

На правах рукописи



Залетов Иван Сергеевич

**ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ГЕМОДИ-
НАМИКИ МЕТОДАМИ ИМПЕДАНСНОЙ РЕОГРАФИИ И
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДОППЛЕРОГРАФИИ**

1.5.2. – Биофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2023

Работа выполнена на кафедре медицинской физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель: **Сагайдачный Андрей Александрович**, к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Официальные оппоненты: **Пирогов Юрий Андреевич**, д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Танканаг Арина Владимировна, к.б.н., ведущий научный сотрудник, ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пушкино.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл

Защита диссертации состоится «21» марта 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.392.06 при Федеральном Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корпус 11, ауд. 515.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-06/kandidatskaya-dissertaciya-zaletovai-ivana-sergeevicha>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.392.06

д.ф.-м.н., профессор



Генина Элина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время для анализа периферической гемодинамики широко распространено применение неинвазивных методов оптической, электрической, ультразвуковой и других модальностей, таких как лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) [1,2], фотоплетизмография (ФПГ) [3,4], лазерный спекл-корреляционный анализ [5], импедансная реография [6], развиваются также методы двух- и трехмерной медицинской визуализации [7,8,9,10].

Для описания гемодинамики в макро- и микрососудах важен контроль объемного кровотока, определение которого требует одновременного измерения скорости кровотока и объема сосуда. Методы контроля указанных параметров, используемые по отдельности, не позволяют определять динамику объемного кровотока, поэтому разработка физических методов одновременного анализа динамики объемных и скоростных параметров кровотока в периферических сосудах в норме и при патологии является актуальной задачей биофизики в области биомедицинской диагностики.

С точки зрения точности и локальности измерения скорости кровотока в сосудах различного калибра оптимальным методом является ультразвуковая доплерография [11-13]. Использование импедансной реографии для определения колебаний объема крови в сосудах обеспечивает такие основные преимущества перед аналогами (прежде всего ФПГ и ЛДФ) как более высокая глубина зондирования и возможность регистрации низкоамплитудных дополнительных волн, составляющих пульсовую волну. Таким образом, в данной работе для анализа параметров гемодинамики, в том числе объемного кровотока, в качестве основных выбраны методы ультразвуковой доплерографии и импедансной реографии.

Отмечается успех в области проектирования и создания комплексов точечных электродов для биполярных и тетраполярных исследований методом импедансной реографии [14-16]. Сигнал импедансной реографии, получаемый с использованием точечных электродов, в отличие от классического метода с использованием кольцевых электродов, несет информацию о локальной динамике кровотока в исследуемом участке организма. Анализ локального сигнала позволяет выделить параметры, которые в будущем могут представлять интерес для диагностики нарушений механизмов регуляции периферической гемодинамики.

Анализ литературных данных демонстрирует выраженный интерес современных научных групп к вопросам изучения гемодинамики как в макро-, так и в микрососудах, и к её нарушениям при наличии артериальной гипертензии (АГ), сахарного диабета (СД) и других заболеваний, оказывающих влияние на периферическую гемодинамику [17-20]. Однако недостаточная изученность связи кровотока в макро- и микрососудах не позволяет в полной мере оценить взаимное влияние нарушений функционирования в разных отделах кровеносной системы.

Показано, что вейвлет-анализ колебаний позволяет оценить спектральный состав, определить степень корреляции и разность фаз для двух сигналов на каждой частоте, сделан вывод о том, что использование адаптивного вейвлет-анализа может дать дополнительную важную информацию о параметрах микрогемодинамики, обусловленных миогенным, нейрогенным и эндотелиальным механизмами регуляции тонуса сосудов [21-23]. Для спектрального анализа гемодинамических сигналов в диапазоне функционирования механизмов эндотелиальной, нейрогенной и миогенной регуляции нашел широкое применение метод вейвлет-корреляции.

Также одной из актуальных проблем современной диагностики заболеваний, оказывающих влияние на механизмы регуляции периферической гемодинамики, таких как АГ, атеросклероз сосудов, СД и т.д., является поиск возможностей выявления нарушений на ранней стадии развития заболеваний. Комплексный подход к изучению процессов, происходящих в периферическом отделе сердечно-сосудистой системы, с использованием методов ультразвуковой доплерографии и импедансной реографии для анализа кровотока в макрососудах и двумерной термографии для оценки кровотока в микрососудах может быть полезен при

обнаружении артериальной гипертонии, к которой в настоящее время наблюдается повышенный интерес в исследованиях зарубежных и отечественных научных групп [24-26].

Цель и задачи исследования.

В связи с вышесказанным, целью диссертационной работы является раскрытие новых диагностических возможностей анализа периферической гемодинамики в микро- и макрососудах **совместно** методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии, и их верификация с помощью термографического метода двухмерной визуализации гемодинамических процессов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Провести критический анализ работ, посвящённых описанию современных методов исследования кровотока в микро- и макрососудах, в том числе с помощью методов импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии.
2. Разработать метод анализа средневзвешенной скорости кровотока на основе непрерывного измерения спектра скорости кровотока, измеренной методом ультразвуковой доплерографии, в состоянии физиологического покоя. Выполнить модельное описание результатов.
3. Провести декомпозицию форм пульсовых волн, регистрируемых методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии, с целью установления их взаимосвязи.
4. Разработать комплекс низкоинтенсивных функциональных нагрузочных проб, позволяющий провести комплексную оценку кровотока в области лучевой артерии и сосудов кисти.
5. Провести анализ длительных записей сигналов ультразвуковой доплерографии, импедансной реографии и инфракрасной термографии в состоянии покоя с целью установления взаимосвязей кровотока в макро- и микрососудах запястья и кистей здоровых испытуемых в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах регуляции тонуса сосудов.
6. Разработать способ выявления нарушений регуляции тонуса периферических сосудов в группе пациентов с диагнозом артериальная гипертония.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является гемодинамика в периферических сосудах запястья (лучевая артерия) и кистей рук человека, как областей наиболее доступных для неинвазивных измерений. Предметом исследования является проявление и специфика механизмов регуляции периферической гемодинамики в процессе проведения нагрузочных проб в группе здоровых испытуемых и испытуемых с диагнозом артериальная гипертония. Материалом исследования являются реографические, ультразвуковые и термографические данные, полученные с периферических областей тела человека в норме и при патологии.

Методы исследования

Информационную базу составляют монографические работы, материалы научно-технических конференций, объекты интеллектуальной собственности, статьи в периодических изданиях и научных сборниках по исследуемой проблеме.

При проведении исследований использовались:

- методы математической теории эксперимента (методы математической статистики);
- реографические, ультразвуковые и термографические методы сбора и анализа экспериментальных данных;
- метод вейвлет-корреляции;
- аппаратные и программные методы обработки сигналов;
- программное обеспечение для написания кода на языке Python.

Достоверность подтверждается согласованием экспериментальных результатов с данными других исследовательских групп, обеспечена применением откалиброванной современной измерительной аппаратуры и статистической обработкой результатов измерений с использованием общепринятых методов.

Научная новизна диссертационной работы

1. Показано, что средневзвешенное значение скорости кровотока в лучевой артерии находится вблизи значения равного половине максимальной скорости кровотока и отличается от него на величину не более 5% при комфортных условиях окружающей среды (температура – 22-24°C, влажность – 40-55%) и отсутствии физической, психической и фармакологической нагрузок.
2. Впервые экспериментально установлено, что дополнительный положительный пик волны объема крови в сосуде, регистрируемый методом импедансной реографии в позднюю систолу, соответствует по времени возникновения отрицательному пику волны скорости кровотока, регистрируемой методом ультразвуковой доплерографии.
3. Установлена связь между сигналами скорости кровотока лучевой артерии и объемного кровотока дистальной фаланги указательного пальца испытуемого на уровне 0.6 в эндотелиальном диапазоне колебаний кровотока.
4. Показано, что вариабельность произведения огибающей систолических пиков скорости кровотока, измеренной ультразвуковым методом, и объема сосуда, измеренного методом импедансной реографии, сохраняет осциллирующий характер относительно среднего значения вне зависимости от проведения дыхательной и окклюзионной проб.
5. Показана эффективность достижения состояния температурного симпатолита для оценки динамического диапазона регуляции периферической гемодинамики в группе пациентов с диагнозом артериальной гипертонии, находящихся на медикаментозной терапии.

Научная и практическая значимость результатов работы:

- Полученная информация о распределении форменных элементов крови по скорости кровотока в перспективе может позволить определять области с аномальным течением крови при детектировании значительного отклонения от соотношения максимальной и средней скорости кровотока, равного 0.5.

- Анализ динамики дополнительного пика кривой реографического объема в позднюю систолу дает возможность оценки периферического сопротивления кровотоку без использования метода ультразвуковой доплерографии.

