

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

**Раздельное детектирование активности потовых желез и  
гемодинамики с помощью спектральной обработки  
динамических термограмм**

АВТОРЕФЕРАТ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА

студента 4 курса 4021 группы

направления 03.03.02 «Физика»

Института физики

Чуланова Кирилла Алексеевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.,

должность, уч. ст., уч. зв.



9.06.22

личная подпись, дата

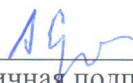
А.А. Сагайдачный

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.



9.06.22

личная подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2022

## **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение наружной секреции человека является важным аспектом в биомедицине. В частности, изучение потовых желез. Большой интерес к этой области обусловлен взаимосвязью потовых желез с симпатической иннервацией человеческого организма [1-2]. Известно, что активность потовых желез зависит от различных факторов, таких как терморегуляция, психоэмоциональная нагрузка, физическая нагрузка и т.д. Чаще всего нарушение функционала потовых желез зависит от различных патологий (сахарный диабет, болезнь Паркинсона, хроническая сердечная недостаточность). Они, в свою очередь, связаны с нарушением вазомоторной и судомоторной активностью организма. На данный момент существует множество методов оценки функциональности потовых желез в реальном времени. Однако, некоторые методы обеспечивают лишь интегральную оценку выделения единичной потовой железы, которая не привязана к пространственным координатам. С использованием инфракрасной томографии, детектирование активности потовых желез и визуализации открытых потовых пор позволило открыть множество новых физиологических эффектов.

### **Актуальность темы:**

Разработка нового метода отдельного детектирования активности потовых желез и гемодинамики с помощью спектральной обработки.

### **Цели и задачи работы:**

Целью данной дипломной работы является разработка нового метода отдельного детектирования активности потовых желез и гемодинамики с помощью спектральной обработки динамических термограмм. Основными задачами дипломной работы являются:

- Подробное рассмотрение раздела физиологии человека, который посвящен гемодинамике крови. Изучение вазомоторной активности. Описание вазомоторной регуляции (механизмы регуляции тонусов сосудов).

- Изучение понятия судомоторной активности. Подробное рассмотрение функции управления с помощью вегетативной нервной системой деятельностью потовых желез. Рассмотрение структуры кожи, потовой железы. Иннервации кожи кисти
- Анализ трех известных методов детектирования активности потовых желез. Изучение пробы с глубоким вдохом.
- Разработка метода детектирования, основанного на построении термограмм потовых желез и отдельных термограмм гемодинамики крови. Реализация программы в Mathcad.

## Основное содержание работы

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

*В первой главе* рассматриваются основные понятия гемодинамики.

*В разделе один первой главы* рассматривается периферическая сосудистая система.

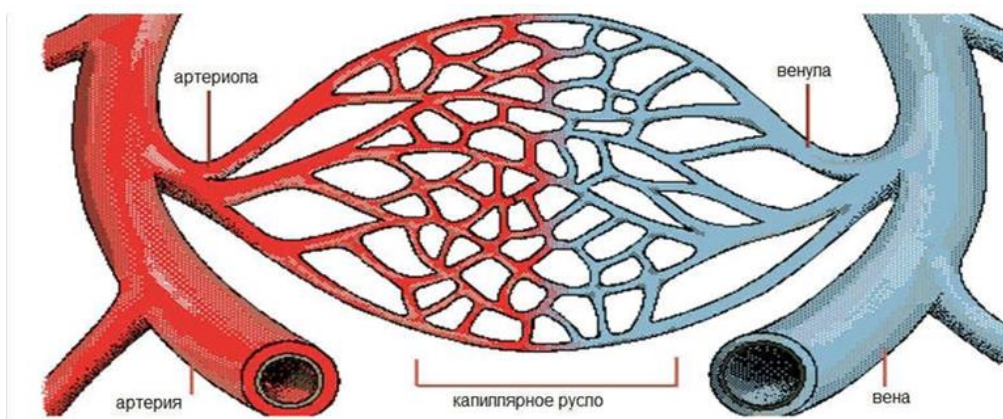
Гемодинамика – это постоянное движение крови внутри сосудов, которое возникает из-за разности давления (гидростатического) в различных участках кровеносной системы. Благодаря разности давления внутри кровеносной системы формируется непрерывный ток крови. Ток крови, в свою очередь зависит от сопротивления стенок сосудов относительно крови, от радиуса и длины, а также вязкости крови [3-4].

Фиксация гемодинамики крови происходит по измерению сердечного выброса, то есть по минутному объему кровотока сердца. Скорость крови равна расстоянию, которое она преодолевает за единицу времени, независимо от переменного объема.

