оценки гемодинамических параметров кровообращения в конечностях на основе электроимпедансных методов. Разработка компьютерной системы многоканальной электроимпедансной кардиографии основана на методологии теории биотехнических систем. Для решения поставленных задач использовался математический аппарат цифровой обработки сигналов, методы безусловной оптимизации, теория распределения электрического поля в проводящих биосредах.

Экспериментальные исследования с участием добровольцев проводилось на основании решения Этического комитета Научно-образовательного медико-технологического центра МГТУ им. Н.Э. Баумана (№ 1 от 28 января 2021 года).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Впервые представлен подход к мониторингу тонуса сосудов всех отделов конечностей в режиме реального времени с привязкой к фазе дыхания

2. Традиционная форма пульсовых сигналов биоимпеданса, регистрируемых с конечностей, не превышает 75%.

3. Для анализа сигналов электрического импеданса при определении типа тонуса сосудов целесообразно использовать сигналы сегментов конечностей в фазе вдоха.

4. Исследование типа сосудистого тонуса сегмента конечностей с использованием разработанной многоканальной биоимпедансной системы позволяет качественно и количественно оценить изменения в сосудистом тонусе.

**Достоверность работы.** Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований, а также их непротиворечием известным данным и результатам, полученным в работах других авторов.

**Апробация работы.** Апробация работы проведена на научном семинаре факультета «Биомедицинская техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, научно-учебного комплекса «Радиоэлектроники, лазерной и медицинской техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана 30.05.2023 г.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: «2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)» (Екатеринбург, 2019); «2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)» (Екатеринбург, 2021).

**Личный вклад автора.** Все представленные в диссертации результаты были получены автором лично. Автором проведены самостоятельно экспериментальные и теоретические исследования, разработаны и применены протоколы их проведения, подготовлены базы данных, разработаны необходимые алгоритмы для обработки и анализа результатов, а также созданы программы для анализа и визуализации результатов исследований.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Научные положения диссертации соответствуют паспорту специальности 2.2.12.

Приборы, системы и изделия медицинского назначения. Результаты проведенного исследования соответствуют области исследования, специальности, конкретно пунктам 1,2 паспорта специальности.

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования отражены в 7 научных работах, из которых: 1 статья в рецензируемом журнале и издании из перечня ВАК РФ; 4 статьи, индексируемых в Scopus (2 в журналах 1-го квартиля, 2 труда конференции); Свидетельство о регистрации базы данных; Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Общий объем 5.05 п.л..

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основное содержание работы изложено на 115 страницах, содержит 54 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 107 библиографических источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность диссертационной работы, определена область исследования, обозначены основные научные и технические задачи, решение которых сдерживает прогресс в обозначенной области. На основании обзора литературных данных рассмотрены существующие методы оценки сосудистого тонуса в конечностях, особенности и преимущества разрабатываемого метода, сформулированы цель и задачи работы. Раскрыта научная новизна и практическая ценность работы, описана ее структура.

**В первой главе** были проанализированы медико-технические предпосылки к разработке системы пространственно-временного картирования преобладающего типа тонуса системы кровоснабжения. В данной главе проведён анализ понятия сосудистого тонуса с различных научных точек зрения, приведены особенности исследований типов сосудистого тонуса и его изменений в норме и при заболеваниях, особенности инструментальных и программно-методических средств и методов измерения параметров сосудистого тонуса. Рассмотренные неинвазивные методы включали измерение давления, доплеровскую ультразвуковую ангиографию, фотоплетизмографию и изучение параметров распространения пульсовой волны давления. Инвазивные методы включали катетеризацию артерий и внутрисосудистую ультразвуковую ангиографию.

Далее были рассмотрены методы и средства непрерывного мониторинга параметров сосудистого тонуса. Проанализированы биоимпедансные методы, носимые устройства фотоплетизмографии и устройств для мониторинга параметров пульсовой

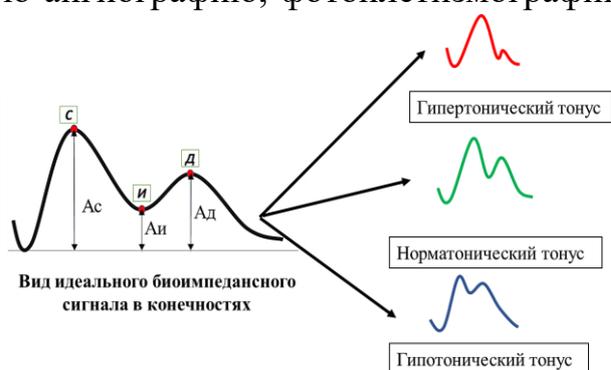


Рисунок 1. Общепринятая форма сигнала биоимпеданса сегментов конечностей и тип сосудистого тонуса по изменению амплитуд волн в сигнале

волны. Были также проанализированы методики определения показателей кровоснабжения и тонуса сосудов.

Одним из ключевых направлений в главе стал анализ методики определения типа сосудистого тонуса с помощью пульсовых сигналов биоимпеданса. Отмечено, что данный подход базируется на анализе параметров сигнала в каждом сердечном цикле, включающих амплитуду систолической волны ( $A_c$ ), амплитуду диастолической волны ( $A_d$ ) и инцезуру ( $A_i$ ) (Рисунок 1), по которым определяется два общепринятых индекса: дикротический индекс (ДКИ) и диастолический индекс (ДСИ). Индексы рассчитываются как отношение амплитуды инцезуры к амплитуде систолической волны, в то время как диастолический индекс – как отношение амплитуды диастолической волны к амплитуде систолической волны.

