

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

Кафедра медицинской физики

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

**Бимодальный анализ пространственной корреляции
гемодинамики в микро и макрососудах с помощью
ультразвуковой доплерографии и инфракрасной термографии**

студентки 2 курса 2221 группы

направления 03.04.02 «Физика», профиль «Медицинская физика»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института

Жабской Виктории Ивановны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

 14.06.23

подпись, дата

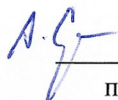
А.А. Сагайдачный

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

профессор, д.ф.-.м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

 14.06.23

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2023 г.

Введение

Ишемические заболевания являются одной из наиболее распространенных патологий сосудистых заболеваний, причем чаще встречаются ишемии нижних конечностей, в отличие от верхних. Однако, ввиду наличия большого количества заболеваний для верхних конечностей, большое значение имеет знание анатомических особенностей расположения сосудов и доступов к ним при проведении хирургических вмешательств при лечении окклюзионно-стенозных поражений артерий. Также при получении ран от ожогов или обморожений и дальнейшим их лечении с помощью пересадки кожи, необходимо учитывать область с которой будет взят трансплантат, а также область пересадки. Прогрессивной теорией, способной улучшить результаты реваскуляризации является ангиосомная теория – концепция строения сосудистого русла покровных тканей тела человека.

Для изучения пространственной корреляции гемодинамики в микро и макрососудах в работе будет применяться бимодальный анализ данных, т.е. измерения будут проводиться с применением нескольких каналов – это доплеровский ультразвуковой (УЗ) сигнал и тепловизионный инфракрасный (ИК) сигнал. Данные сигналы дают существенно различную физическую и физиологическую информацию об организме человека. Так, УЗИ позволяет оценить проходимость сосудов, измерить диаметр и объемный кровоток, а также понять, имеется ли недостаток кислорода жизненно-важных органов и тканей в режиме реального времени. ИК-измерение регистрирует распределение тепла на поверхности тела человека визуально и количественно, тем самым косвенно отражая объемный кровоток в коже. Данный вид диагностики позволяет уточнять локализацию функциональных изменений, активность процесса и его распространенность.

Целью настоящей дипломной работы является установление взаимосвязи колебаний гемодинамики в лучевой артерии и сосудах кисти с

помощью синхронных тепловизионных и ультразвуковых измерений и расчета корреляции временной динамики для информативных зон поверхности кисти.

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

1. Анализ теоретических данных в рамках исследуемой темы;
2. Проведение измерений скорости кровотока на лучевой артерии с помощью УЗИ с непрерывной регистрацией температуры с помощью тепловизора в состоянии покоя;
3. Выбор информативных зон на кисти, в которых будут проводиться расчеты корреляций;
4. Выделение эндотелиального поддиапазона полученных сигналов;
5. Проведение расчета корреляций во времени 2 типов данных, применение цветовой палитры для пространственной разметки корреляции;
6. Анализ полученных результатов.

Актуальность поставленных задач состоит в том, что в научной литературе применение ангиосомной теории для интерпретации гемодинамики верхних конечностей не обнаружено. Подсчет корреляций во времени позволит установить взаимосвязь колебаний гемодинамики в лучевой артерии и сосудах кисти и поможет в дальнейшем при проведении хирургических вмешательств использовать необходимые области ангиосом.

Структура и объем работы

По своей структуре работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Работа изложена на 53 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка, список литературы из 32 наименований.

Краткое содержание

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формулируется цель исследования, определяется научная новизна и практическая ценность результатов.

В первой главе дается представление о микроциркуляции и гемодинамике крови, описываются основные законы гемодинамики и режимы течения крови, а также частотные диапазоны микроциркуляции, поскольку система микроциркуляции крови является частью сердечно-сосудистой системы человека. Микроциркуляция – это совокупность взаимосвязанных процессов, представляющие собой кровоток в сосудах микроциркуляторного русла (МЦР) и неразрывно связанные с ним обмен различными веществами крови и тканей, а также образование лимфы. Основная функция МЦР – транспорт крови и веществ к тканям и от тканей.