Кровеносная система состоит из сердца и обширной разветвленной системы сосудов, содержащих кровь, основной функцией которой является транспортировка кислорода, питательных веществ и тепла по всему телу. В медицине термин “гемодинамика” часто относится к основным показателям сердечно-сосудистой функции, таким как артериальное давление или сердечный выброс.

Периферическая сосудистая система, представленная на рисунке ниже, включает в себя все кровеносные сосуды, которые существуют вне сердца. Периферическая сосудистая система классифицируется аортой и ее ветвями, которые включают в себя:

- Артериолы;
- Капилляры;
- Вены и вены возвращают кровь к сердцу;



### Периферическая сосудистая система

*Во втором разделе первой главы изучается понятие крови.*

Гемодинамика включает в себя разные понятия: сосуды, кровеносная система и т.д., но стоит упомянуть такое важное понятие, как кровь, её вязкость и структуру. Рассмотрим подробно этот аспект. Кровь представляет собой двухфазную суспензию форменных элементов (эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов) (Рис.2), взвешенных в водном растворе органических молекул, белков и солей, называемых плазмой. Вязкость крови зависит от существующих сил сдвига (кровь ведет себя как неньютоновская жидкость) и определяется гематокритом, вязкостью плазмы, агрегацией эритроцитов и механическими свойствами эритроцитов. Эритроциты обладают высокой степенью деформации, и это физическое свойство значительно способствует улучшению кровотока как в условиях объемного потока, так и в микроциркуляции. Тенденция эритроцитов подвергаться обратимой агрегации является важным фактором, определяющим кажущуюся вязкость, поскольку размер агрегатов эритроцитов обратно пропорционален величине сил сдвига; агрегаты рассеиваются с увеличением сил сдвига, а затем реформируются в условиях низкого потока или статики. Агрегация эритроцитов также влияет на текучесть крови, особенно в областях с низким сдвигом кровеносной системы.

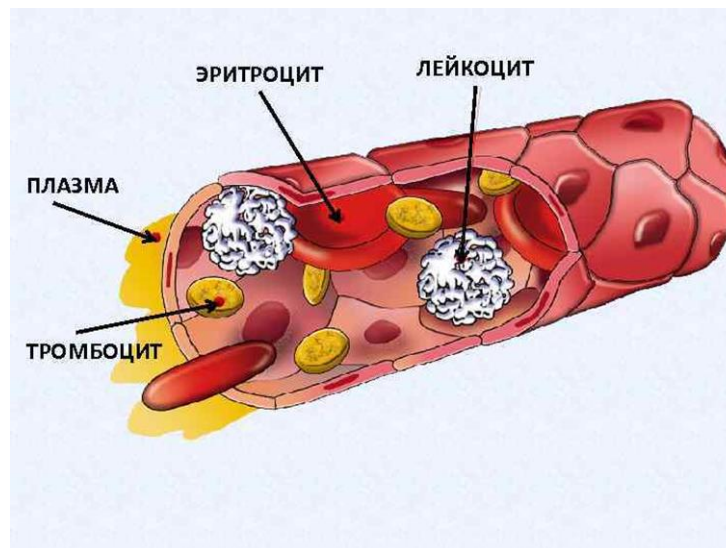


Рис.2. Структуру крови в сосуде.

*В третьем разделе первой главы рассматриваются механизмы регуляции и вазомоторная активность.*

Симпатическая нервная система в первую очередь иннервирует кровеносные сосуды. Тонкий баланс между влиянием симпатической и парасимпатической нервных систем отвечает за основной физиологический сосудистый тонус. Специализированные рецепторы, расположенные в дуге аорты и сонных артериях, получают информацию о кровяном давлении (барорецепторы) и содержании кислорода (хеморецепторы) из проходящей крови. Затем эта информация передается в ядро одиночного тракта через блуждающий нерв. После этого происходит сужение или расслабление кровеносных сосудов, определяемое симпатической реакцией организма.

Так называемой вазомоторной активностью являются различные нервносимпатические воздействия на сосуды (изменение их диаметра, упругости). Например, влияние ядра гипоталамуса.

*Во второй главе изложены: принцип судомоторной активности, структура потовой железы и кожи, болезнь Паркинсона и иннервация кожи.*

*В первом и втором разделе второй главы рассмотрены принцип судомоторной активности, структура кожи и потовой железы.*

Судомоторные сигналы исходят из терморегуляторного центра в гипоталамусе, менее модифицируются барорефлексами, чем сигналы для

кожной вазодилатации в сердечно-сосудистом центре в мозговом веществе, и достигают потовых желез, которые не синхронизированы с сердечным циклом [4-5].

Кожа разделена на несколько слоев (Рис.3). Эпидермис состоит в основном из кератиноцитов [7-8]. Под эпидермисом находится базальная мембрана (также известная как дермо-эпидермальное соединение); эта узкая многослойная структура закрепляет эпидермис на дерме. Слой под дермой, гиподерма, состоит в основном из жира.