Численные значения ДКИ и ДСИ позволяют определить тип сосудистого тонуса, используя специально разработанную диаграмму (Рисунок 2). В зависимости от положения точки на диаграмме ДКИ и ДСИ, определяется тип сосудистого тонуса (Лужнов П.В., 2004; Шамкина Л.А., 2009; Klabunde R. E., 2012). Результаты представленных в главе исследований определили научно-технические направления исследований и разработки системы пространственно-временного картирования преобладающего типа сосудистого тонуса.

**Во второй главе** представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание системы оценки типа тонуса сосудов на основе многоканальных измерений биоимпеданса.

В главе представлен обзор приборов и систем, которые позволяют определить тип тонуса сосудов конечностей. В разделе были изучены и проанализированы характеристики различных устройств и методов, что позволило сделать выводы о целесообразности использования в исследовании многоканальной электроимпедансной системы "РЕО-32" (Рисунок 3), разработанной на факультете биомедицинской техники университета.

Технические характеристики системы "РЕО-32" подробно приведены в работе Тихомирова А.Н., 2021. Следующий раздел главы посвящён

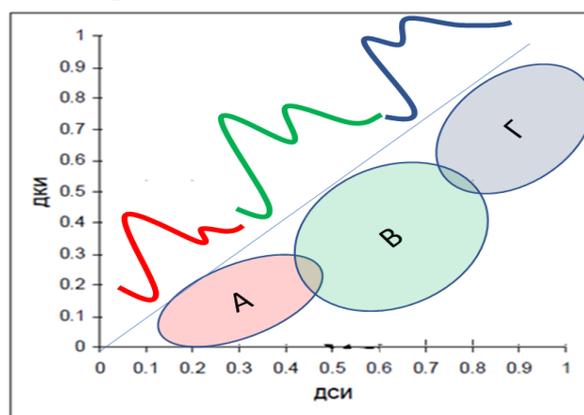


Рисунок 2. Области типов сосудистого тонуса по значениям ДКИ и ДСИ:

А – гипертонический тонус,  
В – нормотонический тонус,  
Г – гипотонический тонус



Рисунок 3. 32-канальная реографическая система "РЕО-32"

определению обоснованного типа электродной системы для измерения тонуса сосудов в конечностях на основе многоканальных измерений биоимпеданса.

Исследовались различные виды электродных систем и их расположение. Исследование включало системы с 4, 8 и 12 одноразовыми самоклеющимися электродами на нижних конечностях шести добровольцев (Рисунок 4). В случае 8 и 12 электродов токовые и измерительные электроды были попарно соединены. Размеры между электродами в 8 и 12-ти электродной системе определялись на основе известных в литературе соотношений, соответствующих более однородному току в области измерения (Мерлеев А.А., 1999). Сигналы анализировались по форме, амплитуде и количеству характерных пиков. Исследование привело к следующим выводам: система с 8 электродами, расположенными латерально, обеспечивает наибольшее количество характерных пиков в сигнале, необходимых для определения типа сосудистого тонуса; амплитуда систолической волны меняется при использовании разного количества электродов на одном и том же сегменте, как показано на Рисунке 5.

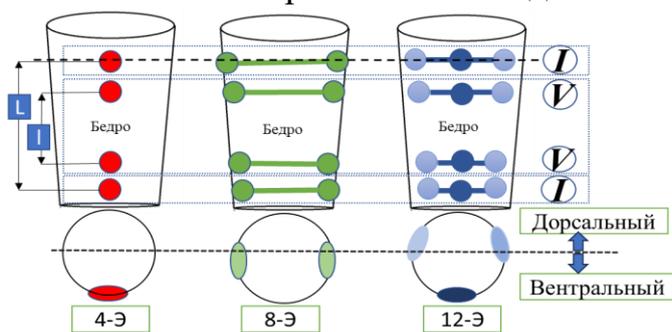


Рисунок 4. Распределение электродов в используемых системах

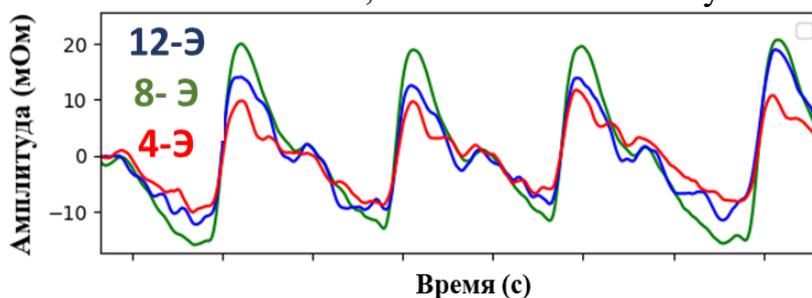


Рисунок 5. Изменения амплитуд систолических волн и параметров сигнала, записанных с сегмента бедра добровольца № 1, в зависимости от используемой электродной системы

С учётом полученных данных для дальнейших исследований в работе была определена система с 8 попарно-соединенными электродами. В главе представлены теоретические и экспериментальные исследования по определению дыхательного паттерна и фазы дыхания на основе многоканальных измерений биоимпеданса грудной области с целью последующего изучения влияния различных фаз дыхания на сосудистый тонус. Были проведены исследования с