Микроциркуляторное русло, по Куприянову В.В., состоит из следующих структурных единиц: артериолы (диаметр 100 мкм и меньше); прекапиллярные артериолы или прекапилляры (диаметр 25 – 10 мкм); капилляры (диаметр 3 – 40 мкм); посткапиллярные венулы или посткапилляры (диаметр 15 – 20 мкм); венулы (диаметр до 100 мкм). Также выделяют артериоловенулярные анастомозы (диаметр их – от 30 до 500 мкм), являющиеся непосредственными соустьями между артериолами/артериями и венулами/венами, обходящие капиллярные русла.

Наука, с помощью которой изучаются законы движения крови по сосудистой системе, называется гемодинамикой. В основе описания процессов гемодинамики в организме человека является раздел классической физики – гидродинамика. С помощью представления движения крови по сосудам, как движение жидкости по трубам, появилась возможность восприятия закономерностей системы кровообращения, специфических свойств движущейся крови. Градиент давления между различными отделами

сосудистого русла представляет собой движущую силу кровотока, поскольку кровь течет от области высокого давления к области низкого давления. Разница давления задает вектор направления и скорости движения крови. Таким образом, основными параметрами гемодинамики являются: скорость кровотока; давление; сосудистое сопротивление; вязкость крови.

Характер кровотока разделяют на ламинарный и турбулентный. Ламинарное течение – это слоистое стационарное течение жидкости, без завихрений и смешивания слоев жидкости, скользящие относительно друг друга. Профиль скоростей движущихся по сосудам частиц имеет форму параболы. Ламинарный поток крови становится турбулентным после достижения критической скорости, когда частицы крови теряют свою устойчивость в потоке и начинают перемешиваются. Данная скорость обозначается как число Рейнольдса. Турбулентное течение – вихревое течение, образованное хаотичным изменением скорости движения частиц и их траектории (центральное, круговое и радиальное направления). Из-за большого градиента скоростей у поверхности сосуда происходит образование вихрей. Такое течение сопровождается появлением шума, который можно наблюдать на высоких скоростях.

Также известно, что объем кровотока в периферических сосудах варьируется в зависимости от активности различных физиологических подсистем, поэтому было выделено пять частотных диапазонов, в которых проявляется гемодинамическая активность периферических сосудов: эндотелиальный (0,005–0,02 Гц); нейрогенный (0,02–0,05 Гц); миогенный (0,05–0,15 Гц); дыхательный (0,15–0,4 Гц); кардиальный (0,4–2,0 Гц).

Во второй главе описывается ангиосомная теория и ее применение в медицине. В 1987 г. хирурги Taylor и Palmer впервые предложили ангиосомную теорию, согласно которой, ангиосомы – это трехмерные участки тканей, включая кожу, подкожную клетчатку, фасциальные, мышечные и

костные структуры, кровоснабжаемые одной питающей артерией. Таких участков было выделено 40, т.е. ткани тела человека были разделены на отдельные участки с точными границами. Для подтверждения теории в артерии вводили оксид свинца с разноцветными красителями, а в дальнейшем проводили микропрепаровку. Ангиосомная теория была разработана для пластической реконструктивной хирургии: с учетом расположения ангиосом, забранные лоскуты кожи (перфорантный лоскут) при пересадке лучше кровоснабжаются на всей площади поражения. Каждый ангиосом связан с соседним с помощью артериальных анастомозов (без изменения калибра сосуда), либо сосудистой сетью (с понижением калибра сосуда). Крупные артерии к коже проходят в пространстве между мышцами, затем они разделяются на множество терминальных взаимосвязанных ветвей. Таким образом кровь до кожи достигает поэтапно: от крупных глубоких сосудов до сосудистого сплетения через соединительные кожно-фасциальные, кожно-мышечные, кожно-жировые слои. Наружный слой кожи не содержит кровеносных сосудов, поэтому напрямую зависит от процессов диффузии в дерме.

В третьей главе представлен метод УЗИ, как метод регистрации потока крови. Ультразвуковая доплерография обычно используется для выявления нарушения кровообращения во многих сосудах, поскольку способна определять скорость и направление кровотока. Метод основан на оценке сдвига частоты, возникающей, когда звуковые волны сталкиваются с движущимися объектами. Для получения наиболее достоверных данных, необходимо точно позиционировать УЗИ-датчик на сосуде и соблюдать его наклон. Описываются стандартные доплеровские режимы, включающие в себя цветную доплерографию, энергетическую доплерографию и спектральную доплерографию.