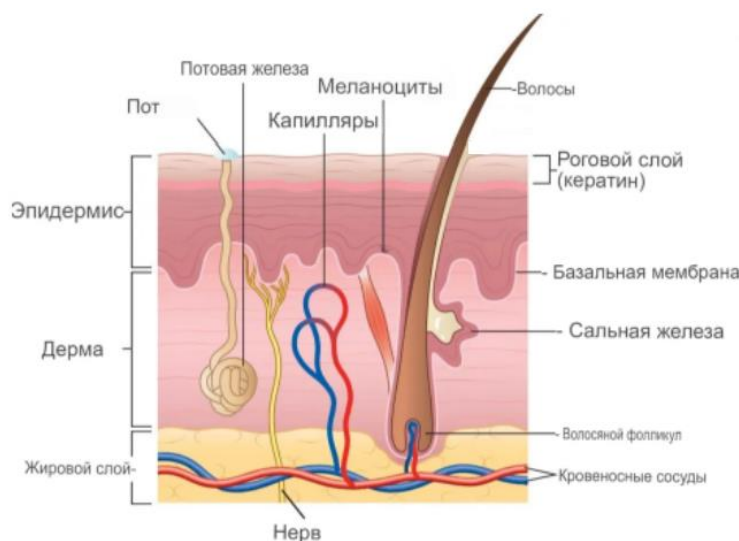


Рис.3. Строение кожного покрова

Одной из важных функций кожи является защита тела от холода или тепла и поддержание его постоянной температуры. Это достигается за счет изменений кровотока через кожное сосудистое русло. Когда температура окружающей среды или тела повышается сосуды расширяются, кожа краснеет и на поверхности образуются капли пота (вазодилатации = больший кровоток = большая прямая потеря тепла). В холодные периоды кровеносные сосуды сужаются, предотвращая выход тепла (сужение сосудов = меньший кровоток = уменьшенная потеря тепла). Секреция и испарение пота с поверхности кожи также помогает охладить тело.

Структура потовой железы. Потовые железы представляют собой трубчатые структуры, расположенные в более глубоких тканях кожи, которые содержат богатую сеть капилляров и нервных волокон (Рис.4).

Потовые железы – это экзокринные железы, распределенные по всей поверхности тела. Их иногда называют судороговыми железами. Эти названия происходят от латинского слова “*sudor*”, что означает пот [8-9].



Рис.4. Строение потовой железы.

Секреторные единицы потовых желез окружены сократительными миоэпителиальными клетками, которые помогают секретировать продукт железы. Сокращение этих клеток контролируется либо гормонами, либо иннервацией кожи.

*В третьем и четвертом разделе второй главы описаны болезнь Паркинсона и иннервация кожи кисти.*

Болезнь Паркинсона (БП) является прогрессирующим нейродегенеративным заболеванием, патологическим признаком которого является потеря дофаминергических нейронов [12-14]. Основными двигательными признаками БП являются тремор, ригидность, акинезия и нарушение походки, характеризующееся согнутой осанкой и короткими шаркающими шагами. БП чаще всего встречается у людей пожилого возраста, но нередко обнаруживается у молодых людей и, хотя и редко, может встречаться у подростков. У молодых пациентов дистонические симптомы встречаются чаще.



Нарушение судомоторной функции при болезни Паркинсона происходит на позднем этапе. Симпатический судомоторный ответ используется для оценки преганглионарной и постганглионарной симпатической активности путем измерения изменения напряжения, возникающего на поверхности кожи после электрической стимуляции. При проявлении небольших аномалий судомоторного ответа, пациенту, проходящему данное обследование, стоит пройти более обширное обследование (сделать ЭЭГ, МРТ головы). Так же при БП наблюдается нарушение активности потовых желез. Это связано с нарушением иннервации конечностей, но также нарушение функции иннервации советуется ранним стадиям ряда патологий, например сахарный диабет.

*Кожа* является высокочувствительным органом. Она плотно иннервируется различными типами сенсорных нервных окончаний, которые различают боль, температуру и прикосновение. Также присутствуют вегетативные нервные волокна, которые полностью происходят от симпатических (холинергических) нейронов. Во время всех фаз заживления кожных ран (воспалительные, пролиферативные и ремоделирующие фазы) задействованы нейромедиаторы [15-20]. Несколько клинических наблюдений показывают, что повреждение периферической нервной системы влияет на заживление ран, что приводит к хроническим ранам в пораженной области. У пациентов с кожными сенсорными дефектами из-за лепроматозной проказы, травмы спинного мозга и диабетической невропатии развиваются язвы, которые не заживают. Кроме того, многочисленные экспериментальные наблюдения показывают, что нейрогенные стимулы глубоко влияют на восстановление раны после травмы и что замедленное заживление раны наблюдается на животных моделях после хирургической резекции кожных нервов.

