

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

**Оценка состояния сосудистой системы с использованием
метода лазерной доплеровской флоуметрии при проведении
гравитационной и тепловой проб**

студента 2 курса 2221 группы
направления «Физика»

института физики

наименование факультета, института

Еремеевой Виктории Алексеевны

фамилия, имя, отчество

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

подпись, дата
18.06.25

Ан.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2025 г.

Введение

В настоящее время исследование микроциркуляции (МЦ) при различных заболеваниях стало одним из важных и перспективных направлений биомедицинской науки. Микроциркуляторное русло играет ключевую роль в обеспечении тканевого обмена веществ, газообмена и иммунной защиты. Его нарушение связано с развитием многих сердечно-сосудистых, эндокринных, воспалительных и нейродегенеративных заболеваний.

Переход от лабораторных экспериментов к клиническим наблюдениям позволил глубже понять процессы, происходящие в микрососудах при патологии. Это способствовало внедрению фундаментальных научных знаний в медицинскую практику и развитию более персонализированных подходов к диагностике и лечению. Однако большинство существующих методов оценки микроциркуляции имеют ограничения: они не позволяют точно изучать механизмы регуляции кровотока на уровне мелких сосудов, что снижает их ценность для практической медицины.

Поэтому в последнее время растёт интерес к методам, которые позволяют неинвазивно и точно оценивать состояние микроциркуляции. Одним из таких методов является лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). ЛДФ основана на измерении изменений частоты лазерного луча, отражённого от движущихся клеток крови, что позволяет с высокой точностью фиксировать даже небольшие колебания кровотока в тканях. Этот метод даёт возможность не только измерить общий уровень кровоснабжения, но и исследовать работу различных механизмов регуляции микроциркуляции — нейрогенных, миогенных, гуморальных и метаболических.

ЛДФ отличается высокой точностью, не требует инвазивного вмешательства и проста в применении, благодаря чему получила широкое распространение в научных исследованиях. Однако в клинической практике метод пока используется ограниченно. Одна из основных причин заключается в

том, что данные ЛДФ часто применяются для анализа групповых характеристик, а не для оценки состояния конкретного пациента. Это снижает его ценность при принятии индивидуальных решений о диагностике и лечении.

Для успешного применения ЛДФ в клинике необходимо переходить от простой количественной оценки к построению моделей, связывающих данные о микроциркуляции с конкретными особенностями течения заболевания. Важную роль здесь играют функциональные пробы, которые помогают оценить резервные возможности сосудов и выявить скрытые нарушения регуляции кровотока. Такие пробы, как тепловой, холодовой тест, окклюзионная проба или ортостатическая нагрузка, позволяют значительно повысить информативность метода.

Таким образом, развитие ЛДФ сегодня направлено на то, чтобы перейти от описания физиологических процессов к практическому использованию полученных данных для более точной диагностики и персонализированного лечения пациентов.

Целью моей работы является комплексная оценка состояния сосудистой системы с использованием метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) на основе данных, полученных в ходе многоэтапного функционального теста, включающего гравитационную и тепловую пробы.

Задачами моей работы являются:

1. Провести аналитический обзор современных представлений о функциональных свойствах сосудистой стенки и характере вазомоций в микроциркуляторном русле.
2. Описать механизмы возникновения колебательных процессов в стенках микрососудов под воздействием внешних (экспериментальных) и внутренних (физиологических) воздействующих факторов.

3. Определить диагностические критерии применимости метода ЛДФ для персонализированной оценки состояния микроциркуляции и выявить наиболее информативные параметры исследования.

4. Проанализировать существующий научный опыт применения функционально-нагрузочных проб как средства индукции стрессовых физиологических состояний с целью получения более детализированной картины микрогемодинамики.

5. Разработать физиологически обоснованный подход к повышению чувствительности и специфичности ЛДФ-методики в клинко-ориентированном анализе микроциркуляторных нарушений.

Новизна работы: Предложен усовершенствованный диагностический метод, включающий сочетанное применение тепловой и гравитационной пробы в рамках лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), который позволяет более полно и объективно оценивать адаптационные возможности сосудистой системы по сравнению с использованием отдельных нагрузочных тестов. Показано преимущество комплексной функциональной нагрузки для нивелирования влияния психоэмоциональных факторов и повышения воспроизводимости результатов, что особенно важно при исследовании начальных форм сосудистых нарушений. Выявлены характерные изменения нейрогенной и миогенной активности сосудов при последовательной двойной нагрузке, что не рассматривалось в аналогичных исследованиях, использующих только один вид функционального воздействия. Разработан подход к анализу амплитудно-частотных характеристик ЛДФ-сигнала в условиях комбинированной пробы, что позволяет более точно интерпретировать механизмы регуляции микроциркуляции. Обоснована возможность применения данного протокола в рамках ранней диагностики и мониторинга состояния сосудистой системы в персонализированной медицинской практике.

