

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

**Изучение динамики тонуса сосудов при изменении положения
верхней конечности, перспективы применения в
биомедицинской диагностике**

АВТОРЕФЕРАТ

БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4021 группы

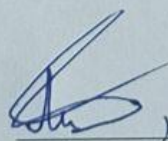
направления 03.03.02 «Физика»

Института физики

Торопова Артем Анатольевича

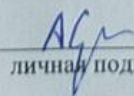
Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.,
должность, уч. ст., уч. зв.

, 16.06.25
личная подпись, дата

А.А. Сагайдачный
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. ст., уч. зв.


личная подпись, дата
16.06.25

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2025

Введение.

В современной медицине и физиологии сосудистая система занимает одно из центральных мест в изучении механизмов поддержания гомеостаза организма. Сосудистая система обеспечивает гомеостаз организма, регулируя кровяное давление, перфузию тканей и общее кровообращение с помощью нервных, гуморальных и локальных факторов. При смене положения конечностей происходит перераспределение кровотока и адаптация сосудистого тонуса под гравитационной нагрузкой — важный механизм как в физиологии, так и в клинической диагностике. Тем не менее динамика тонуса артерий верхней конечности при её перемещении изучена недостаточно, особенно с использованием неинвазивной фотоплетизмографии (ФПГ). Применение ФПГ для оценки изменений тонуса при смене положения открывает перспективы раннего выявления нарушений регуляции кровообращения и создания доступных диагностических методик.

Актуальность темы:

Фотоплетизмографическая оценка высоко- и низкочастотных колебаний тонуса сосудов верхней конечности при переходе её положения относительно уровня сердца из «опущенного» в «возвышенное», с варьированием времени удержания руки на уровне сердца и температурных условий окружающей среды.

Цель и задачи работы:

Целью данной работы является фотоплетизмографическое исследование динамики тонуса сосудов верхней конечности при изменении ее положения из крайнего положения «вниз» в крайнее положение «вверх».

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

1. Провести обзор современных работ, посвященных исследованию реакции на ортостатическую и гравитационную пробы.

2. Провести регистрацию сигнала ФПГ при проведении пробы с изменением положения верхней конечности из крайнего положения «вниз» в

крайнее положение «вверх».

3. Проанализировать высокочастотную и низкочастотную динамику тонуса сосудов в процессе проведения пробы с изменением положения верхней конечности, выявить возможные закономерности и сформулировать соответствующие выводы.

4. Описать перспективы практического применения метода для выявления нарушений регуляции тонуса сосудов при артериальной гипертонии.

Основное содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формируется цель исследования и определяется научная новизна.

В первой главе рассматривается физиология сосудистого тонуса и его регуляция.

В разделе один первой главы рассматривается регуляция сосудистого тонуса.

Изучение регуляции сосудистого тонуса традиционно фокусировалось на трёх слоях стенки: интима (эндотелий), медиа (гладкомышечные клетки и эластические пластины) и адвентиция (соединительная ткань с нервными окончаниями) (рис. 1) [7]. Открытие оксида азота в 1980-х годах сместило акцент на эндотелий как паракринную ткань, модулирующую медию напрямую и через нейротрансмиттеры; в то время адвентиция считалась лишь опорной, но недавно выявлен её прямой вклад в регуляцию сосудов, что станет понятнее при развитии методов удаления адвентиции для изучения межслойных взаимодействий [7],[6]. Кроме этого, периваскулярный жир показал антиконстрикторное действие: исследования Сольтиса и Кассиса и последующие работы Лёна выявили, что адипоцит-зависимый релаксирующий фактор (ADRF) ингибирует сосудистые сокращения через тирозинкиназные пути и АТФ-зависимые K^+ каналы, подчёркивая роль жировой ткани в регуляции тонуса [7],[11].

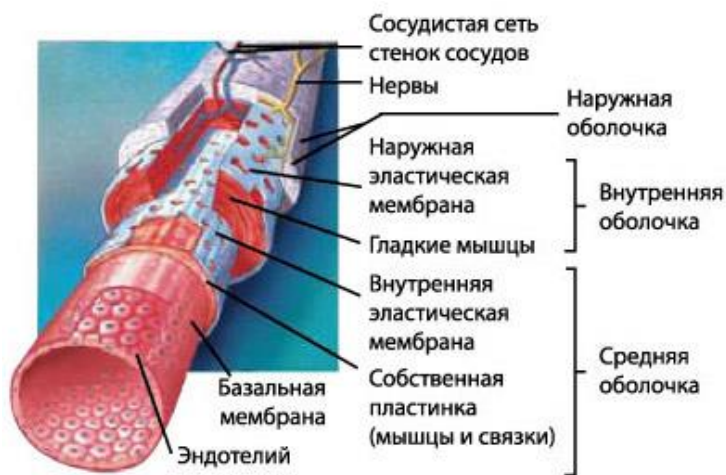


Рис. 1. Строение сосудов

Во втором разделе первой главы рассматривалась микроциркуляция сосудов.

Капилляры — это ключевой элемент кровеносной системы, обеспечивающий обмен веществами между кровью и интерстициальной жидкостью. Такой обмен происходит также в венулах. Вместе с артериолами, метартериолами и венулами капилляры образуют терминальное русло — единую систему, где кровь длительно контактирует с большой поверхностью [4]. «Истинные» капилляры отходят от метартериол под прямым углом, их стенки содержат гладкомышечные элементы, которые убывают к дистальной части, а прекапиллярные сфинктеры и сокращение артериол регулируют кровоток. В терминальном русле присутствуют артериовенозные анастомозы, связывающие артерии с венулами; они особенно обильны в коже акральных зон (например, пальцы, уши) и участвуют в терморегуляции. По структуре стенок капилляры делятся на три типа: с непрерывной стенкой (встречаются в мышцах, жировой ткани, лёгких), фенестрированной (в почечных клубочках, кишечнике) и прерывистой (в костном мозгу, печени, селезёнке) [4],[5].



Рис. 2. Терминальное (микроциркуляторное) русло

В третьем разделе первой главы рассматривалось анатомо-физиологические особенности кровообращения верхней конечности.

Кровообращение верхней конечности начинается в левом желудочке: артериальная кровь по восходящей и дуге аорты направляется к плечеголовному стволу или прямо к левой подключичной артерии (рис. 3.).

