

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСУДИСТОЙ РЕАКЦИИ НА ОККЛЮЗИОННУЮ
ПРОБУ МЕТОДОМ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4021 группы института физики
направления 03.03.02 «Физика» (профиль «Компьютерные технологии в
медицинской физике»)

Перетягиной Анны Сергеевны

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание



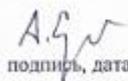
подпись, дата

16.06.25

А.А. Сагайдачный
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. звание



подпись, дата

16.06.25

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2025г.

Введение

В современной медицине оценка функционального состояния периферической сосудистой системы представляет собой важнейший диагностический инструмент, позволяющий выявлять ранние признаки нарушений микроциркуляции и предотвращать развитие серьезных сердечно-сосудистых заболеваний. В условиях роста распространенности патологий, связанных с дисфункцией эндотелия и нарушениями регуляции кровотока, актуальность неинвазивных методов диагностики возрастает. Эти методы позволяют получать объективные данные о состоянии эндотелиальной функции, вазомоторном тоне и механизмах регуляции кровообращения, что особенно важно для ранней диагностики и своевременной коррекции патологических процессов.

Перспективным подходом является использование низкочастотной фотоплетизмографии (НЧ-ФПГ), которая позволяет регистрировать медленные колебания объема крови в микроциркуляторном русле, связанные с активностью автономной нервной системы и эндотелиальной регуляцией.

Одной из стандартных функциональных проб для оценки сосудистой реактивности является окклюзионная проба — временная остановка кровотока с последующим восстановлением, что вызывает характерные изменения в системе микрогемодициркуляции. Анализ этих изменений с помощью НЧ-ФПГ открывает возможности для более глубокого понимания механизмов регуляции кровотока и выявления патологических состояний на ранних стадиях. [1]

Целью настоящей дипломной работы является установление взаимосвязи между показателями низкочастотной фотоплетизмографии и состоянием микроциркуляторного русла при проведении окклюзионной пробы.

Для достижения поставленной цели в рамках работы были сформулированы следующие задачи:

Задачи дипломной работы:

1. Анализ теоретических данных в рамках исследуемой темы;
2. Разработка протоколов окклюзионных проб
3. Проведение измерений ФПГ-сигналов
4. Цифровая обработка ФПГ-сигналов
5. Анализ АС- и DC-компонент при различных протоколах окклюзии
6. Определение диагностических маркеров сосудистых нарушений
7. Оценка диагностической значимости метода

Актуальность работы обусловлена тем, что применение низкочастотной фотоплетизмографии для оценки сосудистой реакции на окклюзионную пробу остаётся малоизученным направлением. Несмотря на широкое использование ФПГ в диагностике состояния периферического кровообращения, её потенциал для анализа сосудистой реактивности в условиях ишемии недостаточно раскрыт. Между тем именно раннее выявление дисфункции эндотелия имеет ключевое значение для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний, так как эндотелиальная дисфункция рассматривается как один из первых маркеров их развития.

Оценка фотоплетизмографических данных в ответ на окклюзионное воздействие позволяет зафиксировать начальные отклонения в регуляции сосудистого тонуса и кровотока. Это делает метод перспективным неинвазивным инструментом для раннего выявления нарушений микроциркуляции и оценки функционального состояния сосудистой стенки в клинической практике.

Основное содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность исследования, сформулирована цель и определены задачи.

В *первой главе* рассматриваются физиологические основы объемного кровенаполнения и его динамики.

В *разделе один первой главы* рассматриваются механизмы регуляции кровенаполнения периферических сосудов.

Кровоснабжение тканей осуществляется системой сосудов, где движение крови определяется давлением, сопротивлением сосудов и свойствами самой крови. Давление, создаваемое сердцем при сокращении, формирует пульсовую волну, которая движется по артериям, постепенно снижаясь от крупных сосудов к мелким артериолам и капиллярам. Этот градиент давления обеспечивает направленный кровоток от артериальной к венозной части.

Сопротивление кровотоку в значительной мере определяется артериолами — мелкими сосудами с мышечным слоем, способными сужаться и расширяться. Малейшие изменения их диаметра приводят к значительным колебаниям объёма крови, поступающей в ткани, что регулирует распределение кровотока в зависимости от потребностей организма. Связь давления и сопротивления особенно важна при патологических состояниях, например, гипертонии, когда сужение сосудов увеличивает нагрузку на сердце.

Венозная система отличается высокой растяжимостью и служит резервуаром, содержащим большую часть циркулирующей крови. Возврат крови к сердцу зависит от тонуса вен, работы клапанов и мышечно-дыхательных насосов.

Важной характеристикой крови является её вязкость, которая влияет на гемодинамику. При низкой скорости кровотока и в мелких сосудах вязкость увеличивается из-за агрегации клеток крови, что может затруднять

кровообращение и снижать доставку кислорода к тканям. При увеличении скорости вязкость уменьшается, улучшая кровоток.

Капиллярное русло — место обмена газами и питательными веществами, где давление зависит от артериального притока, венозного оттока и сопротивления сосудов. Нарушение баланса гидростатического и онкотического давления приводит к выходу жидкости в ткани, вызывая отёки. Тонус мелких сосудов влияет на капиллярное давление и обменные процессы.

Строение сосудистой сети варьируется в разных органах. В тканях с высоким метаболизмом (мозг, сердце, почки) капиллярная сеть более развита и снабжена механизмами авторегуляции, поддерживающими стабильный кровоток.