- Установленная взаимосвязь объемного кровотока дистальных фаланг (микрососуды) и скорости крови в лучевой артерии (макрососуд), демонстрирует возможность косвенной оценки состояния макрососудов по анализу кровотока в области дистальных фаланг пальцев.

- Параметр объемного кровотока как произведение сигналов скорости кровотока, измеренной методом ультразвуковой доплерографии и объема сосуда, измеренного методом импедансной реографии, в перспективе может характеризовать процессы авторегуляции в норме и при патологии.

- Проведение в группе пациентов с АГ комплекса из гравитационной и тепловой проб позволяет по изменению амплитуды систолического пика кривой реографического объема оценить динамический диапазон регуляции периферической гемодинамики.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. При отсутствии нарушений гемодинамики средневзвешенное значение скорости кровотока в лучевой артерии находится вблизи значения равного половине максимальной скорости кровотока и отличается от него на величину не более 5% от максимальной скорости.
2. Установлена корреляция ($r \approx 0.6 \pm 0.1$) скорости кровотока, измеренной методом ультразвуковой доплерографии, в макрососуде (область лучевой артерии) и колебаний кровотока в микрососудах (область дистальных фаланг пальцев) в частотном диапазоне эндотелиальной регуляции тонуса сосудов.
3. Дополнительный положительный пик волны объема крови в сосуде, регистрируемый методом импедансной реографии в позднюю систолу, соответствует по времени возникновения отрицательному пику волны скорости кровотока, регистрируемой методом ультразвуковой доплерографии.

4. Вариабельность произведения огибающей систолических пиков скорости кровотока, измеренной методом ультразвуковой доплерографии, и огибающей систолических пиков объема сосуда, измеренного методом импедансной реографии, у испытуемых без нарушений регуляции тонуса сосудов сохраняет осциллирующий характер относительно среднего значения вне зависимости от проведения нагрузочных дыхательной и окклюзионной проб.
5. Проведение гравитационной пробы на верхней конечности совместно с тепловой пробой, позволяет, за счет индуцирования состояния температурного симпатолита, оценить динамический диапазон регуляции периферической гемодинамики в норме и при артериальной гипертонии.

Апробация работы

1. XIV Международная конференция по микроциркуляции и гемореологии, Ярославль, 10-11 июля 2023 г.
2. Шестнадцатая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва, 28 июня – 02 июля 2021 г.
3. IV Всероссийская с международным участием школа-конференция «Физиология и патология кровообращения», Москва, 3-6 февраля 2020 г.
4. Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие СВЧ, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами», 24-25 мая 2023 г., Саратов, Россия.
5. «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2022», 22-24 ноября 2022 г., Саратов, Россия.
6. «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2021», 19-21 ноября 2021 г., Саратов, Россия.
7. «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2020», 18–19 ноября 2020г., Саратов, Россия.
8. «УМНИК-2019 НТИ Хелснет», НИТУ «МИСиС», 13 декабря 2019 г, Москва, Россия.
9. «УМНИК-2019» в рамках XXXII Международной научной конференции Математические методы в технике и технологиях ММТТ-32, 20-22 ноября 2019 г., Саратов, Россия.

Полученные в работе результаты использовались при выполнении научных исследований по грантам: «УМНИК» № 15212ГУ/2020, РФФИ № 19-32-90072, РФФИ № 21-75-00035.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.5.2. «Биофизика» (отрасль науки – физико-математические) по направлениям исследований: «Общая биофизика: биофизика регуляторных процессов», «Биофизика сложных систем: медицинская биофизика», «Исследование явлений пространственно-временной самоорганизации, саморегуляции и самоуправления в биологических системах, включая методы неравновесной термодинамики и синергетики.», «Теоретическое и экспериментальное исследование физических процессов, протекающих в биологических системах разного уровня организации, в том числе исследование воздействия различных видов излучений и других физических факторов на биологические системы.».

Личный вклад автора

Все положения и результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Цели и задачи диссертации сформулированы совместно с научным руководителем. Все программы обработки сигналов, полученных методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии, разработаны лично автором, соответствующие результаты отражены в работах [A2, A5]. Программа детектирования моментов активации потовых желез на основе вейвлет-преобразования, использованная в данном исследовании при длительных записях инфракрасных термограмм, разработана автором лично, что отражено в работе [A1]. Клинические исследования в группе пациентов с диагнозом артериальная гипертония проводились

на базе ГУЗ «Областной клинический кардиологический диспансер», г. Саратов под руководством д.м.н. Клочкова В.А.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них: 3 статьи, удовлетворяющие рекомендациям ВАК (1 статья в зарубежных рецензируемых научных изданиях из квартиля Q1, индексируемых международными реферативными базами данных Web of Science и/или Scopus; 2 статьи в научных изданиях, отнесенных к категории K1), 1 патент РФ, 2 свидетельства о гос. регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка (126 наименований). Работа изложена на 117 листах, включает 1 таблицу и 53 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дается обоснование актуальности темы исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель и задачи работы, указывается научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования, сформулированы основные результаты и положения.

В **Первой главе** диссертации проведен обзор исследований в области ультразвуковых и биоимпедансных методов анализа гемодинамики. Описаны методы исследования периферической гемодинамики запястий и кистей человека. Проведен обзор нагрузочных проб, применяемых для диагностики нарушений функционирования механизмов регуляции периферической гемодинамики.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов выделения значимой информации из экспериментальных сигналов в методах ультразвуковой доплерографии и импедансной реографии. Первой задачей, решаемой во второй главе, является разработка метода анализа доплеровского сигнала, позволяющего производить оцифровку, сохранение и численную обработку экспериментальных данных. Трудности с решением этой задачи возникают вследствие того, что большинство ультразвуковых комплексов, созданных для медицинского использования, не имеют возможности сохранения длительных записей изменения скорости кровотока в память ПК.

С целью осуществления оцифровки ультразвукового сигнала УЗИ-аппарат Edan U50 подключался к плате видеозахвата при помощи VGA-HDMI конвертера. При помощи программы OBS studio выбиралось окно захвата и осуществлялась запись с частотой 60 к/с, соответствующей частоте обновления дисплея УЗИ-аппарата. После окончания записи полученный ролик покадрово трансформировался в набор изображений. Для выделения изображений необходимых для формирования оцифрованной записи и проведения процедуры оцифровки была написана программа на языке Python. Результатом работы программы является огибающая доплеровского спектра, отражающая изменение максимальной скорости кровотока с сохраненным временным и амплитудным разрешением первоначального сигнала скорости кровотока (рис. 1).

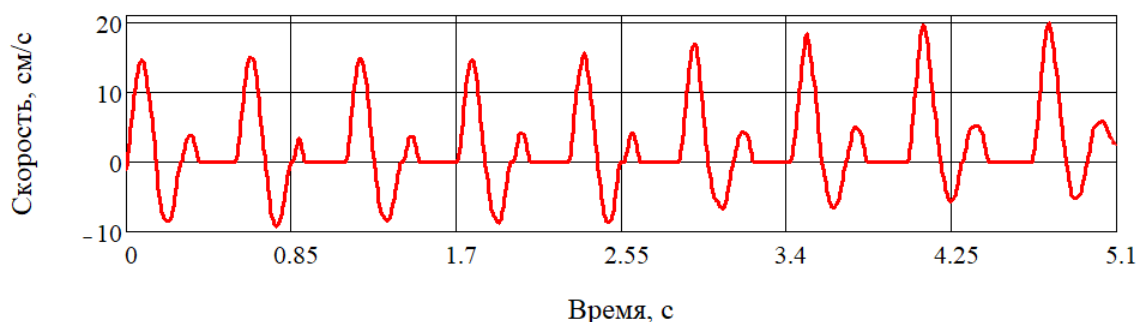


Рис. 1. Оцифрованная запись скорости, регистрируемой методом ультразвуковой доплерографии

Второй задачей, решаемой в данной главе, является анализ доплеровского спектра скорости эритроцитов в просвете сосуда. Как известно, доплеровский спектр кровотока помимо данных о скорости, содержит также яркостную информацию об относительном количестве эритроцитов, обладающих той или иной скоростью, поэтому при анализе спектра имеется дополнительная возможность в каждый момент времени определять гистограмму распределения количества эритроцитов по скоростям. Штатное программное обеспечение дуплексных ультразвуковых приборов не содержит данную функцию.

Гистограмма скоростей эритроцитов может быть полезна при оценке параметра средней скорости кровотока. Согласно математической модели параболического ламинарного течения максимальная скорость потока выражается как частное решение уравнения Навье-Стокса в виде (1). При этом средняя скорость потока равна половине максимальной скорости (см. выражения (2) и (3)) [28]. В случае отклонения характера течения от ламинарного соотношения между максимальной и средней скоростями может меняться.

$$v_{max} = -\frac{1}{4\mu} \frac{\Delta p}{\Delta z} R^2 \quad (1)$$

где μ – вязкость крови, Δp – разность давлений на входе и выходе трубки (кровеносного сосуда), Δz – длина трубки, R – радиус трубки.