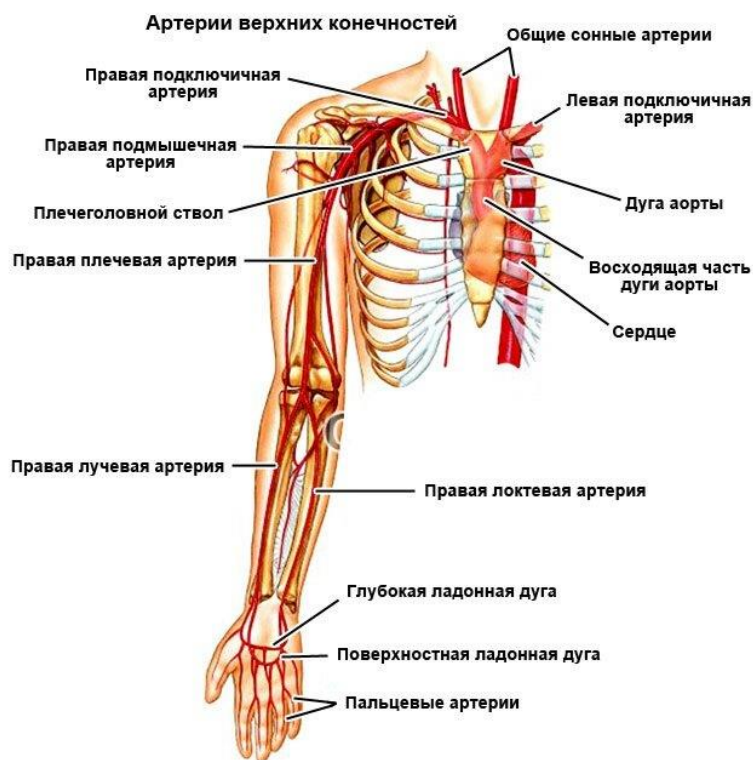


Рис. 3. Схема артерий верхних конечностей.

Подключичная, проходя под ключицей, становится подмышечной артерией, дающей ветви к мышцам и коже плеча, а затем продолжается как плечевая артерия, спускаясь вдоль медиального края плеча и разветвляясь на лучевую и локтевую в области локтевого сгиба [14]. Лучевая артерия по радиальному краю предплечья пальпируется на запястье; локтевая вдоль медиального края, вместе с глубокими пальцевыми ветвями формирует поверхностную ладонную дугу, а лучевая, входя в ладонь, участвует в глубокой ладонной дуге. От обеих дуг отходят пальцевые артерии, питающие ткани пальцев [14].

Венозный отток осуществляется двумя системами: поверхностной (латеральная и медиальная подкожные вены, соединённые средней локтевой) и глубокой (вены, совпадающие с артериями: лучевая, локтевая, плечевые), которые через подмышечную и подключичную вену формируют плечеголовной сток и впадают в верхнюю полую вену. Физиологически кровоток динамично меняется: при мышечной активности растёт потребление кислорода, что вызывает дилатацию артериол и усиление притока крови. Обширная сеть анастомозов (особенно в области локтевого сустава и кисти) обеспечивает непрерывное снабжение при временном пережатии сосудов. Для гомеостаза важна терморегуляция: при тепле расширяются поверхностные сосуды для отдачи тепла, при холоде — сужаются. Венозные клапаны и мышечный «насос» предплечья и плеча обеспечивают однонаправленный ток крови к сердцу, преодолевая гравитацию; их нарушение при длительной неподвижности или компрессии может приводить к застою, отёку и риску тромбоза.

В четвертом разделе первой главы рассматриваются основные законы гемодинамики.

Гемодинамика изучает, как кровь движется по сосудам, опираясь на принципы гидродинамики. Главный закон — закон Пуазейля — говорит, что объем крови, проходящий через сосуд, сильно зависит от его радиуса: даже небольшое сужение резко увеличивает сопротивление и уменьшает кровоток. Закон сохранения массы объясняет, что объем крови в системе не меняется, поэтому в узких капиллярах скорость высокая, что помогает обмену веществ, а в широких сосудах, вроде аорты, она ниже, чтобы быстро доставлять кровь. Закон сохранения энергии показывает, как давление падает от аорты к венам из-за сопротивления, особенно в артериолах, которые регулируют кровоток. Кровь может течь упорядоченно, слоями — это ламинарный поток, типичный для большинства сосудов, или хаотично, с вихрями — это турбулентный поток, который появляется при высоких скоростях или сужениях и слышен как шумы при прослушивании.

В пятом разделе первой главы рассматриваются частотные диапазоны колебаний кровотока в микрососудах.

Гемодинамическая активность периферических сосудов проявляется в пяти частотных диапазонах [16],[17]:

Низкочастотные ($0,005-0,02$ Гц): отражают эндотелиальную активность: медленные колебания кровотока, связанные с высвобождением вазоактивных веществ (например, NO) внутренним слоем сосудов.

Среднечастотные ($0,02-0,06$ Гц): соответствуют нейрогенной регуляции через симпатическую нервную систему, влияющую на сужение и расширение сосудов.

Высокочастотные ($0,06-0,16$ Гц): связаны с миогенной активностью гладкомышечных клеток, реагирующих на изменения давления для поддержания стабильного потока (миогенный ответ).

Дыхательные ($0,16-0,4$ Гц): синхронизированы с дыханием: изменения внутригрудного давления влияют на венозный возврат и сердечный выброс, что проявляется в пульсовых изменениях кровотока.

Сердечные ($0,4-2$ Гц): отражают пульсацию, вызванную частотой сердечных сокращений; в микроциркуляции эти колебания менее выражены, но обусловлены изменением градиента давления в мелких артериях и артериолах, определяя мгновенный объём крови через сечение сосуда.

Такое частотное разложение позволяет отдельно оценивать вклад эндотелия, нервной системы, миогенного механизма, дыхательных и сердечных факторов в регуляцию периферического кровотока [16],[17].

В шестом разделе первой главы рассматривается влияние положения верхней конечности на сосудистый тонус.

Изменение положения верхней конечности влияет на сосудистый тонус за счёт гравитации, венозного возврата и рефлекторных механизмов. Венозное растяжение при опускании руки увеличивает давление в венах и активирует афферентные волокна III и IV групп в адвентиции мелких вен, что вызывает рефлекторную симпатическую активацию, повышение MSNA и артериального давления, как показано при инфузии физиологического раствора в вены предплечья во время артериальной окклюзии [18]. Введение лидокаина устраняет этот эффект, подтверждая роль венозных афферентов и системный характер реакции, отличающийся от локального веноартериолярного рефлекса. При опущении руки растяжение вен сначала может снижать сосудистый тонус механически, но затем рефлекторная вазоконстрикция поддерживает среднее артериальное давление и перфузию органов. В поднятом положении снижение венозного давления уменьшает стимуляцию афферентов, что через миогенные и симпатические механизмы повышает тонус артериол. Горизонтальное положение даёт базовые условия с минимальным гравитационным влиянием и относительно стабильным венозным давлением, делая описанный венозно-растяжной рефлекс менее выраженным.

Во второй главе рассматривается метод фотоплетизмографии (ФПГ).

Фотоплетизмография (ФПГ) — неинвазивный метод измерения изменений объема крови в микрососудах кожи, основанный на оптических свойствах тканей: поглощении, рассеянии и пропускании света определённой длины волны. В 1937 году Херцман показал, что интенсивность отражённого от кожи света изменяется в зависимости от сердечной активности, предложив использовать ФПГ для оценки кровенаполнения.