Ответвления кожных нервов предплечья состоят из различных секторов. Медиальный из плечевого нервного сплетения – это чувствительный нерв и латеральный из плечевого нервного сплетения — смешанный проходят в виде стволов только в подкожной клетчатке внутренней поверхности нижней трети

предплечья, т. е. выше уровня запястья. В области запястья они вступают в взаимодействия с ладонными кожными ветвями срединного и локтевого нервов (Рис.5).

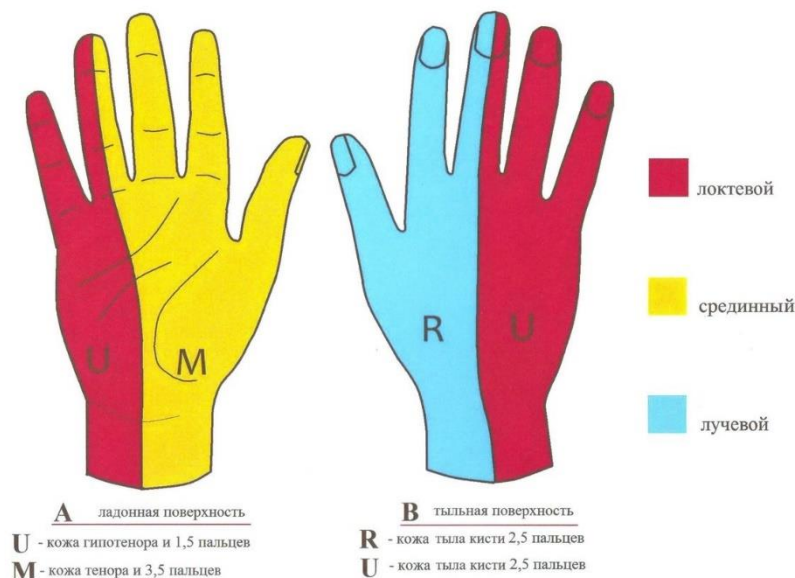


Рис.5. Принцип иннервации кожи рук.

В третьей главе проведен анализ трёх методов детектирования активности потовых желёз.

Метод Кружвицкого является бесконтактным, пассивным и обеспечивает высокое временное и пространственное разрешение [10]. Активность пор контролируется на лице и на волярных поверхностях дистальных и медиальных фаланг указательного и среднего пальцев. В момент наблюдения участники эксперимента совершают серию из шести глубокий вдохов и выдохов. Переходные реакции также наблюдались на лице, хотя участки пальцев, по-видимому, были более чувствительными. Результаты показывают, что тепловизионная визуализация реакции пор может обеспечить полезную бесконтактную корреляционную меру для электротермических реакций, зарегистрированных в соответствующих местах.

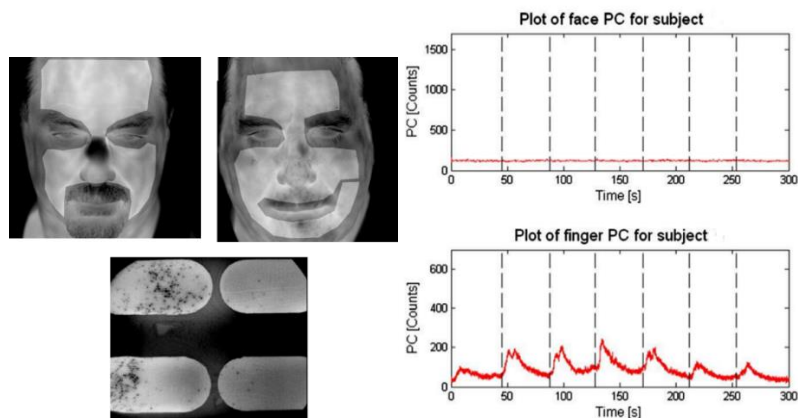


Рис 6. Активность потовых пор Реакции кожи пальцев.