Объемный расход жидкости Q через поперечное сечение трубки по закону Пуазейля определяется как:

$$Q = -\frac{\pi}{8\mu} \frac{\Delta p}{\Delta z} R^4 \quad (2)$$

Тогда средняя скорость определяется через объемный расход и, с учетом (2) и (1), выражается как:

$$v_{avg} = \frac{Q}{S} = -\frac{1}{8\mu} \frac{\Delta p}{\Delta z} R^2 = \frac{v_{max}}{2} \quad (3)$$

где S – площадь сечения трубки, $S = \pi R^2$

Для более полного описания скоростных характеристик кровотока в данном исследовании проводился анализ распределения скоростей в экспериментальном спектре, для чего рассматривалось сечение спектра в момент времени, соответствующий систолическому пику (рис. 2).

Рис. 3 демонстрирует неоднородность распределения эритроцитов по скоростям. Средняя высота столбцов диаграммы в диапазоне скоростей крови более 20 см/с вдвое меньше средней высоты в диапазоне от 5 до 20 см/с. В связи с этим для общей оценки скорости целесообразно использовать средневзвешенную скорость $v_{avg}(t)$, которая может быть получена как взвешенное значение скоростей:

$$v_{avg} = 0,01 \sum_{n=1}^N v_n \cdot C_n \quad (4)$$

где v_n – распределение скоростей эритроцитов в спектре доплеровского смещения; C_n – весовой коэффициент, описывающий процентное отношение количества эритроцитов, обладающих конкретной скоростью, к общему числу эритроцитов; N – количество дискретных значений диапазона скоростей кровотока, n – номер дискретного значения диапазона скоростей кровотока.

Для проверки соответствия средневзвешенной скорости экспериментального сигнала и математической модели проводилось вычисление двух параметров для двух испытуемых с различным характером профиля доплеровского сдвига частоты: заполненный спектр, являющийся типичным для здоровых испытуемых, (рис. 4) и незаполненный спектр (рис. 5), являющийся нетипичным для группы здоровых испытуемых.

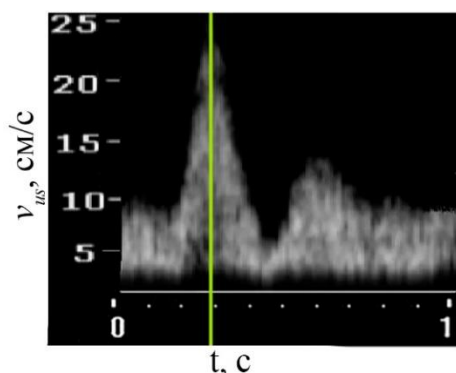


Рис. 2. Спектрограмма доплеровского сдвига частоты ультразвукового сигнала за период сердечного цикла. Вертикальной линией обозначено сечение, в котором анализировалось распределение эритроцитов по скоростям (см. рис. 3).

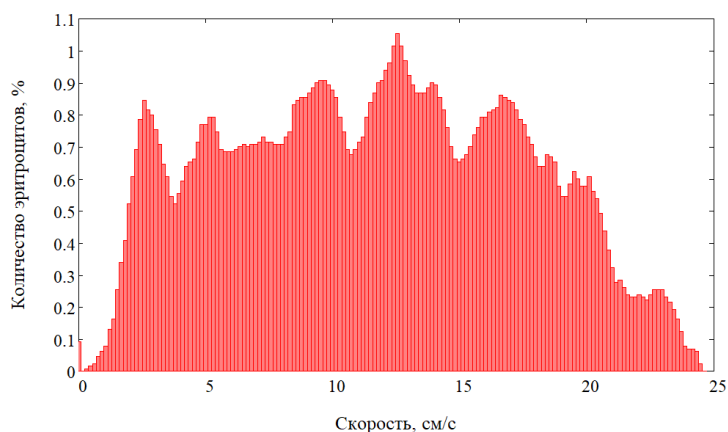


Рис. 3. Пример гистограммы распределения доплеровской скорости движения эритроцитов в сосуде (лучевой артерии) в сечении систолического пика (см. рис. 2).

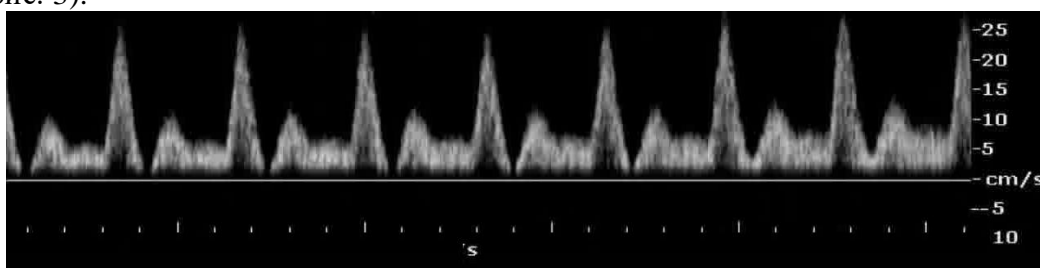


Рис. 4. Участок доплерограммы испытуемого с заполненным спектром

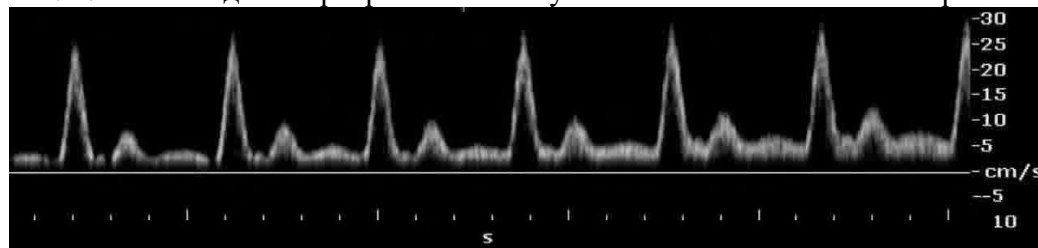


Рис. 5. Участок доплерограммы испытуемого с незаполненным спектром.

Разница в величинах между средневзвешенной скоростью и половиной максимальной скорости кровотока для заполненного спектра, как показано на рис. 6а, в среднем составляет 14% или 0,7 см/с, что можно трактовать как незначительное отклонение от модельного сигнала. Разница пары сигналов для незаполненного спектра (рис. 6б) составила в среднем 36% или 1,4 см/с, что можно трактовать как значительное отклонение от модельного представления средней скорости кровотока. В перспективе величина отклонения параметра средневзвешенной скорости от половины максимальной скорости может выступать критерием отклонения от ламинарности кровотока (турбулентности), наблюдающегося, например, вследствие наличия бифуркаций, локальных стенозов, аневризм и холестериновых бляшек.

Третьей задачей, решаемой во второй главе, является декомпозиция формы пульсовой волны объема сосуда, регистрируемого методом импедансной реографии, с целью выделения высокочастотной компоненты, отражающей пульсовые изменения кровенаполнения исследуемого участка сосуда. Описан алгоритм разделения экспериментального сигнала на 2 компоненты: высокочастотную АС-компоненту, отражающую пульсовые колебания, и ДС-компоненту, отражающую изменение базового импеданса. Второй задачей алгоритма декомпозиции является выделение из АС-компоненты огибающих основных реографических пиков: систолического, диастолического и дополнительного пика в позднюю систолу.

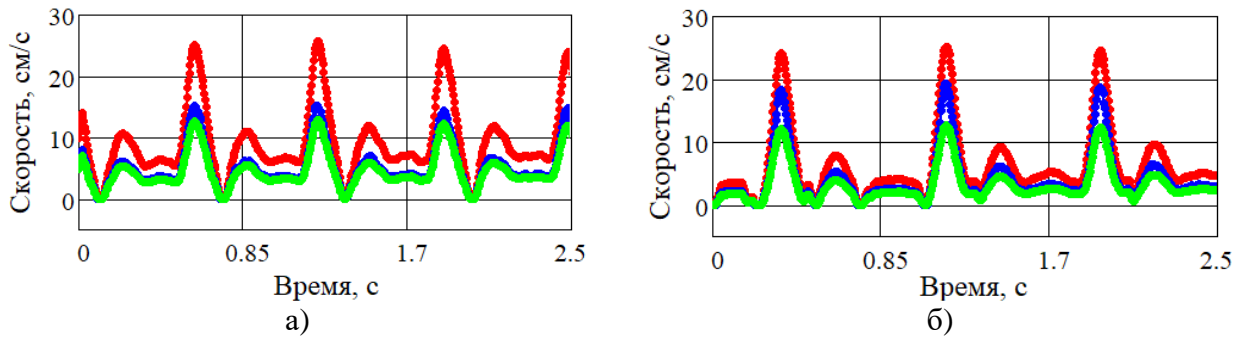


Рис. 6. Сопоставление максимальной скорости движения эритроцитов (красная кривая), средневзвешенной скорости движения эритроцитов (синяя кривая) и половины максимальной скорости (зеленая кривая): а – для случая “заполненного” спектра, б – для случая “незаполненного” спектра.