Гемодинамика периферических тканей — это сложное взаимодействие давления, сопротивления, вязкости крови и сосудистого тонуса, обеспечивающее адекватное кровоснабжение. Нарушения любого из этих факторов отражаются на состоянии органов и играют важную роль при анализе данных фотоплетизмографии, которая отображает динамику объёмного кровенаполнения.

Во *втором разделе первой главы* рассматриваются механизмы регуляции сосудистого тонуса и объёма крови.

Поддержание стабильного сосудистого тонуса и объёма циркулирующей крови важно для адекватной перфузии тканей. Это обеспечивается сложной системой регуляции, включающей нейрогенные, гуморальные и местные механизмы.

Нейрогенная регуляция в основном осуществляется симпатической нервной системой, которая через выброс норадреналина вызывает сокращение гладкомышечных клеток сосудов, увеличивая сосудистое сопротивление и давление, а также стимулирует веноконстрикцию, повышая венозный возврат к сердцу. Парасимпатическая активность выражена слабее и способствует вазодилатации, особенно в сосудах пищеварения, через выработку оксида азота (NO).

Гуморальные механизмы представлены, в частности, ренин-ангиотензин-альдостероновой системой. Ангиотензин II вызывает вазоконстрикцию и стимулирует задержку натрия и воды, что увеличивает объём крови и поддерживает давление.

Эндотелий сосудов играет ключевую роль, продуцируя вазоактивные вещества, особенно NO, который расслабляет сосуды и снижает сопротивление. Местные механизмы — миогенная реакция на растяжение сосудистой стенки и метаболическая регуляция, основанная на накоплении метаболитов и снижении кислорода — обеспечивают точное соответствие кровотока потребностям ткани.

Барорецепторы и хеморецепторы участвуют в рефлекторной регуляции сосудистого тонуса при изменениях давления и газового состава крови, активируя симпатическую систему при падении давления.

В целом, эта система обеспечивает поддержание давления, тканевую перфузию и адаптацию к нагрузкам. Нарушения её работы лежат в основе многих сердечно-сосудистых заболеваний.

Во *второй главе* излагается об окклюзионной пробе как инструменте сосудистой диагностики.

В *первом разделе второй главы* рассказывается о роли окклюзионной пробы в медицинской диагностике.

Окклюзионная проба используется для провокации поток-зависимой дилатации и реактивной гиперемии, что помогает оценить функцию сосудов. Использование окклюзионной пробы в качестве диагностической процедуры может быть описано следующей схемой:



Рисунок 1 – Схема применения окклюзионной пробы в качестве диагностической процедуры

Преимущество метода — доступность и простота, однако точность зависит от соблюдения протокола, включая контроль времени перекрытия сосуда и давления манжеты.

Тест включает три этапа: предокклюзионную фазу с измерением исходных показателей кровотока и температуры кожи, фазу окклюзии с уменьшением притока крови, и постокклюзионную фазу, когда кровоток восстанавливается и часто превышает исходный уровень. Последняя фаза важна для оценки эндотелиальной функции.

Для анализа применяются разные методы — УЗИ, лазерная доплеровская флоуметрия, фотоплетизмография, артериальная тонометрия и термография, каждый из которых имеет свои особенности.

Реакция на окклюзию наблюдается не только в месте пережатия, но и в других частях тела, что свидетельствует о системном характере сосудистой реакции. Также проба влияет на состояние кожи, открывая перспективы применения в дерматологии и неврологии.

Повторные пробы позволяют оценить стабильность и воспроизводимость сосудистых реакций на временное прекращение кровотока и его восстановление.

Во *втором и третьем разделе второй главы* излагается о диагностическом применении артериальной и венозной окклюзионных проб.

Артериальная окклюзионная проба — неинвазивный метод оценки реактивности сосудистой стенки на кратковременную ишемию. В основе лежит способность артерий расширяться в ответ на усиление кровотока после временного прекращения перфузии, что называется потокозависимой вазодилатацией. Эта реакция отражает состояние эндотелия.

Манжету накладывают на плечо или предплечье и нагнетают давление выше систолического на 30 мм рт. ст., создавая ишемию 4,5–5 минут. После быстрого стравливания манжеты начинается реактивная гиперемия — резкий рост кровотока и сдвиговое напряжение на сосуды, стимулирующее продукцию оксида азота (NO), который вызывает расслабление гладких мышц и расширение артерий.

Максимальная дилатация достигается через 45–90 секунд после снятия окклюзии, при этом сосудистая реакция проходит несколько фаз — пассивное растяжение, миогенный ответ и собственно потокозависимая вазодилатация с доминированием NO. Для верхних конечностей регистрация занимает около 3 минут, для нижних — не менее 5 из-за замедленной реакции.

Основной показатель — процентное изменение диаметра сосуда относительно базового уровня. При этом важно учитывать вариабельность реакции между пациентами и необходимость нормализации по сдвиговому напряжению для более точной оценки.

Снижение потокозависимой вазодилатации свидетельствует об эндотелиальной дисфункции и повышенном риске сердечно-сосудистых заболеваний. Метод широко применяется для мониторинга эффективности лечения и изучения факторов, влияющих на сосудистую функцию.

Венозная окклюзионная проба оценивает скорость артериального притока при временной блокировке венозного оттока. Пациент лежит в спокойствии, рука фиксируется выше уровня сердца, создавая условия для естественного венозного дренажа между циклами.