Результаты

На рисунке (Рис.1) представлен пример записи ЛДФ-граммы для дистальной фаланги среднего пальца кисти правой руки при гравитационной пробе и совместного теста с гипертермией (Рис.2) добровольца с нормальной реакцией

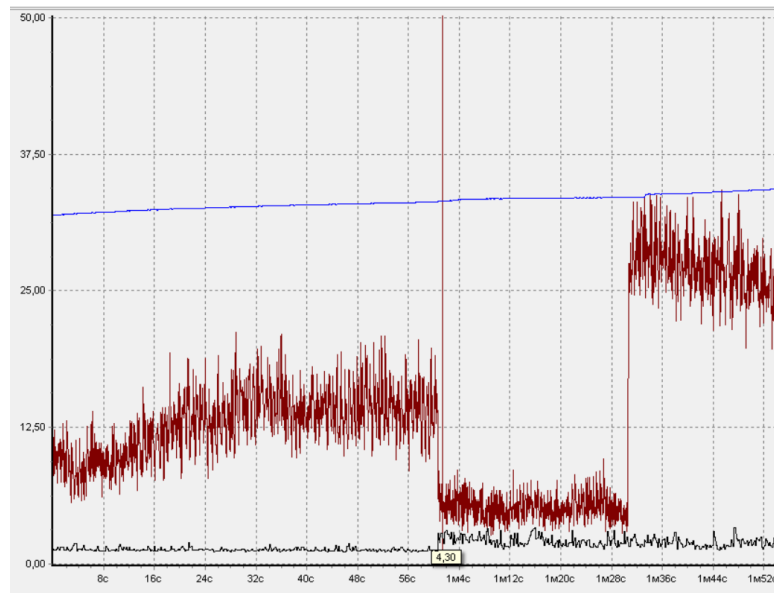


Рис.1 –ЛДФ-грамма гравитационной пробы одного из испытуемых при гравитационном тесте

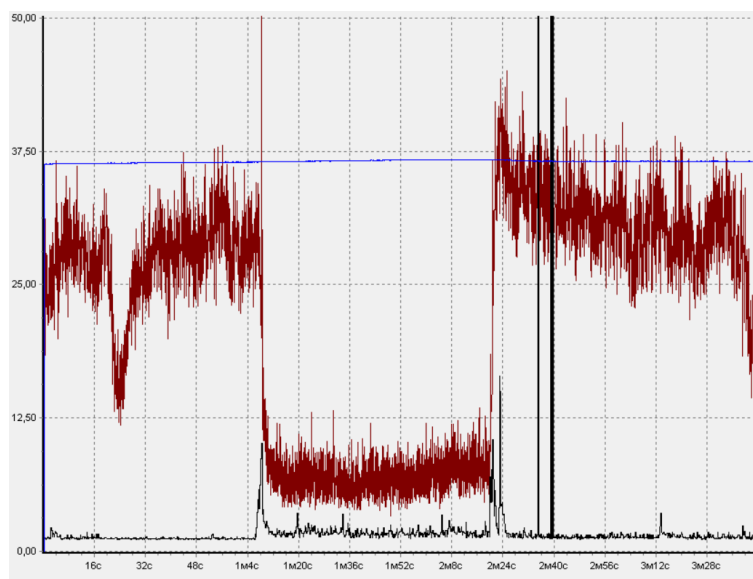


Рис.2 –ЛДФ-грамма гравитационной пробы одного из испытуемых при комплексном тесте

На представленном рисунке (Рис.1) отражены изменения микроциркуляторного кровотока в ответ на гравитационную пробу — поднятие и последующее опускание руки относительно уровня сердца. Исходные данные свидетельствуют о физиологически адекватном, соответствующем норме базальном уровне перфузии у большинства испытуемых, что исключает наличие исходной гиперперфузии или сосудистой дисфункции в состоянии покоя, а также повышенного психоэмоционального состояния. При подъеме конечности выше сердца гравитационный фактор приводит к уменьшению гидростатического давления в дистальных отделах конечности, что вызывает отток крови в направлении более низко расположенных сосудов, что проявляется резким падением перфузионного индекса. Одновременно активируются барорецепторы и симпатическая нервная система, запуская компенсаторную вазоконстрикцию. Данный механизм направлен на предотвращение избыточной потери крови и поддержание системного артериального давления. Обратное перемещение конечности ниже уровня сердца сопровождается значительным притоком крови под действием силы тяжести. Артериолы быстро адаптируются к изменению давления, обеспечивая усиленную доставку крови, однако венозный дренаж происходит с некоторой задержкой из-за более низкого тонуса венозной системы. Это приводит к временному повышению кровенаполнения тканей.