Сигнал изменения объема, регистрируемый методом импедансной реографии, снимался с проекции лучевой артерии в запястьях правой руки. Данная область отличается близким расположением лучевой артерии к поверхности кожи и малой толщиной жировой прослойки. Такой подход позволил рассматривать получаемый в ходе проведения реографического исследования сигнал, как сигнал, в большей степени отражающий изменение кровенаполнения участка лучевой артерии в результате прохождения пульсовой волны.

Для выделения АС-компоненты из исходного сигнала вычитались огибающая минимумов и формировалась кривая, отражающая пульсовые колебания исследуемого участка. Полученная АС-компонента позволяет проводить анализ реакции пульсовой компоненты на различные виды нагрузочных проб. Дальнейшая декомпозиция АС-компоненты реографического объема заключалась в определении для каждого кардиоцикла набора точек, соответствующего основным характерным пикам реографического колебания. Таким образом выделялись огибающие систолических, диастолических и дополнительных пиков, возникающих в позднюю систолу (см. рис. 7).

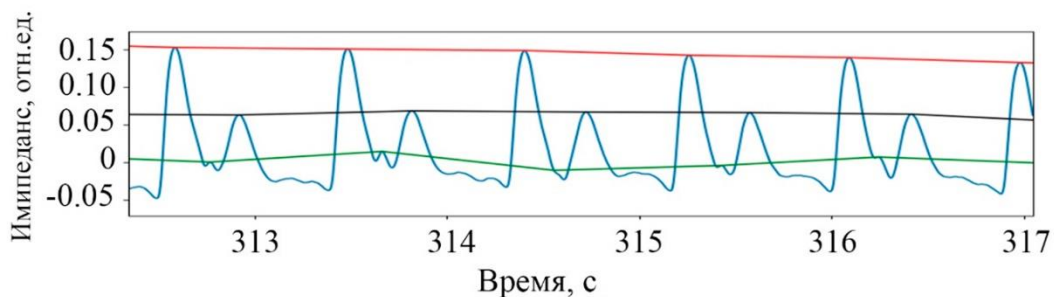


Рис. 7. АС-компонента объема, регистрируемого методом импедансной реографии, с выделенными огибающими систолического (красная линия), дополнительного (зеленая линия) и диастолического (черная линия) пиков.

В **третьей главе** исследуется взаимосвязь между скоростью кровотока в лучевой артерии, объемом лучевой артерии и кровотоком в микрососудах кистей в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах колебания кровотока. В ходе работы проводилось сопоставление трех параметров: динамика объема лучевой артерии (V_{rheo}), регистрируемая методом импедансной реографии, скорость кровотока (v_{us}), регистрируемая методом ультразвуковой доплерографии и трансформированный из температуры объемный кровоток (BF_T). Для анализа экспериментальных данных в частотной области применялась функция вейвлет-корреляции $CC(s)$ (7) и анализирующий вейвлет Морле (6), как описано в работе [21].

$$W(s, \Delta t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} F(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t - \Delta t}{s} \right) dt, \quad (5)$$

$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot e^{(i \cdot \omega_0 \cdot r)} \cdot e^{(-r^2/2)}, \quad (6)$$

$$r = \frac{t - \Delta t}{s}$$

где s и Δt – параметры временного масштаба и временного сдвига базисного вейвлета, соответственно, t – время, $F(t)$ – экспериментальный сигнал, ω_0 – параметр вейвлета [28]

$$CC(s) = \frac{\sum_{j=1}^N W_1(s, t_j) \cdot W_2^*(f_s, t_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |W_1(s, t_j)|^2 \cdot \sum_{j=1}^N |W_2(s, t_j)|^2}}, \quad (7)$$

где $W_1(s, t_j)$ – вейвлет-образ первого сигнала, $W_2(s, t_j)$ – вейвлет-образ второго сигнала; * – комплексное сопряжение.

В результате обработки экспериментальных сигналов для каждого испытуемого была получена матрица корреляции 15 сигналов BF_T с сигналами V_{rheo} и v_{us} , измеренными на различных участках пальцев, ладони и запястья в группе из 10 испытуемых. Затем строилась карта корреляции, отражающая пространственное распределение коэффициентов корреляции на поверхности кисти. В результате анализа матриц установлена высокая степень корреляции для пары сигналов скорости кровотока в лучевой артерии и кровотока дистальной фаланги указательного пальца ($r \approx 0.6 \pm 0,1$) (см. рис. 8).

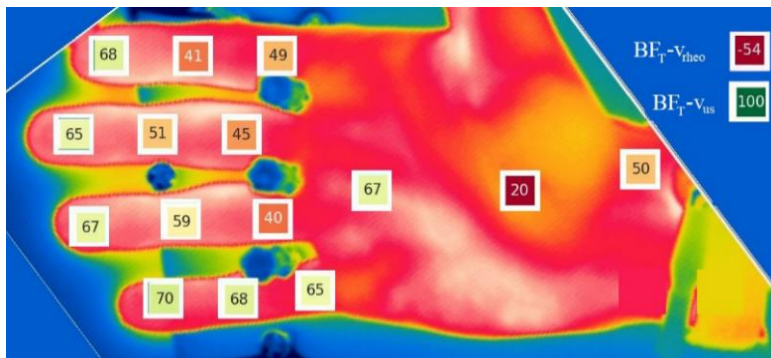


Рис. 8. Карта распределения коэффициентов корреляции на поверхности ладони испытуемого (референсный сигнал – скорость, измеренная методом ультразвуковой доплерографии)

На рис. 9 продемонстрирована корреляция попарно для сигналов кровотоков-объем (синяя диаграмма размаха), объем-скорость (оранжевая диаграмма размаха) и кровотоков-скорость (зеленая диаграмма размаха) для группы испытуемых. Из рис. 9а следует, что корреляция сигналов в эндотелиальном диапазоне колебаний (0,005–0,02Гц) находится на уровне 0.6 для пары сигналов кровотоков-скорость и -0.6 для пары сигналов кровотоков-объем.

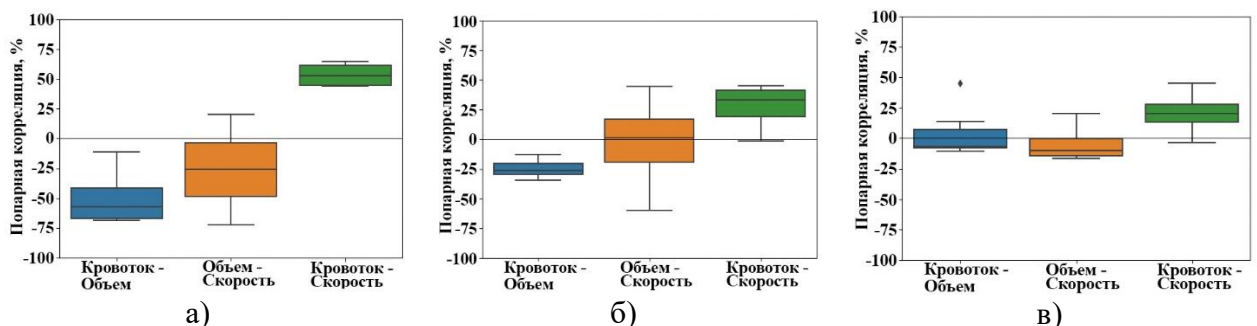


Рис. 9. Диаграммы размаха корреляции сигналов скорости и объема лучевой артерии и кровотока дистальной фаланги указательного пальца. Кровоток-объем (синяя диаграмма размаха), объем-скорость (оранжевая диаграмма размаха) и кровотоков-скорость (зеленая диаграмма размаха): а – эндотелиальный диапазон, б – нейрогенный диапазон, в – миогенный диапазон.

Корреляция для пары сигналов объем-скорость составил в среднем -0.25 , обратная корреляция этих сигналов согласуется с результатами, представленными в работе [29]. В нейрогенном и миогенном диапазонах наблюдается слабая корреляция (см. рис. 9 б, в). На рис. 8 и 9 коэффициент корреляции спектральных составляющих выражен в процентах в диапазоне $[-100;100]$, где -100% соответствует значению коэффициента корреляции -1 , 100% - значению $+1$. Колебания кровотока в дистальной фаланге имеют высокую корреляцию с колебаниями кровотока в лучевой артерии, что обосновывает высокую информативность и практическую значимость измерений параметров гемодинамики на дистальной фаланге пальцев рук.

В четвертой главе проводится исследование взаимосвязи формы пульсаций объема сосуда и скорости кровотока, а также анализ вариабельности формы пульсовой волны при проведении дыхательной пробы. Описывается реакция кровотока лучевой артерии на дыхательную и окклюзионную пробы.