В четвертой главе представлены результаты взаимосвязи колебаний гемодинамики в лучевой артерии и сосудах кисти, полученные в ходе

эксперимента. В ходе эксперимента проводилась запись скорости кровотока на лучевой артерии с непрерывной регистрацией температуры кисти условно-здорового испытуемого. Скорость кровотока была записана с помощью переносной диагностической ультразвуковой системы U50 фирмы EDAN Instruments в режиме импульсно-волнового доплера (PW). Температура была записана бесконтактным методом с помощью тепловизионной камеры ThermaCam SC 3000 FLIR Systems (Швеция) с температурной чувствительностью $0,02^{\circ}\text{C}$ и размером матрицы 320×240 пикселей.

Данные сигналов фиксировались после адаптации испытуемого к лабораторным условиям в течение 15–20 минут. В комнате поддерживалась постоянная температура воздуха 24°C и отсутствовали конвекционные потоки (термoneйтральные условия). Испытуемый находился в положении сидя на стуле, правая рука была зафиксирована на подложке из пенопласта (большой палец фиксировался к ладони для минимизации движения конечности) и располагалась так, чтобы тепловизор снимал внутреннюю часть ладони. Длительность непрерывной записи в состоянии покоя составляла 18 минут. (Рис. 1).



а)



б)

Рис. 1 Проведение эксперимента: запись УЗИ и тепловизионных данных

Для обработки полученных сигналов термограммы использовалась программа ThermaCAM Researcher 2.8 HS. Экспериментальные данные обрабатывались в программах MathCad 14, TBF Converter.

В результате эксперимента были получены ультразвуковые данные скорости кровотока, построена их огибающая максимумов, которая применялась для обработки сигнала в дальнейшем. С помощью тепловизионных данных были выбраны информативные зоны на кисти, в которых будут проведены расчеты корреляций – всего 16 участков: по 3 зоны на каждом пальце (дистальная, средняя и проксимальная фаланги) и 4 зоны на внутренней стороне ладони (Рис. 2). Температура ладони колебалась в пределах 32,8 – 35,5 °С. Частота дискретизации съемки составляла 1 Гц.

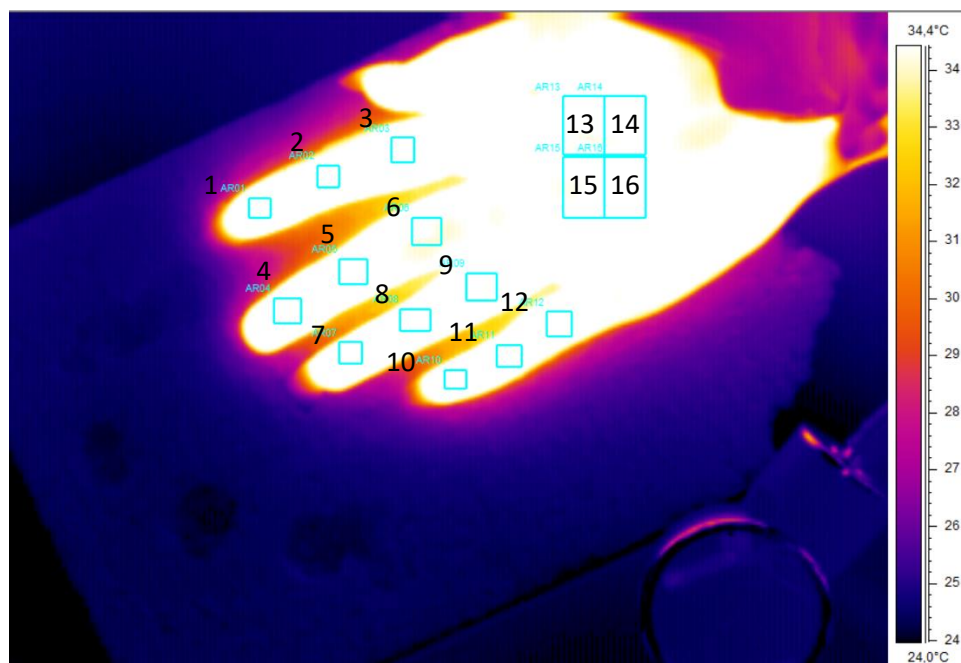


Рис. 2 Зоны в которых проводились анализы вариабельности температуры пальцев (AR01- AR12) и кисти (AR13- AR16)