В методе *визуализации лицевых признаков нейрофизиологических реакций* используют структуру обнаружения периферических симпатических реакций с помощью визуализирующих средств [11]. Измерения проводятся в трех областях лица, имеющих симпатическое значение, то есть в периорбитальной, супраорбитальной и верхнечелюстной областях. В данном методе анализируется симпатическая иннервация верхнечелюстной области. Поскольку измерения изображений имеют тепловую природу и состоят из нескольких компонентов переменной частоты (кровотока, активации потовых желез и дыхания), вейвлет-преобразование выбрали в качестве основы анализа изображений. Вейвлет-анализ энергии количественно демонстрирует, что лицевые симпатические каналы могут быть использованы для обнаружения возбуждения. Измерения имеют значительный шум из-за несовершенства отслеживания и сегментации тканей (Рис.7). Анализ изображений основан на сигналах гальванического кожного ответа, которые считаются золотым стандартом в периферических нейрофизиологических и психофизиологических исследованиях. Результаты показывают, что мониторинг лицевых каналов дает аналогичную обнаруживающую способность (Рис.8). Однако детальная количественная оценка обозначений, возможна посредством соответствующего моделирования. На данный момент довольно сложна в лицевых каналах. Данный метод открывает новую область исследований, которая приводит к ненавязчивым технологиям скрининга в нейрофизиологии и психофизиологии.



Рис.7. Измерения в трех областях лица

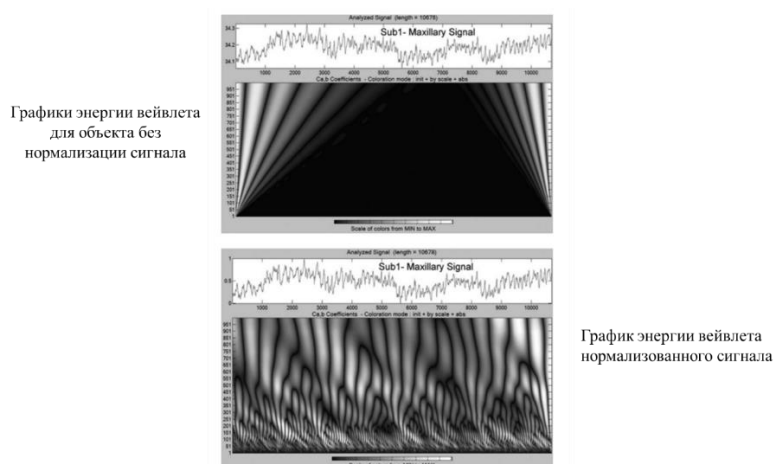


Рис 8. Вейвлет-анализ энергии

*Метод термографического анализа реакции потовых желез пальцев рук, основан на подсчете количества открытых потовых пор как функцию времени [6]. Представлена возможность анализа количественных потовых желез, которые активизируются на левой и правой руках в ответ на дыхательную пробу. Сопоставлена температура гемодинамики крови, количества открытых пор и колебаний объемного кровотока [21]. Активность выводных протоков потовой железы приводит к появлению низкоамплитудных высокочастотных колебаний температуры кожи, а колебания кровотока приводит к высокоамплитудным частотам. Медицинский потенциал этого метода заключается в том, что динамика активности потовых желез связана с деятельностью симпатической нервной системы. Снижению количества открытых потовых пор свидетельствует о поражении малых нервных волокон (Рис.9).*

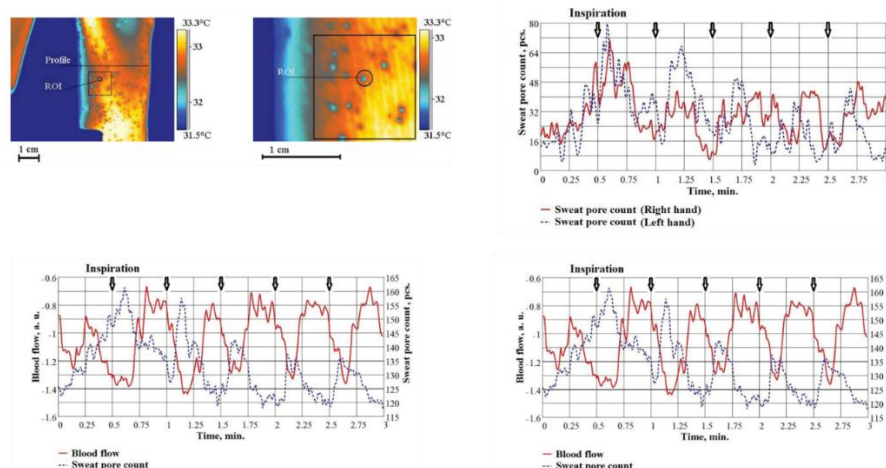


Рис.9. Анализ реакции потовых желез пальцев рук, основан на подсчете количества открытых потовых пор как функцию времени

В четвертой главе подробно описан алгоритм написания метода отдельного детектирования динамических термограмм пота и термограмм крови.

Условия проведения записи эксперимента. Испытуемым являлся мужчина в возрасте 37 лет без сердечно-сосудистых заболеваний, без нарушения вазомоторной активности и с нормальной судомоторной активностью. Измерения выполнялись в лабораторных условиях при температуре  $20 \pm 0.2$  °C.