Первой задачей, решаемой в данной главе, явилось сравнение формы волны объема лучевой артерии и скорости кровотока лучевой артерии в состоянии физиологического покоя и при проведении дыхательной пробы. Как показано на рис. 10 и 11 в ответ на проведение дыхательной пробы наблюдается разнонаправленная реакция объема лучевой артерии и скорости кровотока. Также, после снятия окклюзии и сброса давления происходит резкое возрастание скорости кровотока, вследствие чего наблюдается поток-зависимая дилатация. Анализ реакции сигналов показывает противоположную направленность динамики пары сигналов.

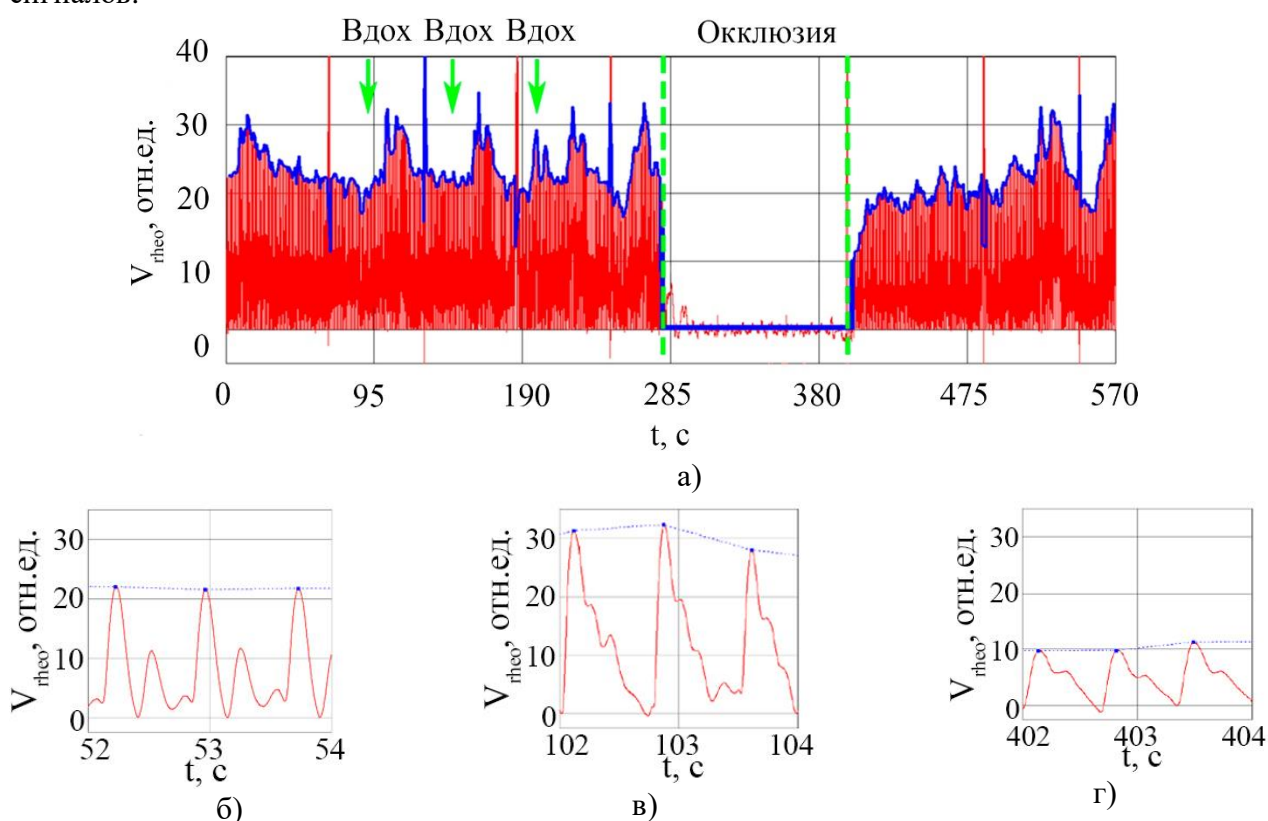


Рис. 10. Изменение объема крови в ответ на дыхательную пробу: а – полный реографический сигнал, б – типичный вид кривой на участке покоя, в – типичный вид кривой на участке дыхательной пробы, г – типичный вид кривой после снятия давления в манжете.

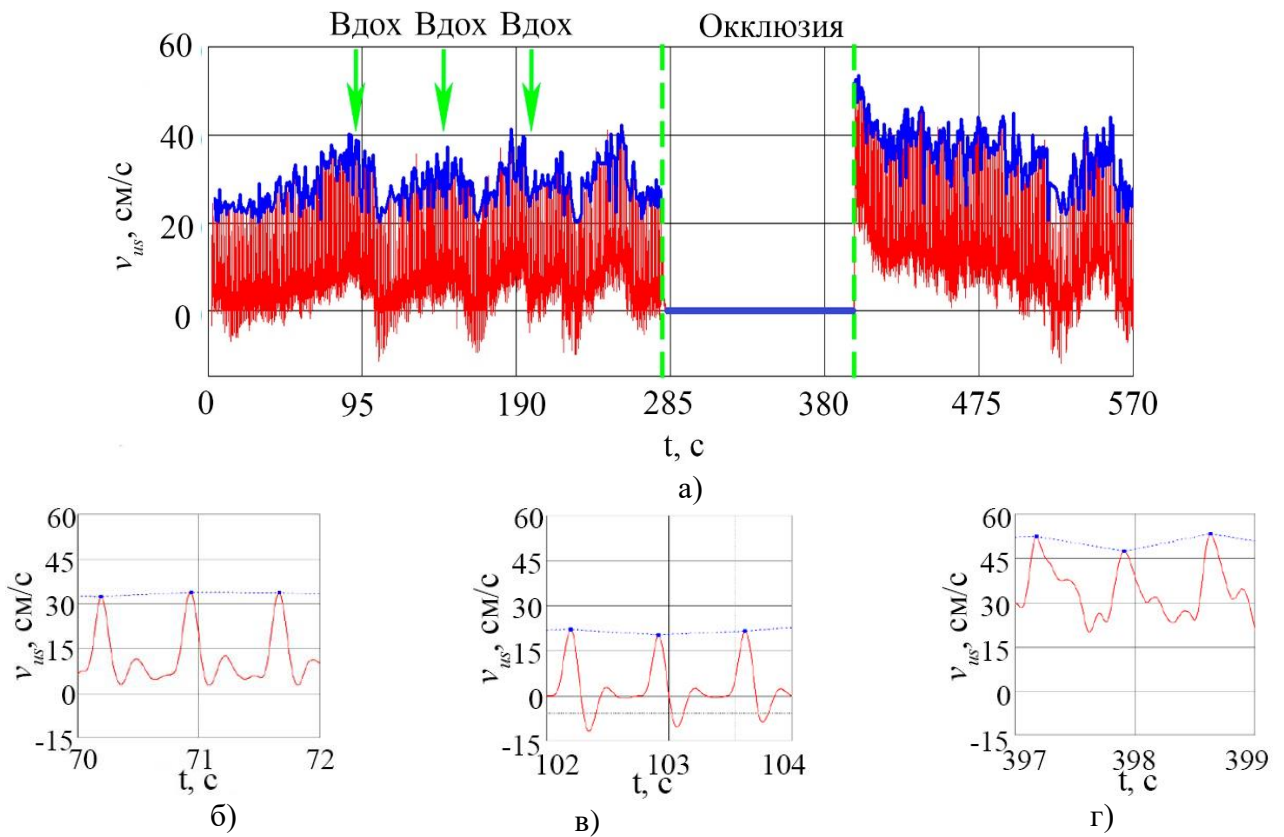


Рис. 11. Изменение скорости кровотока в ответ на дыхательную пробу: а – полный сигнал скорости кровотока, б – типичный вид кривой на участке покоя, в – типичный вид кривой на участке дыхательной пробы, г – типичный вид кривой после снятия давления в манжете.

Для сравнения изменения объема лучевой артерии и скорости кровотока без учета незначительной вариабельности формы соседних волн осуществлялось построение интегрированных волн \bar{V}_{theo} и \bar{v}_{us} , полученных усреднением данных за 60 последовательных кардиоциклов.

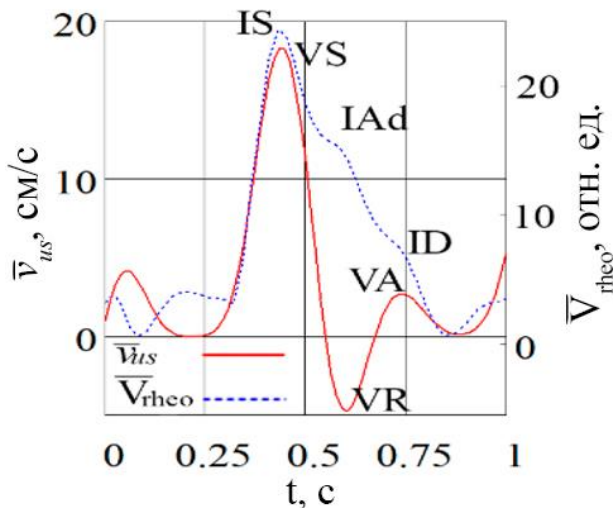


Рис. 12. Сопоставление усредненных волн объема (синяя пунктирная кривая) и скорости (красная кривая) после проведения дыхательной пробы.

