



МИНПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»  
(ТГПУ им. Л.Н. Толстого)

Кафедра медико-биологических дисциплин и фармакогнозии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)  
на тему:  
ОСОБЕННОСТИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В КОЖЕ РАЗНЫХ  
УЧАСТКОВ ТЕЛА СТУДЕНТОВ ИЗ АФРИКИ**

Выполнена:  
студенткой 4 курса группы 821561  
очной формы обучения  
факультета естественных наук  
направления подготовки 06.03.01 Биология  
направленность (профиль) Биоэкология  
**Глазковой Еленой Сергеевной**

Тула, 2020

**Работа выполнена на факультете естественных наук**

**ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л.Н. Толстого»**

Научный руководитель – Коняева Татьяна Николаевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры медико-биологических дисциплин и фармакогнозии

09.06.2020 г.

*(Подпись)*

**Работа обсуждена на заседании кафедры медико-биологических дисциплин и фармакогнозии (протокол № 9 от 28.05.2020) и допущена к защите**

Заведующий кафедрой медико-биологических дисциплин и фармакогнозии, кандидат биологических наук, доцент Якушина Валентина Сергеевна

09.06.2020 г.

*(Подпись)*

Защита состоится «23» июня 2020 г. в 09.00 часов.

**Декан факультета естественных наук**

**И.В. Шахкельдян**

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 4  |
| ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....   | 7  |
| 1.1. Кожа как объект исследования.....   | 7  |
| 1.1.1. Строение кожи .....   | 7  |
| 1.1.2. Структурно-функциональная организация микроциркулярного русла ....  | 10 |
| 1.1.3. Микроциркуляция кожи человека .....   | 14 |
| 1.2. Расово-этнические особенности кожи .....  | 18 |
| 1.2.1. Особенности пигментации кожи людей разных рас .....   | 18 |
| 1.2.2. Гипотезы потемнения кожи.....   | 21 |
| 1.3. Лазерная доплеровская флоуметрия как метод исследования<br>микроциркуляторного русла.....   | 24 |
| 1.3.1. Физические основы метода .....  | 24 |
| 1.3.2. Влияние кожного хромофора меланина на регистрируемые сигналы ЛДФ<br>.....   | 27 |
| ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....   | 32 |
| ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ .....  | 35 |
| 3.1. Особенности микроциркуляции крови в коже предплечья у темнокожих<br>студентов.....  | 35 |
| 3.2. Особенности микроциркуляции крови в коже концевой фаланги пальца руки<br>у темнокожих студентов.....                              | 39 |
| 3.3. Особенности микроциркуляции крови в коже лба у темнокожих студентов.  | 43 |
| 3.4. Сихронизация показателей ЛДФ-грамм кровотока кожи в правом и левом<br>предплечье темнокожих студентов .....                       | 45 |
| 3.5. Синхронизация показателей ЛДФ-грамм кровотока кожи в дистальной<br>фаланге пальцев правой и левой руки темнокожих студентов ..... | 48 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 52 |
| ВЫВОДЫ .....   | 55 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....   | 57 |

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из решающих значений для эволюции человека было изменение цвета кожи, которое происходило в период миграции людей и в условиях изменения интенсивности и спектрального состава солнечного излучения [36]. При изменении физических характеристик окружающей среды изменяются и виды. Особи, более приспособленные к новым условиям, имеют преимущество в выживании. В течение многих поколений эволюция человека путем естественного отбора привела к изменениям в генетическом и фенотипическом составе вида. Таким образом, в условиях фрагментации ареала различные популяции вида с успехом адаптировались к различным условиям инсоляции.

Известно, что применение метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) в исследованиях динамики микрососудистого кровотока в норме и при патологии эффективно в случае исследования людей со светлой кожей (кожей с низкой концентрацией меланина), т.к. оптические свойства такой кожи позволяют проникать лазерному излучению на необходимую глубину.

Для расширения возможностей использования метода и дальнейшего развития медицины необходимо диагностировать надежность оборудования для использования ЛДФ-метода и у темнокожих пациентов [29]. Однако, в темной коже концентрация меланина значительно выше, чем в светлой. Спектр поглощения меланина лежит в ультрафиолетовом (до 400 нм) и видимом (400 - 760 нм) диапазонах спектра, т.е. до глубоких слоев темной кожи проникает меньшее количество лазерного излучения, в том числе излучения лазерного анализатора капиллярного кровотока (ЛАКК).

Исследованиями Stefanovska A. с соавторами было показано, что ЛДФ-метод может предоставить достоверную информацию о динамических свойствах кровотока в темнопигментированной коже: значительная часть лазерного излучения оказалась способной проникать, взаимодействовать с движущимися эритроцитами, отражаться и достигать детектора ЛАКК [29]. По-

глощение меланином лазерного излучения постепенно уменьшается по мере увеличения длины волны света. Количественная оценка мощности колебаний и их фазовых характеристик продемонстрировали, что колебательные характеристики записей временных рядов ЛДФ для темнопигментированной кожи не отличаются от характеристик, полученных для светлой кожи. Это указывает на то, что интенсивность излучения света 780 нм, проникающего на 1,15 мм ниже эпидермиса, достаточна для сбора ЛДФ информации о динамике кровотока [29]. Таким образом, исследованиями 2019 года была показана возможность применения метода ЛДФ в оценке особенностей гемомикроциркуляции в темнопигментированной коже.

Однако статистически достоверные сведения о наличии или отсутствии у условно здоровых испытуемых с темным цветом кожи особенностей статистических и спектральных показателей данных лазерной доплеровской флоуметрии по сравнению с условно здоровыми испытуемыми со светлым цветом кожи на сегодняшний день в научной литературе отсутствуют. Такие сведения необходимы для адекватного сравнительного анализа данных, полученных для темнокожих пациентов с различными заболеваниями, приводящими к нарушению гемомикроциркуляции.

По нашему мнению, проведенное нами исследование является актуальным, так как анализ колебаний кровотока в темнопигментированной коже поможет внести вклад в понимание механизмов регуляции в системе микроциркуляции, поскольку составляющие ЛДФ-граммы несут информацию о состоянии сосудистого тонуса и механизмах контроля за перфузией, включающих как пассивные, так и активные факторы.

Цель работы – выяснение механизмов регуляции кровотока в микроциркуляторном русле темнопигментированной кожи разных участков тела на основе амплитудно-частотного анализа данных ЛДФ.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1. выявить особенности микроциркуляции в коже предплечья, концевой фаланги 2-го пальца руки и коже лба темнокожих испытуемых по сравнению с испытуемыми со светлой кожей;
2. исследовать закономерности микроциркуляции в симметричных участках кожи предплечья и концевой фаланги 2-го пальца руки у темнокожих испытуемых;
3. оценить степень пространственной синхронизации колебаний кровотока в симметричных участках кожи.

Объект исследования – кожа человека.

Предмет исследования – микроциркуляция крови разных участков кожи человека.

Структура работы представлена введением, тремя главами, заключением, выводами и списком литературы.

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### 1.1. Кожа как объект исследования

#### 1.1.1. Строение кожи

Кожа является сложным и не полностью изученным органом нашего организма, который функционально связан с внутренними органами, отражает их состояние в норме и в патологии [11]. Только кожа так часто подвергается негативному воздействию внешней среды, такому как колебания температуры и уровня солнечной радиации.

Кожа выполняет ряд важнейших функций [3]:

1. защищает организм от механических повреждений;
2. является барьером для микроорганизмов (роговой слой эпидермиса);
3. препятствует потере жидкости из организма;
4. уменьшает воздействие ультрафиолетового излучения;
5. принимает участие в терморегуляции за счет наличия терморцепторов, потовых желез и густой сети кровеносных сосудов;
6. сенсорную: в коже локализованы рецепторы давления и прикосновения, терморцепторы, болевые рецепторы;
7. синтеза витамина D под действием ультрафиолетовых лучей в кератиноцитах;
8. дыхательную;
9. иммунную: клетки эпидермиса вырабатывают ряд факторов, участвующих в иммунных и воспалительных процессах: простагландины, лейкотриены;
10. участия в обмене веществ: в коже происходит метаболизм гормонов, ядов, канцерогенов;
11. выделительную: через кожу экскретируется ряд продуктов обмена (вода, мочевины, соли, некоторые лекарственные вещества);
12. депонирование крови.

Кожа состоит из систем и подсистем, взаимодействующих между собой и состоящих из структурных элементов. К таким системам относят эпидер-

мис, дерму, гиподерму, железы и др. Кожа образует общий покров тела, в состав которого входят чувствительные нервные окончания, сальные и потовые железы, мышцы, волосы и ногти [8].

Общая масса кожи составляет примерно 20% от всей массы тела, а ее площадь – примерно  $1,8 \text{ м}^2$  [8]. В среднем на каждом участке кожи площадью  $6,5 \text{ см}^2$  находится 25 нервных волокон, более тысячи нервных окончаний, а также 65 волосяных фолликул и кровеносные сосуды в сумме протяженностью около 6 метров. За счет наличия в коже многочисленных нервных окончаний, кровеносных и лимфатических сосудов происходит быстрое реагирование кожи на различные раздражители.

Эпидермис – это наружный слой кожи, который представлен непрерывно возобновляющимися клетками эпителия – кератиноцитами, которые находятся в процессе постоянной дифференцировки, начиная с базального - слабодифференцированного слоя в направлении к верхнему - роговому слою [2].

Толщина эпидермиса кожи ладоней и ступней (толстой кожи) примерно 0,4-0,6 мм, а толщина эпидермиса волосистой части кожи (тонкой кожи) примерно 75-150 мкм [2]. Разделение на «толстую» и «тонкую» кожу связано с толщиной рогового слоя. Особенностью толстой кожи является то, что в состав ее структурной организации входят гребешки и бороздки, которые создают узор на поверхности кожи. Характер этого узора определяется наследственными факторами. Появление таких гребешков можно объяснить тем, что эпидермис полностью повторяет контуры лежащих под ним дермальных гребешков, которые образованы рыхлой соединительной тканью – сосочковым слоем дермы. Каждый гребешок дермы расщепляется на два дермальных сосочка участками эпидермиса - «межсосочковыми клиньями». Через межсосочковые клинья проходит эпидермальная часть выводных протоков потовых желез [2].

Эпидермис состоит из многослойного эпителия. Самый глубокий слой эпидермиса – ростковый (зародышевый) слой, который содержит пигмент

меланин, количество которого обеспечивает разный цвет кожи. Ряд клеток этого слоя прилегают непосредственно к собственно коже и выделяются как базальный слой. В нем образуются новые слои эпидермиса за счет деления клеток, которые постепенно замещают клетки ороговевшего слоя эпидермиса [8].

Над ростковым слоем находится шиповатый слой. Структурно этот слой похож на базальный, но отличается меньшим содержанием органелл и отсутствием пигмента. Также этот слой содержит клетки Лангерганса, которые выполняют ряд важных функций:

- оказывают регулирующее действие на кератиноциты за счет синтеза ряда цитокинов;
- участвуют в образовании эпидермальных пролиферативных единиц (при повреждении клеток Лангерганса нарушается столбчатая организация эпидермиса, что приводит к утолщению пласта);
- принимают участие в иммунных реакциях, передавая информацию Т-лимфоцитам об антигене;
- способствуют размножению Т-хелперов и Т-киллеров в ответ на антиген;
- обеспечивают реакцию контактной гиперчувствительности ко;
- защищают кожу от опухолей.

Зернистый слой располагается над шиповатым. В этом слое сокращается число органоидов, появляются гранулы кератогеолина – предшественники кератина. Главная функция этого слоя – секреция межклеточных жиров, которые скрепляют клетки рогового слоя, защищают кожу от обезвоживания и проникновения определенных веществ.

Над зернистым располагается цикловидный или блестящий слой, образованный 3-4 рядами клеток, заполненный промежуточным продуктом превращения кератогиалина в кератин – элеидином.

Следующий слой – роговой. Эпителиоциты превращаются в ороговевшие клетки, не содержащие ядер – мёртвые кератиноциты, соединённые

пальцевидными соединениями (интердигитациями) их мембран. Роговой слой защищает кожу от потери воды и от проникновения извне определенных веществ.

Собственно кожей (дермой) называют производное мезодермы, состоящее из волокнистой соединительной ткани [8]. Толщина дермы примерно 1-2 мм. В дерме располагаются кровеносные и лимфатические сосуды, потовые, сальные и молочные железы; волосяные фолликулы, гладкомышечные клетки. В состав собственно кожи входят два слоя: сосочковый и сетчатый.

Примыкающий к эпидермису слой – сосочковый, относительно тонкий; представлен рыхлой волокнистой соединительной тканью, которая вдаётся в виде сосочков в эпидермис. В этих сосочках залегают рецепторные нервные окончания, кровеносные капилляры, а также слепые выросты лимфатических капилляров поверхностной сети кожи.

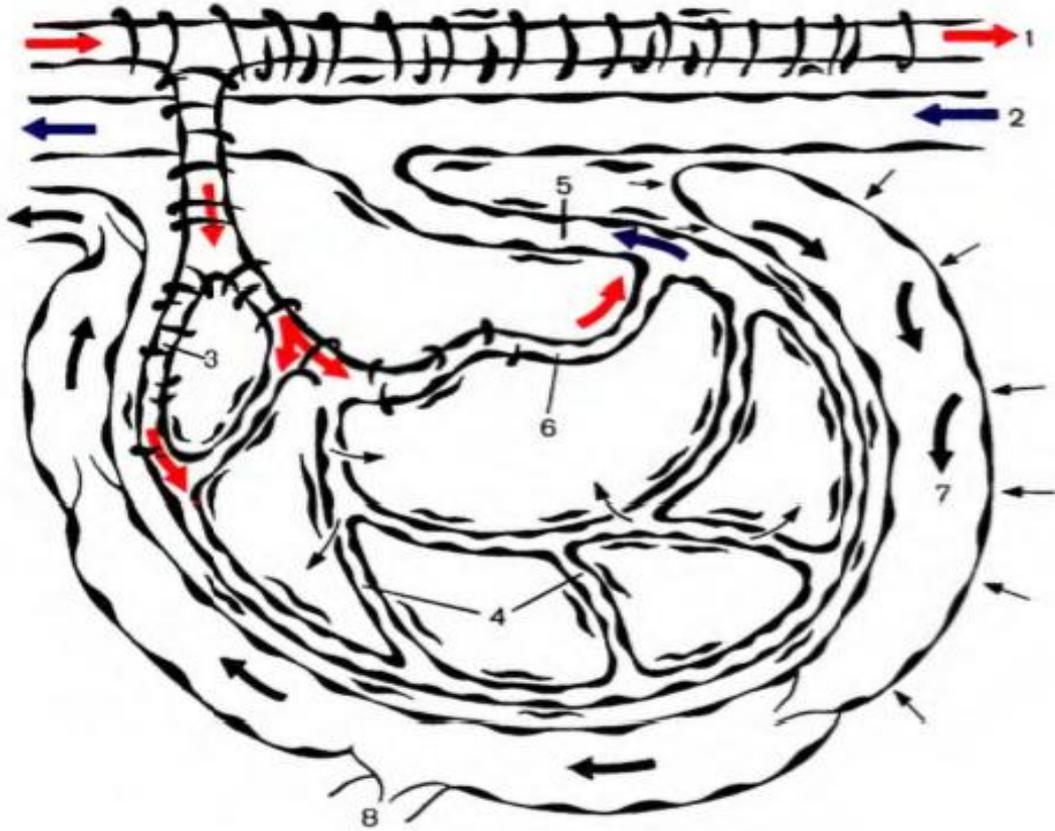
Второй слой дермы – сетчатый – образован плотной неоформленной соединительной тканью, в которой коллагеновые и эластические волокна образуют для определенной области тела своеобразную сеть.