С помощью охлаждаемой тепловизионной производели замеры температуры фаланги большого пальца левой руки в момент нагрузочной пробы, которая заключала в себе кратковременную задержку дыхания на максимальной высоте вдоха.

Проба состояла из трех глубоких вдохов в течении 2 минут. Диапазон колебания температуры составил 33,8 – 36,3°C. Сохранил полученную термограмму в формате SEQ через ThermoCAM Researcher Professional (Рис.10).

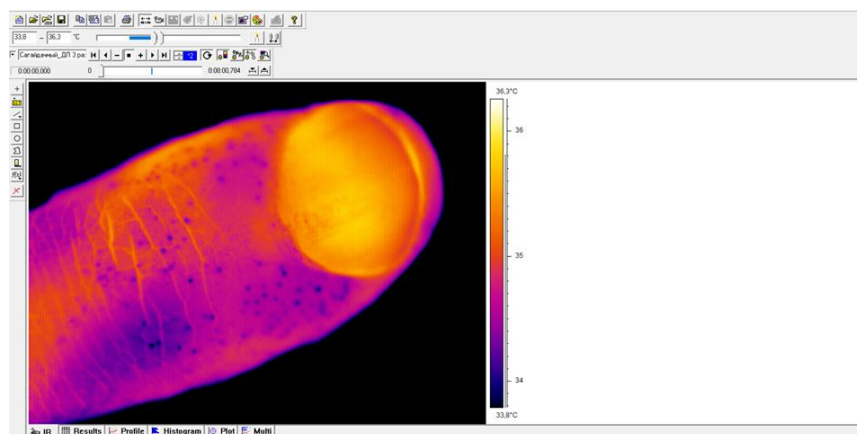


Рис.10. Первый кадр полученной термограммы фаланги пальца.

Полученный файл сессии записи термограммы конвертировал через ThermaTransform в текстовые файлы.

Дальнейшая реализация метода происходила в программе Mathcad

Используя встроенную функцию submatrix, сформировали матрицу данных выбранного файла (320 X 240). Чтобы в дальнейшем провести спектральный анализ, нужно преобразовать полученные двумерные матрицы в одномерный вектор. Написал функцию Dim (One). Эта функция преобразования двумерных значений одних и тех же пикселей на протяжении всего времени в одномерный вектор.

Написали функцию Prog, которая является циклом перебора файлов и добавления их в таблицу. Количество добавляемых файлов зависит от особенностей реализации Фурье фильтрации в Mathcad (особенностью является преобразование вектора вещественных значений, содержащего  $2^n$  элементов, которое возвращает вектор размером  $2^{n-1} + 1$ ) (Рис. 11)

$2^n$	Имя файла	Возвращает строку, образованную последовательным объединением строк BaseName, num2str(i), ".txt"
<code>Prog := for i ∈ 1..2047</code>	<code>Name ← concat(BaseName, num2str(i), ".txt")</code>	Формат
	<code>Data ← READPRN(Name)</code>	Номер файла
	<code>MtrOne ← Dim(submatrix(Data, 0, 239, 0, 319))</code>	

Рис. 11. Цикл перебора файлов и добавление их в таблицу.

Затем составили главный блок программы (Рис. 12). Этой частоте соответствует пороговое значение равное 3,575. Округлим это значение до 4, так как цикл работает только для целых значений. Это значение буду использовать

при подстановке его в функцию Program на место аргумента Porog.