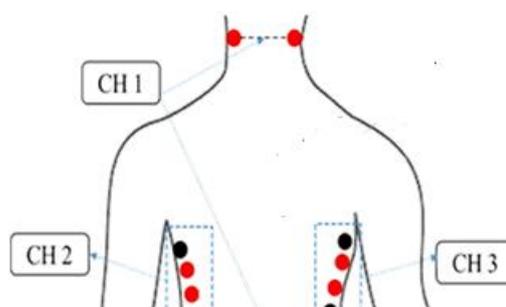


Рисунок 6. Расположение электродов, используемое для определения фазы дыхания с использованием сигналов биоимпеданса

использованием трансторакального – СН1 и торакальных – СН2,3 каналов, расположение электродных систем которых представлено на Рисунке 6. Чёрные – токовые, красные – измерительные электроды; токовые электроды СН1 располагались на лбу и левой голени добровольца. Исследования подтвердили, что биоимпеданс меняется в зависимости от фазы дыхания: увеличивается при вдохе и уменьшается при выдохе. Эти данные послужили основой для разработки алгоритма определения пяти периодов дыхания на основе биоимпедансных измерений, представленных на Рисунке 7.

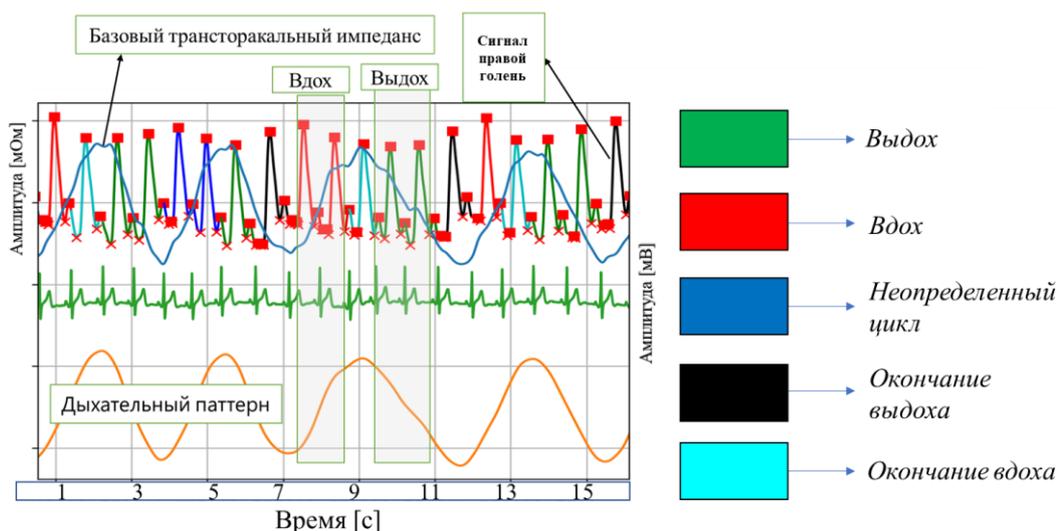


Рисунок 7. Паттерн дыхания, извлечённый из трансторакального канала и соответствие циклов сигнала пульсового биоимпеданса добровольца № 1 фазам дыхания

Корреляция между дыхательными паттернами, полученными в каждом из трёх каналов, оценивалась с помощью коэффициента корреляции Пирсона (1) (где  $z_i$  и  $z'_i$  – значения импеданса для соответствующего цикла измерений  $i$ ,  $N$  – количество циклов измерений,  $\bar{z}$  и  $\bar{z}'$  – средние значения импеданса по циклам).

$$r_i = \frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})(z'_i - \bar{z}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (z'_i - \bar{z}')^2}} \quad (1)$$

Средние значения корреляции между каналами для добровольцев следующие: между каналами СН1 и СН2 – 0.94, между СН1 и СН3 – 0.86, и между СН2 и СН3 – 0.9. На основании полученных результатов сделан вывод, что для целей настоящей работы любой из трёх каналов допустимо использовать для исследования влияния фаз дыхания на пульсовые сигналы биоимпеданса конечностей.

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов пространственно-временного картирования типа тонуса сосудов конечностей на основе многоканальных измерений биоимпеданса.

В главе осуществлено создание базы данных сигналов, регистрируемых в сегментах конечностей здоровых добровольцев. Используемые каналы и расположение электродных систем приведены на Рисунке 8. Исследование включало в себя 12 здоровых добровольцев мужского и женского пола, не имеющих перенесенных или выявленных заболеваний. Исследования проводились на основании решения этического комитета университета и под наблюдением медицинских специалистов научно-образовательного медико-технологического центра.