Кроме того, локальная ишемия, вызванная предыдущей фазой гипоперфузии, стимулирует выброс вазодилататоров (например, NO), что усиливает расширение сосудов. Нервные окончания, чувствительные к механическому растяжению и изменению химического состава межклеточной среды, дополнительно влияют на сосудистый ответ, способствуя резкому возрастанию перфузии.

На ЛДФ-грамме описанные процессы визуализируются в виде характерного ступенчатого сигнала:

- Резкий спад кривой соответствует фазе вазоконстрикции и оттока крови.

- Выраженный подъем отражает реактивную гиперемия и компенсаторную вазодилатацию.

Такая динамика подтверждает нормальную реактивность микроциркуляторного русла и отсутствие патологических изменений в механизмах регуляции кровотока. Полученные данные согласуются с классическими физиологическими представлениями о реакции сосудов на гравитационную нагрузку и могут служить маркером сохранной эндотелиальной функции у обследуемых.

На рисунке представлены данные показателя перфузии для всех испытуемых во время проведения гравитационной пробы.

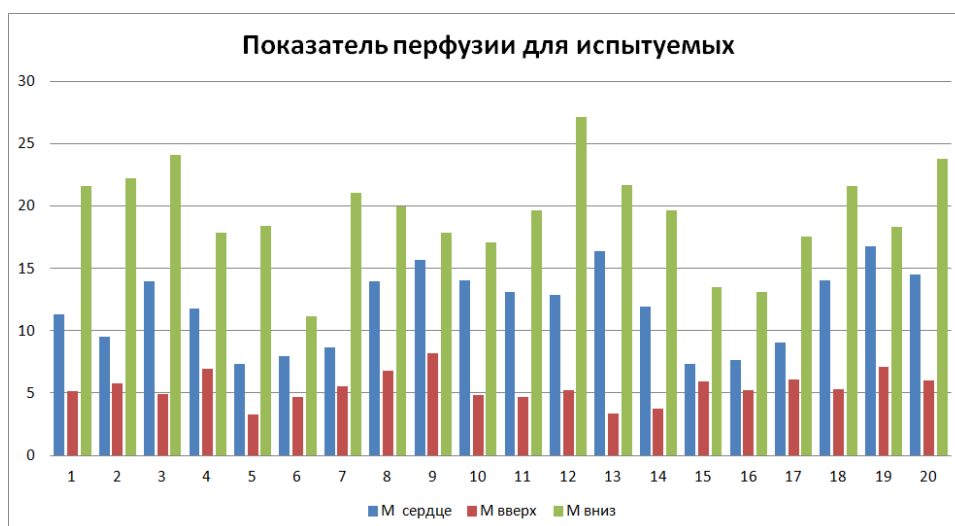


Рис.3– Показатели перфузии при гравитационной пробе всех испытуемых

Показатель М сердце –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель М вверх –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель М вниз –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

Результаты исследования представлены в виде диаграммы, где каждому испытуемому соответствуют три значения перфузии, обозначенные цветовой кодировкой: синий — при положении руки на уровне сердца, красный — выше

уровня, зелёный — ниже уровня. Проведённый анализ выявил выраженную и воспроизводимую зависимость между положением конечности и уровнем кожной перфузии. У 20 испытуемых наибольшие значения перфузии регистрировались в положении руки ниже уровня сердца, минимальные — при положении руки выше уровня сердца, и промежуточные — в положении на уровне сердца.

Физиологически такие изменения объясняются действием градиента гидростатического давления: при опускании руки ниже уровня сердца возрастает артериальное и венозное давление в дистальных отделах конечности, что приводит к усилению кровенаполнения капиллярного русла и увеличению микроциркуляции. Подъём руки выше уровня сердца, напротив, вызывает снижение артериального давления и, как следствие, уменьшение кровотока. Данные результаты согласуются с классическими представлениями о гравитационном перераспределении крови и принципами ауторегуляции периферического кровообращения.