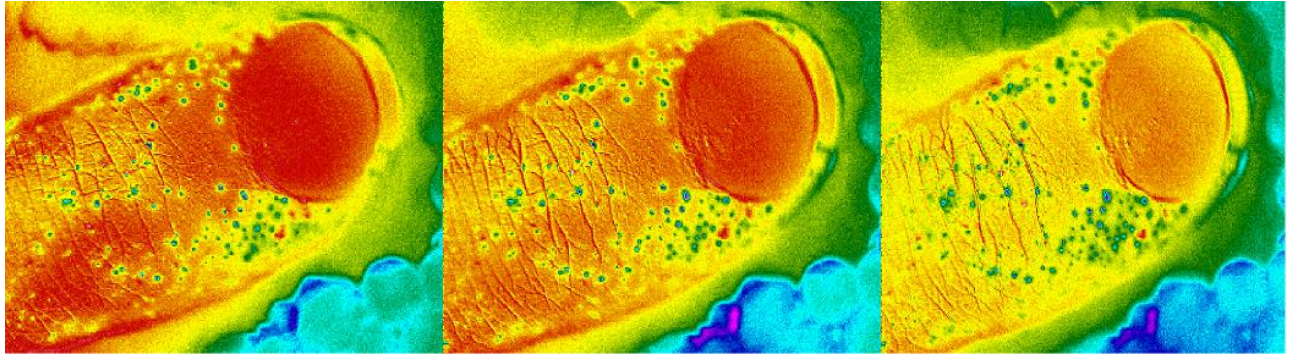
```
Program(DataMtr, Porog, R, C) :=
  BaseName ← 1
  for NPix ∈ 0..cols(DataMtr) - 1
    Sb ← fft[(DataMtr)^(NPix)]
    Ss ← Sb
    for k ∈ 0..Porog - 1
      Ss_k ← 0
    for p ∈ Porog + 1..rows(Sb) - 1
      Sb_p ← 0
    BloodRes ← ifft(Sb)
    SweatRes ← ifft(Ss)
    Blood^(NPix) ← BloodRes
    Sweat^(NPix) ← SweatRes
  Sweat ← Sweat^T
  Blood ← Blood^T
  for NFrame ∈ 0..cols(Sweat) - 1
    for j ∈ 0..C - 1
      for i ∈ 0..R - 1
        FrameSW_i,j ← Sweat_j,R+i,NFrame
    for j ∈ 0..C - 1
      for i ∈ 0..R - 1
        FrameBL_i,j ← Blood_j,R+i,NFrame
  Name ← concat("K:\Sweat\SweatFrame", num2str(NFrame), ".txt")
  WRITEPRN(Name, FrameSW)
  Name1 ← concat("K:\Blood\BloodFrame", num2str(NFrame), ".txt")
  WRITEPRN(Name1, FrameBL)
```

Рис. 12. Главный блок программы детектирования активности потовых желез и гемодинамики.

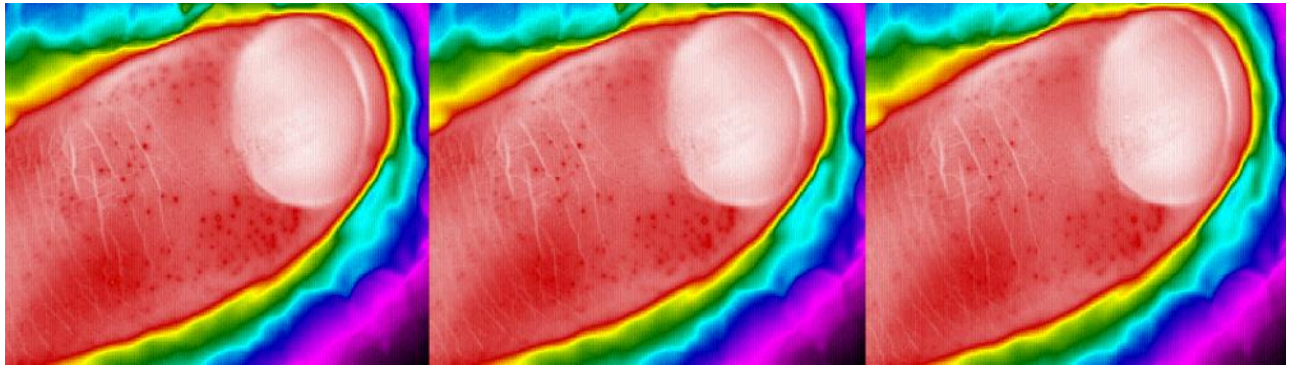
Присвоили Program к Final. Подставляем нужные аргументы в Program и производим запись файлов в отдельные папки. Вычисление 2048 файлов составили 33 часа 43 минуты.

После записи файлов в папки, создал модуль преобразования числового файла в цветное изображение.

С помощью этого модуля раскрасили файлы термограмм гемодинамики и активности потовых желез. Записали новые файлы в формате JPG (Рис. 13.).



Активность потовых желез



Гемодинамика кровотока

Рис. 13. Раздельные термограммы гемодинамики крови и активности потовых желез.



## **Заключение.**

В данной работе изучен раздел, посвященный гемодинамике крови. Рассмотрено понятие вазомоторной активности и механизмы регуляции тонусов сосудов. Проведен анализ трех методов детектирования судомоторной активности (активно потовых желез).

Разработан программный модуль отдельного детектирования активности потовых желез и гемодинамики. Показано, что между гемодинамикой кровотока и активностью потовых желез есть видимые различия. Полученные данные могут быть достаточно серьезным источником данных для количественного анализа. Использование предложенного алгоритма обработки динамических термограмм предоставило возможность анализировать термограммы активности пота и кровотока по отдельности.

Практическое применение описанного метода продемонстрировало наличие ряда интересных эффектов: наличие детектируемых колебаний температуры кожи с частотой выше миогенного диапазона, обусловленных активизацией потовой железы и уменьшение объемного кровотока, в пальцах в ответ на дыхательную пробу.

Дальнейшая разработка метода планируется на языке программирования Python (оптимизация метода).