Графики зависимости максимальной систолической скорости кровотока в лучевой артерии и температуры дистальной фаланги указательного пальца от времени представлены на рис. 3. Частота дискретизации записи УЗИ составляла – 1,2 Гц. Выполнили передискретизацию данных до 1 Гц с помощью линейной интерполяции, поскольку для дальнейшего подсчета корреляций необходима одинаковая частота дискретизации двух сигналов.



Рис. 3 Графики зависимости максимальной скорости кровотока и температуры дистальной фаланги указательного пальца от времени

Для фильтрации сигналов использовали Фурье преобразование, чтобы отделить высокочастотные составляющие сигналов от экспериментальных. Полученные спектры представлены на рис. 4.

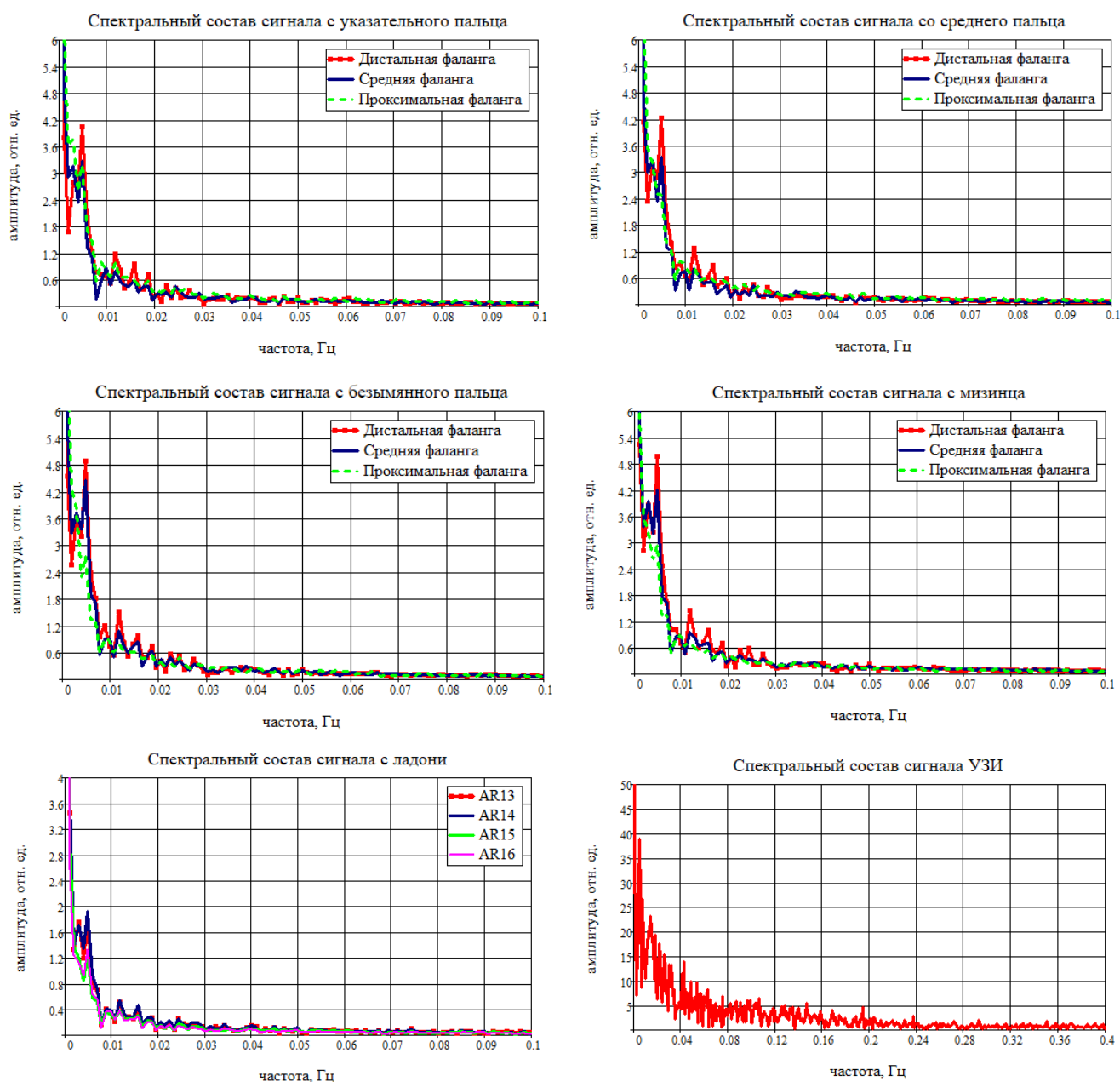
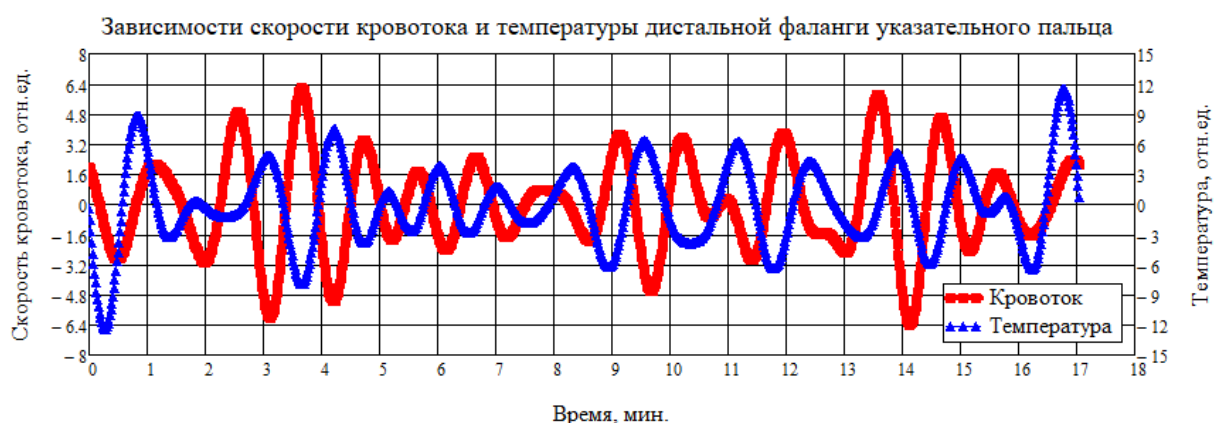