Собственно кожа переходит в подкожную основу, которая состоит из коллагеновых и эластических волокон и образует широкопетлистую сеть. Петли этой сети заполнены рыхлой соединительной тканью и содержат большое количество жировых клеток.

### **1.1.2. Структурно-функциональная организация микроциркулярного русла**

Для нормального существования организма необходим постоянный транспорт жидкостей и веществ [27]. Микрососуды участвуют в распределении крови, создают условия для транспорта веществ между кровью и тканями; играют адаптивную роль при неблагоприятном воздействии внешних условий среды. Микроциркуляторное русло (рис. 1) – это одна из важнейших систем кожи, от которой зависит питание кожи, ее способность выполнять функцию барьера, а также зависит ее внешний вид [2]. Микроциркуляция –

это транспорт крови и лимфы по мельчайшим кровеносным и лимфатическим сосудам, а также транспорт воды, газов, лекарственных или иных веществ между микрососудами и интерстициальным пространством [5].



*Рис. 1. Строение микроциркуляторного русла кожи*

*1 – артерия, 2 – вена, 3 – артериола, 4 – гемокапилляр, 5 – венула, 6 – артериоло-венулярный анастомоз, 7 – лимфатический капилляр, 8 – лимфатический сосуд. Толстые стрелки – направление движения крови и лимфы, тонкие стрелки – транскапиллярный обмен*

В состав микроциркуляторного русла входят сосуды, которые можно разделить на две группы:

- первая группа – это распределители капиллярного кровотока, которые представлены метартериолами, терминальными артериолами, артериоло-венулярными анастомозами, прекапиллярными сфинктерами;
- вторая группа – это обменные сосуды, которые представлены капиллярами и посткапиллярными венулами [9].

Классификация микрососудов была принята в 1970 году в Ленинграде на Международном конгрессе анатомов и включает [6]:

1. артериолы;
2. прекапиллярные артериолы;
3. кровеносные капилляры;
4. посткапиллярные венулы;
5. венулы.

Куприянов В.В. использовал похожую классификацию микрососудов, изменив названия прекапиллярных и посткапиллярных артериол на прекапилляры и посткапилляры.

Чернух А.М. использовал деление микроциркуляторной системы на отделы:

1. начальный отдел;
2. отдел притока, который делится на:
  - звено генерации давления и кровотока;
  - звено передачи вдоль транспортного канала;
  - звено функционального распределения крови;
  - звено транскапиллярного обмена и кровоснабжения органа;
3. конечный отдел, который связан с возвратом крови и подразделяется на:
  - ёмкостное звено функционального накопления крови;
  - резервуары большого объема крови.

Эта система обеспечивает местное кровоснабжение и транскапиллярный обмен [27].

Выделяют несколько типов строения микроциркуляторного русла [27]:

1. классический тип – такое строение микроциркуляторного русла можно встретить в скелетных мышцах, а также в серозных оболочках. Этот тип представлен сетью капилляров, которые отходят от артериолы и образуют между собой густую сеть анастомозов, а затем сливаются в венулу.

2. мостовой тип – основным каналом является метартериола, которая соединяется с венулой. От метартериолы отходят прекапилляры, которые распадаются на капилляры.
3. сетевой тип – особенность строения в том, что имеются замкнутые кольцевидные образования из артериол, которые соединяются похожими кольцевыми образованиями из венул путем классического типа ветвления капилляров.

Сосуды микроциркуляторного русла при изменении кровотока довольно пластичны и способны изменять проницаемость для тканевой жидкости, могут пропускать только плазму.

Наиболее мелкими артериальными сосудами являются артериолы [8]. Они содержат кольцевой слой гладких мышц, из-за сокращения которых создается сопротивление кровотоку. С одной стороны они связаны с артериями, а с другой переходят в капилляры.

Важные процессы происходят и в капиллярах. Через капилляры происходит движение воды и различных газообразных веществ из крови в ткань и в обратном направлении [14].

Капилляры подразделяют на три типа [1]:

1. соматический тип – капилляры проницаемы для воды и растворенных в ней минеральных веществ, но непроницаемы для крупных молекул белка;
2. висцеральный тип – расположены в тех органах, которые всасывают большое количество воды (например, почки, кишечник);
3. синусоидный тип – имеют хорошую проницаемость для элементов крови, встречаются в селезенке и печени.

Самыми многочисленными сосудами в организме человека являются кровеносные капилляры. Капилляры способны сливаться между собой и образовывать капиллярные сети, в которые кровь поступает по артериолам, а выходит по венулам. Лимфатические капилляры обеспечивают отток лимфы.

Венулы подразделяют на три типа [2]. Венулы посткапиллярного типа напоминают по строению капилляры, но отличаются большим количеством

перицитов. Вены собирательного типа образуются при слиянии посткапиллярных венул. В их строении появляются гладкие мышечные клетки. Мышечные вены в своем строении имеют 1-2 слоя гладких мышечных клеток и более развитую наружную оболочку.

Главная функция венозного отдела совместно с лимфатическими капиллярами для микроциркуляции в том, что они выполняют дренажную функцию, удаляют продукты метаболизма тканей, регулируют гематолимфатическое равновесие между кровью и внесосудистой жидкостью.

Артериоло-венулярные анастомозы, по которым кровь движется из артериол в вены, обеспечивают непрерывный кровоток в обход основной массы капилляров, т.е. выполняют роль шунтов. Играют важную роль при патологиях в тканях, когда происходит нарушение в нутритивном кровотоке [14].

Лимфатическая система тесно связана с кровеносной. Лимфатические капилляры образуются в сосочковом слое кожи рядом с венозными отделами капилляров и посткапиллярными венами. Они образуют поверхностное лимфатическое сплетение. Второе лимфатическое сплетение формируется между дермой и гиподермой. Третье лимфатическое сплетение дает начало магистральным лимфатическим сосудам и располагаются в подкожной жировой клетчатке [8].

### **1.1.3. Микроциркуляция кожи человека**

Кожа как граница между организмом и внешней средой выполняет множество функций, часть которых зависит от процесса микроциркуляции в сосудах, расположенных в дерме и гиподерме [18]. Выделяют три группы артерий, которые обеспечивают васкуляризацию кожи – это кожные ветви артерий, которые находятся в межмышечных фасциальных перегородках; мышечно-кожные артерии и надкостнично-кожные артерии [2].

Кровоток в коже обеспечивается за счет глубоких артериальных сетей, а также поверхностных, которые расположены в дерме и подкожной жировой

клетчатке. Из этих двух артериальных сетей отходят сосуды, которые обеспечивают кровоснабжение таких составных частей дермы, как волосяные фолликулы, потовые и сальные железы и нервы [22].

Поскольку дерма в основном состоит из коллагена, она не нуждается в интенсивном капиллярном кровоснабжении и из-за этого капилляры в ней развиты слабо [8]. Капиллярные сети в основном находятся в соединительной ткани, которая лежит непосредственно под эпидермисом и окружает матрицу волосяных фолликулов и окружает потовые, сальные железы, т.к. они нуждаются в питании для полноценного выполнения своих функций и для роста [23].

На границе сосочкового слоя находится артериолярная сеть и отходящие от нее терминальные артериолы, которые питают определенную группу сосочков. В связи с тем, что между терминальными артериолами отсутствуют анастомозы, появляются красные пятна на коже лица, шее при стрессах.

Под сосочками располагаются поскапиллярные вены, которые образуют мелкопетлистую веноулярную сеть. Под артериальной сетью образуется вторая веноулярная сеть.

Сеть сосудов, которая собирает кровь от волос и сальных желез располагается в сетчатом слое кожи [2]. От потовых желез собирает кровь глубокая венозная сеть, которая находится в гиподерме. Сосуды, которые расположены в сосочковом слое и на границе с сетчатым слоем, участвуют в терморегуляции. Терморегуляция в организме зависит от метаболизма, а также от таких внешних факторов, как температура среды, влажности. Так у человека усиливается потоотделение и на коже появляется пот при повышении температуры воздуха. За счет потоотделения и испарения пота с поверхности кожи происходит охлаждение кожи и крови, протекающей в поверхностных капиллярах и венах. Усиливается кровоток и теплоотдача за счет расширения сосудов [3].

При понижении температуры воздуха происходит снижение кровотока капилляров [2]. Это связано с тем, что происходит сужение просвета арте-

риол и раскрытие артериоло-венулярных анастомозов. По данным сосудам артериальная кровь попадает в венулы, минуя капиллярное русло.

Важную роль в микроциркуляции играют специализированные сосудистые тельца – гломусы, которые располагаются на кончиках пальцев кистей и стоп [3]. Особенность строения гломусов в том, что они состоят из венозного и артериального сегментов и короткого канала. Короткий канал объединяет артериолу и венулу, при этом минуя капиллярную сеть. Функция гломусов заключается в усилении тока крови в коже. Под ногтями могут образовываться красные гломусные образования, что происходит за счет увеличения объема гломусных телец.

Для медицины огромную роль играет изучение кожного покрова и микроциркуляторного русла в анатомическом плане. Но не менее важно исследование топографо-анатомических особенностей микроциркуляции разных участков тела [20].

В процессе изучения кровоснабжения кожи было выявлено, что различия микроциркуляции разных областей тела объясняется особенностями структуры микроциркуляторного русла этих областей, зависит от глубины залегания микрососудов и плотности капиллярной сети [19]. Например, капиллярная сеть в области предплечья имеет длину 150-200 мкм, а в области локтя – 300-500 мкм [22]. Известно, что наиболее плотно капилляры расположены в коже лица, в частности красной каймы губ, а также в коже пальцев верхних и нижних конечностей [25].

Благодаря длительным исследованиям были выявлены отличия интенсивности микроциркуляции кожи в зависимости от области тела. Наиболее интенсивная микроциркуляция в коже мочки уха и в коже подушечки 4-го пальца кисти. Наименьшая интенсивность наблюдалась в коже голени и лодыжки, в коже предплечья [11].

Но интенсивность кровоснабжения может различаться даже в пределах одной области тела. Например, микроциркуляция разных участков кожи лица имеет отличия. Высокая интенсивность наблюдается в области щек, а наи-

меньшая в области подбородка. Это было выявлено с помощью лазерной доплеровской флоуметрии [14]. Также было выявлено, что интенсивность кровотока зависит от суточных и климатических факторов [31].

Существует два основных закона движения крови и обмена жидкости в микроциркуляторном русле [24].

Скорость объемного кровотока определяется в соответствии с законом Пуазейля. Применительно к микроциркуляции можно сказать, что капиллярный кровоток прямо пропорционален длине капилляра, вязкости крови, а также градиенту гидростатического давления в артериальном и венозном отделах микроциркуляторного русла. Если под влиянием каких-либо факторов эти значения изменяются, перфузия сосудистого русла также изменяется, или даже может быть нарушена.

Одна из основных причин декомпенсации микроциркуляции – нарушения реологических свойств крови. Под реологическими свойствами крови подразумевают ее текучесть, которая определяется рядом признаков: подвижностью, агрегационной активностью форменных элементов, вязкостью крови, концентрацией глюкозы. Особое значение имеет вязкость крови, т.к. при увеличении вязкости крови снижаются ее реологические свойства.

Все нарушения микроциркуляции подразделяются на три основных типа:

- внутрисосудистый тип основан на увеличении вязкости крови, что впоследствии приводит к нарушению перфузии сосудов микроциркуляторного русла;
- тип, основанный на увеличении проницаемости капиллярной стенки;
- внесосудистый тип связан с повреждением тканей сосудистой стенки, что приводит к нарушению оттока лимфы [4, 24].

## **1.2. Расово-этнические особенности кожи**

### **1.2.1. Особенности пигментации кожи людей разных рас**

Существование этнических различий в строении и функциях общего наружного покрова человека на сегодняшний день подкреплено многочисленными исследованиями. Данные различия касаются в основном проблемы пигментации кожи. Однако к расово-этническим особенностям кожи относят также ее жирность, определяющуюся качественно-количественным составом секрета сальных желез; кислотно-основное состояние и влажность кожи. Указанные особенности не влияют на способность кожи пропускать лазерное излучение, поэтому в данной главе мы остановимся только на особенностях пигментации кожи людей разных рас.

Окраска кожи, а также волос и глаз человека определяется содержанием в них меланинов. Меланины – это природные пигменты, которые продуцируются меланоцитами – клетками базального слоя эпидермиса в виде особых гранул, связанных с белками меланопротеидами. Синтезированный меланин меланоциты передают соседним клеткам эпидермиса – кератиноцитам, чтобы защитить их ядро от УФ-излучения [13].

Меланин представляет собой продукт окислительной трансформации аминокислоты тирозина. Ряд последовательных превращений тирозина выглядит следующим образом: вначале формируется диоксифенилаланин (ДОФА), затем из него синтезируется ДОФА-хром (реакция катализируется ферментом тирозиназой), после чего ДОФА-хром полимеризуется с образованием высокомолекулярных меланинов.