Новый метод представляет интерес для раннего выявления различных форм нейропатии мелких сосудов, например, при сахарном диабете, болезни Паркинсона и синдроме Рейно.

## Список литературы.

- 1 Bujalkova M, Straka S, Jureckova A. Hippocrates' humoral pathology in nowadays reflections. Bratisl Lek Listy . 2001; 102 489-492
- 2 Riddle J M. Theory and practice in medieval medicine. Viator . 1974; 5 157-184
- 3 Schultz S G. Willam Harvey and the circulation of the blood: The birth of a scientific revolution and modern physiology. News Physiol Sci . 2002; 17 175-180
4. Щанкин, А. А., Щанкина, Г. И., & Арбузов, Н. Н. (2016). Гемодинамика и физическая нагрузка. *Science Time*, (11 (35)), 558-564. *Science Time*, no. 11 (35), 2016, pp. 558-564.
5. Boulanger C, Vanhoutte PM. [The role of the endothelium in the regulation of vasomotor activity] *Archives des Maladies du Coeur et des Vaisseaux*. 1991 Jan;84 Spec No 1:35-44. PMID: 2053832.
6. Сагайдачный, А. А., Майсков, Д. И., Залетов, И. С., Фомин, А. В., & Скрипаль, А. В. (2020). Детектирование активности единичных потовых желез методом макротермографии и ее взаимосвязь с температурой кожи и периферической гемодинамикой. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика*, 20(2), 103-115.
7. Знаменская, И. А., Коротеева, Е. Ю., Хахалин, А. В., Шишаков, В. В., Исайчев, С., & Черноризов, А. М. (2017). Термографическая визуализация и анализ изображений динамических процессов в области лица. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*, (6), 88-93.
8. Tucker WD, Arora Y, Mahajan K. Anatomy, Blood Vessels. In: StatPearls. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL); 2021. PMID: 29262226.
9. Ogawa, T., & Sugeno, J. (1993). Pulsatile sweating and sympathetic sudomotor activity. *The Japanese journal of physiology*, 43(3), 275–289.
10. Krzywicki, Alan T., Gary G. Berntson, and Barbara L. O'Kane. "A non-contact technique for measuring eccrine sweat gland activity using passive thermal imaging." *International Journal of Psychophysiology* 94.1 (2014): 25-34.
11. Shastri, D., Merla, A., Tsiamyrtzis, P., & Pavlidis, I. (2008). Imaging facial signs of neurophysiological responses. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*,

56(2), 477-484.

12. Znamenskaya I. A., Koroteyeva E. Y., Khakhalin A. V., Shishakov V. V., Isaichev S. A., Chernorizov A. M. Infrared Thermography and Image Analysis of Dynamic Processes around the Facial Area // *Moscow University Physics Bulletin*. 2017. Vol. 72, № 6. P. 595–600.

13. Znamenskaya I., Koroteeva E., Isaychev A., Chernorizov A. Thermography-based remote detection of psychoemotional states // *QIRT 2018 Proceedings*. Vol. 1. P. 51–56. DOI: 10.21611/qirt.2018.p13

14. Allen J., Frame J. R., Murray A. Microvascular blood flow and skin temperature changes in the fingers following a deep inspiratory gasp // *Physiological Measurement*. 2002. Vol. 23, № 2. P. 365–373. DOI: 10.1088/0967-3334/23/2/312

15. Allen J., Di Maria C., Mizeva I., Podtaev S. Finger microvascular responses to deep inspiratory gasp assessed and quantified using wavelet analysis // *Physiological Measurement*. 2013. Vol. 34, № 7. P. 769–779.

16. Ivanitsky G. R. Modern matrix thermovision in biomedicine // *Advances in Physical Sciences*. 2006. Vol. 49, № 12. P. 1263–1288. DOI: 10.1070/PU2006v049n12ABEH006163

17. Shastri, D.J., Merla, A., Tsiamyrtzis, P., & Pavlidis, I.T. (2009). Imaging Facial Signs of Neurophysiological Responses. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 56, 477-484.

18. Sato K., Kang W. H., Saga K., Sato K. T. Biology of sweat glands and their disorders. II. Disorders of sweat gland function // *Journal of the American Academy of Dermatology*. 1989. Vol. 20, № 5. P. 713–726. DOI:10.1016/S0190-9622(89)70081-5

19. Juniper Jr. K., Blanton D. E., Dykman R. A. Palmar skin resistance and sweat-gland counts in drug and non-drug states // *Psychophysiology*. 1967. Vol. 4, № 2. P. 231–243. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1967.tb02762.x

20. Vainer B. G. FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // *Physics in Medicine & Biology*. 2005. Vol. 50, № 23. P. 63–94.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several stylized, overlapping loops and lines, positioned in the lower right quadrant of the page.