Рис. 4 Спектры сигналов: тепловизионные данные и УЗИ данные

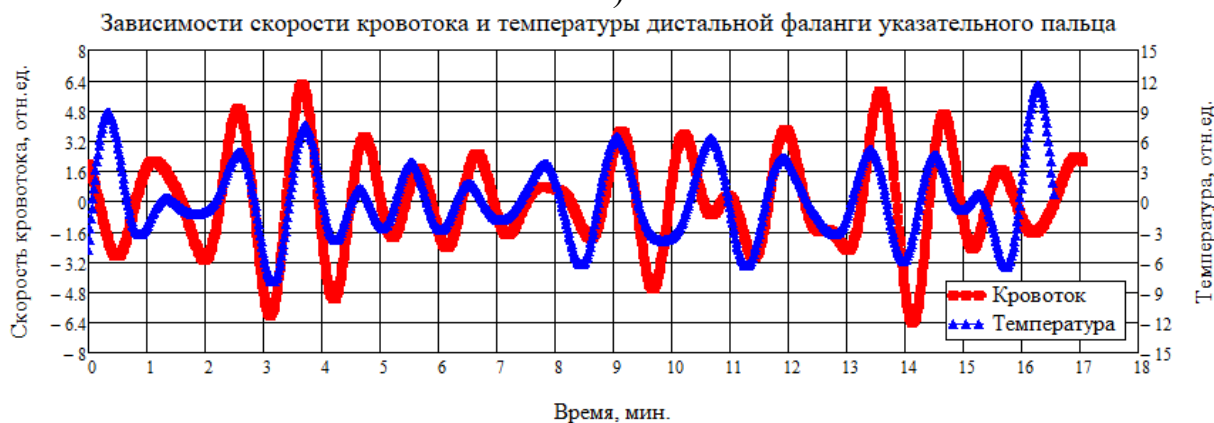
После получения частотно-временных спектров, разбили их на поддиапазоны, в частном случае анализа гемодинамики это эндотелиальный (0.005-0.02 Гц), нейрогенный (0.02-0.05 Гц), миогенный (0.05-0.15 Гц), дыхательный (0.15-0.5 Гц) и кардиальный (0.5-2 Гц) диапазоны колебаний