Полученные данные подтверждают нормальную реактивность сосудистого русла и адекватность компенсаторных механизмов регуляции локального кровотока у обследованных испытуемых.

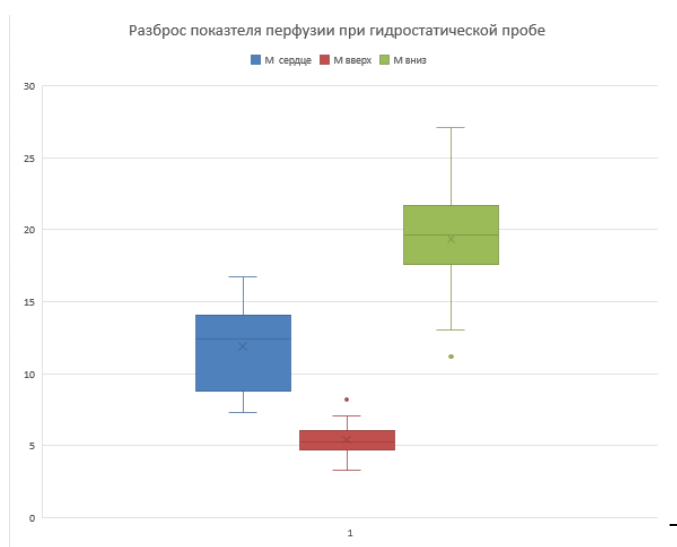


Рис.4- Разброс значений показателя перфузии при гравитационной пробе

Показатель М сердце –разброс перфузии всех добровольцев при положении руки на уровне сердца

Показатель М вверх – разброс перфузии всех добровольцев при положении руки выше уровня сердца

Показатель М вниз – разброс перфузии всех добровольцев при положении руки ниже уровня сердца

Диаграмма демонстрирует тот факт, что гравитационное положение конечности оказывает статистически и физиологически значимое влияние на уровень кожной микроциркуляции. Минимальные показатели перфузии наблюдаются при поднятии руки, что соответствует снижению артериального давления на уровне измерения. Наоборот, при опускании руки кровоток усиливается за счёт увеличенного давления и сопровождается резким и обильным кровенаполнением капиллярного русла.

Отмечается значительная вариабельность полученных данных при положении руки ниже уровня сердца, что может быть связано с различиями в тоне венозной системы, состоянии клапанного аппарата и индивидуальных особенностях внутренней регуляции. Наличие выбросов в группе с поднятой рукой подчёркивает, что даже в условиях физиологической нормы возможны вариации чувствительности сосудистого русла к изменениям положения.

Данная диаграмма дополняет предыдущие результаты, предоставляя наглядную оценку вариабельности перфузии и подтверждая высокую чувствительность метода ЛДФ к изменениям гемодинамики, вызванным положением конечности.

Помимо ЛДФ-грамм были получены визуализации амплитудных колебаний определенного частотного диапазона относительно средней модуляции кровотока для нейрогенного ($A_n/3\sigma$, отн. ед.) и миогенного ($A_m/3\sigma$

отн. ед.) тонус-формирующих диапазонов для всех испытуемых. Для более глубокого анализа динамики изменения микроциркуляции кожи и ее реакции на внешние воздействия был произведен анализ спектральных составляющих вейвлет-преобразования.