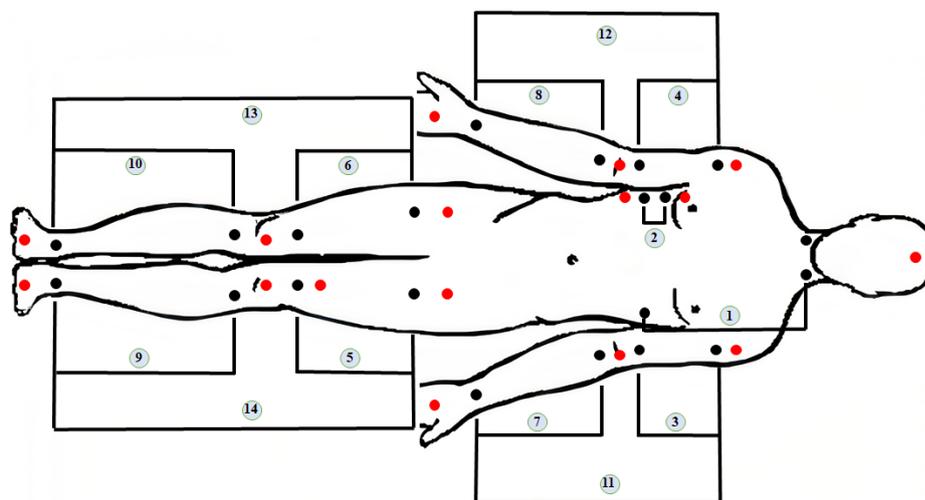


Рисунок 8. Используемые каналы и расположение электродных систем

Процедура исследования была следующей: доброволец приходил в медицинский центр в течение дня и отдыхал в течение 10 минут. После чего на него устанавливались одноразовые электроды, которые подключались к соответствующим каналам – процесс занимал от 20 до 30 минут. Затем доброволец находился в состоянии покоя в течение десяти минут. Среднее время записи было 7-10 минут при свободным дыханием и 3-5 минут при глубоком. Во время записи доброволец находился в покое лежа. Данные, помимо данных биоимпедансного мониторинга, включали индекс массы тела (ИМТ), время записи, количество циклов и среднюю частоту сердечных сокращений (ЧСС). Эта информация и была использована для формирования базы данных сигналов и дальнейшего анализа.

Второй раздел фокусируется на разработке алгоритма анализа параметров сигналов пульсового биоимпеданса каждого канала в фазах дыхания, что включало в себя предварительную фильтрацию сигналов, фильтрацию влияния дыхания на сигналы биоимпеданса сегментов конечностей, анализ пульсовых изменений в фазы дыхания, определение параметров ДКИ, ДСИ и типа сосудистого тонуса.

На Рисунке 9 представлены основные этапы алгоритма для обработки сигналов и определения типа сосудистого тонуса в каждом цикле пульсового кровенаполнения, реализованные на языке программирования Python.

Этапы, выделенные красным, были подвергнуты отдельному исследованию.



Рисунок 9. Основные этапы алгоритма для обработки сигналов и определения типа сосудистого тонуса в системе мониторинга

В процессе исследования было проведено сравнение следующих методов фильтрации: метод Савицкого-Голея; быстрое преобразование Фурье; биномиальный фильтр и локальная полиномиальная регрессия. Результаты, отображенные на Рисунке 10, демонстрируют, что неправильный выбор метода фильтрации может привести к потере диастолического пика.

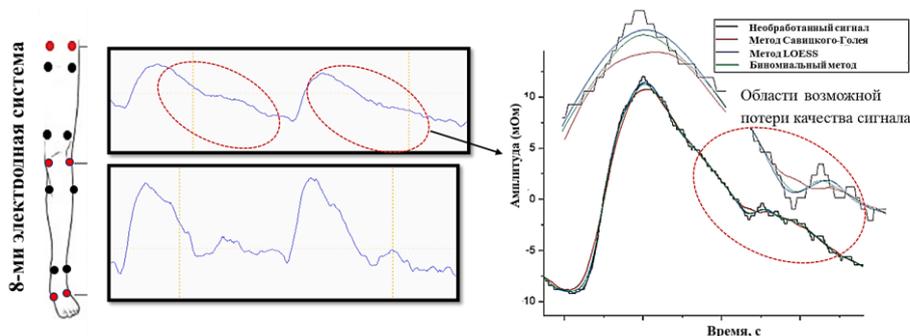


Рисунок 10. Вариации формы диастолической волны при использовании различных методов сглаживания сигнала

Для оценки эффективности различных алгоритмов фильтрации была применена экспертная оценка, включающая анализ количества пиков, обнаруженных в записи, времени пиковой активности и амплитуды.

На основании проведенного анализа было выявлено, что метод Савицкого-Голея с параметрами: ширина окна 21-57, полиномиальная степень 1 является наиболее эффективным методом фильтрации. Для сигналов от бедра был выбран биномиальный метод порядка 90-110 для биоимпедансных сигналов с частотой дискретизации 500 Гц.

Третий раздел посвящен разработке интерфейса визуализации типа тонуса сосудов для исследования сосудистого тонуса. С помощью языка программирования Python и C++ было разработано программное обеспечение,

позволяющее визуализировать пространственно-временные изменения сосудистого тонуса в сегментах конечностей.

1. Названный нами статистический подход представлен на Рисунке 11. Согласно Лужнов П.В., 2004; Шамкина Л.А., 2009 области на Рисунке 11 разделены следующим образом: область между прямыми С, А и В соответствует гипотоническому типу сосудистого тонуса, область между С, D, В и А – нормотоническому, между D и А – гипертоническому. Этот подход отражает общий тонус сосудов в сегменте в течение многих циклов. Однако, такой подход может упустить детальную информацию, если сигналы записывались в течение длительного времени, содержащего большое количество циклов. Поэтому, в алгоритм был включен расчет положения центра масс, положение которого в пространстве параметров ДКИ-ДСИ, позволяет отслеживать изменения тонуса до и после воздействия и во времени.