объемного кровотока. В дальнейшем для анализа корреляций тепловизионных и УЗИ данных использовали только эндотелиальный диапазон.

После этого выполнили обратное преобразование Фурье эндотелиальных диапазонов для того, чтобы перевести сигнал обратно из частотной области во временную для дальнейшего подсчета корреляций. Поскольку после Фурье фильтрации нулевой коэффициент ряда Фурье, т.е. среднее значение, отбрасывается, поэтому отфильтрованный сигнал колеблется относительно нуля (Рис. 5).



а)



б)



в)



г)

Рис. 5 Зависимости скорости кровотока и температуры указательного пальца (а-б); ладони (в-г); б, г – смещенные тепловизионные данные относительно кровотока (УЗИ)

Для определения корреляций тепловизионных и УЗИ-данных во временной области использовали формулу коэффициента корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}}$$

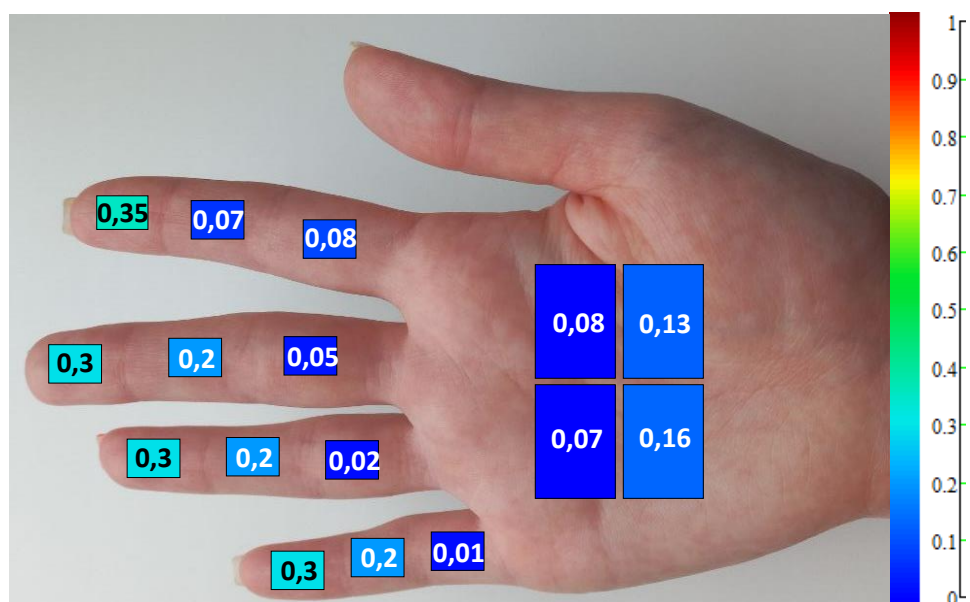
где x_i – значение скорости кровотока в отн. ед. измерения (X), y_i – значение температуры в отн. ед. измерения (Y), $\bar{X}$ – среднее выборочное по X, $\bar{Y}$ – среднее выборочное по Y.