Из анализа рис. 12 следует что время возникновения дополнительного пика в позднюю систолу в сигнале объема совпадает с временем возникновения обратного (ретроградного) пика скорости кровотока. Это свидетельствует о том, что дополнительный положительный систолический пик, регистрируемый методом импедансной реографии в позднюю систолу, порожден волной, распространяющейся по сосудистому руслу в обратном (проксимальном) направлении.

Второй задачей, решаемой в данной главе, явился анализ динамики объемного кровотока по данным импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии в ответ на проведение нагрузочных проб.

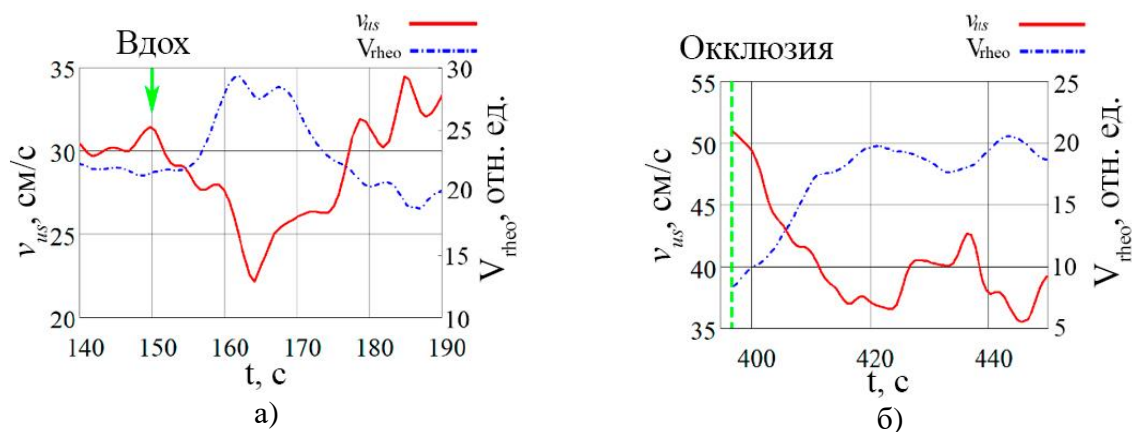


Рис. 13. Реакция гемодинамики на нагрузочные пробы: а – дыхательная проба, стрелка показывает момент глубокого вдоха, б – окклюзионная проба, вертикальная линия показывает момент снятия давления в манжете.

Для проверки модели взаимосвязи объема лучевой артерии и скорости кровотока вычисленные кривые V_{rtheo} и v_{us} подставлялись в выражение для объемной скорости кровотока (8). Результирующий график объемного кровотока $Q(t)$ (рис. 14), показывает незначительные отклонения значений объемного кровотока от среднего уровня (штриховая линия на рис. 14).

$$Q(t) = v(t) \cdot \frac{V(t)}{L} \quad (8)$$

где $Q(t)$ – объемный кровоток, $v(t)$ – линейная скорость кровотока, $V(t)$ – объем исследуемого участка сосуда, $L = const$ – длина исследуемого участка сосуда

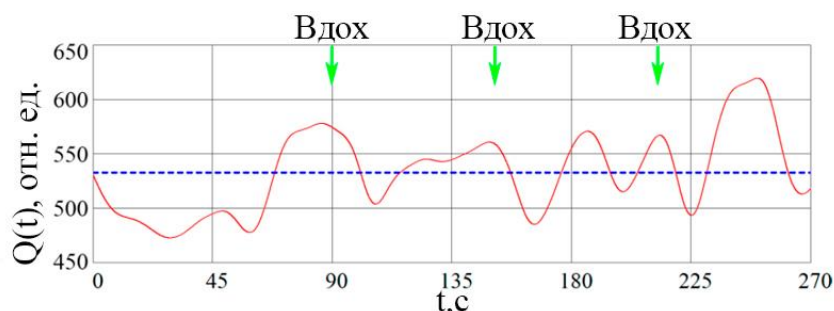


Рис. 14. График изменения объемной скорости кровотока, полученный из экспериментальных данных, стрелки показывают момент глубокого вдоха.

Анализ кривой объемного кровотока показывает малые отклонения величины Q от среднего значения, что, по всей видимости, является проявлением процесса авторегуляции периферического объемного кровотока.

В пятой главе изучается динамика гемодинамических показателей в ответ на гравитационную пробу в группе здоровых испытуемых и группе пациентов с диагнозом артериальная гипертензия в состояниях до и после температурного симпатоллиза, достигаемого путем нагрева конечности испытуемого в термостате с температурой воды $42\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве параметра для сравнения амплитудных изменений объема лучевой артерии была выбрана усредненная огибающая максимумов систолической волны на участках статичного положения руки. Рис. 15 демонстрирует наличие повышения амплитуды реографической волны при поднятии руки и уменьшение при опускании как в группе нормы, так и в группе пациентов. Анализ данных, полученных после достижения состояния температурного симпатоллиза (рис. 16), показывает повышенную реакцию на гравитационную пробу в группе нормы и ослабление реакции в группе пациентов.

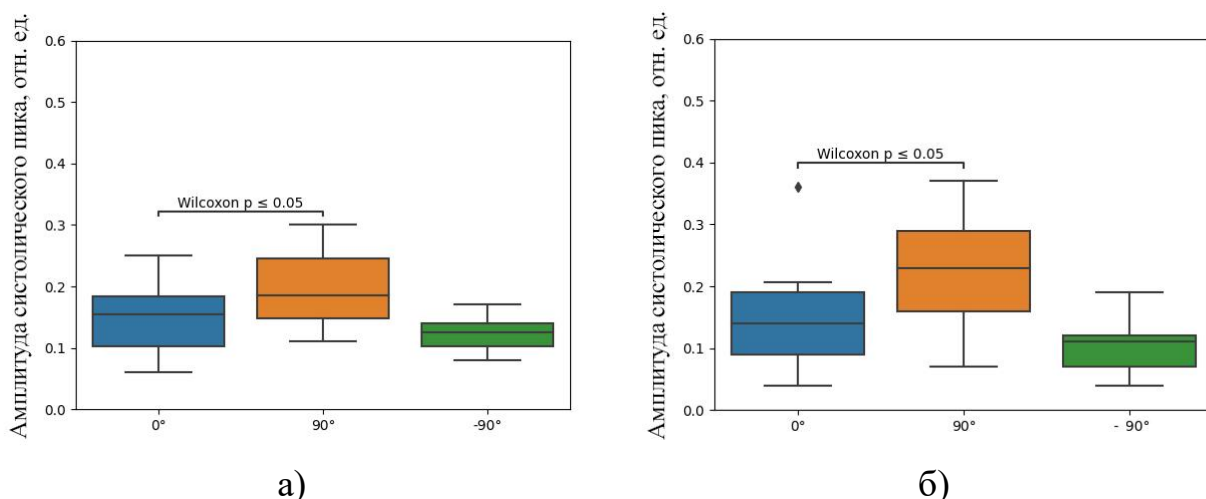


Рис. 15. Диаграмма размаха средней амплитуды систолической волны для трёх положений руки перед проведением тепловой пробы: а – группа нормы, б – группа пациентов с артериальной гипертонией.

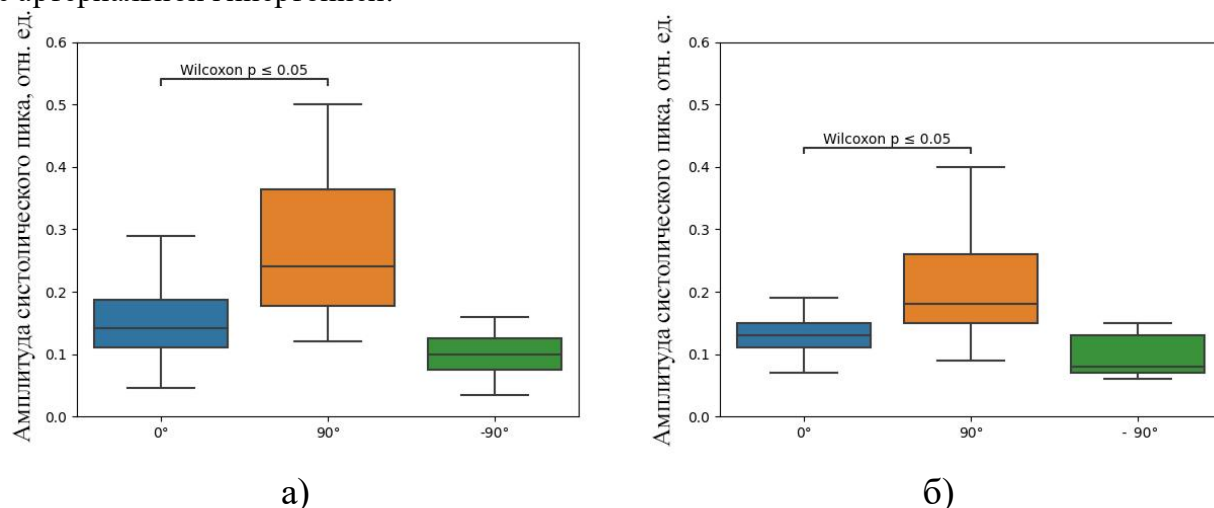


Рис. 16. Диаграмма размаха средней амплитуды систолической волны для трёх положений руки после проведения тепловой пробы: а – группа нормы, б – группа пациентов с артериальной гипертонией.