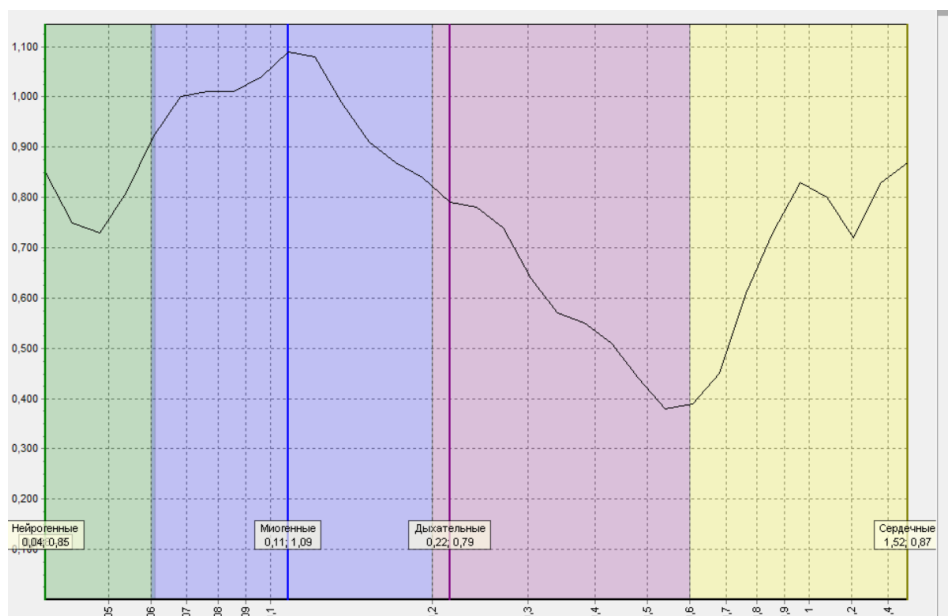


Рис.5- Амплитудно-частотный спектр колебаний одного из испытуемых при гравитационной пробе рука на уровне сердца

Основной вклад в перфузию вносят два активных параметра (миогенный и нейрогенный), пассивные параметры (дыхательный и сердечный) не являются экспериментально значимыми, когда человек находится в спокойном состоянии.

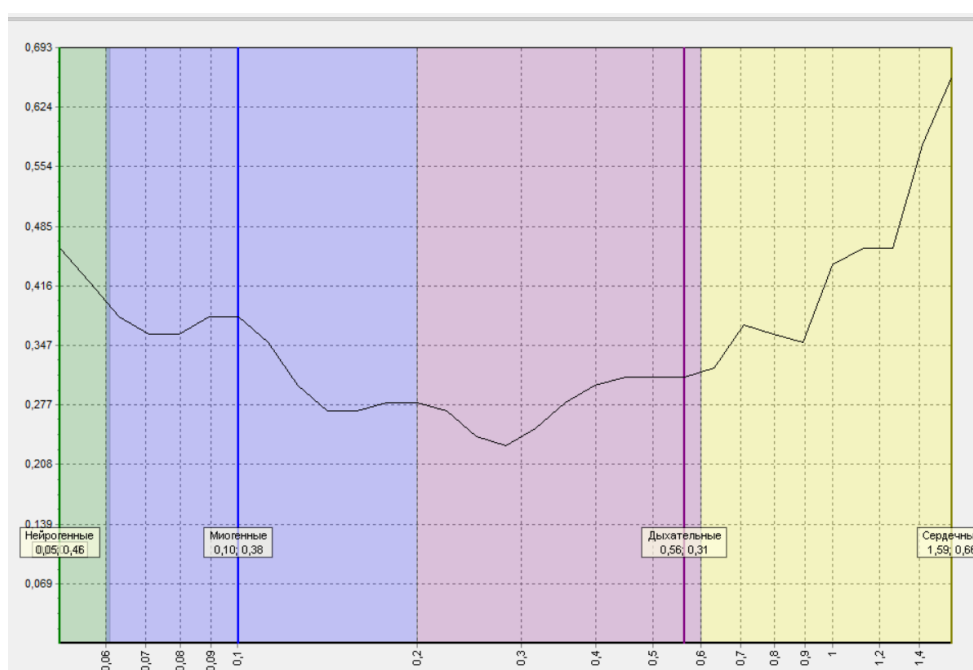


Рис.6- Амплитудно-частотный спектр колебаний одного из испытуемых при гравитационной пробе рука выше уровня сердца

На представленных данных (Рис. 6) наблюдается характерное изменение амплитуд нейрогенного и миогенного компонентов микроциркуляторного кровотока при гравитационной пробе. При гравитационном воздействии на организм рефлексy симпатической нервной системы активируют уменьшение амплитуд миогенной и нейрогенной компонент, что свидетельствует о повышении тонуса сосудов. Физиологически это проявляется вазоконстрикцией, направленной на поддержание центрального кровообращения.