Цветовое картирование корреляции спектров УЗИ-данных лучевой артерии со спектрами в 16 различных зонах интереса тепловизионных данных представлены на рис. 6 а. При условии смещения тепловизионных данных относительно УЗИ (Рис. 5 б, г), согласно таблице 1, значения корреляций увеличиваются (Рис. 6 б). Усредненное время смещения составляет 29,6 с, удовлетворяющее значению фазовой задержки температурных спектральных компонентов относительно компонентов кровотока (время задержки, согласно исследованиям, варьируется в диапазоне от 15 до 30 секунд).

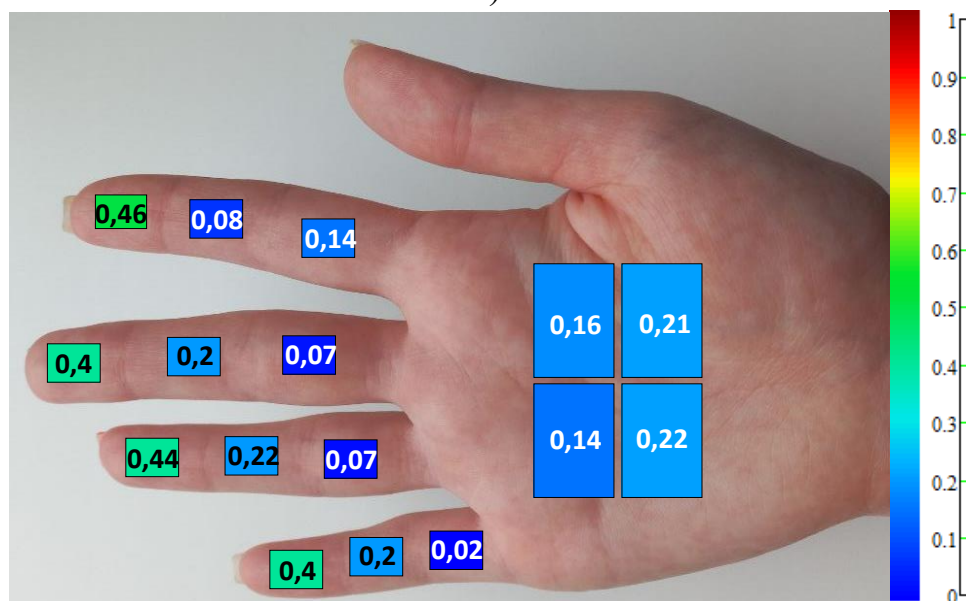
Таблица 1. Сводные данные корреляций тепловизионных и УЗИ-данных

Зона интереса	Наименование области	Корреляция	Время смещения, с	Корреляция после смещения
1	Дист. фаланга указат. пальца	0,35	30	0,46
2	Средн. фаланга указат. пальца	0,07	30	0,08
3	Проксим. фаланга указат. пальца	0,08	28	0,14
4	Дист. фаланга средн. пальца	0,3	28	0,4
5	Средн. фаланга средн. пальца	0,2	30	0,2
6	Проксим. фаланга средн. пальца	0,05	33	0,07
7	Дист. фаланга безымян. пальца	0,3	30	0,44
8	Средн. фаланга безымян. пальца	0,2	30	0,2
9	Проксим. фаланга безымян. пальца	0,02	25	0,07
10	Дист. фаланга мизинца	0,3	30	0,4
11	Средн. фаланга мизинца	0,2	33	0,2
12	Проксим. фаланга мизинца	0.01	33	0,02
13	Ладонь	0.08	27	0,16

14	Ладонь	0,13	27	0,2
15	Ладонь	0,07	30	0,14
16	Ладонь	0,16	30	0,2



а)



б)

Рис. 6 Визуализация корреляции фильтрованных кривых во временной области УЗИ-данных лучевой артерии с фильтрованными кривыми в 16 различных зонах интереса тепловизионных данных для эндотелиального диапазона: а) без смещения; б) со смещением тепловизионных данных относительно УЗИ-данных