Метод регистрирует изменения интенсивности света, проходящего через ткани, что связано с пульсацией крови и объясняется законом Бугера–Ламберта–Бера: ослабление света зависит от коэффициента поглощения, концентрации веществ и длины оптического пути.

Свет, проходя через кожу, взаимодействует с тканями, венами и артериями, а затем фиксируется фотодетектором. Интенсивность зарегистрированного сигнала зависит от объема крови, диаметра артерии и концентрации гемоглобина, изменяющихся в течение сердечного цикла. В диастолу объём крови минимален, поглощение снижается, и детектор фиксирует максимум света. В систолу — наоборот, сигнал ослабевает.

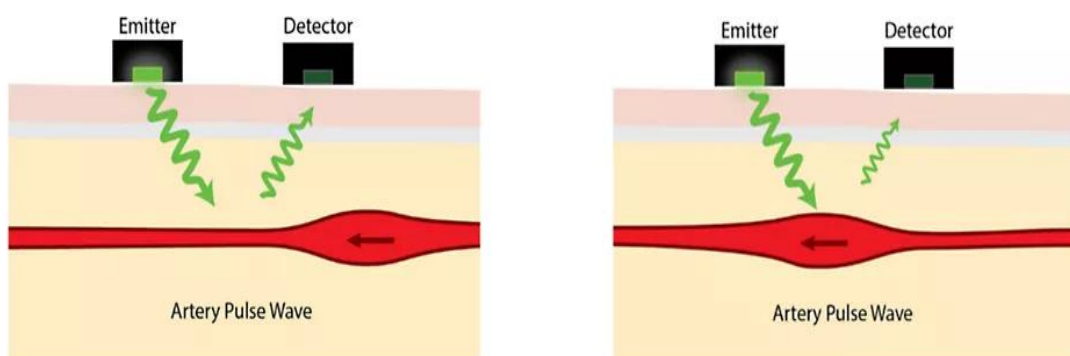


Рис. 4. Регистрация сигнала ФПГ (на рисунке слева - фаза систолы (пульсовая волна): артериальный сосуд расширен, в нём больше крови. Поглощение света возрастает, на детектор попадает меньше отражённого света — амплитуда сигнала падает. На рисунке справа - фаза диастолы: сосуд сужен, объём крови в нём меньше. Свет проходит ближе к кожной поверхности, меньше поглощается кровью и больше отражается к детектору — амплитуда сигнала растёт.)

В первом разделе второй главы рассматривается устройство ФПГ.

Устройство ФПГ включает светодиод (LED), испускающий свет, и фотодетектор. В зависимости от их расположения различают пропускающие и отражающие типы датчиков. В пропускающем типе фотодетектор находится напротив светодиода, свет проходит через ткани (например, на пальцах или мочках ушей). Такие датчики обеспечивают более стабильные измерения (рис. 5).

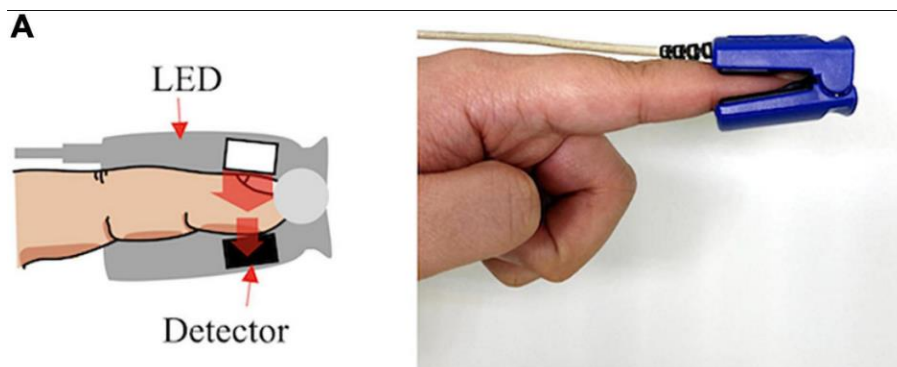


Рис. 5. Устройство ФПГ, работающее в режиме «на пропускание».

В отражающем типе фотодетектор расположен рядом со светодиодом и регистрирует рассеянный свет, что даёт меньшую интенсивность сигнала, но позволяет проводить измерения на лбу, запястье и других зонах с толстыми тканями (рис. 6).

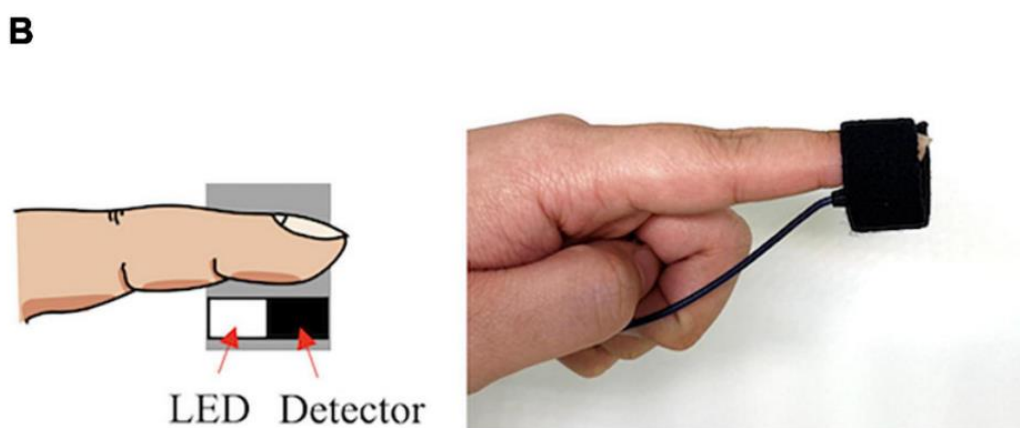


Рис. 6. Устройство ФПГ, работающее в режиме «на отражение».

Клиническое применение PPG включает измерение насыщения крови кислородом (пульсоксиметрия), тонуса сосудов и изменений кровотока при дыхании. Оксигенация рассчитывается как отношение оксигемоглобина к общему гемоглобину, при этом используют две длины волн: красную (~660 нм) и инфракрасную (~880 нм), так как они по-разному поглощаются формами гемоглобина.

Индекс перфузии, определяемый как отношение пульсирующего и неппульсирующего компонентов сигнала, используется для оценки сосудистого тонуса, особенно при гипертонии и ишемической болезни сердца.

Во втором разделе второй главы разбирается структура фотоплетизмограммы.

Пульсовая волна возникает, когда левый желудочек выбрасывает кровь в аорту во время сокращения. Ее скорость зависит от просвета сосуда, эластичности и толщины его стенок, а также силы сердечного толчка. Фотоплетизмография помогает выявлять сужение и склероз сосудов, оценивать их тонус и работу сердца. На фотоплетизмограмме волна делится на анакротическую фазу (систола) и диакротическую (диастола). Диакротический пик образуется за счет отражения крови, возвращающейся из периферии в аорту. У здорового человека подъем волны крутой, а отраженная волна высокая, но при сужении артерий подъем сглаживается, диакротическая фаза удлиняется, а отраженная волна снижается или пропадает (рис. 7) .