Функции меланинов в коже:

- поглощение ультрафиолетовых лучей с обеспечением защиты глубоких слоев тканей от лучевых повреждений;
- усвоение УФ-излучения в целях обеспечения жизнедеятельности;
- сокращение накопления радионуклидов в человеческом организме;
- ингибирование окисления (антиоксидант).

В коже человека, независимо от его этнического происхождения, количество меланоцитов постоянно, однако содержание меланина в них различно. Различается кожа и по количеству, размерам, агрегации и распределению меланосом в пределах кератиноцитов. Меланосомы в кератиноцитах темной кожи крупные, сильно пигментированные и распределенные по отдельности [40]. От количества синтезированного меланина зависит цвет кожи и, следовательно, ее чувствительность к воздействию света. У людей с различным этническим типом кожи содержание меланина варьирует в диапазоне 1,3 - 43 %. Содержание меланина в слабопигментированной коже составляет 1,3 - 1,6 %, в среднепигментированной – 11 - 16 %, в темнопигментированной – 18 - 43 % [35].

Особенности пигментации кожи людей разных рас находят свое отражение в различных классификациях. В 1975 году американским дерматологом Томасом Б. Фитцпатриком была разработана шкала фототипов кожи лица, предназначенная для оценки влияния на нее УФ-излучения. Шкала Фитцпатрика (таблица 1) включает шесть фототипов, которые описывают кожу по основному цвету, уровню меланина, способности кожи к загару, воспалительному ответу на УФ-излучение и риску возникновения злокачественных заболеваний кожи (меланомы, рака кожи).

Таблица 1

### Шкала оценки пигментации кожи [по Фитцпатрику]

| Тип кожи | Цвет кожи          | Ожоговая реакция кожи на солнце | Способность кожи к загару | Ответ кожи на УФ-излучение   | Вероятность развития злокачественных заболеваний кожи |
|----------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|--|---|
| I        | белый (фарфоровый) | всегда ожог                     | отсутствует               | рано появляется множество веснушек; резкое снижение содержание ме- | очень высокая   |

|     |  |   |                       |  |                            |
|-----|--|---|-----------------------|--|----------------------------|
|     |  |   |                       | ланина в<br>коже   |                            |
| II  | белый<br>(жемчуж-<br>ный)                                | всегда ожог                                   | редко                 | веснушки;<br>умеренное<br>снижение<br>содержания<br>меланина в<br>коже | высокая                    |
| III | коричнева-<br>тый (смуг-<br>лый)                         | иногда ожог                                   | проявляется<br>быстро | множество<br>веснушек<br>и/или ги-<br>перпигмен-<br>тация              | умеренная                  |
| IV  | оливковый  | ожог крайне<br>редко                          | проявляется<br>быстро | гиперпиг-<br>ментация  | низкая                     |
| V   | темно-<br>коричневый<br>с краснова-<br>тым оттен-<br>ком | может раз-<br>виваться<br>легкая эри-<br>тема | темно-<br>коричневый  | однородная<br>гиперпиг-<br>ментация<br>без появле-<br>ния пятен        | практически<br>отсутствует |
| VI  | черный   | солнечных<br>ожогов не<br>бывает              | черный                | однородная<br>пигмента-<br>ция   | практически<br>отсутствует |

Другая шкала – хроматическая шкала фон Люшана – предназначена для классификации типов кожи по ее цвету. Шкала названа в честь ее изобретателя Феликса фон Люшана и состоит из 36 непрозрачных стеклянных пластин разного оттенка, предназначенных для сравнения с кожей субъекта, в том месте, которое не подвергается воздействию солнца (например, подмышечная область) (рис. 2). В таблице 2 приведены 36 категорий шкалы фон Люшана по отношению к шести категориям шкалы Фитцпатрика.

Таблица 2

### Сравнительная оценка шкалы фототипов Фитцпатрика и хроматической шкалы фон Люшана

| Шкала Фитц-патрика | Шкала фон Люшана | Название типа  |
|--------------------|------------------|--|
| I                  | 0-6              | очень светлый или белый, «кельтский тип»                     |
| II                 | 7-13             | светлый или «светлокожий европейский тип», «нордический тип» |

|     |       |   |
|-----|-------|---|
| III | 14-20 | легкий промежуточный или «темнокожий европейский тип»             |
| IV  | 21-27 | темная промежуточная или «оливковый тип», «средиземноморский тип» |
| V   | 28-34 | темный или «коричневый тип», «индонезийский тип»                  |
| VI  | 35-36 | очень темный или «черный тип», «афроамериканский тип»             |

|  |   |    |  |  |    |    |  |
|--|---|----|--|--|----|----|--|
|  | 1 | 10 |  |  | 19 | 28 |  |
|  | 2 | 11 |  |  | 20 | 29 |  |
|  | 3 | 12 |  |  | 21 | 30 |  |
|  | 4 | 13 |  |  | 22 | 31 |  |
|  | 5 | 14 |  |  | 23 | 32 |  |
|  | 6 | 15 |  |  | 24 | 33 |  |
|  | 7 | 16 |  |  | 25 | 34 |  |
|  | 8 | 17 |  |  | 26 | 35 |  |
|  | 9 | 18 |  |  | 27 | 36 |  |

*Рис. 2. Хроматическая шкала фон Люшана*

### 1.2.2. Гипотезы потемнения кожи

В процессе эволюции организм человека претерпел множество изменений. Одним из важнейших результатов эволюции было появление разных оттенков кожи. Эти изменения могут объясняться адаптациями к солнечному ультрафиолетовому излучению (например, солнечные ожоги, рак кожи, дефицит витамина D) или половым отбором [36]. Миграция человека в районы с высоким уровнем ультрафиолетового излучения оказывает влияние на потемнение кожи, а миграция в районы с низким уровнем инсоляции способствовала ее осветлению. Также выделяются и второстепенные факторы, которые также оказывают влияние на пигментацию кожи - температура окружающей среды и потребление продуктов с высоким уровнем витамина D.

В процессе исследований были выделены пять гипотез потемнения кожи в ходе эволюции:

- защита потовых желез и кровеносных сосудов кожи;
- защита от рака кожи;
- защита от переизбытка витамина D;
- борьба с микроорганизмами;
- защита жизненно важных структур и молекул в составе крови.

#### **Защита потовых желез и кровеносных сосудов кожи**

Повреждение потовых желез и кровеносных сосудов кожи жарким африканским солнцем может привести к нарушению процесса терморегуляции, что приводит к неизбежному появлению адаптации в виде темного цвета кожи [40]. Расположенный в эпидермисе меланин защищает все слои кожи, а также кровеносные сосуды от повреждающего воздействия солнечных лучей [40].

#### **Защита от рака кожи**

Считается, что при изучении эволюции можно выявить причину возникновения многих заболеваний. Одним из таких заболеваний считается рак кожи. По мнению одних исследователей рак кожи играет важную роль для ее эволюции и появления темной пигментации. По мнению других - рак кожи не играл значимой роли в эволюции, т.к. в редких случаях вызывал смерть у лиц репродуктивного возраста [34]. В ходе исследований было выявлено, что наиболее подвержены раку кожи светлокожие люди.

Существует несколько типов рака кожи, наиболее распространенными среди которых являются плоскоклеточный и базальноклеточный рак, связанные с постоянным воздействием солнечного излучения, и развивающиеся ближе к 70 годам. Злокачественная меланома кожи встречается намного реже и вызвана солнечными ожогами, которые могут быть получены в детстве, но рак при этом может проявиться через 20-30 лет.

Поэтому гипотеза о том, что темный цвет кожи защищает от возникновения рака кожи, является маловероятной, т.к. рак развивается в большинстве

случаев после репродуктивного возраста, который был низким у наших предков.

### **Защита от избытка витамина D**

В 1967 году Лумис предположил, что темный цвет кожи развился для препятствия возникновению избытка витамина D [38]. Уже в то время было известно, что солнечная радиация является чрезвычайно эффективным продуцентом витамина D и что высокие дозы витамина D могут оказывать токсическое действие [38]. Но это оказалось неверным утверждением, т.к. витамин D мог преобразовываться в коже до витамина D<sub>3</sub> или поглощать ультрафиолетовое излучение и преобразовываться в биологически неактивные продукты [32]. Таким образом, переизбыток витамина D от воздействия солнца невозможен [33].

### **Защита от микроорганизмов**

В ходе исследований было выявлено, что степень воспаления регулируется наличием или отсутствием пигментации; а также степень воспаления связана с влиянием темной пигментации на снижение pH эпидермиса. Ключевая роль pH эпидермиса заключается в регуляции проницаемости, целостности рогового слоя, в защитной антимикробной функции. Таким образом, при снижении pH дезактивируются противовоспалительные сериновые протеазы, которые наносят повреждения структуре эпидермиса, нарушая его функции [37].

В темной коже степень воспаления труднее оценить, чем в светлой. Но в ходе исследований по многим макроскопическим, функциональным и молекулярным параметрам кожа темного цвета показывала более низкую склонность к развитию воспалений, чем светлая.

Клетки, продуцирующие меланин, могут выполнять иммунологические функции, и некоторые ученые считают, что меланоциты должны рассматриваться как компоненты иммунной системы [39]. В тропических регионах больше видов опасных бактерий, чем в холодных. Это подтверждает гипотезу защиты, поскольку люди, живущие в тропических регионах, обычно име-

ют больше меланина и более темный цвет кожи, чем люди, живущие в более холодных регионах на высоких широтах.

### **Защита жизненно важных структур и молекул в составе крови**

Учеными было выявлено, что фотолиз фолатов при участии солнечного света играет важную роль в эволюции кожи. Показано большое значение фолатов в таких процессах, как биосинтез и метилирование ДНК, метаболизме аминокислот и в выработке меланина [34].

Была выдвинута теория, что темный цвет кожи развивался для замедления снижения фертильности за счет фотолиза фолатов. Также были предоставлены данные, которые доказывали, что при снижении количества фолатов под воздействием ультрафиолетового излучения могут возникать врожденные патологии, например, патология нервной трубки.

Были проведены исследования фоточувствительности фолиевой кислоты в пробирке и в естественных условиях, которые продемонстрировали, что связь между метаболизмом фолатов и пигментацией кожи является сложным процессом. В состав данной связи входят фотодеградации фолиевой кислоты и фотодеструкции в присутствии порфиринов и флавинов за счет активных форм кислорода.

Фолаты являются производными витамина В. Значительная часть фолатов в организме человека содержится в крови и находится в дермальных микрососудах, которые могут быть достигнуты ультрафиолетовым излучением. За счет того, что фолаты могут быть разрушены УФ-излучением, темная кожа может выполнять защитную функцию для фолатов [30].

## **1.3. Лазерная доплеровская флоуметрия как метод исследования микроциркуляторного русла**

### **1.3.1. Физические основы метода**

В клинической медицине важную роль занимает анализирование и оценивание состояния микроциркуляции крови, тестирование расстройств микроциркуляции при различных заболеваниях человека [16].

Нарушения процесса микроциркуляции разнообразны, поэтому применяются методы оперативной оценки состояния кровотока на тканевом уровне, а также метод длительного мониторинга. Одним из самых распространенных методов является лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). За счет высокой чувствительности к изменениям в сосудистом русле, метод ЛДФ является приоритетным по сравнению с другими методами исследования микроциркуляции [17].

Метод лазерной доплеровской флоуметрии применяется при заболеваниях сердца и сосудов, при диабете, при заболеваниях органов дыхания, почек, печени; при кожных заболеваниях, заболеваниях слизистой оболочки рта и других. Медицинских противопоказаний для применения данного метода не существует.

Диагностика происходит за счет зондирования ткани лазерным излучением; обработка происходит за счет выделения из зарегистрированного сигнала доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала, который пропорционален скорости движения эритроцитов. Также во время исследования происходит регистрация изменений потока крови в микроциркуляторном русле – флоуметрия. Важную роль для осуществления оптического зондирования ткани играет длина волны лазерного источника, а также тип ткани. Для лазерного излучения на длине волны 632 нм она составляет около 1 мм [16].

Сигнал, который регистрируется при ЛДФ, характеризует кровоток в микрососудах в объеме около  $1 \text{ мм}^3$  ткани. Известно, что в таком объеме кожи пальца кисти содержится примерно 200 микрососудов. В их число входят 20 артериол, 110 капилляров, 40 посткапиллярных венул и 30 венул [28]. Все данные являются примерными.

В посткапиллярных сосудах находится больше всего эритроцитов. Поэтому основная часть величины ЛДФ-сигнала формируется за счет эритроцитов посткапиллярно-венулярного звена микроциркуляторного русла. В других участках кожи, а также в слизистых оболочках могут быть иные струк-

турные и функциональные отношения между микрососудами и содержанием эритроцитов, что может повлиять на формирование ЛДФ-сигнала.

При использовании метода ЛДФ для исследования микроциркуляции кожи различных областей тела важную роль играет пространственное направление основных потоков крови по отношению к поверхности кожного покрова, на котором фиксируется оптический зонд [17]. В разных участках кожи тела человека микрососуды направлены преимущественно перпендикулярно поверхности кожи. Но, несмотря на это, существует разница в глубине залегания микрососудов и плотности расположения капилляров [20].

При использовании лазерной доплеровской флоуметрии происходит регистрация сигнала на протяжении всего исследования. Для диагностирования состояния микроциркуляторного русла необходим анализ графической записи изменений перфузии, которая называется ЛДФ-граммой [17]. Колебания перфузии представляют сложный, непериодический процесс. Спонтанные колебания физиологических систем являются более оптимальными для существования, чем периодические. Такие колебания необходимы для того, чтобы система не погибла. Для поддержания незатухающих колебаний необходимо участие регуляторных факторов и механизмов обратной связи. Регуляторные факторы делятся на активные и пассивные.

Активные факторы отвечают за регуляцию просвета сосудов, а также за тонус сосудов. Пассивные факторы отвечают за колебания кровотока вне микроциркуляторного русла. За счет активных и пассивных факторов происходит изменение скорости и концентрации потока эритроцитов, которые приводят к модуляции перфузии.