Манжета на плече нагнетается до давления, перекрывающего вены, но не артерии, что приводит к накоплению крови и расширению капилляров и

венул. Изменение объёма тканей, пропорциональное кровотоку, регистрируется разными методами, включая фотоплетизмографию и тензодатчики.

Метод позволяет измерять «чистую» гемодинамическую реакцию без влияния венозного возврата и барорефлексов, обеспечивая объективную оценку локального кровотока. Модификации пробы с длительной ишемией и последующим снятием давления позволяют оценить сосудистый резерв и эндотелиальную функцию.

Применение метода включает изучение микроциркуляторных нарушений при гипертензии, диабетической ангиопатии и вегетативных дисфункциях. Для точности необходим контроль температуры, фиксация манжеты и неподвижность пациента.

Венозная окклюзионная проба — простой, информативный и воспроизводимый метод, широко используемый в клинической практике и научных исследованиях для оценки локальных сосудистых реакций.

В *третьей главе* описан метод фотоплетизмографии, в частности – для контроля окклюзионной пробы.

В *первом и втором разделе третьей главы* описывается принцип действия фотоплетизмографии и обработка ФПГ-сигнала.

Фотоплетизмография (ФПГ) — неинвазивный метод регистрации колебаний объёма крови в периферических сосудах. Основан на оптическом измерении: свет проходит через ткани, отражается или рассеивается, и фиксируется фотодатчиком. Получаемый сигнал содержит две основные компоненты: переменную (АС), связанную с пульсовыми изменениями артериального объёма, и постоянную (DC), отражающую состояние венозной и капиллярной сетей, а также бескровных тканей.

Первоначально ФПГ применялась для мониторинга частоты пульса и насыщения кислородом, однако сегодня активно используется для оценки состояния сердечно-сосудистой и вегетативной систем. Распространение

носимых устройств стимулировало развитие новых алгоритмов обработки ФПГ-сигналов, особенно для устранения артефактов движения.

Различают два режима измерения: пропускания (датчик просвечивает ткани, например, палец или ухо) и отражения (датчики располагаются рядом и фиксируют отражённый свет с участков вроде запястья или лба) (Рисунок 2). Первый даёт более чистый сигнал, второй — более универсален.

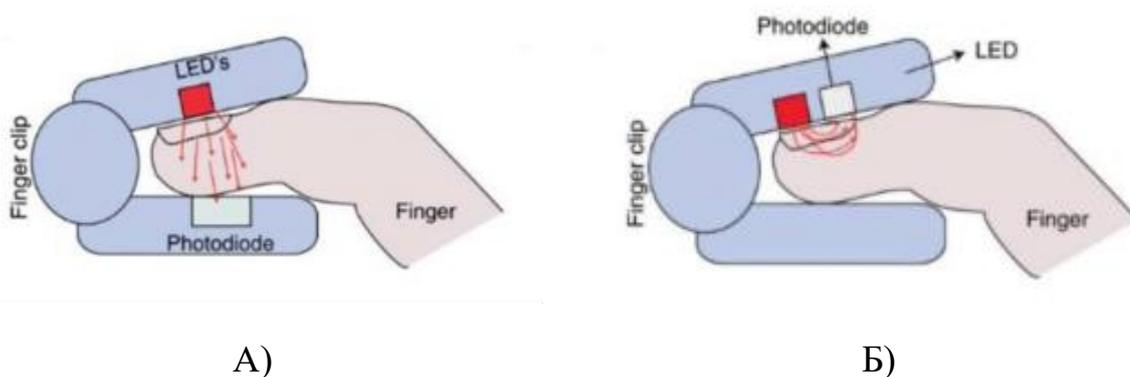


Рисунок 2 – Контактная фотоплетизмография в режиме
А) пропускания; Б) отражения

ФПГ-сигнал чувствителен к шумам и физиологическим изменениям, поэтому требует комплексной обработки. На этапе предобработки выполняется фильтрация высоко- и низкочастотных помех, коррекция дрейфа базовой линии и нормализация сигнала. Затем проводится сегментация — разделение сигнала на отдельные пульсовые циклы.

Извлекаемые характеристики включают частоту сердечных сокращений, амплитуду и форму пульсовой волны, индекс ригидности артерий и другие параметры, позволяющие судить о тоне сосудов и функциональном состоянии системы кровообращения.

Заключительным этапом является анализ и классификация, в том числе с использованием алгоритмов машинного обучения для диагностики и оценки рисков сердечно-сосудистых нарушений.

Также применяется синтез ФПГ-сигналов — создание искусственных пульсовых кривых для обучения и тестирования алгоритмов. Используются

два подхода: физиологический (с моделированием сердечно-сосудистой динамики, как в модели Виндкесселя) и статистический (на основе эмпирических данных, например, с помощью суммы гауссовских функций). Это позволяет моделировать как нормальные, так и патологические состояния.

В *третьем разделе третьей главы* рассматриваются компоненты ФПГ-сигнала.

Центральными составляющими ФПГ-сигнала являются переменная (АС) и постоянная (DC) компоненты, каждая из которых несёт специфическую физиологическую информацию.

DC-компонента отражает медленно меняющийся уровень кровенаполнения тканей и зависит от таких факторов, как пигментация кожи, толщина эпидермиса и плотность капилляров. Хотя она не связана напрямую с сердечным циклом, её колебания могут указывать на изменения сосудистого тонуса, терморегуляцию, стресс и другие долгосрочные физиологические процессы.