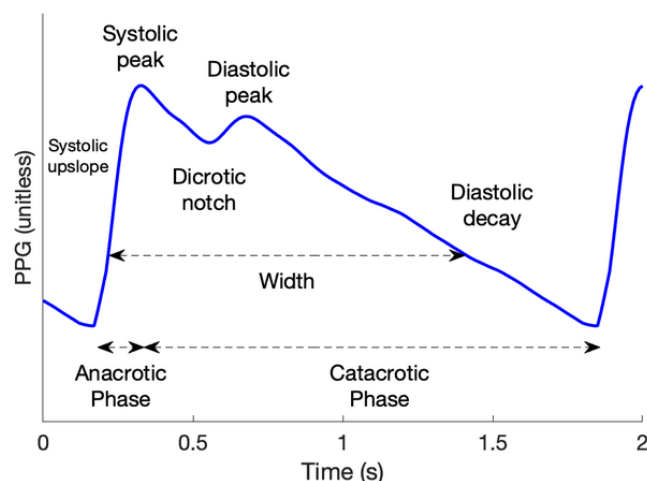


Рис. 7. Разбор пульсовой волны на фотоплетизмограмме.

Ключевые параметры фотоплетизмограммы — индекс жесткости и индекс отражения. Индекс жесткости отражает сужение крупных артерий и эластичность их стенок, косвенно указывая на кальциевый обмен. Индекс отражения показывает тонус мелких сосудов; его рост может говорить о высокой вязкости крови или атеросклерозе. Нарушения на пульсовой волне проявляются по-разному: дополнительные волны могут указывать на отклонения гемодинамики или тромб, крутой подъем с быстрым спадом и слабым дициротическим пиком — на аортальную недостаточность, отсутствие дициротического зубца — на диабет, атеросклероз или гипертонию, а длинная анациротическая фаза с пологим подъемом и заметным дициротическим зубцом — на повышенный тонус сосудов, начальный атеросклероз или гипертонию. При облитерирующем эндартериите амплитуда волн падает на пораженной конечности, а у больных ревматизмом при погодных изменениях или магнитных бурях усиливаются реакции, связанные с расширением сосудов.

В третьем разделе второй главы рассматриваются компоненты сигнала фотоплетизмограммы.

Сигнал фотоплетизмографии (PPG) включает два основных компонента: постоянную (DC) и переменную (AC) составляющие, вместе формирующие полную картину кровотока (рис. 8).

DC-компонента — это стабильный базовый уровень, отражающий среднее кровенаполнение тканей. Она зависит от количества гемоглобина, толщины кожи и интенсивности света. Также в ней присутствуют низкочастотные колебания, связанные с дыханием, активностью симпатической нервной системы и терморегуляцией. DC используется для оценки общего объема крови и калибровки устройств, например, пульсоксиметров [21], [25].



Рис. 8. Пульсирующая (переменная, AC) составляющая сигнала фотоплетизмографии (PPG) и соответствующая электрокардиограмма (ЭКГ). Переменная составляющая на самом деле наложена на гораздо большую квазипостоянную (квазипостоянного тока, DC) составляющую. На практике форма сигнала PPG часто инвертируется.

АС-компонента показывает пульсации, синхронизированные с сердечным циклом: увеличивается в систолу, уменьшается в диастолу. Её частота соответствует пульсу (примерно 1 Гц у здорового человека), а амплитуда зависит от сосудистого тонуса. АС используется для измерения частоты сердечных сокращений, анализа ритма и оценки состояния периферических сосудов [23].

Отношение АС к DC называется пульсационным индексом (PI) — он отражает силу пульсового сигнала относительно общего объёма крови. Высокий PI указывает на хорошую перфузию, низкий — на сосудистые нарушения. PI особенно важен при расчёте насыщения крови кислородом (SpO_2) в пульсоксиметрии.

Для разделения компонентов используют фильтрацию: высокочастотные фильтры выделяют АС, а низкочастотные — DC; также применяются усилители для слабых сигналов. В клинике DC применяется для оценки базового кровенаполнения и настройки приборов, а АС — для анализа пульса, сосудистой функции и ритмики [23], [26].

В четвертом разделе второй главы рассматриваются перспективы применения метода в области диагностики гипертонии.

Метод фотоплетизмографии (ФПГ) активно применяется в современной функциональной диагностике, особенно в контексте изучения регуляции сосудистого тонуса у пациентов с артериальной гипертонией. Современные исследования подтверждают высокую чувствительность ФПГ-сигнала к изменениям в гемодинамике и влиянию вегетативной нервной системы, что делает этот метод перспективным для оценки сосудистой адаптации в различных условиях.

В исследовании [24] была продемонстрирована высокая чувствительность ФПГ-сигнала к изменению положения конечности относительно уровня сердца. Подъём и опускание руки вызывали заметные изменения как в постоянной (DC), так и в пульсовой (AC) составляющей сигнала. Эти изменения свидетельствуют о том, что ФПГ способен фиксировать гидростатические эффекты и включение локальных сосудистых рефлексов, таких как веноуло-артериолярный рефлекс, при изменении положения конечности (рис. 9).

Аналогичные результаты получены в исследовании [30], где изучалась амплитуда AC-составляющей в различных частотных диапазонах при фиксированных положениях руки. Исследование подтвердило, что амплитуда пульсовой волны существенно изменяется при подъёме или опускании руки, отражая перераспределение кровотока и регуляторные сосудистые реакции. Таким образом, авторы сделали вывод, что ФПГ-сигнал информативен не только для оценки состояния сердечно-сосудистой системы, но и для анализа механизмов адаптации периферического кровообращения (рис. 13).

В клиническом исследовании [31], проведённом на пациентах с гипертонией, была показана высокая чувствительность ФПГ-сигнала к действию сосудорасширяющих препаратов. После введения нитроглицерина наблюдалось улучшение формы сигнала, особенно в его диастолической фазе, что свидетельствует об улучшении перфузии тканей и повышении

эластичности сосудов. Изменения в параметрах ФПГ-сигнала, по мнению авторов, отражают функциональные сдвиги в микроциркуляции, а не необратимые анатомические изменения. Это позволяет использовать анализ формы ФПГ-сигнала как чувствительный индикатор эффективности антигипертензивной терапии и состояния сосудистой регуляции.

В третьей главе подробно описывается экспериментальная часть и анализ динамики тонуса сосудов верхней конечности.