2. Динамический подход, представленный на Рисунке 12, позволяет наблюдать изменения тонуса сосудов во всех исследуемых сегментах во времени. На Рисунке 12 также отмечено значение "0", которое обозначает неопределённый тип сосудистого тонуса. Это означает, что в данном цикле метод не позволил нам определить тип сосудистого тонуса. Этот момент будет рассмотрен дополнительно далее.

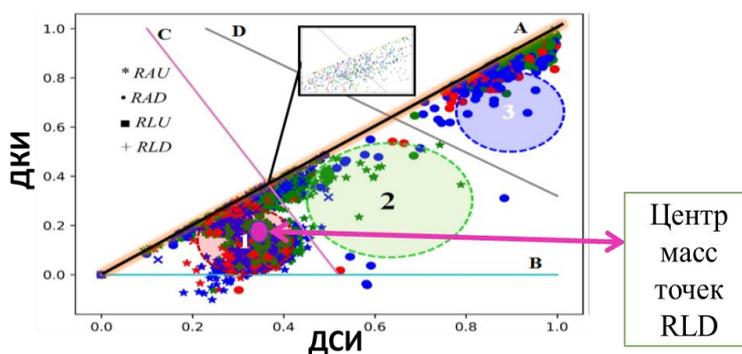


Рисунок 11. Тип тонуса сосудов в каждом сердечном цикле по записи для разных сегментов конечностей

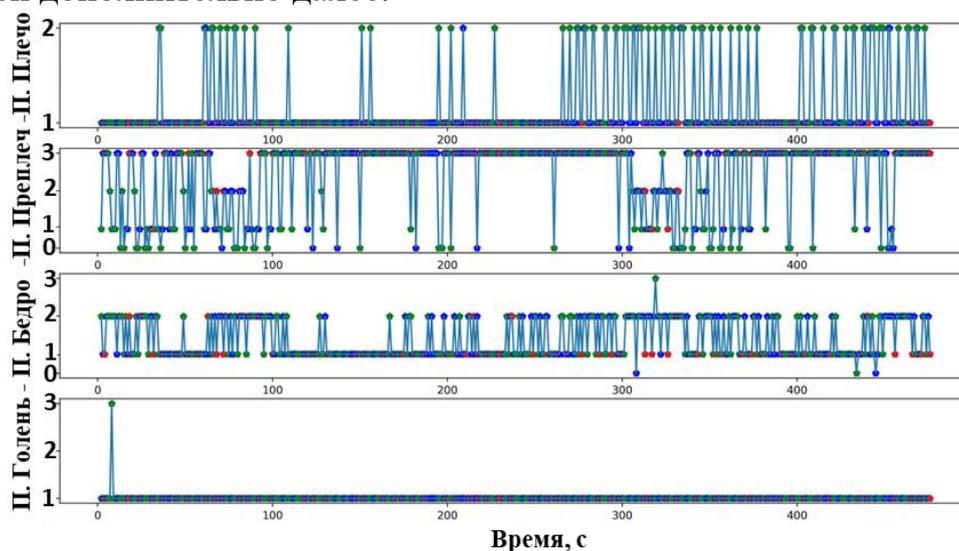


Рисунок 12. Изменения типа сосудистого тонуса конечностей для нескольких субъектов в реальном времени в связи с фазой дыхания (1 – гипертонический, 2 – нормотонический, 3 – гипотонический, 0 – неопределенный тип тонуса; зеленый – выдох, красный – вдох, синий – неопределенная фаза дыхания)

Разработанное программное обеспечение также включает в себя систему визуализации изменений типа сосудистого тонуса, синхронизированную с дыханием, в режиме мониторинга (Рисунок 13). Было замечено, что у добровольцев, у которых переходы типа тонуса сосудов наблюдались в сочетании со сменой фазы дыхания, данные изменения происходили преимущественно в верхних сегментах конечностей, особенно в плечевом сегменте, где тип тонуса сосудов смещался от гипертонического к нормотоническому или от нормотонического к гипотоническому во время фазы выдоха, как показано на Рисунке 14.

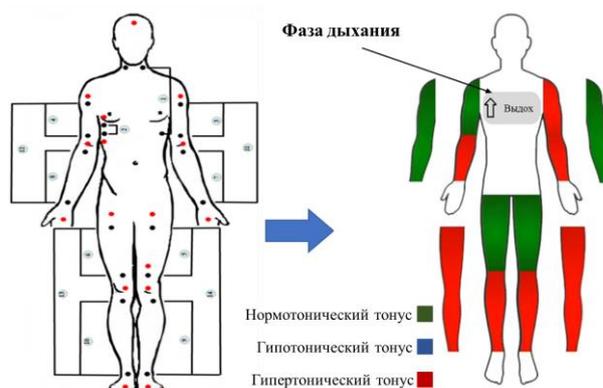


Рисунок 13. Скриншот из системы мониторинга, разработанной для отображения типа тонуса сосудов в конечностях в реальном времени

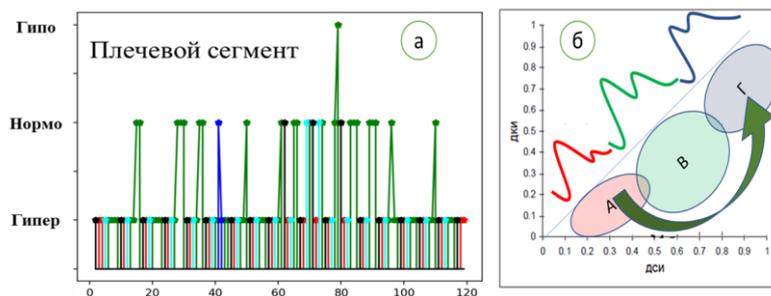


Рисунок 14. а – Переходы типа сосудистого тонуса в сочетании с фазой дыхания в плечевом сегменте, б – Направление перехода типа сосудистого тонуса в фазе выдоха (А – Гипертонический; В – Нормотонический; Г – Гипотонический)

В четвертой главе диссертации представлены исследования изменений типа тонуса сосудов в сегментах конечностей при физических воздействиях. Отмечено, что традиционные методы определения типа сосудистого тонуса, предполагающие форму сигнала, близкую к идеальной, и исключающие иные по форме циклы, нельзя признать обоснованными.