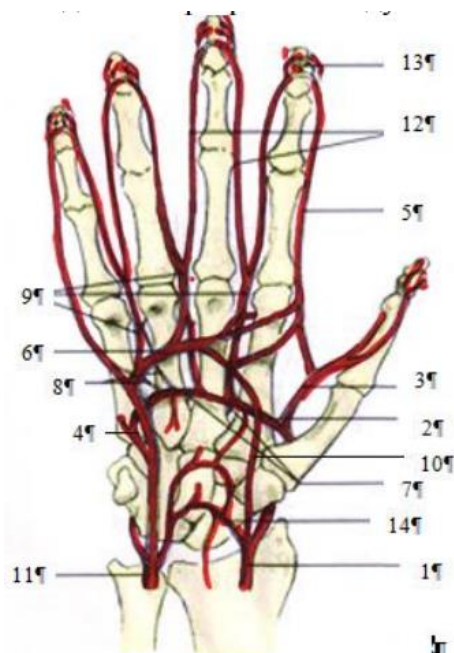
Количественные значения пространственной корреляции спектров в эндотелиальном диапазоне, представлены на рис. 7 в зависимости от анатомической зоны (усреднение по областям: дистальная фаланга, средняя фаланга, проксимальная фаланга, ладонь).



Рис. 7 Пространственное распределение корреляции в зависимости от зоны кисти (усреднение по 3 фалангам различных пальцев и 4 зонам ладони) для эндотелиального диапазона

В результате максимальные значения корреляции обнаруживаются на дистальных фалангах (0,4 – 0,46), а также регистрируется наименьший разброс относительного среднего значения по фалангам различных пальцев. Установлено, что максимальное значение корреляции на указательном пальце (0,46) связано с тем, что ультразвуковые измерения проводились на лучевой артерии, продолжающейся в глубокую ладонную дугу, от которой отходят ветви пальцевых артерий, а в области дистальных фаланг собственные артерии заканчиваются путем формирования капиллярной сети (рис. 8). Также значения корреляций между указательным и остальными пальцами (рис. 6) могут различаться из-за разного снабжения крови и нервов, поскольку согласно строению иннервации кисти и теории ангиосом, участок 39 (передний межкостный), т.е. передняя межкостная артерия, являющаяся артерией в предплечье и передний межкостный нерв, являющийся

исключительно двигательным нервом, иннервирует длинный сгибатель большого пальца, сгибатель I и II пальцев и квадратный пронатор.



- 1 – лучевая артерия;
- 2 – глубокая ладонная дуга;
- 3 – артерия большого пальца;
- 4 – анастомоз с глубокой ветвью локтевой артерии;
- 5 – дорсальная артерия лучевой стороны указательного пальца;
- 6 – поверхностная артериальная дуга;
- 7 – глубокие перфоранты;
- 8 – ладонная пястная артерия;
- 9 – ладонные пальцевые артерии;
- 10 – поверхностная ладонная ветвь;
- 11 – локтевая артерия;
- 12 – артерии пальцев;
- 13 – капиллярная сеть.

Рис. 8 Артерии кисти

Также, при переводе температурных данных в кровоток, используя приложение TBF-converter, и дальнейшем подсчете корреляций между полученным кровотоком и УЗИ-сигналом в эндотелиальном диапазоне, значения корреляций не превышали 0,47, что соответствует значению расчетных данных.

Заключение

В результате в данной работе описаны строение микроциркуляторного русла, основные законы гемодинамики, режимы течения крови, частотные диапазоны микроциркуляции и ангиосомная теория.

В ходе анализа экспериментальных данных установлено, что максимальное значение корреляции на указательном пальце (0,46) в эндотелиальном диапазоне связано с тем, что ультразвуковые измерения проводились на лучевой артерии, продолжающейся в глубокую ладонную дугу, от которой отходят ветви пальцевых артерий, а в области дистальных фаланг собственные артерии заканчиваются путем формирования капиллярной сети. Так, в первую очередь кровоснабжение получает указательный палец. Также значения корреляций между указательным и остальными пальцами могут различаться из-за разного снабжения крови и нервов.

Подсчет корреляций во времени установило взаимосвязь колебаний гемодинамики в лучевой артерии и сосудах кисти, что поможет в дальнейшем при проведении хирургических вмешательств использовать необходимые области ангиосом, т.к. знание строения ангиосома позволит проводить реваскуляризацию части тела, а также создавать многокомпонентные лоскуты, состоящие из кожи, мышц, нервов, сухожилий, костей, питаемых одной артериовенозной системой.