Эксперимент проводился с использованием отражающего ФПГ-датчика на указательном пальце (рис. 9). Прибор состоит из центральной части – аналого-цифрового преобразователя, и двух каналов, выходящих из него. Они в свою очередь состоят из светодиода красной длины волны и фотодатчика. Были разработаны два протокола. Первый (7 минут): 1 минута на уровне сердца, по 1 минуте при опускании, 1 минута на уровне сердца, по 1 минуте при поднятии, и 1 минута на уровне сердца, при 24°C. Во втором протоколе (10 минут) были увеличены фазы, когда рука находилась на уровне сердца (до 2 минут), и эксперимент проводился при примерно 30°C для усиления вазодилатации. Испытуемые адаптировались к условиям 15–20 минут, сидя, с левой рукой на столе в начальной позиции.

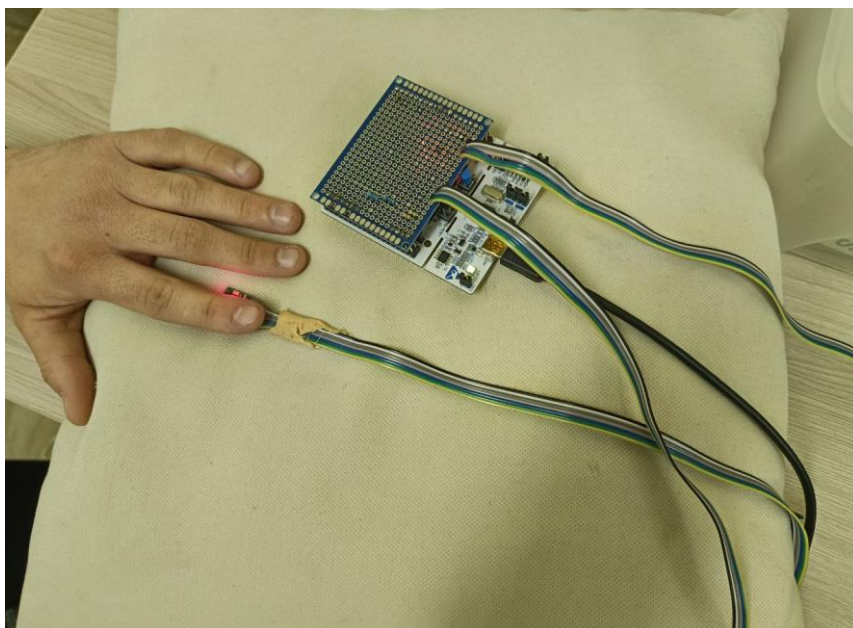


Рис. 9. Проведение эксперимента: запись ФПГ – сигнала.

В результате эксперимента были получены данные регистрации объемных изменений кровообращения, представленных в виде текстового файла со значениями, записанными сенсором устройства. Для дальнейшего анализа полученные данные необходимо обработать в программе Mathcad 14.

$$f := \frac{17518}{417} = 42.01$$

Частота дискретизации

$$\text{floor}(f) = 42$$

Округление до нижней границы

$$\text{timeStep} := \frac{1}{\text{floor}(f)} = 0.024$$

$$\text{ind} := 0.. \text{rows}(\text{data}) - 1$$

Приведение ко временному ряду

$$\text{time}_{\text{ind}} := \text{timeStep} \cdot \text{ind}$$

$$x_{\text{ind}} := \frac{\text{time}_{\text{ind}}}{60}$$

Массив временного ряда в минутах

DC-составляющая определяется как сглаженные с помощью функции ksmooth исходные данные. ksmooth (vx,vy,b) возвращает n-мерный вектор сглаженных значений вектора vy, вычисленных на основе распределения Гаусса, vx и vy - n-мерные векторы действительных чисел. Полоса пропускания b управляет степенью сглаживания. AC-составляющая определяется как разность исходного и сглаженного сигнала (DC)

$$\text{DC} := \text{ksmooth}(x, \text{signal}, 0.015)$$

$$\text{AC} := \text{signal} - \text{DC}$$

Рис. 10. Обработка данных в Mathcad.

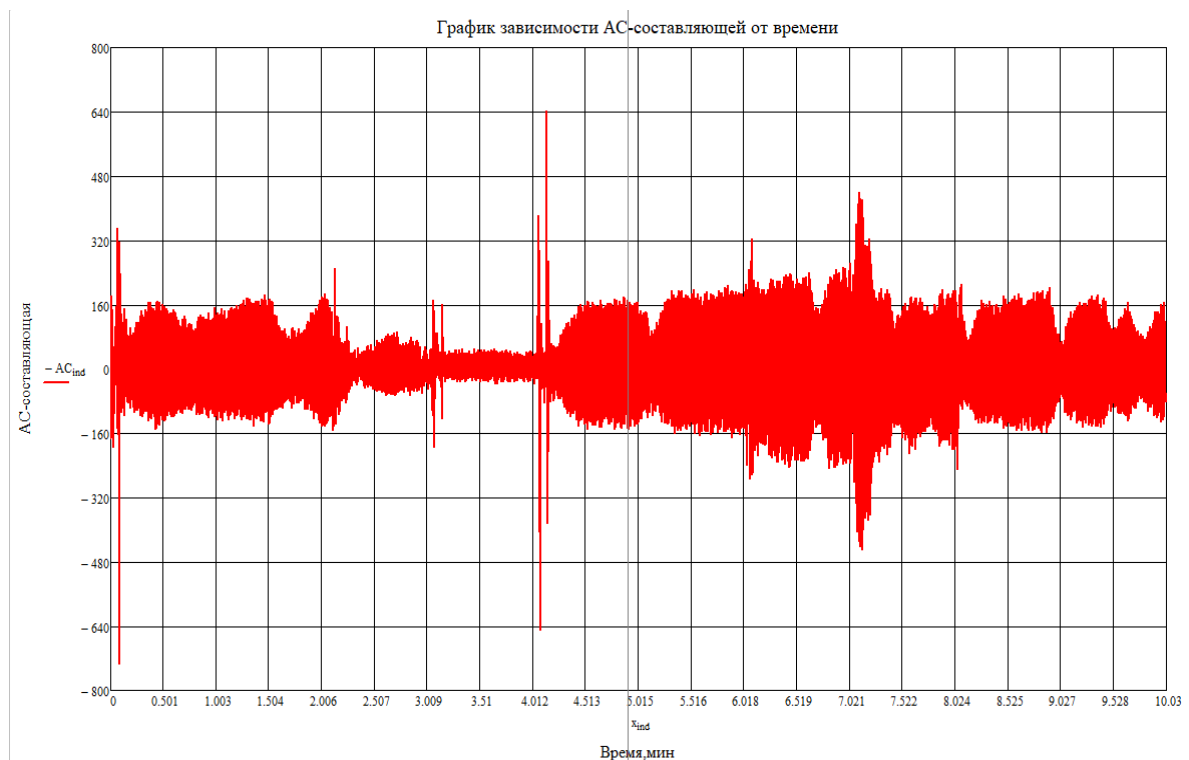


Рис. 19. Пример графика зависимости AC-составляющей сигнала от времени.