Наше исследование 60 000 циклов у здоровых добровольцев позволило выявить восемь основных типов форм сигналов в конечностях, представленных на Рисунке 15.

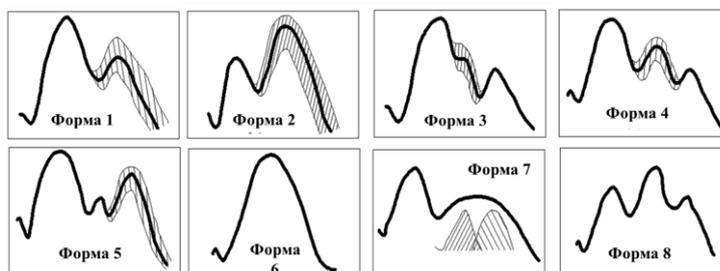


Рисунок 15. Основные формы биоимпедансных сигналов в конечностях

Численный анализ показал, что идеальный тип сигнала (Тип 1, представленный на Рисунке 15) составляет 64% от всех циклов, причем 53% в верхних и 75% в нижних конечностях (Рисунок 16).

Это показывает, что с использованием идеальной формы сигнала значительная доля циклов остается нераспознанной, что может влиять на точность определения типа сосудистого тонуса. Таким образом, данное исследование указывает на необходимость расширения понимания механизмов формирования сигналов биоимпеданса в конечностях. Установлено, что изменения в форме сигналов в фазах дыхания на нижних конечностях незначительны и статистически достоверных различий между вдохом и выдохом нет (Рисунок 17). В то время, как верхние конечности проявляют большую вариабельность, особенно на фазе выдоха, где сигналы второго и четвертого типа представлены в большем количестве. Из-за этого сигнал стабильнее в фазе вдоха. Это подтверждает предположение о влиянии повышения венозного возврата во время вдоха. Вероятно, что уход крови из вен в фазе вдоха приводит к улучшению кровообращения в сегментах конечностей, и тем самым уменьшаются отраженные волны, вызывающие появление разных форм сигналов.

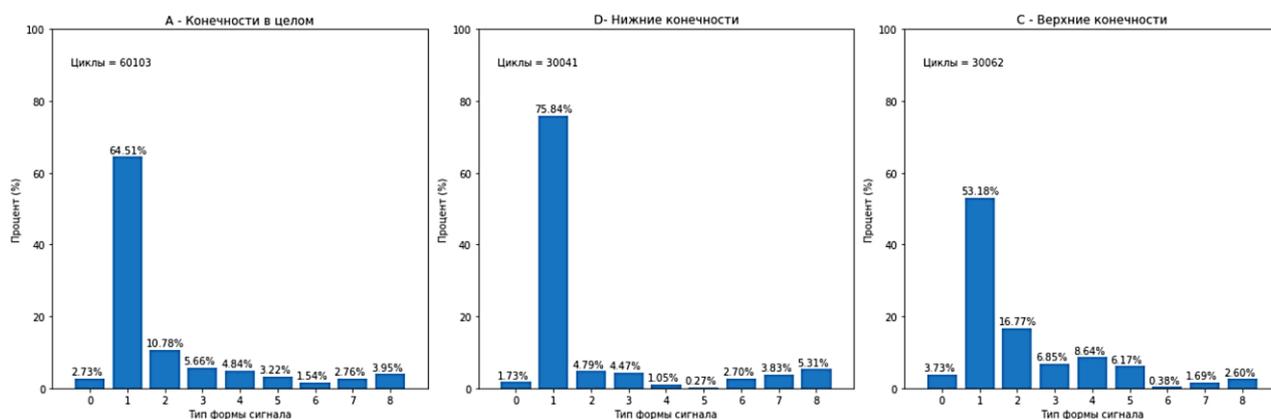


Рисунок 16. Процентное соотношение появления различных типов сигналов биоимпеданса в конечностях (А – конечности в целом, В – нижние конечности, С – верхние конечности; Тип формы 0 – сигнал является аномальным и искаженным из-за шума или иных факторов)