АС-компонента, напротив, представляет собой пульсовые колебания, синхронные с сердечными сокращениями, и используется для анализа эластичности сосудов, вариабельности ритма и функциональных проб. Её амплитуда и форма отражают состояние артериального русла, особенно в поверхностных артериолах кожи.

Отношение АС к DC-компоненте — важный показатель, используемый для нормализации сигнала и повышения достоверности анализа, в частности при расчёте насыщения крови кислородом (SpO_2).

Выделение этих компонентов осуществляется цифровой фильтрацией: DC — через сглаживание и низкочастотные фильтры, АС — полосовой фильтрацией в диапазоне 0,5–5 Гц. Качественная фильтрация необходима для устранения артефактов и сохранения формы сигнала.

В диагностике окклюзионных проб поведение АС-компоненты особенно информативно: её снижение указывает на артериальную окклюзию,

а увеличение — на венозную. DC-компонента при этом может отражать восстановление кровотока и сосудистую реактивность.

В четвертом разделе третьей главы описаны перспективы применения ФПГ в функциональной диагностике на примере обзорной статьи.

В рамках поиска альтернатив ультразвуковой оценке опосредованной потоком дилатации в работе [24] рассматривается возможность применения фотоплетизмографии (ФПГ) совместно с ЭКГ. Методика основана на регистрации пульсовой волны ФПГ, синхронизированной с ЭКГ, и позволяет количественно оценивать сосудистые реакции.

В исследовании с участием 20 здоровых добровольцев использовались одновременные записи УЗИ, ФПГ с двух пальцев и ЭКГ. Применялся автоматизированный компрессионный механизм, что обеспечивало стандартизированные условия окклюзионной пробы.

Авторы предложили ряд новых ФПГ-индикаторов: индекс амплитудных изменений (AC Index), перфузионный индекс (Prf Index) и индекс времени пульсовой волны (PWT Index), основанный на временном интервале между R-зубцом ЭКГ и началом фронта ФПГ. Наибольшую корреляцию с УЗИ-показателями продемонстрировал модифицированный Prf Index ($R = 0.77$, $p < 0.00001$), что подтверждает высокую чувствительность подхода. Даже без синхронизации с ЭКГ результаты оставались значимыми ($R = 0.72$).

Дополнительно выявлено снижение корреляции между ФПГ-сигналами с разных пальцев после окклюзии, что указывает на локальные особенности сосудистой реакции. Также установлено, что инфракрасный спектр даёт более стабильный сигнал по сравнению с красным, подчёркивая важность выбора длины волны.

Метод оказался технически простым, доступным и менее подверженным артефактам, чем УЗИ. Его достоинства включают низкую стоимость, возможность автоматизации и меньшую зависимость от квалификации оператора.

В *четвертой главе* рассказывается об определении сосудистой реакции на окклюзионную пробу.

В *первом разделе четвертой главы* подробно описана суть эксперимента.

В эксперименте для регистрации физиологических показателей использовался отражательный фотоплетизмограф, фиксирующий изменения объема крови в микрососудах по уровню отражённого инфракрасного излучения (рис. 3).

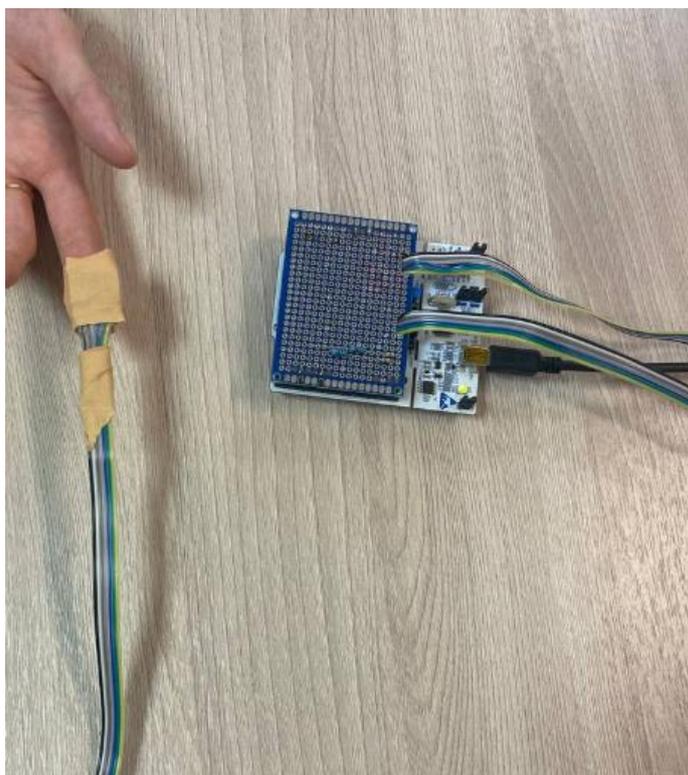


Рисунок 3 – Прибор для проведения эксперимента

В исследовании участвовали 6 испытуемых, для каждого из которых проводилась регистрация ФПГ-сигнала при выполнении четырёх протоколов окклюзионных проб:

- **Протокол 1:** 2 минуты покоя, затем 2-минутная венозная окклюзия при давлении ~ 60 мм рт.ст., и 2-минутный восстановительный период (всего 6 минут);

- **Протокол 2:** 3 минуты покоя, 3-минутная артериальная окклюзия (~160 мм рт.ст., выше систолического давления), затем 3 минуты восстановления (всего 9 минут);
- **Протокол 3:** после 3 минут покоя — 2-минутная венозная и 2-минутная артериальная окклюзии подряд, без интервала, и 3 минуты восстановления (всего 10 минут);
- **Протокол 4:** 3 минуты покоя, затем артериальная и венозная окклюзии по 2 минуты подряд, с последующим 3-минутным восстановлением (всего 10 минут).