Индекс флаксмоций (ИФМ) описывает эффективность регуляции модуляций в микроциркуляторном русле [16]. ИФМ является соотношением амплитуд флуктаций в физиологически значимых диапазонах частот, выявляемых при спектральном анализе ЛДФ-граммы:

$$\text{ИФМ} = \text{ALF} / (\text{AHF} + \text{ACF})$$

Рассчитать микрососудистый тонус (СТ) возможно по соотношению амплитуды низкочастотных колебаний ALF к средней величине флакса:

$$СТ = \sigma / ALF$$

Внутрисосудистое сопротивление (Rc) характеризуется нормированием амплитуды высокочастотных и пульсовых колебаний относительно СКО:

$$Rc = (АНF + АСF) / \sigma$$

То есть, в результате анализа колебаний показателя микроциркуляции в ЛДФ-грамме мы можем сделать выводы о состоянии регуляторных механизмов тканевой гемодинамики [16].

При исследовании микроциркуляции с помощью ЛДФ-метода выделяют несколько этапов.

Первый этап считается базовым и направлен на определение средней величины перфузии, определение уровня флакса и индекса флаксмоций.

Второй этап считается расширенным и направлен на углубленное изучение нарушений процессов микроциркуляции. В ходе углубленного изучения проводится анализ биоритмов колебаний тканевого кровоснабжения для определения амплитуд колебаний в диапазонах частот: AVLF, ALF, АНF, АСF, а также определение вклада отдельных частотных диапазонов в общую мощность спектра биоритмов. Также исследование направлено на определение микрососудистого тонуса и внутрисосудистого сопротивления.

### **1.3.2. Влияние кожного хромофора меланина на регистрируемые сигналы ЛДФ**

В методе ЛДФ существует проблема оценки состояния микрогемодинамики из-за различий оптических параметров кожи светлокожих и темнокожих людей.

Известно, что применение ЛДФ-метода эффективно в случае исследования людей со светлой кожей, т.к. оптические свойства кожи с низкой концентрацией меланина позволяют легче проникать свету. Для людей со светлым цветом кожи метод широко применяется как у здоровых, так и у боль-

ных при патологиях, сопровождающихся нарушением гемомикроциркуляции. Особенно это важно в кардиологии, диабетологии, стоматологии, дерматологии, онкологии, хирургии и реаниматологии. Для людей с темным цветом кожи применение метода ЛДФ выдвигает новые задачи: требуется обосновать пригодность применения метода и определить адекватность результатов оценки показателей микроциркуляции, полученных с использованием метода исследований у пациентов с темным цветом кожи в конкретных условиях.

Даже светлая кожа человека является многокомпонентной поглощающей средой, в которой взаимодействие лазерного излучения с такой средой носит сложный характер [26]. Одна из характеристик взаимодействия света с кожей – это поглощение излучения, обусловленное наличием в тканях большого количества различных эндогенных хромофоров. Причем в пределах каждого слоя кожи поглощение лазерного излучения определяется различными доминирующими структурами эпидермиса, дермы и гиподермы. Кожный пигмент меланин является одним из таких поглощающих хромофоров, локализованных в кожном эпидермисе; гемоглобин, оксигемоглобин и коллаген – в дерме; вода – хромофор, расположенный во всех слоях кожи. Помимо эндогенных в коже могут присутствовать и экзогенные хромофоры – красители, применяющиеся в татуаже, а также различные частицы, импрегнированные при травмах. На рис. 3 представлены спектры поглощения кожных хромофоров [26].

Меланин поглощает свет в видимой и ближней инфракрасной частях оптического спектра. Поглощение уменьшается с увеличением длины волны. В темной коже концентрация меланина больше, т.е. до глубоких слоев темной кожи проникает меньшее количество лазерного света. Очевидно, что для исследования методом ЛДФ микроциркуляции в темной коже необходимо использование лазерного излучения с большей длиной волны [29].

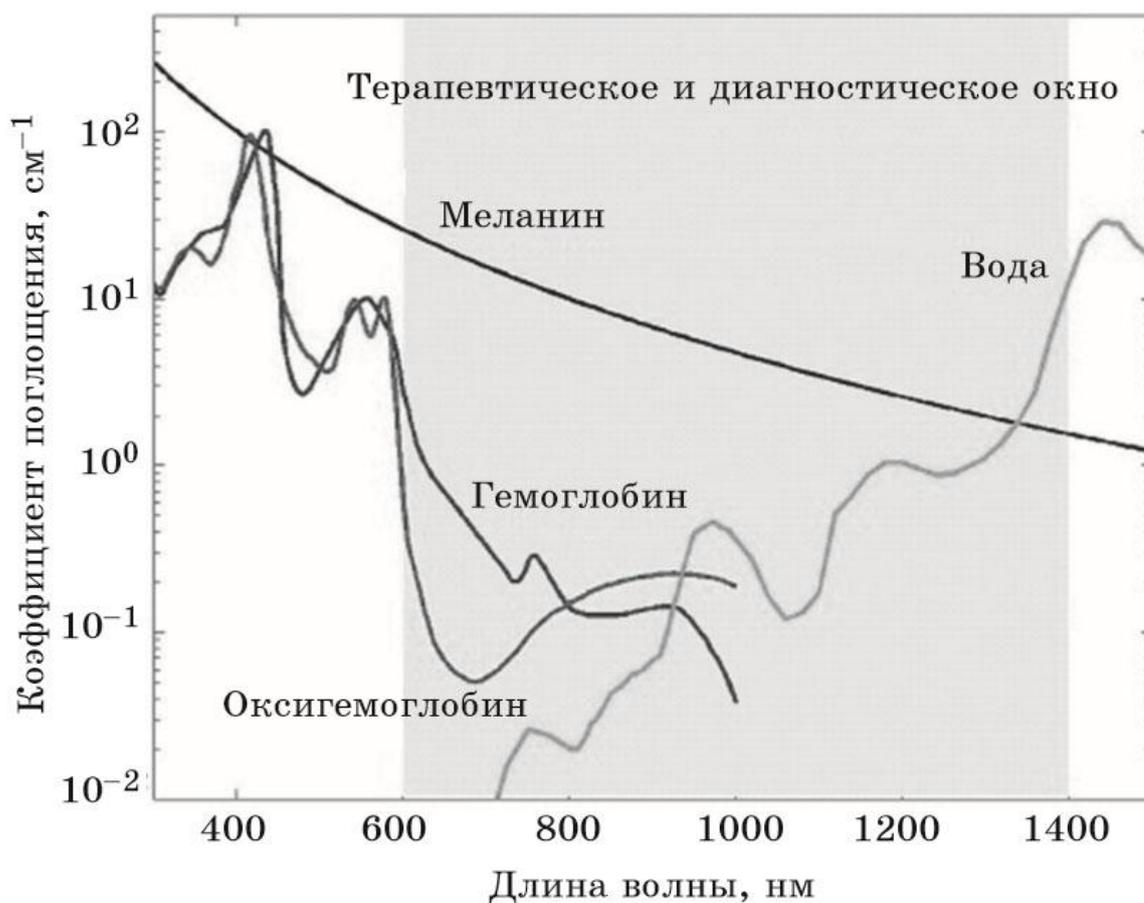


Рис. 3. Спектры поглощения кожных хромофоров

В настоящее время в России НПО «ЛАЗМА» производятся приборы для лазерной доплеровской флоуметрии, в которых используются источники лазерного излучения с различной длиной волны: в ЛАКК-01 - 630 нм, в ЛАКК-02, ЛАКК-ОП и ЛАКК-М - 830 и 1064 нм, что с успехом позволяет использовать этот метод для исследований пациентов с темной кожей.

В исследованиях Stefanovska с соавторами был использован анализатор капиллярного кровотока, оснащенный источником лазерного излучения с длиной волны 780 нм, и проведен сравнительный анализ использования метода ЛДФ на светложких и темнокожих испытуемых. При использовании метода были применены одинаковые условия эксперимента, зонды располагались в одинаковых областях тела. Stefanovska с соавторами показали, что высокая концентрация меланина в коже темнокожих испытуемых не является препятствием для использования данного метода. В ходе эксперимента авто-

рами было показано, что ЛДФ может предоставить достоверную информацию о динамических свойствах кровотока в темнопигментированной коже: значительная часть лазерного излучения способна проникать, взаимодействовать с движущимися эритроцитами и обратно рассеиваться, чтобы достичь детектора. Количественно оценивая мощность колебаний и их фазовые характеристики, авторы утверждают, что колебательные характеристики записей временных рядов ЛДФ с темнопигментированной кожи не отличаются от характеристик, измеренных со светлой кожи. Это указывает на то, что интенсивность света 780 Нм, проникающего на 1,15 мм ниже эпидермиса, достаточна для сбора ЛДФ информации о динамике кровотока [29].

В исследованиях К.В. Подмастерьева с соавторами был использован анализатор капиллярного кровотока, оснащенный источником лазерного излучения с длиной волны 1064 нм, и проведен анализ использования метода ЛДФ на группе испытуемых с различным этническим типом кожи [10]. Группой исследователей проведен анализ кровотока в коже подушечки 3-го пальца руки как слабопигментированной зоны для всех испытуемых и в коже дистального отдела предплечья как зоны с выраженными различиями в содержании меланина. Полученные группой результаты оказались неоднозначными: наблюдалось широкое варьирование базовых показателей ЛДФ у обследуемых с разным количеством меланина в коже. В связи с этим авторами была предпринята попытка моделирования вклада рассеяния и поглощения в общее затухание зондирующего лазерного излучения. При моделировании учитывались коэффициенты поглощения основных эндогенных хромофоров. Были получены кривые зависимости, отражающие вклад рассеяния и поглощения в общее затухание зондирующего лазерного излучения при различной концентрации меланина. Обнаружено, что при содержании меланина до 10 % с приближением к ближнему инфракрасному диапазону (740 - 2500 нм) основной вклад в затухание зондирующего излучения вносит эффект рассеяния; а при содержании меланина более 10 % - эффект поглощения. Полученные результаты показали, что при увеличении длины волны лазерного излу-

чения способность меланина поглощать сигнал уменьшается, однако увеличивается его способность отражать сигнал. Такой эффект экранирования ЛДФ-сигнала от гиперпигментированной кожи, возникающий при повышении уровня содержания меланина в коже, снижает регистрируемые показатели ЛДФ. Обнаруженный эффект необходимо учитывать как при интерпретации данных ЛДФ, так и при разработке и обосновании медико-технических требований для приборов ЛДФ [10].

## **ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Тестируемая область**

Регистрация параметров микроциркуляции происходила по трем физиологически значимым точкам: в симметричных участках кожи наружной поверхности дистального конца предплечья правой и левой руки (в зоне Захарьина-Геда для сердца); в симметричных участках кожи подушечки 2-го пальца кисти правой и левой руки; а также в коже лба, по краю волосистой части головы.

Данные области кожи были выбраны с целью изучения особенностей микроциркуляции в зонах с различными доминирующими регуляторными влияниями, с различной плотностью функционирующих капилляров и различной толщиной кожного эпидермиса.

Край волосистой части головы не содержит большого количества волос и это способствует получению более точных результатов канала. Для этой области характерен самый низкий индекс флаксомоций, отражающий сбалансированность симпатических и парасимпатических влияний на регуляцию кровотока.

Наружный дистальный конец предплечья обеих рук выбран из-за малого количества артериоло-венулярных анастомозов. За счет этого мы можем исследовать кровотоки в нутритивных микрососудах.

Палец кисти был выбран из-за скопления большого количества вегетативных и сенсорных нервных волокон и анастомозов, что способствует изучению нейрососудистой функции.

### **Условия исследований**

Данное исследование проводилось при определенных стандартизированных условиях:

1. все эксперименты проходили в специально оборудованной лаборатории, где поддерживалась комфортная температура воздуха 18-22 °С;

2. на протяжении эксперимента была обеспечена полная тишина;
3. испытуемые находились в удобной позе, в положении сидя, неподвижно на протяжении всего времени регистрации параметров кровотока;
4. эксперимент проводился при условии обеспечения стабильности положения зондов, а также поддержания равномерности давления наконечников зондов на ткани.

В исследовании в качестве испытуемых приняли участие темнокожие юноши и девушки 18-20-летнего возраста, приехавшие на обучение из африканских стран Кот-д'Ивуара и Камеруна, а также светлокожие юноши и девушки 18-21-летнего возраста с европейским фототипом. Всего в эксперименте участвовало 9 темнокожих (4 девушки и 5 юношей) и 9 светлокожих (6 девушек и 3 юноши) испытуемых.

Перед началом эксперимента участники были проинформированы о цели данной работы, о ходе экспериментов, было получено их добровольное согласие на участие в исследовании. Испытуемые были практически здоровы, не курили и не употребляли алкогольные напитки, а также кофеиносодержащие напитки и препараты.

### **Методика проведения функциональных тестов**

Для исследования особенностей кровообращения в микроциркуляторном русле кожи темнокожих испытуемых нами регистрировались показатели в нативном состоянии. Данные для контралатеральных участков кожи регистрировались одновременно в симметричных областях. Регистрация данных проходила в течение 10 минут для каждого участка кожи. Для регистрации показателя микроциркуляции (ПМ) использовали двухканальный лазерный доплеровский флоуметр ЛАКК-ОП (НПП «ЛАЗМА») с длиной волны 0.8 мкм.

### **Обработка ЛДФ-грамм**

Зарегистрированные ЛДФ-граммы анализировали на основе амплитудно-частотных характеристик и амплитудной динамики субсигналов, выде-

ленных посредством цифровой полосовой фильтрации на основе алгоритмов, реализующих непрерывное адаптивное вейвлет-преобразование.

Анализ спектров и фильтрацию проводили в 5 частотных диапазонах, колебания в которых возникают при воздействии физиологических процессов [17]:

- 0.006 – 0.02 Гц – диапазон эндотелиальной активности (E);
- 0.02 – 0.06 Гц – диапазон нейрогенной активности (N);
- 0.06 – 0.2 Гц – диапазон собственной миогенной активности (M);
- 0.2 – 0.4 Гц – диапазон респираторного ритма (R);
- 0.8 – 1.6 Гц – диапазон кардиоритма (C).

Статистический анализ полученных данных проводили с использованием программы SigmaPlot 13.0 (Systat Software, Inc., 2014). Для сравнения средних использовали t-критерий Стьюдента для независимых выборок. Статистически значимыми считали различия при  $p < 0.05$ .

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Особенности микроциркуляции крови в коже предплечья у темнокожих студентов

Результаты статистического анализа показателей микроциркуляции крови в коже предплечья темнокожих студентов по сравнению со светлокожими студентами в нативном состоянии приведены в таблице 3.