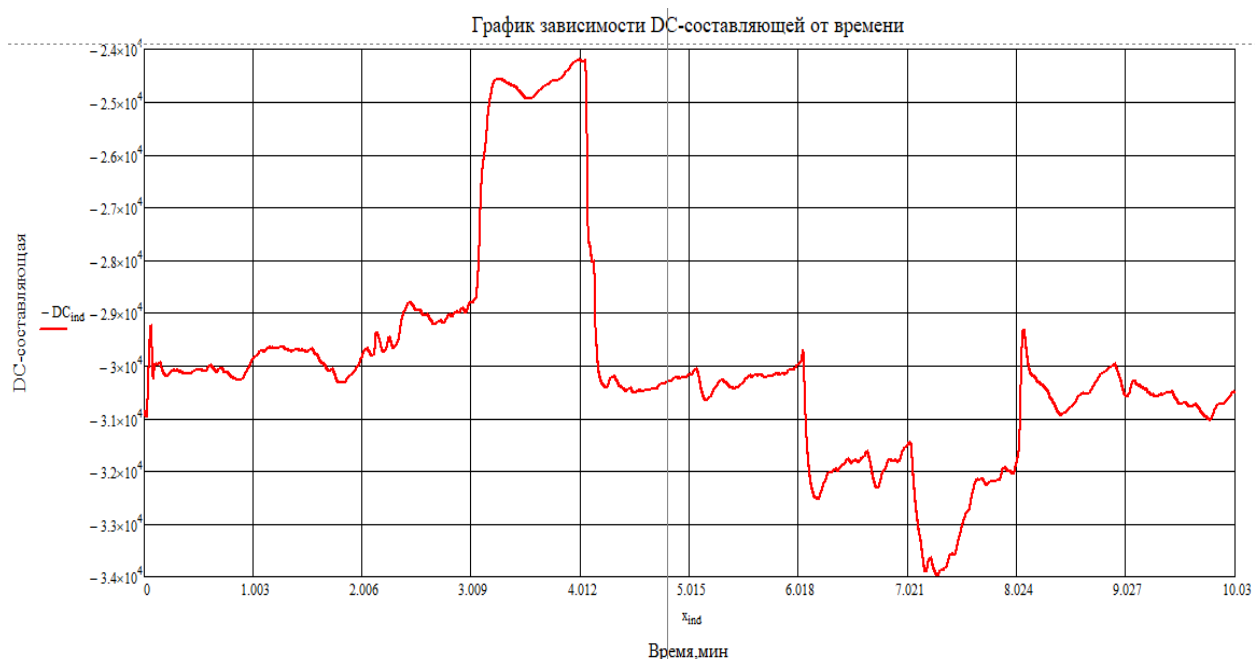


Рис. 20. График зависимости DC составляющей сигнала от времени.

В программе TBF Converter 1.6 из полученного АС-сигнала мы строили кривую пиков, для более простого дальнейшего анализа (рис. 13)

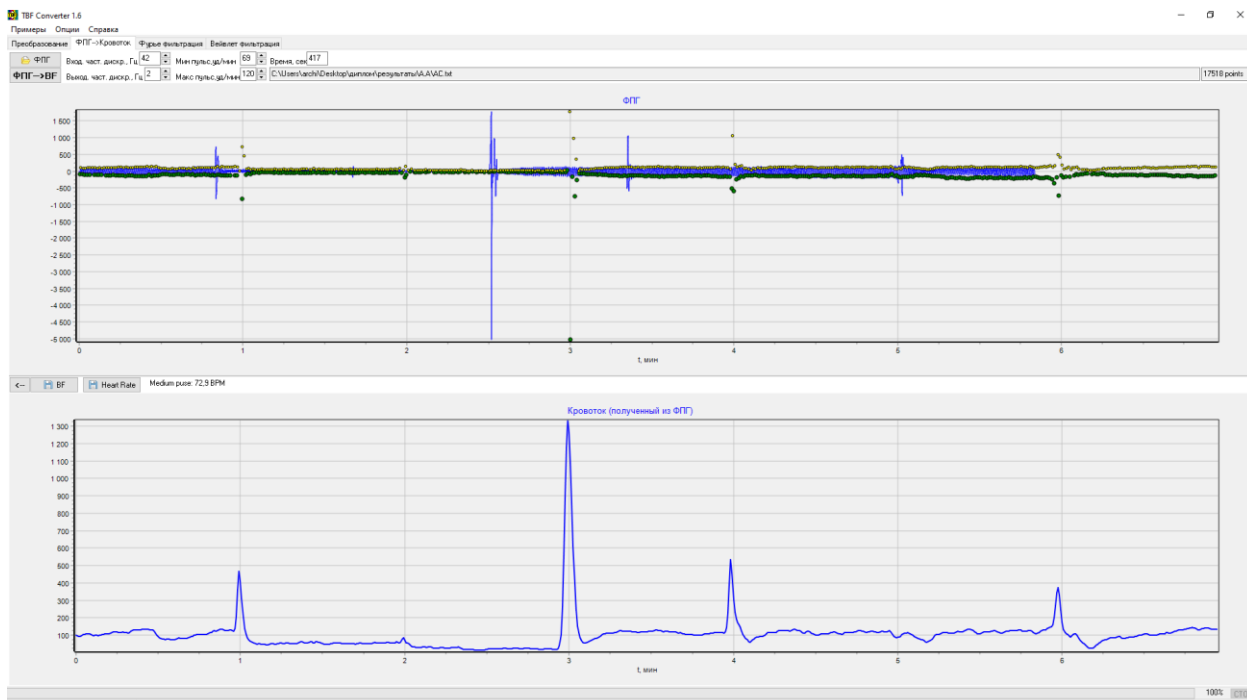


Рис.13. Кривая пиков, построенная в TBF Converter 1.6.

На последнем этапе обработки данных был написан код в Python, который позволял строить медианы на протяжении всей кривой пиков (рис. 14)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Загружаем данные из файла, заменяя запятые на точки
def replace_comma_with_dot(s):
    if isinstance(s, bytes):
        s = s.decode('utf-8')
    return float(s.replace(',', '.'))

values = np.loadtxt('пики AC A.A2.txt', converters=(0: replace_comma_with_dot))
print(f"Всего значений: {len(values)}")

# Временные параметры
total_minutes = 7
total_seconds = total_minutes * 60
time_per_value = total_seconds / len(values) # Время на одно значение в секундах

# Разделяем данные по минутам и считаем медианы
medians = []
minute_centers = []
for minute in range(total_minutes):
    start_time = minute * 60
    end_time = (minute + 1) * 60
    start_idx = int(start_time / time_per_value)
    end_idx = min(int(end_time / time_per_value), len(values)) # Убедимся, что end_idx не превышает длину массива
    minute_data = values[start_idx:end_idx]
    if len(minute_data) > 0: # Проверяем, есть ли данные в интервале
        median = np.median(minute_data)
        medians.append(median)
        minute_centers.append(minute + 0.5) # Середина минуты
        print(f"Минута {minute + 1}: {len(minute_data)} значений, медиана = {median}")
    else:
        # Если данных нет, добавляем NaN, чтобы сохранить место для минуты
        medians.append(np.nan)
        minute_centers.append(minute + 0.5)
        print(f"Минута {minute + 1}: нет данных")