Перед началом записи участники адаптировались к условиям лаборатории (10–15 минут) при температуре 24 °С. Измерения проводились в положении сидя, с левой рукой на столе. Датчик устанавливался на дистальную фалангу указательного пальца (рис. 4). Продолжительность непрерывной регистрации сигнала составляла 6–10 минут.

Обработка данных выполнялась в программах MathCad 14 и TBF Converter 1.6.



Рисунок 4 – Проведение эксперимента:
запись ФПГ сигнала

Во *втором разделе четвертой главы* приведен анализ данных эксперимента.

Полученные в ходе эксперимента ФПГ-сигналы подвергались последующей цифровой обработке. Каждый сигнал был разделен на две компоненты:

DC-компонента: является сглаженной версией исходного ФПГ-сигнала (сглаживание производилось при помощи встроенной функции `ksmooth`). Она характеризует базовое кровенаполнение. Учитывает не пульсирующие компоненты.

AC-компонента: является разностью начального ФПГ-сигнала и DC-компоненты. Она отражает пульсационные изменения объема крови в тканях, обусловленные сердечным циклом.

Данные компоненты были выведены на графики.

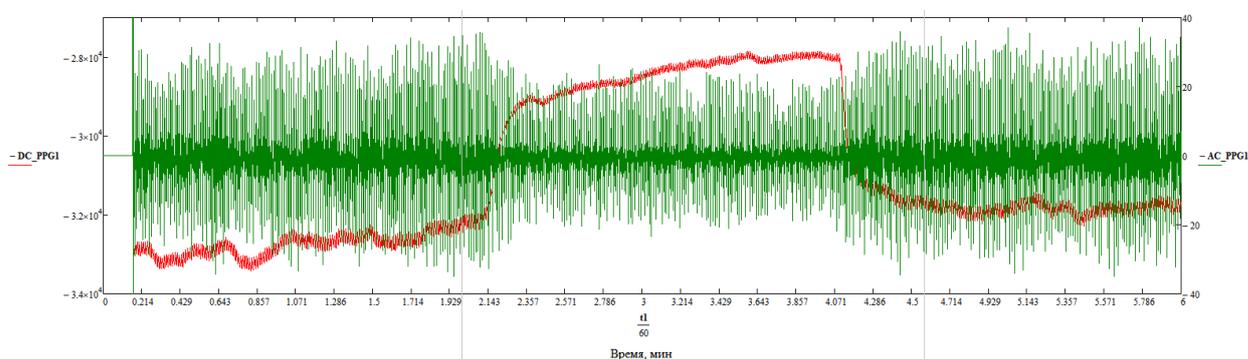
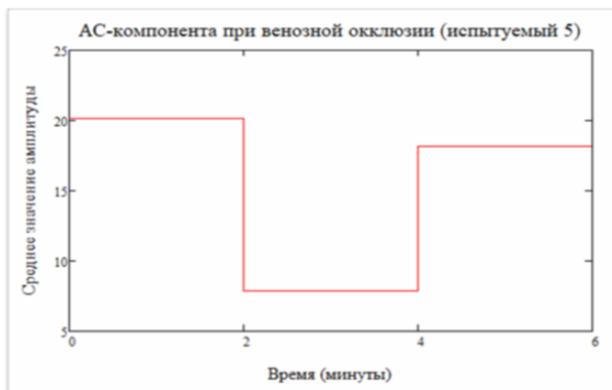


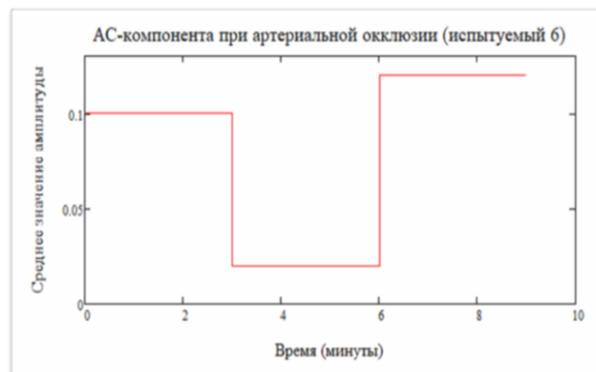
Рисунок 5 – Пример ФПГ-сигнала, разделенного на AC и DC компоненты

После чего при помощи программы TBF Converter 1.6 были построены огибающие сигнала для каждой компоненты и каждого протокола.