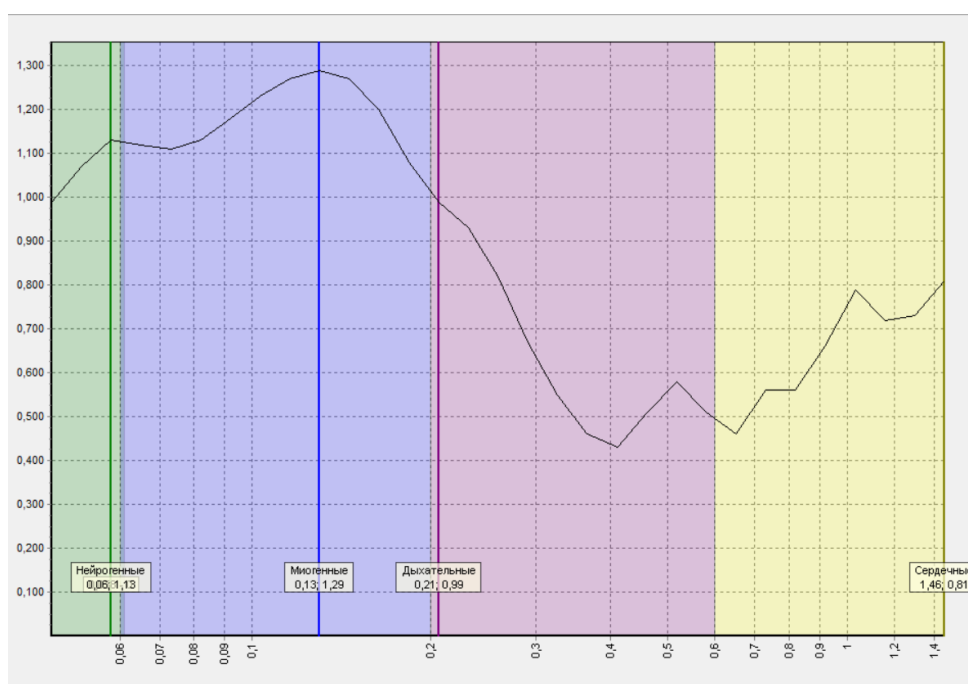


Рис.7- Амплитудно-частотный спектр колебаний одного из испытуемых при гравитационной пробе рука ниже уровня сердца

При опускании руки ниже уровня сердца (Рис.7) фиксируется:

- Увеличение амплитуд нейрогенного и миогенного составляющих.
- Это отражает снижение тонуса сосудов вследствие уменьшения симпатической активности и локального высвобождения вазодилататоров (NO, простагландин).

Дыхательный и сердечный ритмы, несмотря на их наличие, не демонстрируют статистически значимого вклада в показатели перфузии в

условиях покоя, что подтверждает доминирующую роль активных механизмов регуляции.

Полученные данные свидетельствуют об обратной пропорциональной зависимости между амплитудой активных компонентов (нейрогенного/миогенного) и сосудистым тонусом:

- Повышение тонуса → уменьшение амплитуды
- Снижение тонуса → повышение амплитуды

При симпатической активации при поднятии конечности увеличивается сопротивление сосудов, тогда как восстановление перфузии сопровождается вазодилатацией за счет миогенной релаксации и уменьшения нейрогенного влияния.

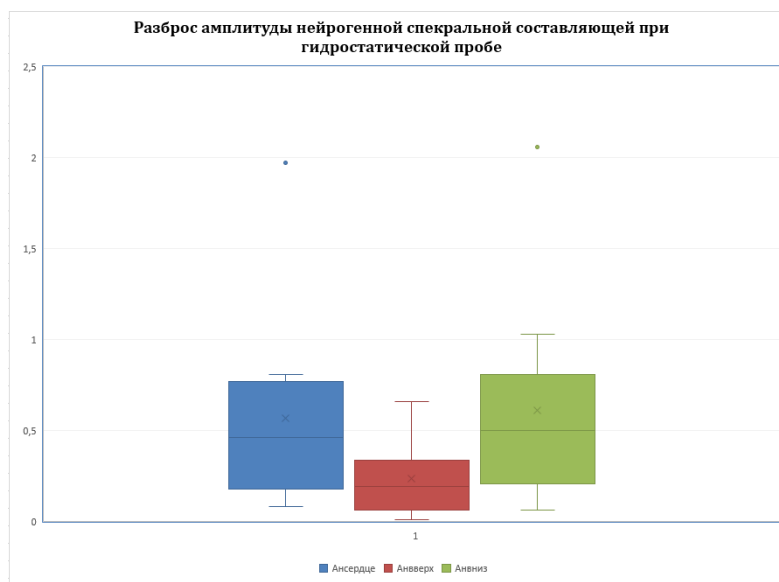


Рис.8- Разброс значений амплитуд нейрогенной составляющей при гравитационной пробе

Показатель Ан сердце – разброс амплитуды нейрогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель Ан вверх – разброс амплитуды нейрогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель Ан вниз – разброс амплитуды нейрогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

Доминирующий вклад в регуляцию перфузии в состоянии покоя вносят активные механизмы – миогенный и нейрогенный компоненты, тогда как пассивные факторы (дыхательный и сердечный ритмы) не оказывают значимого влияния. На рисунках (Рис.8,9) представлены разбросы амплитуд нейрогенного и миогенного спектральных показателей в 3 положениях для всех добровольцев.