# Создаем временную ось для всех значений
time_seconds = np.arange(len(values)) * time_per_value
time_minutes = time_seconds / 60

# Создаем точки для медианы, чтобы она отображалась строго по минутам
minute_boundaries = np.arange(total_minutes + 1) # Границы минут
minute_values = []
for minute in range(total_minutes):
    # Для каждой минуты добавляем значение медианы
    minute_values.append(medians[minute])
# Добавляем последнее значение медианы, чтобы соответствовать количеству границ
minute_values.append(medians[-1])

# Строим график
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(time_minutes, values, label='Значения пиков', color='blue', alpha=0.5)
plt.step(minute_boundaries, minute_values, where='post', label='Медиана по минутам', color='red', linewidth=2)
plt.xlabel('Время, мин')
plt.ylabel('Значение пика')
plt.title('Значения пиков и медианы по минутам')
plt.legend()
plt.grid(True)
# Устанавливаем пределы оси X, чтобы гарантировать полный диапазон
plt.xlim(0, total_minutes)
plt.show()
```

Рис. 14. Код в Python для построения медиан на кривой.

Такое решение наглядно иллюстрирует общую динамику сигнала и позволяет сразу увидеть, как меняется центральная тенденция (медиана) в разных фазах эксперимента (рис. 15). Аналогичным образом процесс проходит и для данных DC-составляющей. (рис. 16.)

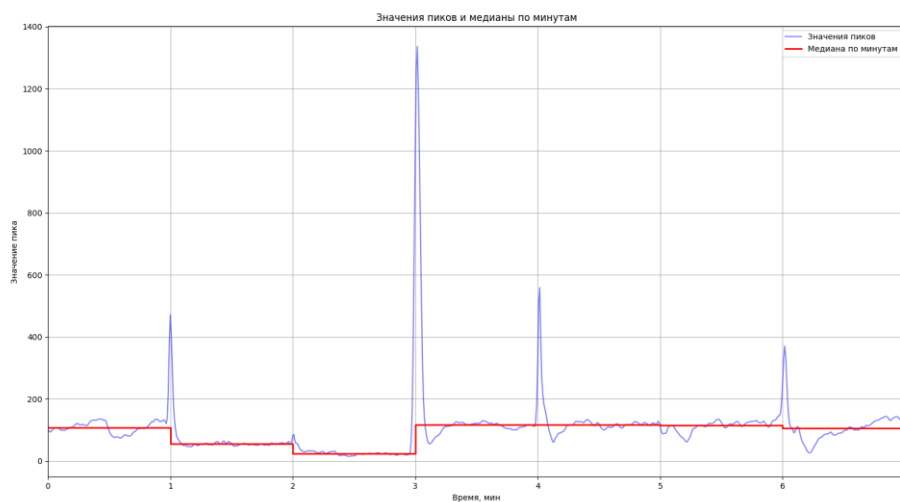


Рис. 15. Итоговый график с медианами, наложенными на кривую пиков АС (первый протокол).

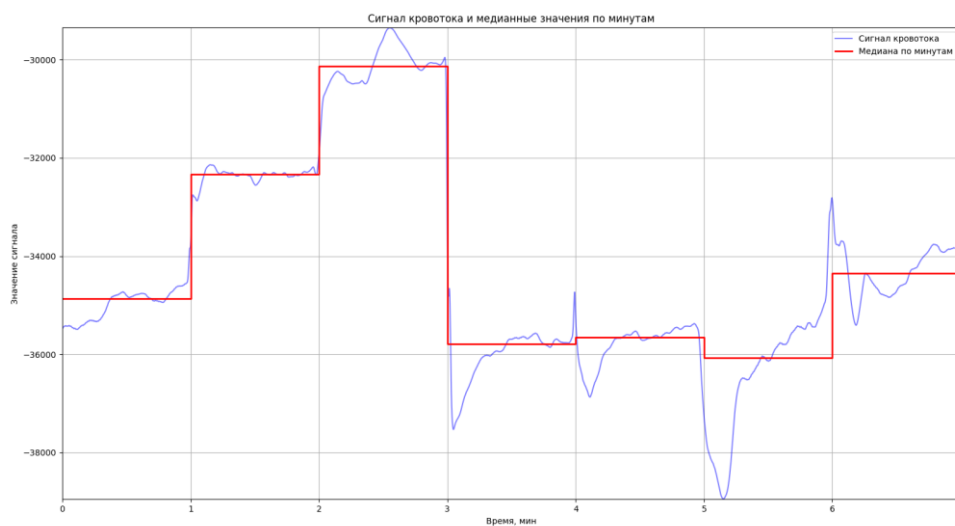


Рис. 16. Итоговый график с медианами, наложенными на сигнал DC (первый протокол).

Помимо этого, код выводил числовое значение медиан на каждом промежутке в течение всего протокола (рис. 17). Для более детального анализа, данные по всей контрольной группе были собраны в таблицы.