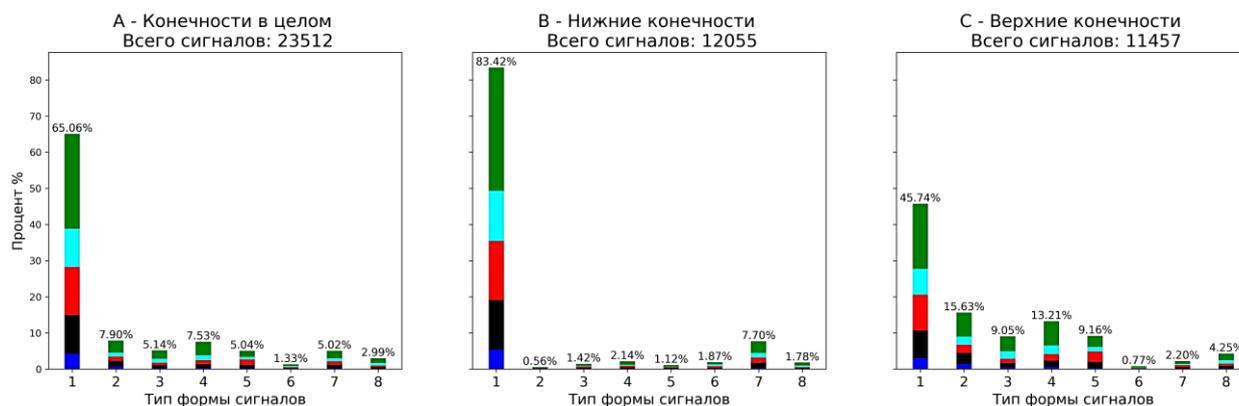


Рисунок 17. Процентное распределение появления различных типов сигналов биоимпеданса в конечностях с учетом фаз дыхания (А – конечности в целом, В – нижние конечности, С – верхние конечности)

В главе приведены исследования влияния венозного возврата на форму сигналов биоимпеданса конечностей и их связь с положением пациента. Отмечено, что так называемый “импульсно-волновой” тип 2, представленный на Рисунке 15, где диастолическая волна выше систолической, может наблюдаться в верхних конечностях. Этот тип, в литературе, часто связываются с ЗПА, но он также встречается и у здоровых людей. В настоящем исследовании 4 добровольца демонстрировали данный тип. Для них были проведены исследования с манжетой на левом плече (60 мм рт. ст.), которые показали его связь с венозным возвратом. Приложение давления нормализовало сигналы в левой руке, что показано на Рисунке 18. Данные результаты показывают, что изменения биоимпеданса в диастолу вероятно связаны с движением крови в венах и отраженными волнами.

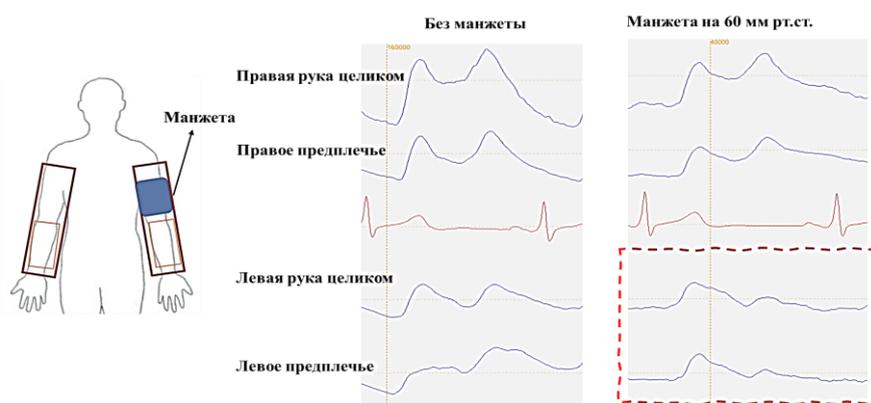


Рисунок 18. Изменения сигнала биоимпеданса при надувании манжеты на плече

У добровольца со вторым типом сигнала в верхних конечностях был изменен угол поднятия руки, чтобы оценить влияние её положения на сигнал. В положении лежа гипотонический тонус переходил в нормотонический при поднятии руки на 30 и 45°, а также в сидячем положении с опущенными руками, что представлено на Рисунке 19. Это подчеркивает важность положения при регистрации сигналов для оценки параметров кровообращения и сосудистого тонуса.

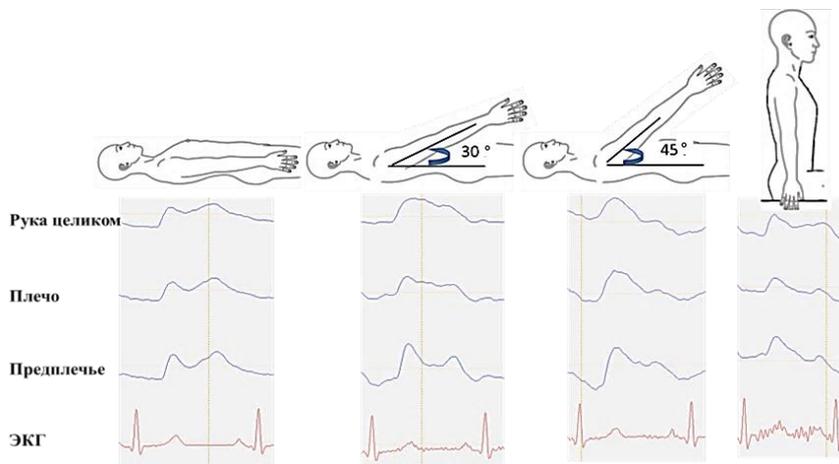


Рисунок 19. Изменения сигнала биоимпеданса при изменении положения конечности

Изучение тонуса сосудов нижних конечностей проводилось у пациента с ранней стадией варикозной болезни. Методика базировалась на регистрации биоимпеданса в состоянии расслабления и после локальной механотерапии. Результаты свидетельствуют об изменении типа сосудистого тонуса нижних конечностей после проведения массажа, при этом характер типа сосудистого тонуса изменяется и смещается, в среднем, в сторону нормотонического типа, что показано на Рисунках 20-21.