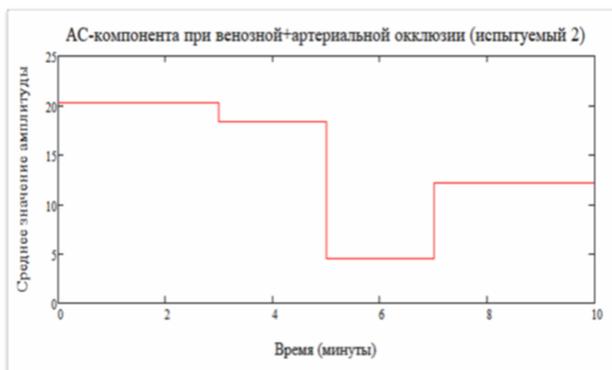
По этим данным было вычислено среднее значение амплитуды для участка покоя, участков венозной и артериальной окклюзии, участка восстановления и отображено графически. (Рисунок 6, 7)



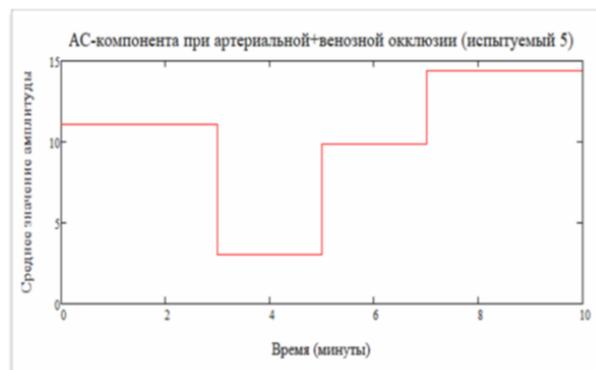
А)



Б)

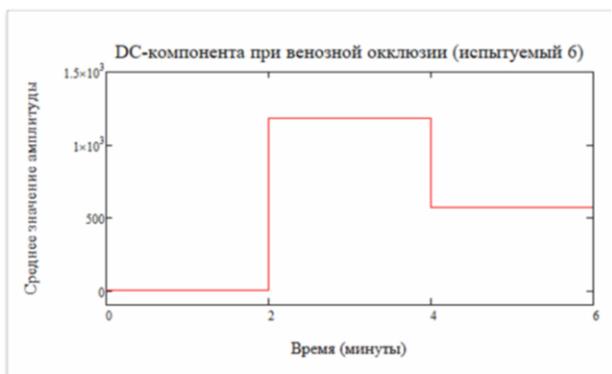


В)

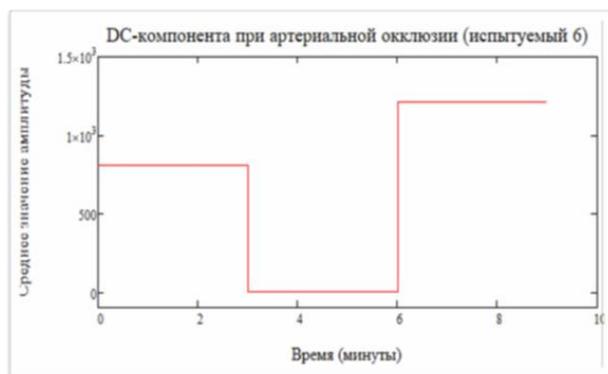


Г)

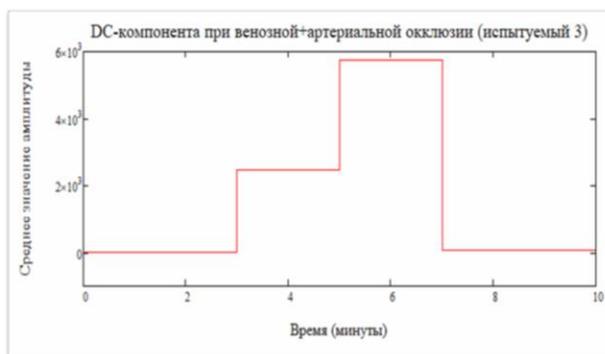
Рисунок 6 – Типичная зависимость среднего значения амплитуды для AC-компоненты: А) при венозной окклюзии. Б) при артериальной окклюзии. В) при венозной, а после артериальной окклюзии. Г) при артериальной, а после венозной окклюзии



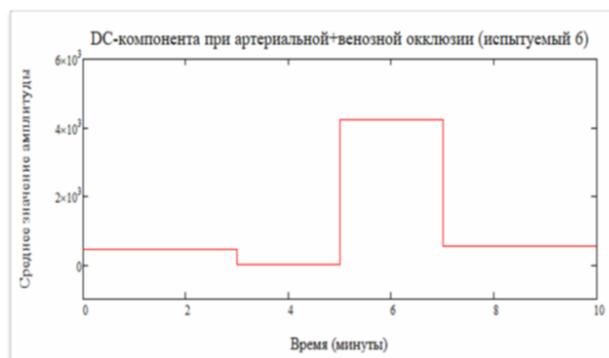
А)



Б)



В)



Г)

Рисунок 7 – Зависимость среднего значения амплитуды для DC-компоненты: А) при венозной окклюзии. Б) при артериальной окклюзии. В) при венозной, а после артериальной окклюзии. Г) при артериальной, а после венозной окклюзии

На основе анализа полученных данных были выявлены закономерности изменения амплитуд АС- и DC-компонент ФПГ-сигнала при различных протоколах окклюзии.

АС-компонента: При венозной окклюзии наблюдается снижение амплитуды, которая после снятия воздействия остаётся немного ниже исходной. Артериальная окклюзия также вызывает падение амплитуды, с частичным восстановлением после снятия, но без достижения начального уровня. При последовательной венозной и артериальной окклюзии амплитуда снижается ещё сильнее, оставаясь по окончании ниже базовой. В случае обратного порядка (артериальная → венозная) амплитуда сначала резко падает, затем увеличивается и возвращается к исходной после снятия манжеты.