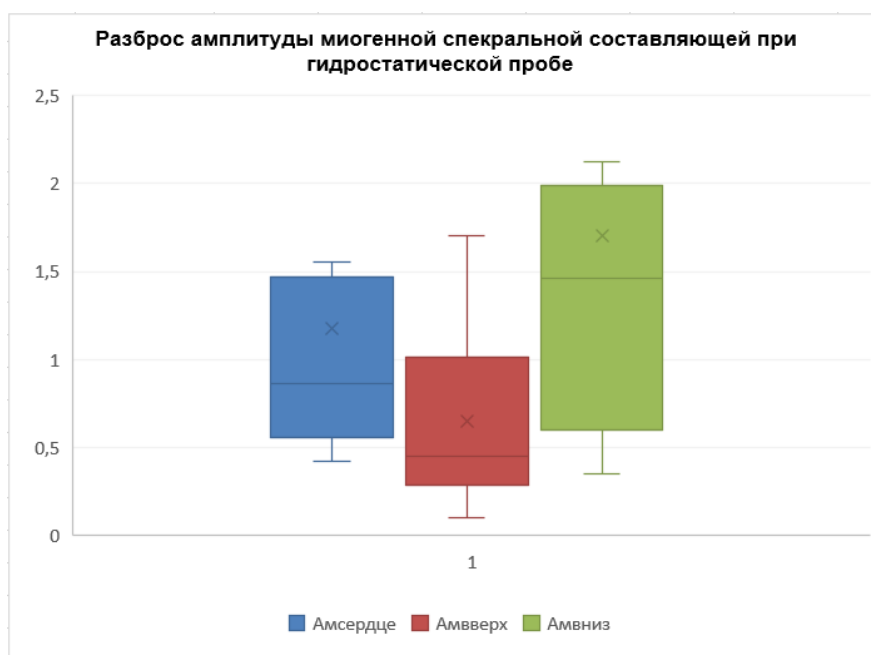


Рис.9- Разброс значений амплитуд миогенной составляющей при гравитационной пробе

Показатель Ам сердце – разброс амплитуды миогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель Ам вверх – разброс амплитуды миогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель Ам вниз – разброс амплитуды миогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

Гравитационное воздействие при поднятии руки инициирует рефлекторную активацию симпатической нервной системы, что проявляется снижением амплитуд нейрогенных и миогенных колебаний вследствие повышения базального сосудистого тонуса. Обратная динамика при

восстановлении кровотока подтверждает принцип обратной пропорциональности между амплитудой активных компонентов и уровнем тонической вазоконстрикции.

Из полученных данных можно отметить разницу в разбросе значений миогенной и нейрогенной составляющей. Миогенная амплитуда во всех положениях выше, чем нейрогенная. Это объясняется физиологическими особенностями сосудистой регуляции.

Физиологическое преобладание значений миогенной спектральной составляющей в лазердоплеровских измерениях обусловлено принципиальными различиями механизмов сосудистой регуляции. Миогенные колебания, генерируемые непосредственно гладкомышечными клетками сосудистой стенки, имеют большую амплитуду благодаря их способности к быстрой автономной реакции на механические воздействия. При изменении положения тела и связанном с этим изменении гидростатического давления, гладкомышечные клетки мелких сосудов моментально реагируют через механочувствительные ионные каналы, что приводит к стремительной деполяризации мембраны и активации сократительного аппарата.

В отличие от миогенных, нейрогенные колебания, опосредованные симпатической нервной системой, обладают меньшей амплитудой вследствие нескольких фундаментальных ограничений. Во-первых, передача нервных импульсов требует времени для синтеза и высвобождения нейротрансмиттеров. Во-вторых, плотность симпатической иннервации уменьшается по мере уменьшения диаметра сосудов, достигая минимума в терминальных артериолах. Особенно наглядно это проявляется при ортостатических пробах, когда миогенный механизм обеспечивает до 70-80% вазомоторного ответа, в то время как вклад нейрогенной регуляции не превышает 20-30%. Такое распределение ролей отражает эволюционно сложившуюся стратегию, при которой быстрые локальные реакции преобладают над более медленными системными регуляторными влияниями. Именно этим объясняется стабильно высокая

амплитуда миогенных колебаний в ЛДФ-спектрах при любых изменениях положения тела.