```
Минута 1: 120 значений, медиана = 107.91
Минута 2: 120 значений, медиана = 54.758
Минута 3: 120 значений, медиана = 24.0765
Минута 4: 120 значений, медиана = 116.38499999999999
Минута 5: 120 значений, медиана = 117.6045
Минута 6: 120 значений, медиана = 115.78049999999999
Минута 7: 120 значений, медиана = 105.158
```

Рис. 17. Вывод численного значения медианы на каждой минуте протокола.

Заключение.

В исследовании показано, что при изменении положения руки относительно уровня сердца ФПГ-сигнал демонстрирует устойчивую реакцию: опускание вызывает рост медленной (DC) и падение пульсовой (AC) составляющих, при подъёме — обратную динамику, отражающую сочетание механических и рефлекторных механизмов регуляции тонуса. Удлинение нейтральной фазы и повышение температуры усиливают эти реакции за счёт активации компенсаторных механизмов микроциркуляции и подчёркивают индивидуальную сосудистую реактивность. Полученные результаты соответствуют данным литературы и подтверждают, что метод фотоплетизмографии в сочетании с позиционной пробой, контролем температуры и анализом AC/DC-компонент служит простым, неинвазивным и высокочувствительным инструментом для оценки состояния сосудистой системы. При стандартизации углов наклона, длительности фаз и температурных условий, а также разработке нормативных значений, этот подход может быть использован для массового скрининга нарушений микроциркуляции, раннего выявления артериальной гипертензии, диабетической ангиопатии, вегетативной дисфункции и других патологий, а также для мониторинга эффективности терапии и индивидуальных особенностей сосудистой адаптации.

Список литературы.

- [1]. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review / Junyung Park, Hyeon Seok Seok, Sang-Su Kim, Hangsik Shin / «Frontiers» . – 2016. -Vol. 12, №2021.
- [2]. Photoplethysmography for the Assessment of Arterial Stiffness / Parmis Karimpour, James M. May, Panicos A. Kyriacou / «Sensors». – 2023. – Vol. 23(24), № 9882.
- [3]. Photoplethysmography in Wearable Devices: A Comprehensive Review of Technological Advances, Current Challenges, and Future Directions / Kwang Bok Kim, Hyun Jae Baek / «Electronics». – 2023. -Vol. 12(13), № 2923.
- [4]. Физиология человека, том 2 / Р.Шмидт, Г.Тевс; пер. с англ. Под ред. Акад. П.Г. Костюка / изд. «Мир». – 1996.
- [5]. Regulation of vascular tone, molecular mechanisms / R. Clinton Webb, David F. Bohr / «Progress in Cardiovascular Diseases». – 1981. – Vol. 24 (3), p. 213-242
- [6]. Regulation of vascular tone by adipocytes / Nele Maenhaut, Johan Dan De Voorde / «BMC Medicine». – 2011. - Vol. 9 (25)
- [7]. Regulation of Vascular Tone / Maria S. Fernandez – Alfonso / «Hypertension». – 2004. – Vol. 44 (3), P. 255-256
- [8]. Poor Agreement between Respiratory Variations in Pulse Oximetry Photoplethysmographic Waveform Amplitude and Pulse Pressure in Intensive Care Unit Patients / S.A. Landsverk, Lars O. Hoiseth, Per Kvandal, Jonny Hisdal, Oivind Skare, Knut A.Kirkeboen / «Anesthesiology». – 2008. – Vol. 109, P. 849-855.
- [9]. The Efficacy of Perfusion Index as an Indicator for Intravascular Injection of Epinephrine-Containing Epidural Test Dose in Propofol-Anesthetized Adults / Hany A. Mowafi / Salah A. Ismail, Mohammed A. Shafi, Abdulmoshin A. Al-Ghamdi / «Anesthesia & Analgesia». – 2009. - Vol. 108(2), P. 549 – 553.
- [10]. Plethysmographic pulse wave amplitude is an effective indicator for intravascular injection of epinephrine-containing epidural test dose in sevoflurane-anesthetized pediatric patients / Hany A. Mowafi, Samer A. Arab, Salah A. Ismail, Abdulmohsin A. Al-Ghamdi, Roshdi R. Al-Metwalli / «Anesthesia & Analgesia».

– 2008. – Vol. 107 (5) , P 1536 – 1541.

[11]. Textbook of Angiology / John B. Chang / published by «Springer». – 2000.

[12]. Основы ангиологии: учебное пособие / Р.Е. Калинин, А.С. Пшенников, И.А. Сучков / изд. «ГЭОТАР-Медиа». – 2018. – 112 с.

[13]. Гемодинамика. Функциональные показатели кровообращения в вопросах и ответах : учебно-методическое пособие [для студентов факультета иностранных учащихся] / А.И. Кубарко, Д.А. Александров, Н.А. Башкаревич / Министерство здравоохранения Республики Беларусь, Белорусский государственный медицинский университет, Кафедра нормальной физиологии. — Минск : БГМУ. – 2012. – 26 с.

[14]. Gray's Anatomy for Students / L. Drake, A. Wayne Vogl, W. Adam, M. Mitchell / « Elsevier». – 2019.

[15]. Physiology, Cardiovascular Hemodynamics / Joshua D. Pollock; Ian V. Murray, etc. / «StarPearls». – 2023.

[16]. Low-frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in the frequency interval 0.0095–2.0 Hz / P. Kvandal, A. Stefanovska, M. Bracic, H. Kvernmo , K.-A Kirkeboen / «Microvascular Research». - 2006. - Vol. 72 (3). - P. 120–127.

[17]. Wavelet analysis of laser Doppler microcirculatory signals / P. Gratz, A. Asbach, M. Rudiger, U. Walter, A. Stefanovska, D. Pittman / «Journal of Biomedical Optics». - 2023.

[18]. Limb venous distension evokes sympathetic activation via stimulation of the limb afferents in humans / Jian Cui, Patrick M. McQuillan, etc. / «Am J Physiol Heart Circ Physiol» , – 2012. – Vol. 303, P. 457–463.

[19]. Teaching the principles of hemodynamics / Francis L. Belloni / «Advances In Physiology Education» - 1999. – Vol. 22 (1). – P. 1043 – 1046.

[20]. Hemodynamics: New Diagnostic and Therapeutic Approaches /Ali Nasimi / « IntechOpen». – 2012. – 164 с.

[21]. AC/DC Ratio Enhancement in Photoplethysmography Using a Pinned Photodiode / Antonino Caizzzone, Assim Boukhayama, Christian Enz / «IEEE

Electron Device Letters». – 2019. – Vol. 40 (11), P. 1828 -1831.

[23]. Pulse Oximeter Concept for Vascular Occlusion Test / Fatanah M. Suhaimi, J. Geoffrey Chase, etc. / «International Journal of Medical Science and Engineering». - 2013. – Vol.7 (11). – P. 63 – 67.

[24]. The effect of vascular changes on the photoplethysmographic signal at different hand elevations / M Hickey, J P Phillips and P A Kyriacou / « Physiological Measurement». – 2015. – Vol. 36 (3) – P. 425 – 440.

[25]. Spectral analysis of AC and DC components of the pulse photoplethysmograph at rest and during induction of anaesthesia / Peter D. Larsen, Murray Harty, Mohana Thiruchelvam & Duncan C. Galletly / «International journal of clinical monitoring and computing». – 2016. – Vol. 14 – P. 89 – 95.

[26]. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement / John Allen / « Physiological Measurement». – 2007. – Vol. 28 (3). – P. 1-39.

[27]. Quantifying tissue mechanical properties using photoplethysmography / Tony J. Akl, Mark A. Wilson, M. Nance Ericson, Gerard L. Côté / «Biomedical Optics Express». – 2014. – Vol. 5 (7). – P. 2362 – 2375.

[28]. Contour analysis of the photoplethysmographic pulse measured at the finger / Millasseau Sandrine, James Ritter, Kenji Takazawa, Philip Chowienczyk / «Journal of Hypertension». – 2006. – Vol. 24 (8). – P. 1449 – 1456.

[29]. Thermography – based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: A Spectral – Filtering Approach / A.A. Sagaidachnyi, A.V. Fomin, D.A. Usanov, A.V. Skripal / «Physiological measurement».- 2017. – Vol. 38(2). – P. 272.

[30]. Влияние сосудистых изменений на сигналы периферического кровотока при разном положении руки / Е.М. Рожнов, И.Д. Жучков, Г.В. Красников / «Известия ТулГУ». – 2020. – Вып. 4. – с. 152 – 162.

[31]. Comparative study of photoplethysmographic waveforms with application of antihypertensive medication in hypertensive patients / Yanchun Hu, Anming Hu, Shenju Song / «Annals of Noninvasive Electrocardiology». - 2022. – Vol. 27 (3). – P. 1-8.