DC-компонента: В ответ на венозную окклюзию амплитуда возрастает и после снятия немного превышает исходный уровень. Артериальная окклюзия вызывает выраженное падение амплитуды, с незначительным превышением базового уровня после снятия. При венозной, а затем артериальной окклюзии наблюдается поэтапный рост амплитуды, с возвращением к исходным значениям после завершения пробы. В обратной

последовательности амплитуда сначала падает, затем возрастает и также восстанавливается.

Эти реакции считаются нормальными и могут служить ориентиром при оценке сосудистого состояния. Отклонения, такие как слабое или замедленное восстановление амплитуды, могут свидетельствовать о нарушениях кровотока — например, при артериальной гипертензии, атеросклерозе или эндотелиальной дисфункции. Сниженная амплитуда АС-компоненты может указывать на нарушения микроциркуляции, характерные для диабетической ангиопатии или периферической артериальной болезни. Если DC-компонента не возрастает после снятия окклюзии, это может свидетельствовать о нарушении венозного оттока — например, при сердечной недостаточности или дисфункции венозных клапанов.

Таким образом, анализ АС- и DC-компонент ФПГ позволяет комплексно оценить функциональное состояние артериального и венозного звеньев микроциркуляции, что значительно расширяет диагностические возможности метода.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы была проведена комплексная оценка диагностических возможностей низкочастотной фотоплетизмографии при проведении окклюзионных проб. На основе анализа теоретических источников была сформирована научная база по физиологии микроциркуляции, принципам действия фотоплетизмографии и механизмам артериальной и венозной окклюзии. Разработанные протоколы окклюзионных проб позволили смоделировать контролируемые изменения сосудистой реакции, необходимые для функционального тестирования.

В рамках экспериментальной части были проведены измерения ФПГ-сигналов, полученных в ответ на различные окклюзионные вмешательства, с последующей цифровой обработкой данных. Особое внимание было уделено выделению и анализу АС- и DC-компонент сигнала. Установлено, что амплитудные изменения АС-компоненты коррелируют с состоянием пульсового кровотока и могут служить косвенным маркером эндотелиальной функции. В свою очередь, динамика DC-компоненты отражает общий объём кровенаполнения и обладает высокой чувствительностью к изменениям венозного оттока.

Проведённый анализ позволил выделить ряд диагностически значимых маркеров сосудистых нарушений, что демонстрирует потенциал для использования в ранней диагностике патологических состояний.

Таким образом, достигнута основная цель исследования — подтверждена диагностическая значимость метода низкочастотной фотоплетизмографии в сочетании с окклюзионными пробами. Полученные результаты обосновывают перспективность дальнейшего применения этого подхода в клинической практике и его потенциал для развития неинвазивной функциональной диагностики сосудистых нарушений.

Список используемой литературы

- [1] Simonyan, M. A., Posnenkova, O. M., Kiselev, A. R. Capabilities of photoplethysmography as a method for screening of cardiovascular system pathology / M. A. Simonyan, O. M. Posnenkova, A. R. Kiselev. – В. м. : В. и., 2020. – 1 ст.
- [2] Yu, J., Wang, L., Guo, H., Liao, B., King, G., Zhang, X. Genome evolutionary dynamics followed by diversifying selection explains the complexity of the *Sesamum indicum* genome / J. Yu, L. Wang, H. Guo [и др.]. – В. м. : В. и., 2017. – 1 ст. – DOI: 10.1186/s12864-017-3599-4. – PMID: 28340563; PMCID: PMC5364699.
- [3] Andreeva, I. V., Grigorev, A. S. Correlations and age-related changes in central and peripheral hemodynamic parameters / I. V. Andreeva, A. S. Grigorev. – В. м. : В. и., 2023. – 2 с. – DOI: 10.17816/dd430328.
- [4] Green, D. J., Hopman, M. T. E., Padilla, J., Laughlin, M. H., Thijssen, D. H. J. Vascular Adaptation to Exercise in Humans: Role of Hemodynamic Stimuli / D. J. Green, M. T. E. Hopman [и др.]. – В. м. : В. и., 2022. – 33 с. – DOI: 10.1152/physrev.00014.2021.
- [5] Joyner, M. J., Casey, D. P. Regulation of blood flow in exercising humans: From brain to the periphery / M. J. Joyner, D. P. Casey. – В. м. : В. и., 2023. – 26 с. – DOI: 10.1002/cphy.c210046.
- [6] Pathak, A., Aujayeb, A. Renin-Angiotensin-Aldosterone System and its Role in Vascular Homeostasis and Hypertension / A. Pathak, A. Aujayeb. – В. м. : В. и., 2021. – 10 с. – DOI: 10.1038/s41371-021-00561-1.
- [7] Horn, A. G., Schulze, K. M., Weber, R. E., Barstow, T. J., Musch, T. I., Poole, D. C., Behnke, B. J. Post-occlusive reactive hyperemia and skeletal muscle capillary hemodynamics / A. G. Horn, K. M. Schulze [и др.]. – В. м. : В. и., 2022. – 1 ст. – DOI: 10.1016/j.mvr.2021.104283.