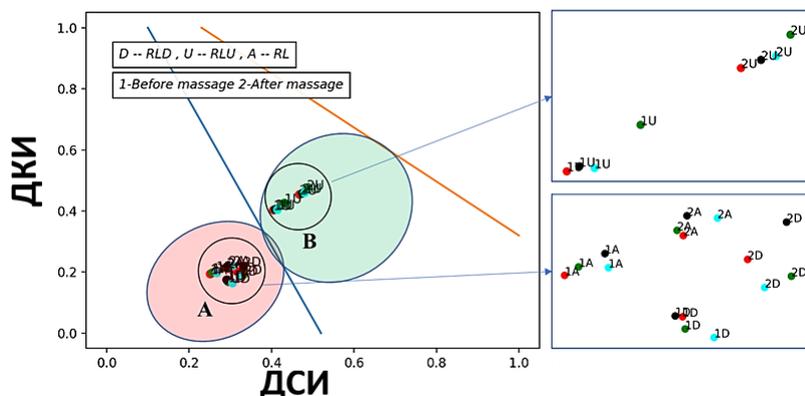


Рисунок 20. Изменения центра масса точек, отражающих тип тонуса сосудов, до и после применения механотерапии (1 – до массажа, 2– после массажа; А – гипертоническая зона, В – нормотоническая зона)

Процент циклов в гипертонической зоне уменьшился относительно общего числа циклов для левого бедра (массаж) с 22,8% до массажа до 2,4% после массажа. Указанное относилось также и к правому бедру, где процент уменьшался с 48,4% до массажа до 11% после массажа.

Приведенные в главе пилотные исследования изменения тонуса сосудов нижних конечностей при внешних воздействиях указывают на потенциальную клиническую ценность разработанных в диссертации медико-технических средств и методов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана биотехническая система многоканальной электроимпедансной системы пространственно-временного картирования преобладающего типа тонуса сосудистой системы человека.

2. Экспериментально установлено влияние параметров электродных систем на параметры электроимпедансных сигналов пульсового кровенаполнения сегментов конечностей. Показано, что для исследования типа тонуса сосудистой системы в системе мониторинга необходимо использовать 8-ми-электродную систему при заданных соотношениях расстояний между ними.

3. Проведено исследование влияния параметров дыхания на параметры электроимпедансных сигналов пульсового кровенаполнения сегментов конечностей. Установлено, что параметры сигналов биоимпеданса и тип сосудистого тонуса изменяются в зависимости от фазы дыхания у существенной доли добровольцев.

4. Разработано и апробировано программно-методическое обеспечение, позволяющее обрабатывать сигналы биоимпеданса для мониторинга изменений тонуса сосудов, включая фильтрацию сигналов от влияния дыхания, разделение сигналов по сердечным циклам и визуализацию пространственно-временных изменений типа сосудистого тонуса.

5. Предложен и апробирован новый метод оценки изменения типа тонуса сосудистой системы при внешних воздействиях, который оценивает проявление смещения центра масс состояния сосудистого тонуса в пространстве показателей ДКИ и ДСИ до и после воздействия, экспериментально показана его эффективность.

6. В результате экспериментальных исследований установлено, что при традиционном методе определения типа сосудистого тонуса удаётся проводить достоверную оценку в среднем для 64% циклов для конечностей в целом, 53% для верхних и 75% для нижних конечностей.

7. На основе анализа экспериментальных исследований предложена новая классификация, основанная на восьми формах сигналов, обнаруживаемых в сегментах конечностей, численно оценены вероятности их проявления, в том числе влияние фаз дыхания.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Оценка влияния конфигурация электродов на точность измерения биоимпеданса при исследовании тонуса сосудов / Хаммуд, А и другие // Физические Основы Приборостроения, 2021. 10(4), С. 22-27. (0.812 п.л./0.7 п.л.).

2. Automatic Bio-impedance Signal Analysis: Smoothing Processes Efficacy Evaluation in Determining the Vascular Tone Type / Hammoud A. et al. // In USBEREIT IEEE Xplore 2021. P. 113-116. (0.75 п.л./0.6 п.л.).

3. Multi-channel bioimpedance system for detecting vascular tone in human limbs: An approach / Hammoud A. et al. // Sensors, 2021. 22(1). P.138. (2.06 п.л./1.7 п.л.).

4. Extraction of Respiratory Patterns Using Thoracic Bio-Impedance Channels / Hammoud A. et al. // In USBEREIT IEEE Xplore 2022. P. 74-77. (0.7 п.л./0.55 п.л.).

5. Evaluation of the Information Content for Determining the Vascular Tone Type of the Lower Extremities in Varicose Veins: A Case Study / Hammoud A. et al. // Biosensors, 2023. 13(1), P.96. (1.86 п.л./1.5 п.л.).

6. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620590 Российская Федерация. База данных сигналов биоимпедансных измерений, зарегистрированных от конечностей человека при его свободном дыхании: № 2023620312 - 2023/ А. Хаммуд, А. Н. Тихомиров, С. И. Щукин; EDN REEVWU.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666364 Российская Федерация. Программа для полуавтоматического выделения характерных точек сигнала биоимпеданса: № 2022665531: 2022 / А. Хаммуд, З. Шахин, С. И. Щукин; EDN KJFRUV.