Таблица 3

#### Усредненные статистические и спектральные показатели ЛДФ-грамм кровотока в коже предплечья темнокожих и светлокожих студентов (M±m, n = 9)

| Параметры    | Светлокожие студенты | Темнокожие студенты |
|--------------|----------------------|---------------------|
| ПМ, пф.ед.   | 8.49±0.55            | 7.97±0.47           |
| СКО, пф.ед.  | 0.44±0.04            | 0.81±0.18*          |
| КВ, %        | 5.10±0.28            | 10.59±2.35          |
| A(E), пф.ед. | 0.13±0.02            | 0.35±0.08*          |
| A(N), пф.ед. | 0.18±0.03            | 0.29±0.04*          |
| A(M), пф.ед. | 0.18±0.02            | 0.25±0.04*          |
| A(R), пф.ед. | 0.13±0.02            | 0.14±0.03           |
| A(C), пф.ед. | 0.22±0.03            | 0.39±0.03*          |
| Ч(E), Гц     | 0.02±8.46e-4         | 0.02±1.27e-3        |
| Ч(N), Гц     | 0.04±3.76e-3         | 0.04±0.01           |
| Ч(M), Гц     | 0.08±0.01            | 0.09±0.02           |
| Ч(R), Гц     | 0.29±0.04            | 0.30±0.04           |
| Ч(C), Гц     | 1.00±0.05            | 0.90±0.04           |

*Примечание:* СКО – среднее квадратическое отклонение, КВ – коэффициент вариации, А – амплитуда колебаний в соответствующем частотном диапазоне, Ч – пиковая частота колебаний в соответствующем частотном диапазоне.

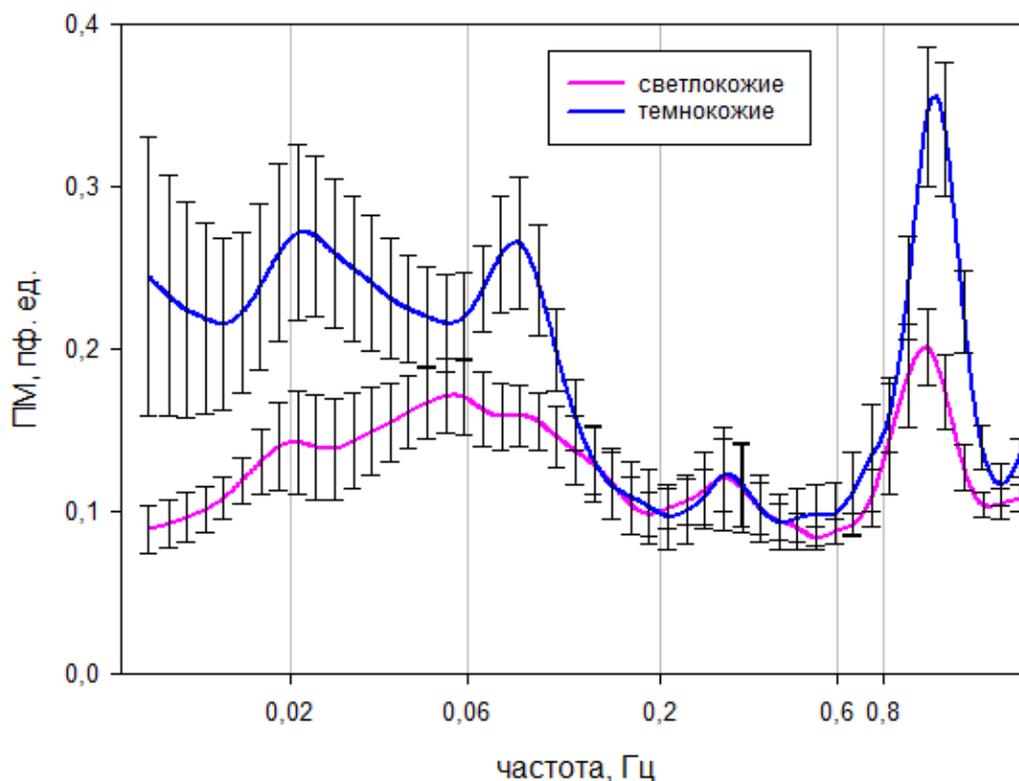
В результате проведенного нами исследования было установлено, что в группе темнокожих испытуемых величина ПМ достоверно не отличается по сравнению с группой светлокожих, то есть общая величина средней перфу-

зии в микроциркуляторном русле кожи предплечья в обеих группах сходна. Однако достоверный рост показателя колеблемости потока крови – СКО (в 1,84 раза по сравнению с группой светлокожих) свидетельствует о более высокой подвижности эритроцитов у темнокожих испытуемых. При этом группа светлокожих испытуемых характеризуется незначительной степенью (коэффициент вариации составляет 5%), а темнокожих – средней степенью (коэффициент вариации составляет 10,6%) рассеивания данных. Увеличение  $\sigma$  однозначно интерпретировать нельзя. С одной стороны ее повышение может быть обусловлено более выраженным функционированием механизмов активного контроля микроциркуляции, с другой стороны – может быть отражением роста амплитуд сердечных и дыхательных ритмов.

Для выяснения вопроса о том, какие механизмы участвуют в регуляции процессов микроциркуляции крови в коже предплечья (в зоне Захарьина-Геда для сердца на предплечье) темнокожих студентов по сравнению со светлокожими, проведен спектральный анализ ЛДФ-грамм. Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм кровотока кожи предплечья темнокожих и светлокожих студентов в нативном состоянии представлены на рис. 4.

Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм по группе темнокожих испытуемых обнаруживают достоверно более высокие значения амплитуд колебаний в диапазонах эндотелиальной, нейрогенной и миогенной активности (выше в 2,7; 1,6 и 1,4 раза, соответственно), а также в диапазоне кардиоритма (выше в 1,8 раза).

Амплитуды колебаний кровотока в нейрогенном и миогенном диапазонах являются отражением диаметров просвета артериол и артериоло-венулярных анастомозов микроциркуляторного русла.



*Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм темнокожих и светлокожих студентов. Исследуемая область – предплечье.*

Более высокие показатели амплитуд колебаний в диапазоне нейрогенной активности у темнокожих испытуемых (выше в 1,6 раза) можно объяснить менее выраженными симпатическими адренергическими влияниями на гладкие мышцы их артериол и артериолярных участков артериоло-венулярных анастомозов. Такие значения амплитуд колебаний в указанном диапазоне указывают на возможно более высокие значения кровотока по артериоло-венулярным анастомозам вследствие меньшего периферического сопротивления артериол.

Это подтверждается и достоверно большими показателями миогенного тонуса у темнокожих студентов. У них нами отмечены более высокие значения амплитуды колебаний в миогенном диапазоне (выше в 1,4 раза), что указывает на меньшие значения периферического сопротивления в сосудах темнокожих испытуемых по сравнению со светлокожими. А более низкие значения мышечного сопротивления, в свою очередь, свидетельствуют о более вы-

соких значениях нутритивного кровотока у темнокожих испытуемых по сравнению со светлокожими.

С амплитудами колебаний кровотока в нейрогенном и миогенном диапазоне тесно связана амплитуда пульсовой волны (диапазон кардиоритма).

Амплитуда пульсовой волны, приходящей в микроциркуляторное русло со стороны артерий, у темнокожих студентов выше в 1,8 раза. Связь этого параметра с состоянием тонуса резистивных сосудов (артериол и прекапилляров), позволяет в нашем случае отметить, что тонус сосудов у темнокожих студентов ниже, чем у светлокожих, и, следовательно, объем притока артериальной крови в микроциркуляторное русло темнокожих студентов, модулированный пульсовой волной, оказывается выше, чем у светлокожих.

Таким образом, для темнокожих испытуемых можно отметить большую величину кровотока по капиллярному звену микроциркуляторного русла, а, следовательно, и лучшее снабжение их клеток и тканей питательными веществами и кислородом по сравнению со светлокожими испытуемыми.

Продукция эндотелием сосудов оксида азота (II) - NO является неотъемлемым компонентом физиологической регуляции мышечного тонуса как важный регулятор давления и распределения потока крови. Значительно более высокие показатели амплитуд колебаний в диапазоне эндотелиальной активности (выше в 2,7 раза), вероятно, указывают на более высокую метаболическую активность клеток эндотелия темнокожих испытуемых. Можно предположить более активное высвобождение эндотелием вазоактивных веществ, что и объясняет рост амплитуды колебаний. Более высокие значения амплитуд колебаний в данном диапазоне вероятнее всего являются отражением деятельности эндотелия, обусловленной медленными ритмическими метаболическими процессами, влияющими на транспортную функцию крови, содействующими тем самым обменным процессам в микроциркуляторном звене.

Амплитуды колебаний в диапазоне респираторной активности, обусловленные присасывающим действием «дыхательного насоса», как у темно-

кожих, так и у светлокожих характеризуются сходными значениями. Равенство показателей дыхательной волны в микроциркуляторном русле кожи предплечья отражает сходную динамику венозного давления в его венолярном звене (сходство градиентов артерио-венозного давления) в процессе внешнего дыхания.

### **3.2. Особенности микроциркуляции крови в коже концевой фаланги пальца руки у темнокожих студентов**

Результаты статистического анализа данных об особенностях микроциркуляции крови в коже концевой фаланги пальца руки темнокожих студентов по сравнению со светлокожими студентами в нативном состоянии приведены в таблице 4.

*Таблица 4*

**Усредненные статистические и спектральные показатели ЛДФ-грамм кровотока в коже концевой фаланги пальца руки темнокожих и светлокожих студентов ( $M \pm m$ ,  $n = 9$ )**

| <b>Серия</b> | <b>Светлокожие студенты</b> | <b>Темнокожие студенты</b> |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|
| ПМ, пф.ед.   | 15.18±1.75                  | 17.06±2.27                 |
| СКО, пф.ед.  | 0.76±0.08                   | 1.32±0.20*                 |
| КВ, %        | 5.11±0.60                   | 8.40±1.24                  |
| A(E), пф.ед. | 0.17±0.03                   | 0.66±0.15*                 |
| A(N), пф.ед. | 0.34±0.05                   | 0.53±0.10*                 |
| A(M), пф.ед. | 0.30±0.04                   | 0.40±0.07                  |
| A(R), пф.ед. | 0.15±0.02                   | 0.20±0.04                  |
| A(C), пф.ед. | 0.48±0.08                   | 0.78±0.14*                 |
| Ч(E), Гц     | 0.02±1.27e-3                | 0.01±1.28e-3               |
| Ч(N), Гц     | 0.05±2.44e-3                | 0.03±3.03e-3               |
| Ч(M), Гц     | 0.08±0.01                   | 0.07±2.51e-3               |
| Ч(R), Гц     | 0.29±0.04                   | 0.38±0.06                  |
| Ч(C), Гц     | 1.09±0.06                   | 0.95±0.05                  |

*Примечание:* СКО – среднее квадратическое отклонение, КВ – коэффициент вариации, А – амплитуда колебаний в соответствующем

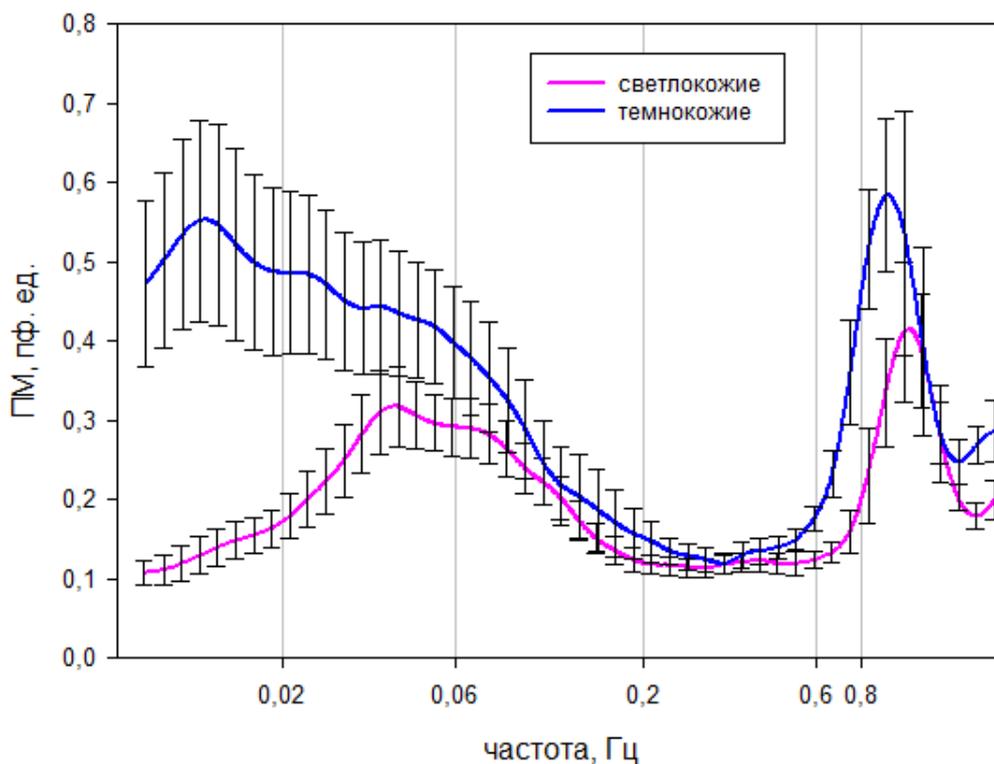
частотном диапазоне, Ч – пиковая частота колебаний в соответствующем частотном диапазоне.

В результате анализа данных ЛДФ-грамм было установлено, что в коже концевой фаланги пальца руки также как и в коже предплечья у темнокожих испытуемых величина ПМ достоверно не отличается по сравнению с группой светлокожих. Таким образом, мы не можем говорить о наличии каких-либо отличий в объеме крови, протекающей за единицу времени через единицу объема микроциркуляторного русла кожи пальцев руки в зависимости от цвета кожи. Однако достоверный рост показателя СКО в этом случае (в 1,74 раза по сравнению с группой светлокожих) указывает на более глубокую модуляцию кровотока в микрососудистом русле кожи пальцев у темнокожих испытуемых. При этом обе группы испытуемых характеризуются незначительной степенью рассеивания данных (коэффициент вариации менее 10 %).

Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм кровотока кожи концевых фаланг пальцев руки темнокожих и светлокожих студентов в нативном состоянии представлены на рис. 5.

Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм по группе темнокожих испытуемых обнаруживают достоверно более высокие значения амплитуд колебаний в диапазонах эндотелиальной и нейрогенной активности (выше в 3,9 и 1,6 раза, соответственно), а также в диапазоне пульсовой волны (выше в 1,6 раза).

Кожа подушечки 2-ого пальца кисти наиболее богата вегетативными и сенсорными нервными волокнами по сравнению с кожей предплечья. В этой области традиционно исследуется нейрогенная регуляция сосудов. Более высокие показатели амплитуд колебаний в диапазоне нейрогенной активности (выше в 1,6 раза) могут указывать на меньшую выраженность симпатических адренергических влияний на мышечные элементы сосудистой стенки микроциркуляторного русла у темнокожих испытуемых в этой зоне.



*Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм темнокоржих и светлокоржих студентов. Исследуемая область – концевая фаланга пальца руки.*

Амплитуды колебаний в диапазоне миогенных колебаний в коже подушечки 2-го пальца у темнокоржих и светлокоржих испытуемых не выявили достоверных различий, что может указывать на близость значений периферического сопротивления в сосудах, обусловленных вазомоциями. Таким образом, можно сделать вывод, что нутритивный кровоток в коже концевых фаланг пальцев у темнокоржих и светлокоржих испытуемых не имеет принципиальных различий.

Амплитуда пульсовых колебаний, приходящих в микроциркуляторное русло кожи 2-го пальца руки со стороны артерий, у темнокоржих студентов выше в 1,6 раза. Это позволяет говорить о более низком тоне сосудов у темнокоржих студентов, и, следовательно, о большем объеме артериальной крови в микроциркуляторном русле кожи пальца темнокоржих студентов, модулированной пульсовой волной.

Таким образом, для микроциркуляции в коже 2-го пальца руки темнокожих испытуемых можно отметить большую величину кровотока по капиллярному звену микроциркуляторного русла по сравнению со светлокожими испытуемыми, где кровоток в значительной мере осуществляется по артериоло-венулярным анастомозам, как и в случае кожи предплечья.

Показатели амплитуд колебаний в диапазоне эндотелиальной активности (выше в 3,9 раза) указывают на значительно большую метаболическую активность клеток эндотелия кожи 2-го пальца руки темнокожих испытуемых в высвобождении ими вазоактивных веществ по сравнению со светлокожими.

Отсутствие достоверных отличий в диапазоне респираторной активности в микроциркуляторном русле кожи 2-го пальца руки указывает на отсутствие отличий в градиентах артерио-венозного давления в этом участке кожи у светлокожих и темнокожих испытуемых.

При сравнительном анализе амплитудно-частотных характеристик ЛДФ-грамм кожи предплечья и кожи концевой фаланги 2-го пальца руки темнокожих нами выявлены достоверно более высокие значения амплитуд колебаний в эндотелиальном, нейрогенном и миогенном диапазонах (выше в 1,9; 1,8 и 1,6 раза, соответственно) и, а также в диапазоне кардиоритма (выше в 2 раза) для концевой фаланги 2-го пальца руки. Показатель микроциркуляции и СКО в коже концевой фаланги 2-го пальца руки темнокожих также характеризуются достоверно большими значениями по сравнению с кожей предплечья (выше в 2,2 и 1,6 раза, соответственно).

Для испытуемых со светлым цветом кожи в свою очередь характерны более высокие статистические и спектральные показатели кровотока в коже концевой фаланги 2-го пальца руки по сравнению с предплечьем, однако характер этих отличий не для всех показателей одинаков по сравнению с темнокожими. Так, ПМ в коже пальца у светлокожих достоверно выше в 1,8 раза; СКО – в 1,7 раза; амплитуда нейрогенных колебаний выше в 1,9 раза; миогенных – в 1,7 раза; колебаний, обусловленных пульсовой волной – в 2,2

раза. При этом амплитуда колебаний в диапазоне эндотелиальной активности в коже пальца не обнаруживает у испытуемых со светлым цветом кожи достоверных отличий по сравнению с предплечьем.

Таким образом, метаболическая активность эндотелия сосудов микроциркуляторного русла кожи концевой фаланги пальца руки не имеет выраженных отличий по сравнению с активностью эндотелия сосудистого русла кожи предплечья у светлокожих испытуемых, в отличие от темнокожих.

### **3.3. Особенности микроциркуляции крови в коже лба у темнокожих студентов**

Результаты статистического анализа данных об особенностях микроциркуляции крови в коже лба темнокожих студентов по сравнению со светлокожими студентами в нативном состоянии приведены в таблице 5.

*Таблица 5*

#### **Усредненные статистические и спектральные показатели ЛДФ-грамм кровотока в коже лба темнокожих студентов в нативном состоянии (M±m, n = 9)**

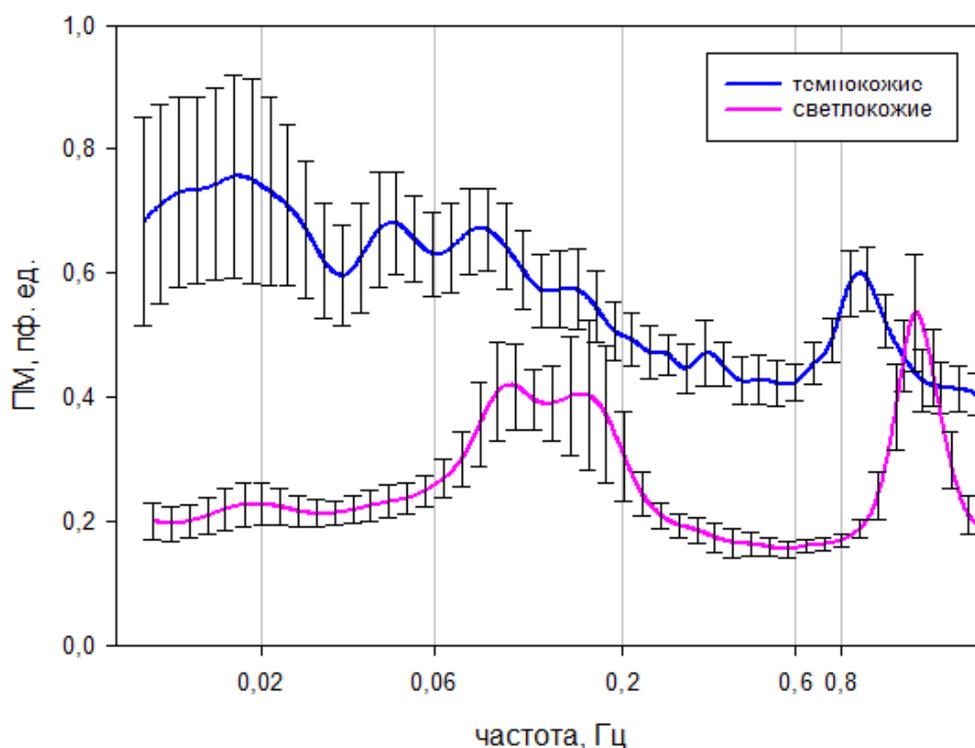
| <b>Серия</b> | <b>Светлокожие студенты</b> | <b>Темнокожие студенты</b> |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|
| ПМ, пф.ед.   | 19.55±1.43                  | 10.93±0.61*                |
| СКО, пф.ед.  | 1.60±0.21                   | 2.30±0.32*                 |
| КВ, %        | 7.77±1.10                   | 18.97±2.48                 |
| A(E), пф.ед. | 0.20±0.01                   | 0.80±0.09*                 |
| A(N), пф.ед. | 0.21±0.05                   | 0.74±0.04*                 |
| A(M), пф.ед. | 0.49±0.07                   | 0.69±0.13*                 |
| A(R), пф.ед. | 0.17±0.03                   | 0.54±0.11*                 |
| A(C), пф.ед. | 0.55±0.13                   | 0.69±0.06                  |
| Ч(E), Гц     | 0.01±9.34e-4                | 0.02±3.92e-3               |
| Ч(N), Гц     | 0.03±3.21e-3                | 0.04±0.01                  |
| Ч(M), Гц     | 0.09±0.01                   | 0.09±0.01                  |
| Ч(R), Гц     | 0.32±0.03                   | 0.24±0.02                  |
| Ч(C), Гц     | 1.26±0.04                   | 0.92±0.05                  |

*Примечание:* СКО – среднее квадратическое отклонение, КВ – коэффициент вариации, А – амплитуда колебаний в соответствующем частотном диапазоне, Ч – пиковая частота колебаний в соответствующем частотном диапазоне.

В коже лба у темнокожих испытуемых ПМ достоверно ниже в 1,8 раза по сравнению со светлокожими, таким образом, базальный кровоток кожи лба темнокожих характеризуется меньшим объемом крови, протекающим в единицу времени через единицу площади сечения микрососудистого русла.

Анализ результатов по характеристикам variability выявил у темнокожих испытуемых достоверно более выраженные механизмы контроля за постоянством потока крови в микроциркуляторном русле кожи лба: СКО в коже лба – выше в 1,44 раза по сравнению со светлокожими.

Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм кровотока кожи лба темнокожих и светлокожих студентов в нативном состоянии представлены на рис. 6.



*Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм темнокожих и светлокожих студентов. Исследуемая область – кожа лба.*

В диапазонах активной модуляции кровотока: эндотелиальном, нейрогенном и миогенном отмечены более высокие значения амплитуд колебаний. В диапазоне эндотелиальной активности для кожи лба – амплитуда выше в 4 раза; в нейрогенном – в 3,5 раза; а в миогенном – в 1,4 раза по сравнению со светлокожими. Колебания в указанных диапазонах формируются непосредственно в микроциркуляторном русле кожи и могут быть обусловлены либо спонтанными сокращениями гладкомышечных клеток сосудов (вазомоциями), либо высвобождением вазоактивных веществ эндотелием, либо действием локальных факторов нейрогенной природы.

В диапазонах пассивной модуляции кровотока (респираторные и пульсовые колебания) у темнокожих испытуемых нами также обнаружены достоверные различия, обусловленные центральными механизмами регуляции: в коже лба у темнокожих испытуемых оказалась в 3,2 раза выше амплитуда респираторных колебаний. Показатели амплитуд колебаний в диапазоне респираторной активности, обусловленные присасывающим действием «дыхательного насоса», в коже лба у темнокожих отражают динамику венозного давления в веноулярном звене микрососудистого русла (градиентов артерио-венозного давления) в процессе внешнего дыхания. Большие значения этого показателя, отмеченные нами в коже лба темнокожих испытуемых, могут быть отражением большего объема крови в ее веноулярном звене. Пульсовые колебания при в ходе амплитудно-частотного анализа не обнаружили достоверных различий.

#### **3.4. Синхронизация показателей ЛДФ-грамм кровотока кожи в правом и левом предплечье темнокожих студентов**

Результаты статистического анализа данных о синхронизации показателей ЛДФ-грамм кровотока в коже правого и левого предплечья темнокожих студентов в нативном состоянии приведены в таблице 6.

**Усредненные статистические и спектральные показатели ЛДФ-грамм кровотока в коже правого и левого предплечья темнокожих студентов в нативном состоянии ( $M \pm m$ ,  $n = 9$ )**

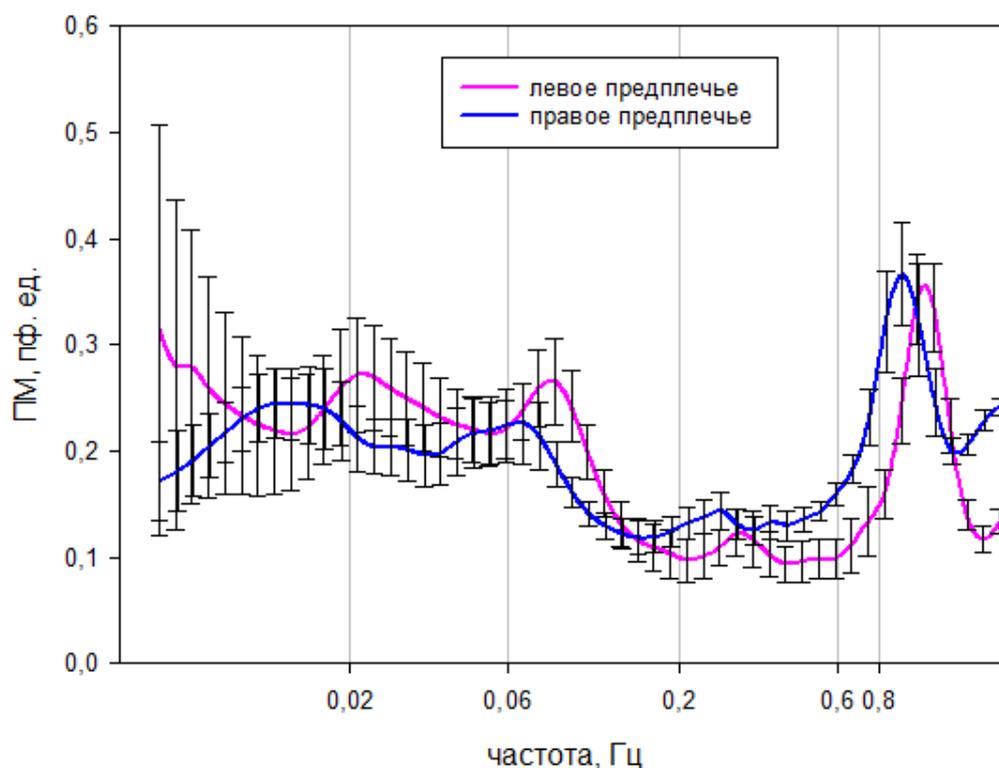
| <b>Серия</b> | <b>Левое предплечье</b> | <b>Правое предплечье</b> |
|--------------|-------------------------|--------------------------|
| ПМ, пф.ед.   | 7.97±0.47               | 9.17±0.46                |
| СКО, пф.ед.  | 0.81±0.18               | 0.74±0.05                |
| КВ, %        | 8.59±2.35               | 6.46±0.45                |
| A(E), пф.ед. | 0.35±0.08               | 0.28±0.03                |
| A(N), пф.ед. | 0.29±0.04               | 0.25±0.03                |
| A(M), пф.ед. | 0.25±0.04               | 0.23±0.04                |
| A(R), пф.ед. | 0.14±0.03               | 0.16±0.02                |
| A(C), пф.ед. | 0.39±0.03               | 0.41±0.06                |
| Ч(E), Гц     | 0.02±1.27e-3            | 0.01±1.24e-3             |
| Ч(N), Гц     | 0.04±0.01               | 0.03±3.73e-3             |
| Ч(M), Гц     | 0.09±0.02               | 0.08±0.01                |
| Ч(R), Гц     | 0.30±0.04               | 0.33±0.04                |
| Ч(C), Гц     | 0.90±0.04               | 1.05±0.07                |

*Примечание:* СКО – среднее квадратическое отклонение, КВ – коэффициент вариации, А – амплитуда колебаний в соответствующем частотном диапазоне, Ч – пиковая частота колебаний в соответствующем частотном диапазоне.