Таки образом, полученные данные показывают разницу в функционировании механизмов регуляции периферической гемодинамики у здоровых испытуемых и пациентов с АГ, находящихся на медикаментозной терапии. Установлено, что схожая реакция на гравитационную пробу в условиях физиологического покоя не отражает в полной мере состояние пациентов. Достижение состояния температурного симпатолитиза позволило оценить динамический диапазон регуляции периферической гемодинамики в норме и при АГ.

Основные результаты и выводы

1. Проведен критический анализ работ, посвящённых описанию современных методов исследования гемодинамики в микро- и макрососудах, в том числе с помощью методов импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии.
2. Разработан метод анализа средневзвешенной скорости кровотока на основе непрерывного измерения спектра скорости кровотока, измеренной методом ультразвуковой доплерографии, в состоянии физиологического покоя.
3. Проведена декомпозиция форм пульсовых волн, регистрируемых методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии. Установлено, что дополнительный пик объёма крови, возникающий в позднюю систолу, соответствует по времени возникновению отрицательному пику скорости кровотока в данном сосуде.

4. Разработан комплекс низкоинтенсивных функциональных нагрузочных проб, позволяющий провести оценку механизмов регуляции кровотока в области лучевой артерии и сосудов кисти. Показано, что вариабельность произведения огибающих систолических пиков скорости кровотока и объема сосуда сохраняет осциллирующий характер относительно среднего значения вне зависимости от проведения дыхательной и окклюзионной проб.
5. Проведен анализ длительных записей сигналов ультразвуковой доплерографии, импедансной реографии и инфракрасной термографии в состоянии покоя, с целью установления взаимосвязей кровотока в макро- и микрососудах запястья и кистей здоровых испытуемых в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах регуляции тонуса сосудов. Установлена высокая корреляция колебаний скорости кровотока в лучевой артерии и колебаний объемного кровотока в области дистальных фаланг пальцев ($r=0.6\pm 0.1$) в частотном диапазоне эндотелиальной регуляции тонуса.
6. Разработан способ выявления нарушений регуляции тонуса периферических сосудов в группе пациентов с диагнозом артериальная гипертония, основанный на подавлении симпатического тонуса за счет теплового воздействия и наблюдения реакции сосудов на изменение условий гравитационного воздействия.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

- **Статьи в российских и зарубежных рецензируемых научных изданиях, индексируемых реферативными базами данных Web of Science и/или Scopus:**
 А1. *Sagaidachnyi A.A., Mayskov D.I., Fomin A.V., Zaletov I.S., Skripal A.V.* Separate extraction of human eccrine sweat gland activity and peripheral hemodynamics from high- and low-quality thermal imaging data // *Journal of Thermal Biology*. Vol.110, 2022. 103351. (Scopus) <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103351>
- **Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК и отнесенных к категориям К-1 или К-2, либо индексируемых базой данных RSCI:**
 А2. **Залетов И. С., Сагайдачный А. А., Скрипаль А. В., Клочков В.А., Майсков Д.И., Фомин А.В.** Взаимосвязь формы пульсовой волны в периферических артериях, регистрируемой методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2023. Т. 23, вып. 1 С. 24-36. (RSCI) DOI: 10.18500/1817-3020-2023-23-1-24-36
 А3. *Сагайдачный А.А., Майсков Д.И., Залетов И.С., Фомин А.В., Скрипаль А.В.* Детектирование активности единичных потовых желез методом макротермографии и ее взаимосвязь с температурой кожи и периферической гемодинамикой // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2020 Т. 20, вып. 2. С. 103-115. (RSCI) DOI: 10.18500/1817-3020-2020-20-2-1603-115
- **Патенты на изобретения и свидетельства о гос. регистрации программы для ЭВМ:**
 А4. Волков, И. Ю. Сагайдачный А. А., Майсков Д. И., **Залетов И.С.** Патент на полезную модель № 203214 У1 Российская Федерация, МПК А61В 5/01, А61В 5/026. Устройство регистрации колебаний объемного кровенаполнения: № 2020133083: заявл. 08.10.2020: опубл. 26.03.2021; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского". – EDN BQUXUZ.
 А5. **Залетов И. С., Фомин А. В., Сагайдачный А. А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680366 Российская Федерация. Программа построения карты распределения активных потовых пор на основе анализа инфракрасных термограмм: № 2021669782: заявл. 05.12.2021: опубл. 09.12.2021 /; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». – EDN ATJJLY.
 А6. Майсков Д. И., Фомин А. В., **Залетов И. С.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681103 Российская Федерация. Программа для построения карты

распределения теплофизических свойств кожи на основе анализа инфракрасных термограмм: № 2021669774: заявл. 05.12.2021: опублик. 17.12.2021 /; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». – EDN NNIDFX.

Публикации в других изданиях

А7. **Залетов И. С.**, Сагайдачный А. А., Майсков Д. И. Анализ взаимосвязи колебаний тонуса макро- и микрососудов методами ультразвуковой доплерографии и инфракрасной термографии // Микроциркуляция и гемореология: материалы XIV международной научной конференции по микроциркуляции и гемореологии, Ярославль, 10–11 июля 2023 года. – Ярославль: Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, 2023. – С. 33. – EDN NUNCSE.

А8. Сагайдачный А. А., Майсков, Д. И. Фомин А. В., **Залетов И.С.** Визуализация симпатической активации тонуса сосудов и потовых желез методом инфракрасной термографии // Микроциркуляция и гемореология: материалы XIV международной научной конференции по микроциркуляции и гемореологии, Ярославль, 10–11 июля 2023 года. – Ярославль: Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, 2023. – С. 89. – EDN MSVUMC.

А9. **Залетов И.С.**, Майсков Д. И., Фомин А. В., Сагайдачный А.А., Скрипаль А.В. Корреляция низкочастотных ритмов колебаний кровотока в макро- и микрососудах // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Сборник статей десятой Всероссийской научной школы-семинара, Саратов, 25 мая 2023 года / Под редакцией Ал.В. Скрипаль. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2023. – С. 283-287. – EDN PRQZOW.

А10. Майсков Д.И., Фомин А.В., **Залетов И.С.**, Антонов А.В. Интегральное и корреляционное картирование инфракрасных термограмм // В сборнике: Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2022 Сборник статей Всероссийской школы-семинара. Саратов, 2022 С. 18-20.

А11. **Залетов И.С.**, Майсков Д.И., Сагайдачный А.А. Фомин А.В., Скрипаль А.В. Термографическая и реографическая оценка синхронности колебаний кровотока в контралатеральных областях конечностей // В сборнике «Оптические методы исследования потоков» Шестнадцатой Международной научно-технической конференции, Москва 28 июня- 02 июля 2021 г.

А12. Майсков Д.И., Фомин А.В., **Залетов И.С.**, Волков И.Ю., Скрипаль. А.В., Сагайдачный А.А. Интегральное картирование гемодинамических процессов и активности потовых желез методом динамической инфракрасной термографии // В сборнике «Оптические методы исследования потоков» Шестнадцатой Международной научно-технической конференции, Москва 28 июня- 02 июля 2021 г.

А13. **Залетов И.С.**, Клочков В.А., Сагайдачный А.А., Скрипаль А.В., Фомин А.В. Импедансная реография периферических артерий высокой степени локализации при воздействии гравитационной пробы // В сборнике: Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2021 Сборник статей Всероссийской школы-семинара. Саратов, 2021 С. 27-30.

А14. **Залетов И.С.**, Майсков Д.И., Жабская В.И., Сагайдачный А.А., Скрипаль А.В. Исследование регуляции тонуса периферических кровеносных сосудов методом двухмерной термовизуализации // Влияние активности потовых желез и периферической гемодинамики на температурный ответ кожи человека при проведении дыхательной пробы // В сборнике VII Всероссийской с международным участием школы-конференции «Физиология и патология кровообращения» - 2020, ООО "РА ИЛЬФ" (Москва), С. 80-81

А15. Майсков Д. И., **Залетов И. С.**, Фомин А. В. Интегральное картирование активности потовых желез методом термографии / Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2020: Сборник статей Всероссийской школы-семинара, Саратов, 18–19 ноября 2020 года. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2020. – С. 56-60. – EDN XILVHQ.