- [8] Сагайдачный, А. А. Окклюзионная проба: биофизические механизмы реакции, методы анализа, перспективы применения / А. А. Сагайдачный, А. В. Скрипаль. – Саратов : Издательство "Саратовский источник", 2019. – 81 с. – ISBN 978-5-6043808-2-6. – EDN RGVMTU.
- [9] Двекар, В., ДеВос, Л., Сайко, Г., Дуплик, А. Влияние протокола теста функциональной окклюзии на оксигенацию мышц во время реактивной гиперемии / В. Двекар, Л. ДеВос [и др.]. – В. м. : Optica Publishing Group, 2024. – 1 с. – (LAOP 2024, статья W4A.12).
- [10] Gavelli, F., Shi, R., Teboul, J. L. The end-expiratory occlusion test for detecting preload responsiveness: a systematic review and meta-analysis / F. Gavelli, R. Shi [и др.]. – В. м. : В. и., 2020. – 1 ст. – DOI: 10.1186/s13613-020-00682-8.
- [11] Ивченко, А. О., Шведов, А. Н., Ивченко, О. А. Окклюзионные заболевания аорты и артерий нижних конечностей: учебное пособие / А. О. Ивченко, А. Н. Шведов, О. А. Ивченко. – Томск : Изд-во СибГМУ, 2017. – 105 с.
- [12] Lupinskaya, Z. A., Zarifyan, A. G., Gurovich, T. S., Shleifer, S. G. Эндотелий. Функция и дисфункция / З. А. Lupinskaya, А. Г. Zarifyan [и др.]. – Б. м. : КРСУ, 2008. – 373 с. – ISBN 978-9967-05-448-6.
- [13] Kresnajati, S., Lin, Y.-Y., Mündel, T., Bernard, J. R., Lin, H.-F., Liao, Y.-H. Changes in Arterial Stiffness in Response to Various Types of Exercise Modalities: A Narrative Review on Physiological and Endothelial Senescence Perspectives / S. Kresnajati, Y.-Y. Lin [и др.]. – В. м. : В. и., 2022. – 1 ст. – DOI: 10.3390/cells11223544.
- [14] Inoue, T., Matsuoka, H., Higashi, Y., Ueda, S., Sata, M., Shimada, K., Ishibashi, Y., Node, K. Flow-Mediated Vasodilation as a Diagnostic Modality for Vascular Failure / T. Inoue, H. Matsuoka [и др.]. – В. м. : В. и., 2021. – 9 с. – DOI: 10.1291/hypres.31.2105.
- [15] Kamshilin, A. A., Zaytsev, V. V., Mamontov, O. V. Novel contactless approach for assessment of venous occlusion plethysmography by video recordings at the

green illumination / A. A. Kamshilin, V. V. Zaytsev, O. V. Mamontov. – В. м. : В. и., 2017. – 1 ст. – DOI: 10.1038/s41598-017-00552-7. – PMID: 28352083; PMCID: PMC5428721.

[16] Raine, N. M., Sneddon, J. C. A simple water-filled plethysmograph for measurement of limb blood flow in humans / N. M. Raine, J. C. Sneddon. – В. м. : В. и., 2022. – 8 с.

[17] Волков, И. Ю., Сагайдачный, А. А., Фомин, А. В. Фотоплетизмографическая визуализация гемодинамики и двухмерная оксиметрия / И. Ю. Волков, А. А. Сагайдачный, А. В. Фомин. – Саратов : Б. и., 2022. – 31 с.

[18] Challoner, A. V. J. Photoelectric plethysmography for estimating cutaneous blood flow / A. V. J. Challoner. – New York : Academic Press, 1979. – С. 125–151.

[19] Рентюк, В. Биологические оптические сенсоры в медицине: настоящее и будущее фотоплетизмографии / В. Рентюк. – М. : Б. и., 2017. – С. 66–72. – EDN VWNZML.

[20] Mejía-Mejía, E., Allen, J., Budidha, K., El-Hajj, C., Kyriacou, P. A., Charlton, P. H. Photoplethysmography Signal Processing and Synthesis / E. Mejía-Mejía, J. Allen [и др.] // В кн.: Photoplethysmography / ред. P. A. Kyriacou, J. Allen. – Elsevier, 2021.

[21] Sarkar, S., Bhoi, A. K., Savita, G. Fingertip Pulse Wave (PPG signal) Analysis and Heart Rate Detection / S. Sarkar, A. K. Bhoi, G. Savita. – В. м. : В. и., 2022.

[22] Lee, C., Shin, H., Kong, I. D., Lee, M. Analysis of Arterial Stiffness Variation by Photoplethysmographic DC Component / C. Lee, H. Shin [и др.]. – В. м. : В. и., 2011. – 9 с. – DOI: 10.9718/JBER.2011.32.2.109.

[23] Sree Sanjanaa Bose, S., Sree Niranjanaa Bose, S., Maniventhan, M. A Review on Feature Extraction Techniques of Photoplethysmogram Signal / S. Sree Sanjanaa

Bose, S. Sree Niranjanaa Bose, M. Maniventhan. – В. м. : В. и., 2020. – С. 380–383. – DOI: 10.46532/978-81-950008-1-4_083.

[24] Mashayekhi, G., Zahedi, E., Movahedian Attar, H., Sharifi, F. Flow mediated dilation with photoplethysmography as a substitute for ultrasonic imaging / G. Mashayekhi, E. Zahedi [и др.]. – В. м. : В. и., 2015. – С. 1551–1571. – DOI: 10.1088/0967-3334/36/7/1551. – PMID: 26057334.