В условиях проведенного нами исследования достоверных различий в статистических параметрах микроциркуляторного кровотока в коже предплечий обеих рук в нативном состоянии у темнокожих испытуемых не выявлено. Кровоток у темнокожих испытуемых сходен как по показателю микроциркуляции (базовый уровень), так и по характеристикам вариабельности (среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации).

Амплитудно-частотный анализ данных, полученных при сравнении показателей, представлен на рис. 7. Достоверные отличия в спектральных ха-

рактических характеристиках кровотока в коже предплечий обеих рук в нативном состоянии у темнокожих также отсутствуют. Такая выраженная синхронизация колебаний кровотока на пространственно разобщенных участках кожи может отражать преимущество центральных механизмов над локальными механизмами регуляции кровотока в микроциркуляторном русле кожи предплечья у темнокожих испытуемых. Высокую степень синхронизации флуксуаций в контралатеральных участках микроциркуляторного русла кожи предплечья можно объяснить существованием общего источника таких колебаний [12].



*Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм в левом и правом предплечье темнокожих студентов.*

Поскольку пульсовые и респираторные колебания формируются за пределами системы микроциркуляции и проникают в микроциркуляторное русло в пассивной форме преимущественно за счет гидростатических механизмов [17], то и синхронизация процессов в данных частотных диапазонах в

коже обеих предплечий высокая и не должна зависеть от расстояния. В нашем эксперименте ЛДФ-граммы темнокожих, например, характеризуются наличием синхронизации как в диапазоне кардиоритма, где общим источником выступают пульсовые колебания, причиной формирования которых служат сердечные сокращения, так и в диапазоне респираторных колебаний, где общим источником выступает «дыхательный насос», возникающий при дыхательных движениях.

В свою очередь колебания кровотока в частотных диапазонах E, N и M формируются непосредственно в микроциркуляторном русле кожи и могут быть обусловлены либо спонтанными сокращениями гладкомышечных клеток сосудов (вазомоциями), либо высвобождением вазоактивных веществ эндотелием, либо действием локальных факторов нейрогенной природы. Такие механизмы формирования флаксомоций практически исключают синхронность колебаний в контралатеральных участках микроциркуляторного русла кожи в данных частотных диапазонах.

В нашем исследовании, напротив, наблюдается высокая степень синхронизации и в частотных диапазонах E, N и M. Высокую синхронизацию колебаний нейрогенной природы, предположительно, можно объяснить фоновой активностью симпатической нервной системы. Наблюдаемая синхронизация колебаний эндотелий-зависимых и миогенных колебаний позволяет предположить наличие неидентифицированных факторов, синхронизирующих локальные процессы в коже предплечий темнокожих испытуемых.

### **3.5. Синхронизация показателей ЛДФ-грамм кровотока кожи в дистальной фаланге пальцев правой и левой руки темнокожих студентов**

Результаты статистического анализа данных о синхронизации показателей ЛДФ-грамм кровотока в коже дистальных фаланг пальцев правой и левой руки темнокожих студентов приведены в таблице 7.

*Таблица 7*

**Усредненные статистические и спектральные показатели ЛДФ-грамм  
кровотока в коже дистальной фаланги пальцев правой и левой руки  
темнокожих студентов в нативном состоянии**

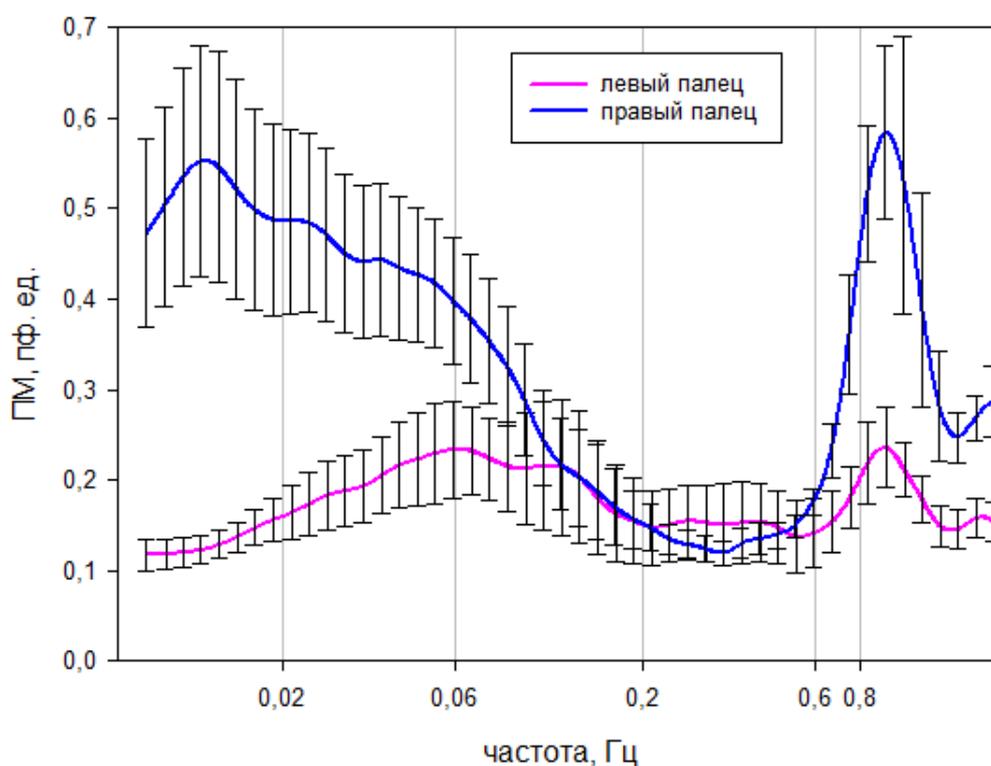
| <b>Серия</b> | <b>Дистальная фаланга<br/>пальца левой руки</b> | <b>Дистальная фаланга<br/>пальца правой руки</b> |
|--------------|---|--|
| ПМ, пф.ед.   | 7.88±0.30                                       | 17.06±2.27*                                      |
| СКО, пф.ед.  | 0.60±0.10                                       | 1.32±0.20*                                       |
| КВ, %        | 7.00±1.48                                       | 8.40±1.24  |
| A(E), пф.ед. | 0.16±0.02                                       | 0.66±0.15*                                       |
| A(N), пф.ед. | 0.24±0.05                                       | 0.53±0.10*                                       |
| A(M), пф.ед. | 0.27±0.07                                       | 0.40±0.07  |
| A(R), пф.ед. | 0.17±0.05                                       | 0.20±0.04  |
| A(C), пф.ед. | 0.27±0.04                                       | 0.78±0.14*                                       |
| Ч(E), Гц     | 0.02±1.13e-3                                    | 0.01±1.28e-3                                     |
| Ч(N), Гц     | 0.04±3.78e-3                                    | 0.03±3.03e-3                                     |
| Ч(M), Гц     | 0.08±0.01                                       | 0.07±2.51e-3                                     |
| Ч(R), Гц     | 0.32±0.03                                       | 0.38±0.06  |
| Ч(C), Гц     | 1.01±0.07                                       | 0.95±0.05  |

*Примечание:* СКО – среднее квадратическое отклонение, КВ – коэффициент вариации, А – амплитуда колебаний в соответствующем частотном диапазоне, Ч – пиковая частота колебаний в соответствующем частотном диапазоне.

В условиях проведенного нами исследования у темнокожих испытуемых обнаружены достоверные различия в статистических параметрах микроциркуляторного кровотока в коже концевых фаланг 2-го пальца правой и левой руки в нативном состоянии. Микроциркуляция в коже пальца правой руки у них значительно выше как по показателю базового кровотока (ПМ выше в 2,2 раза), так и по характеристикам variability (СКО выше в 2 раза, коэффициенты вариации в обеих пальцах менее 10%).

Амплитудно-частотный анализ данных, полученных при сравнении показателей, представлен на рис. 8. Достоверные отличия в спектральных ха-

рактических характеристиках кровотока в коже пальцев обеих рук в нативном состоянии у темнокожих также выявлены нами в ходе анализа. Колебания синхронизированы по диапазонам М и R; отсутствие синхронизации обнаружено в диапазонах E, N и C.



*Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики (спектры) ЛДФ-грамм в дистальной фаланге пальцев левой и правой руки темнокожих студентов.*

Высокая степень синхронизации респираторных колебаний, обусловленных механизмами центрального характера и связанных с действием «дыхательного насоса», объясняется тем, что эти колебания, формируясь за пределами микроциркуляторного русла кожи концевых фаланг пальцев руки, проникают в него пассивным способом. Таким же общим источником колебаний кровотока на пространственно разобщенных участках кожи служат и колебания, обусловленные пульсовой волной (диапазон кардиоритма). Однако в нашем эксперименте синхронизации пульсовых колебаний в коже паль-

цев левой и правой руки у темнокожих испытуемых обнаружить не удалось. Напротив, нами получены достоверные различия по амплитудам колебаний в указанном диапазоне, причем для кожи пальца правой руки амплитуда в 2,9 раза превышает амплитуду для кожи пальца левой руки.

Колебания кровотока в частотных диапазонах Е, N и М, формирующиеся за счет активных локальных механизмов регуляции и практически исключающие синхронность этих колебаний в контралатеральных участках микроциркуляторного русла кожи, в нашем исследовании, напротив, обнаружили достаточно высокую степень синхронизации в диапазоне миогенной активности, обусловленной спонтанной активностью гладкомышечных клеток микрососудистого русла. Результаты, полученные нами для флаксомаций в указанном диапазоне, противоречат существующим представлениям о локализации источников формирования указанных колебаний. Дальнодействие механизмов синхронизации спонтанных вазомоций составляет порядка нескольких миллиметров [Nilsson H. et al., 2003].

В свою очередь полученные нами данные рассинхронизации в частотных диапазонах нейрогенной и эндотелиальной природы хорошо согласуются с теоретическими представлениями [Nilsson H. et al., 2003]. Флуктуации, обусловленные модуляцией вазомоций со стороны эндотелия сосудов или локальных факторов нейрогенной природы, приводят к тому, что в контралатеральных участках микроциркуляторного русла кожи пальцев правой и левой руки у темнокожих испытуемых нами отмечены различающиеся по амплитуде колебания. Так, амплитуды колебаний в диапазоне эндотелиальной и нейрогенной активности в коже пальца правой руки в 4,1 и 2,2 раза, соответственно, превышают амплитуду тех же колебаний в коже пальца левой руки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы широкие возможности метода ЛДФ в неинвазивной диагностике нарушений регуляции гемомикроциркуляции начали широко использоваться не только для пациентов со светлым цветом кожи, но и для пациентов с темным цветом кожи. Это в первую очередь потребовало оценки способности темной кожи пропускать лазерное излучение анализатора капиллярного кровотока для адекватной регистрации показателя микроциркуляции [29].

Следующей задачей становится получение статистически достоверных сведений о наличии или отсутствии у условно здоровых испытуемых с темным цветом кожи особенностей статистических и спектральных показателей данных лазерной доплеровской флоуметрии по сравнению с условно здоровыми испытуемыми со светлым цветом кожи. Такие сведения необходимы для адекватного сравнительного анализа данных, полученных для темнокожих пациентов с различными заболеваниями, приводящими к нарушению гемомикроциркуляции. Особенно это важно в кардиологии, диабетологии, стоматологии, дерматологии, онкологии, хирургии и реаниматологии.

По нашему мнению, такой анализ колебаний кровотока темнопигментированной кожи поможет внести вклад в понимание механизмов регуляции в системе микроциркуляции, поскольку модуляции (переменная составляющая ЛДФ-граммы) несут информацию о состоянии сосудистого тонуса и механизмах контроля за перфузией, включающих как пассивные (пульсовая и дыхательная волны), так и активные факторы (эндотелиальная активность, нейрогенный и миогенный тонус).

В ходе проведенного нами исследования зарегистрированы параметры микроциркуляции кожи различных участков тела у группы условно здоровых испытуемых с темнопигментированной кожей из Камеруна и Кот-д'Ивуара – стран Африки, для коренных популяций которых в соответствии с хроматической шкалой фон Лушана характерны показатели цвета кожи от 27 до 29. Исследованы особенности микроциркуляции в коже симметричных участков

правой и левой верхней конечности: в области предплечья вблизи лучезапястного сустава (в зоне Захарьина-Геда для сердца), в области ладонной поверхности дистальной фаланги 2-го пальца, а также в коже лба по краю волосистой части головы.

В результате проведенного исследования в коже предплечья и концевой фаланги пальца не обнаружено достоверных отличий ПМ у темнокожих и светлокожих испытуемых, что указывает на сходство значений средней перфузии в микроциркуляторном русле за определенный промежуток времени исследований. В коже лба у темнокожих испытуемых ПМ достоверно ниже в 1,8 раза по сравнению со светлокожими, таким образом, базальный кровоток темнокожих характеризуется меньшим объемом крови, протекающим через единицу площади сечения микрососудистого русла кожи лба в единицу времени.

Анализ результатов по характеристикам вариабельности выявил у темнокожих испытуемых достоверно более выраженные механизмы контроля за перфузией, что свидетельствует о более активной модуляции кровотока как в коже предплечья и пальца руки, так и кожи лба. СКО в коже предплечья оказалась выше в 1,84 раза; в коже концевой фаланги пальца – в 1,74 раза; в коже лба – в 1,44 раза. Такие выраженные отличия СКО как переменной составляющей ЛДФ-сигнала обусловлены факторами, влияющими на постоянство потока крови в микроциркуляторном русле.