A16. Залетов И.С., Майсков Д.И., Фомин А.В., Скрипаль А.В., Сагайдачный А.А. Термографическая оценка корреляции гемодинамики в контралатеральных конечностях // В сборнике: Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2020 Сборник статей Всероссийской школы- семинара. Саратов, 2020 С. 60-64.

A17. Залетов И. С., Сагайдачный А. А., Майсков Д. И., Скрипаль А. В. Термографический анализ активности потовых каналов и перспективы его использования для диагностики диабетической полинейропатии / Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2019: Сборник статей Всероссийской школы-семинара, посвященной 110-летию Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, 14–15 ноября 2019 года / Под редакцией А.В. Скрипаля. – Саратов: Издательство "Саратовский источник", 2019. – С. 42-45. – EDN UEQPOK.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ, ЦИТИРУЕМЫХ В АВТОРЕФЕРАТЕ

1. Grinevich A., Tankanag A., Tikhonova I., Chemeris N. A new approach to the analysis of skin blood flow oscillations in human // *Microvascular Research*. – 2019. – Vol. 126. – P. 103889.
2. Zharkikh E. V., Loktionova Y. I., Fedorovich A. A., Gorshkov A. Y., Dunaev A. V. Assessment of blood microcirculation changes after COVID-19 using wearable laser Doppler flowmetry // *Diagnostics*. – 2023. – Vol. 13. – no. 5. – P. 920.
3. Karavaev A. S., Borovik A. S., Borovkova E. I., Orlova E. A., Simonyan M. A., Ponomarenko V. I., Skazkina V. V., Gridnev V. I., Bezruchko B.P., Prokhorov M.D., Kiselev A.R. Low-frequency component of photoplethysmogram reflect the autonomic control of blood pressure // *Biophysical Journal*. – 2021. – Vol. 120. – no. 13. – P. 2657-2664.
4. Allen J., Zheng D., Kyriacou P. A., Elgendi M. Photoplethysmography (PPG): state-of-the-art methods and applications // *Physiological Measurement*. – 2021. – Vol. 42 – no. 10. – P. 100301
5. Timoshina P. D., Bashkatov A. N., Alexandrov D. A., Kochubey V. I., Tuchin V. V. Laser speckle contrast imaging for monitoring of acute pancreatitis at ischemia–reperfusion injury of the pancreas in rats // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. – 2022. – Vol. 15. – no. 01. – P. 2242002.
6. Rodrigues F. B., Bertemes-Filho P. Bioelectrical impedance devices in clinical practice: a narrative review // *Academia Medicine*. – 2023. – Vol. 1. – P. 2-4.
7. Гуляев М. В., Ханов С. К., Наместникова Д. Д., Губский Л. В., Чжоу Ф., Пирогов Ю. А., Панченко В. Я. Магнитно-резонансная термометрия головного мозга крыс методом локальной ЯМР-спектроскопии // *Журнал радиоэлектроники*. – 2013. – № 10. – С. 9-9.
8. Волков А. А., Никифоров В. Н., Прохоров А. С., Иванов А. В., Пирогов Ю. А. Магнитно-резонансные методы регистрации температурных полей в применении к гипертермии // *Медицинская физика*. – 2012. – № 2. – С. 65-70.
9. Sagaidachnyi A. A., Fomin A. V., Usanov D. A., Skripal A. V. Thermography-based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: a spectral filtering approach // *Physiological measurement*. – 2017. – Vol. 38. – no. 2. – P. 272.
10. Goddi A., Fanizza M., Bortolotto C., Raciti M.V., Fiorina I., He X., Du Y., Calliada F. Vector flow imaging techniques: An innovative ultrasonographic technique for the study of blood flow: innovative technique for blood flow imaging // *Journal of Clinical Ultrasound*. – 2017. – Vol. 45. – no. 9. – P. 582-588.
11. Rocha M. P., Mentetzides S. H., Drew R. C. Renal blood flow during exercise: understanding its measurement with Doppler ultrasound // *Journal of Applied Physiology*. – 2023. – Vol. 134. – no. 4. – P. 1004-1010.
12. Kenny J. E. S., Prager R., Rola P., McCulloch G., Eibl J. K., Haycock K. The effect of gravity-induced preload change on the venous excess ultrasound (VExUS) score and internal jugular vein Doppler in healthy volunteers // *Intensive Care Medicine Experimental* – 2023. – Vol. 11. – no. 1. – P. 1-12.
13. Luo J., Li R. X., Konofagou E. E. Pulse Wave Imaging of the Human Carotid Artery: An In Vivo Feasibility Study // *Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. – 2012. – Vol. 59 – no. 1. – P. 174-181.
14. Al-Harosh M., Chernikov E., Shchukin S. Patient Specific Numerical Modeling for Renal Blood Monitoring Using Electrical Bio-Impedance // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22 – no. 2. – P. 606.
15. Shash Y. H., Eldosoky M. A., Elwakad M. T. The effect of vascular diseases on bioimpedance measurements: mathematical modeling // *Biomedical Research and Therapy*. – 2018. – Vol. 5. – no.6. – P. 2414-2431.
16. Din Z. M. U., Hyun K. J., Chowdhry B. S., Cho J. H. Electrical Impedance Plethysmography based Telemetry System used to detect the Pulse Rate from the Radial Artery // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2017. – Vol. 10 – P. 40.
17. Муха Н. В., Говорин А. В., Зайцев Д. Н., Филев А. П. Закономерности нарушения микроциркуляции и структурно-функциональные изменения левого желудочка у пациентов с сахарным диабетом 1 типа, осложненным кетоацидозом // *Российский кардиологический журнал*. – 2020. – № 11. – С. 51-58.
18. Glazkova P. A., Kulikov D. A., Glazkov A. A., Terpigorev S. A., Rogatkin D. A., Shekhyan G. G., Paleev F. N. Reactivity of skin microcirculation as a biomarker of cardiovascular events. Pilot study // *Clinical Hemorheology and Microcirculation*. – 2021. – Vol. 78. – no. 3. – P. 247-257.

19. Campia U., Gerhard-Herman M., Piazza G., Goldhaber S. Z. Peripheral artery disease: past, present, and future //The American journal of medicine. – 2019. – Vol. 132 – no. 10. – P. 1133-1141.
20. Lowe G. D. O. Nature and clinical importance of blood rheology // Clinical blood rheology. – CRC Press, 2019. – P. 1-10.
21. Подтаев С. Ю., Попов А. В., Морозов М. К., Фрик П. Г. Исследование микроциркуляции крови с помощью вейвлет-анализа колебаний температуры кожи // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2009. – Т. 8. – № 3. – С. 14- 20.
22. Зубарева Н. А., Подтаев С. Ю., Паршаков А. А. Диагностика нарушений вазодилатации микрососудов кожи у больных с синдромом диабетической стопы при проведении локальной тепловой пробы //Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2015. – Т. 14. – №. 3. – С. 27-33.
23. Танканаг А. В. Методы вейвлет-анализа в комплексном подходе к исследованию кожной микрогемодинамики как единицы сердечно-сосудистой системы //Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17. – №. 3. – С. 33-41.
24. Booth III J.N., Muntner P., Diaz K. M., Viera A. J., Bello N. A., Shchwartz J.E., Shimbo D. Evaluation of criteria to detect masked hypertension // The Journal of Clinical Hypertension. –2016. – Vol.18. – no. 11. – P. 1086-1094.
25. Siven S.S., Niiranen T.J., Kantola I.M., Jula A.M. White-coat and masked hypertension as risk factors for progression to sustained hypertension: the Finn-Home study // Journal of hypertension. – 2016. – Vol. 34 – no. 1. – P. 54-60.
26. Гельцер Б.И., Котельников В.Н., Ветрова О.О., Карпов Р.С., Маскированная артериальная гипертензия: распространенность, патофизиологические детерминанты и клиническое значение // Российский кардиологический журнал. – 2019. – № 9. – С. 92-98.
27. Колесниченко В.И., Шарифулин А.Н. Введение в механику несжимаемой жидкости. - Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2019. - 60 с.
28. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. - Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. - 400 с.
29. Залетов И.С., Сагайдачный А.А., Скрипаль А.В., Клочков В.А., Майсков Д.И., Фомин А.В. Взаимосвязь формы пульсовой волны в периферических артериях, регистрируемой методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 24-36.

Залетов Иван Сергеевич

ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ГЕМОДИНАМИКИ МЕТОДАМИ ИМПЕДАНСНОЙ РЕОГРАФИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДОПЛЕРОГРАФИИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____._____._____. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. ____

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Типография _____