Амплитудно-частотный анализ данных доплерограмм показал, что спектральные характеристики кровотока темнокожих испытуемых в нативном состоянии также характеризуются рядом особенностей по сравнению с испытуемыми со светлым цветом кожи. Обнаружены более высокие показатели амплитуд колебаний во всех диапазонах активной модуляции кровотока, обусловленных действием местных механизмов регуляции (в диапазонах эндотелиальной, нейрогенной и миогенной активности).

Наибольшие отличия обнаружены нами в диапазоне эндотелиальной активности, что указывает на более высокую метаболическую активность

клеток эндотелия темнокожих испытуемых по высвобождению вазоактивных веществ. Так для кожи предплечья амплитуда выше в 2,7 раза; в коже концевой фаланги пальца – в 3,9 раза; в коже лба – в 4 раза. В нейрогенном и миогенном диапазонах также отмечены более высокие значения амплитуд колебаний. В нейрогенном диапазоне для кожи предплечья и концевой фаланги пальца руки амплитуда выше в 1,6 раза, в коже лба – в 3,5 раза; в миогенном диапазоне – для кожи предплечья и лба амплитуда выше в 1,4 раза; в коже концевой фаланги пальца руки достоверных отличий не обнаружено.

В диапазонах пассивной модуляции кровотока (респираторные и пульсовые колебания) у темнокожих испытуемых нами также обнаружены достоверные различия, обусловленные центральными механизмами регуляции кровотока. Так, в коже предплечья и дистальной фаланги пальца руки оказались выше (в 1,8 и 1,6 раза, соответственно) амплитуды пульсовых колебаний; а в коже лба в 3,2 раза выше амплитуда респираторных колебаний.

В ходе исследования пространственной синхронизации осцилляции кровотока в контралатеральных участках кожи предплечья и кожи концевой фаланги 2-го пальца руки темнокожего условно здорового испытуемого выявлены особенности синхронизации в нативном состоянии. Обнаружена высокая степень синхронизации колебаний микроциркуляторного кровотока в коже предплечья во всех исследуемых частотных диапазонах, а также в коже концевой фаланги пальцев руки в диапазонах миогенной и респираторной активности, что позволяет говорить о наличии факторов синхронизации, имеющих центральную гемодинамическую природу. В нашем случае централизация может быть опосредована как влияниями нейрогенной природы, так и гуморальными факторами. Таким образом, выявленные нами особенности синхронизации флуксуаций отражают состояние регуляторных механизмов и могут быть использованы в диагностике микрососудистых нарушений у пациентов с темнопигментированной кожей.

## ВЫВОДЫ

Результаты, полученные нами в ходе проведенного исследования особенностей микроциркуляции крови в коже различных участков тела темнокожих испытуемых, позволяют сделать следующие выводы:

1. Базальный кровоток в микроциркуляторном русле кожи предплечья и концевой фаланги пальца темнокожих испытуемых не имеет отличий; а в коже лба – достоверно ниже в 1,8 раза по сравнению со светлокожими, что указывает на меньший объем крови, протекающей в единицу времени через единицу площади сечения микрососудистого русла кожи лба.
2. Обнаружены более выраженные механизмы контроля за перфузией: СКО в коже предплечья, пальца и лба выше в 1,84; 1,74 и 1,44 раза, соответственно, что свидетельствует о более активной модуляции кровотока как в коже предплечья и пальца руки, так и в коже лба.
3. Амплитудно-частотный анализ выявил более высокие показатели амплитуд колебаний во всех диапазонах активной модуляции кровотока: E, N и M, обусловленных действием локальных механизмов регуляции. Наибольшие отличия обнаружены в диапазоне эндотелиальной активности: амплитуды колебаний в коже предплечья, пальца и лба выше в 2,7; 3,9 и 4 раза, соответственно, что указывает на более высокую метаболическую активность клеток эндотелия темнокожих испытуемых.
4. Обнаружены достоверные различия амплитуд колебаний в диапазонах пассивной модуляции кровотока: в коже предплечья и пальца в 1,8 и 1,6 раза, соответственно, выше амплитуды пульсовых колебаний; в коже лба в 3,2 раза выше амплитуда респираторных колебаний, что обусловлено действием центральных механизмов регуляции кровотока.
5. Обнаружена высокая степень синхронизации колебаний микроциркуляторного кровотока в коже предплечья во всех исследуемых частотных диапазонах, а также в коже пальцев руки в диапазонах миогенной

и респираторной активности, что позволяет говорить о наличии факторов синхронизации, имеющих центральную гемодинамическую природу.

6. Амплитуды колебаний в диапазоне эндотелиальной и нейрогенной активности в коже пальца правой руки в 4,1 и 2,2 раза, соответственно, превышают амплитуду тех же колебаний в коже пальца левой руки, что обусловлено модуляцией вазомоций со стороны эндотелия сосудов или локальных факторов нейрогенной природы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаджанян, Н.А., Смирнов, В.М. Нормальная физиология: Учебник. [Текст] - М.: Медицинское информационное агентство, 2009. – 520 с.
2. Афанасьев, Ю.И. Гистология, цитология и эмбриология: Учебник [Текст] / Ю.И. Афанасьев, С.Т. Кузнецов, Н.А. Юрина, Е.Ф. Котовский и др.; под ред. Ю.И. Афанасьева, С.Л. Кузнецова, Н.А. Юриной. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2004. – 768 с.
3. Ахтямов, С.Н. Практическая дерматокосметология: учеб. пособие для ВУЗов [Текст] / С.Н. Ахтямов, Ю.С. Бутов. – М.: Медицина, 2008. – 400 с.
4. Бережанский, П.В. Современные представления об участии микроциркуляторных нарушений в патогенезе аллергического воспаления [Текст] / П.В. Бережанский, И.М. Мельникова, Ю.Л. Мизерницкий // Регионарное кровообращение и микроциркуляция, 2012. – Том 11. – N 4(44). – С. 4-11.
5. Большая Медицинская Энциклопедия, под редакцией Петровского Б.В., 3-е издание // Микроциркуляция – URL: <https://бмэ.орг/index.php/МИКРОЦИРКУЛЯЦИЯ> (дата обращения: 20.04.2020).
6. Большая Медицинская Энциклопедия, под редакцией Петровского Б.В., 3-е издание // Парижская анатомическая номенклатура – URL: [https://бмэ.орг/index.php/ПАРИЖСКАЯ\\_АНАТОМИЧЕСКАЯ\\_НОМЕНКЛАТУРА](https://бмэ.орг/index.php/ПАРИЖСКАЯ_АНАТОМИЧЕСКАЯ_НОМЕНКЛАТУРА) (дата обращения: 18.04.2020).
7. Брин, В.Б. Основы физиологии человека: Учебное пособие [Текст] – 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 608 с.
8. Гелашвили, П.А., Супильников, А.А., Плохова, В.А. Кожа человека (анатомия, гистология, гистопатология): учебное пособие для студентов медицинских вузов [Текст] /П.А. Гелашвили, А.А. Супильников, В.А. Плохова – Самара: НОУ ВПО МИ «РЕАВИЗ», 2013. – 168 с.

9. Давыдова, А.В. Оценка состояния микроциркуляторного русла кожи лица методом лазерной доплеровской флоуметрии [Текст] / А.В. Давыдова, А.В. Моррисон, С.Р. Утц, И.В. Меглинский, В.В. Лычагов. – Саратовский научно-медицинский журнал, 2012. – 8 (2). – С. 615-621.
10. Долгушина, Л.В., Дрёмин, В.В., Дунаев, А.В., Жеребцов, Е.А., Подмастерьев, К.В. Анализ вклада рассеяния и поглощения в общее затухание сигналов в лазерной доплеровской флоуметрии при различном содержании меланина // Биотехносфера. – 2015. – № 6 (42). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vklada-rasseyaniya-i-pogloscheniya-v-obschee-zatuhanie-signalov-v-lazernoy-doplerovskoy-floumetrii-pri-razlichnom-soderzhanii> (дата обращения: 22.05.2020).
11. Залмаев, Б.Е. Методологические аспекты изучения микроциркуляторного русла крови у спортсменов [Текст] / Б.Е. Залмаев, Т.М. Соболева. – Труды ученых ГЦОЛИФКа: 75 лет. – М., 1993. – С. 280-292.
12. Кирилина, Т.В., Красников, Г.В., Пискунова, Г.М., Танканаг, А.В., Чермерис, Н.К. Синхронизация колебаний кровотока как индикатор баланса центральных и локальных механизмов регуляции в системе микроциркуляции кожи человека // ВНМТ. – 2009. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sinhronizatsiya-kolebaniy-krovotoka-kak-indikator-balansa-tsentralnyh-i-lokalnyh-mehanizmov-regulyatsii-v-sisteme-mikrotsirkulyatsii> (дата обращения: 15.05.2020).
13. Кичигина, Т.Н., Грушин, В.Н., Беликова, И.С., Мяделец, О.Д. Меланоциты: строение, функции, методы выявления, роль в кожной патологии // Вестник ВГМУ. – 2007. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/melanotsity-stroenie-funksii-metody-vyyavleniya-rol-v-kozhnoy-patologii> (дата обращения: 15.05.2020).
14. Козлов, В.И. Анатомия сердечно-сосудистой системы: учебное пособие для студентов медицинских вузов [Текст] / В.И. Козлов. – М.: Практическая медицина, 2013. – 192 с.

15. Козлов, В.И. Лазерная доплеровская флоуметрия в оценке состояния и расстройств микроциркуляции крови. Методическое пособие [Текст] / В.И. Козлов. – М.: РУДН ГНЦ, 2012. – 32 с.
16. Козлов, В.И., Гурова, О.А., Морозов, М.В. Показатели ЛДФ-грамм в коже различных областей тела человека и их морфофункциональное обоснование [Текст] // Вестник РУДН. Серия Медицина, 2013. – № 1. – С. 20-26.
17. Крупаткин, А.И., Сидоров, В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. Руководство для врачей [Текст] // А.И.Крупаткин, В.В. Сидоров. – Москва: ОАО «Издательство «Медицина», 2005. – 256 с.
18. Крылова, Н.В., Соболева, Т.М. Микроциркуляторное русло человека: атлас-пособие [Текст] – М.: Изд-во Ун-та дружбы народов, 1986. – 61 с.
19. Морозов, М.В. Индивидуально-типологические особенности микроциркуляции у человека [Текст] // Ангиология и сосудистая хирургия, 2004. – Т.10 – №3 – 41 с.
20. Морозов, М.В. Морфофункциональное состояние микроциркуляции в коже различных топографо-анатомических областей тела человека: автореф. дис. канд. мед. наук. – РУДН. – Москва, 2008.
21. Новиков, Ю.В., Фомин, А.А., Першаков, Д.Р. Новый взгляд на ангиосомную теорию с точки зрения микроциркуляции [Текст] // Современные проблемы науки и образования. Тромбоз, гемостаз и реология, 2015. – 5 с.
22. Пигарева, Ю.Н. Особенности микроциркуляторного русла кожи [Текст] // Сибирское медицинское обозрение, 2013. – 6 с.
23. Пономорева, А.А. Традиционные и современные представления о кровоснабжении кожи [Текст] // Журнал фундаментальной медицины и биологии, 2018.
24. Рубцовенко, А.В. Патологическая физиология [Текст] / А.В. Рубцовенко – М.: МЕДпресс-информ, 2006. – 608 с.

25. Селянинов, К.В. Сосудистые реакции в кожно-фасциальном лоскуте при последовательном нарушении его связей с донорской зоной [Текст] // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии, 2014. – 3 (50). – С. 29-42.
26. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2 т. Т. 2 [Текст] / Пер. с англ. под ред. В.В. Тучина. // М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
27. Чернух, А.М., Александров, П.Н., Алексеев, О.В. Микроциркуляция [Текст] // А.М. Чернух, П.Н. Александров, О.В. Алексеев. – Москва: «Медицина», 1975. – 456 с.
28. Чернух, А.М., Фролова, Е.П. Кожа (строение, функция, общая патология и терапия) [Текст] / А.М. Чернух, Е.П. Фролова. – М.: Медицина, 1982. – 336 с.
29. Abdulhameed Y.A., Lancaster G., McClintock P.V.E. and Stefanovska A. On the suitability of laser-Doppler flowmetry for capturing microvascular blood flow dynamics from darkly pigmented skin // *Physiological Measurement*, 2019 – 11 с.
30. Branda R.F., Eaton J.W. Skin color and nutrient photolysis: an evolutionary hypothesis. – *Science*, 1978. – Vol. 201. – P. 625-626.
31. Evans N.T.S, Naylor P.F.D, Sayers B.M. The spatial correlation of fluctuations on the blood flow in forearm skin. – *Brit J Dermatol*, 1977. – Vol. 96 (6). – P. 609-614.
32. Holick M.F., MacLaughlin J.A., Doppelt S.H. Regulation of cutaneous previtamin D<sub>3</sub> photosynthesis in man: skin pigment is not an essential regulator. – *Science*, 1981. – Vol. 211. – P. 590-593.
33. Holick M.F., *Photobiology of Vitamin D*. – Academic Press, Burlington, 2005. – P. 37-45.
34. Jablonski N.G., Chaplin G. Skin cancer was not a potent selective force in the evolution of protective pigmentation in early hominins. – *Proc Biol Sci*, 2014.

35. Jacques S. L. Optical properties of biological tissues: a review // *Physics in medicine and biology*, 2013. – Vol. 58. – P. 37-61.
36. Juzeniene A., Setlow R., Porojnicu A., Steindal A.H., Moan J. Development of different human skin colors: A review highlighting photobiological and photobiophysical aspects // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2009. – P. 93-100.
37. Lin T.K., Man M.Q., Abuabara K., et al. By protecting against cutaneous inflammation, epidermal pigmentation provided an additional advantage for ancestral humans. – *Evol Appl.* – 2019.
38. Loomis W.F. Skin-pigment regulation of vitamin-D biosynthesis in man. – *Science*, 1967. – Vol. 157. – P. 501-506.
39. Mackintosh J.A. The antimicrobial properties of melanocytes, melanosomes and melanin and the evolution of black skin. – *J. Theor. Biol.*, 2001. – Vol. 211. – P. 101-113.
40. Zihlman A.L., Cohn B.A. The adaptive response of human skin to the savanna, *Hum. Evol.* – 1988. – Vol. 33. – P. 397-409.