Следует отметить, что у ряда испытуемых исходный уровень перфузии в положении руки на уровне сердца оказался относительно низким. При подъёме руки выше уровня сердца у таких добровольцев наблюдалась слабовыраженное угнетение перфузии, сопровождающееся сглаженной или маловыраженной «ступенчатой» динамикой на ЛДФ-грамме. Это, в свою очередь, оказывало влияние на последующую фазу теста — при опускании руки ниже уровня сердца перфузионный ответ также был слегка снижен, но все-таки демонстрировал возрастание показателя.

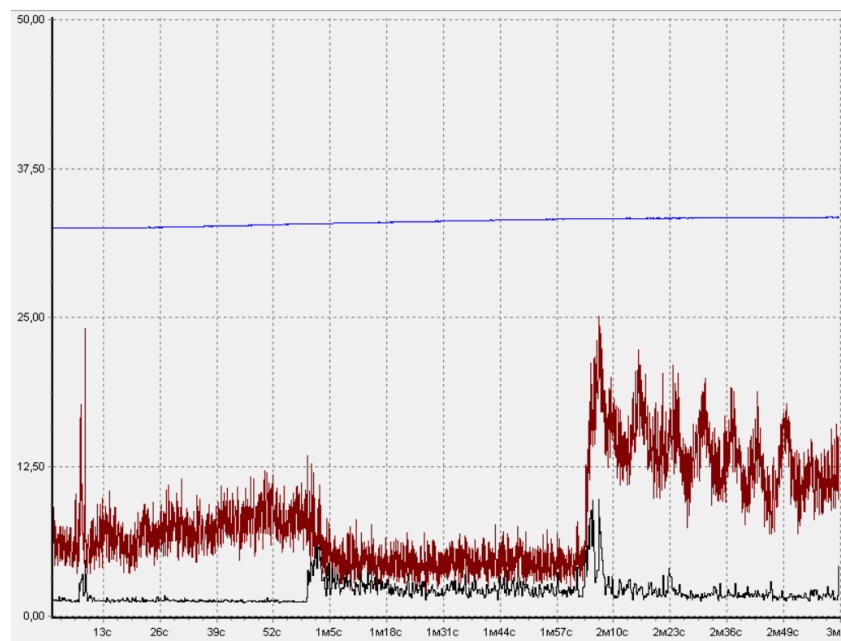


Рис.10 –ЛДФ-грамма гравитационной пробы одного из испытуемых при гравитационном тесте

В связи с этим в последующих исследованиях помимо гравитационного теста был также произведен дополнительный локальный нагрев конечности для изучения реакции сердечно-сосудистой системы на комплекс нагрузочных проб.

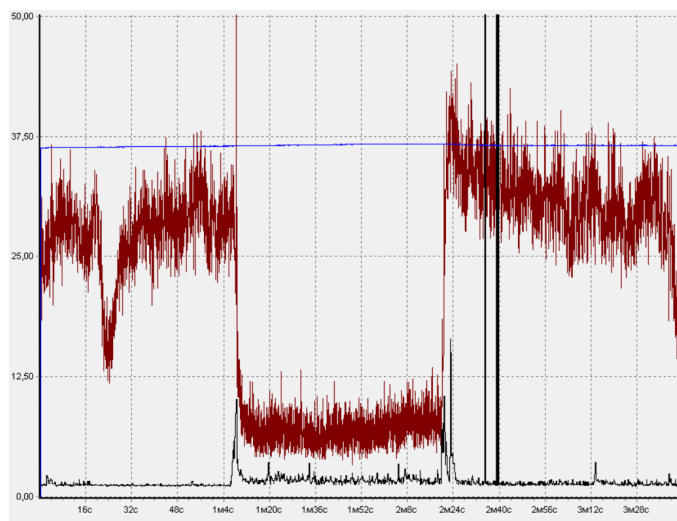


Рис.11 –ЛДФ-грамма гравитационной пробы одного из испытуемых при комплексном тесте

На представленной ЛДФ-грамме зафиксирована характерная динамика показателя перфузии при последовательном изменении положения руки (на столе, выше сердца, ниже сердца) с одновременным локальным нагревом. Данные отражают взаимодействие гравитационных и тепловых эффектов на микроциркуляцию.

В исходном положении руки на столе зафиксирован стабильный базовый уровень перфузии, что соответствует нормальному кровоснабжению в условиях покоя. При поднятии руки выше уровня сердца наблюдается ожидаемое снижение перфузии, обусловленное гравитационным оттоком крови, однако это снижение менее выражено, чем можно было бы ожидать без теплового воздействия, что свидетельствует о компенсаторном эффекте локального нагрева, вызывающего вазодилатацию.

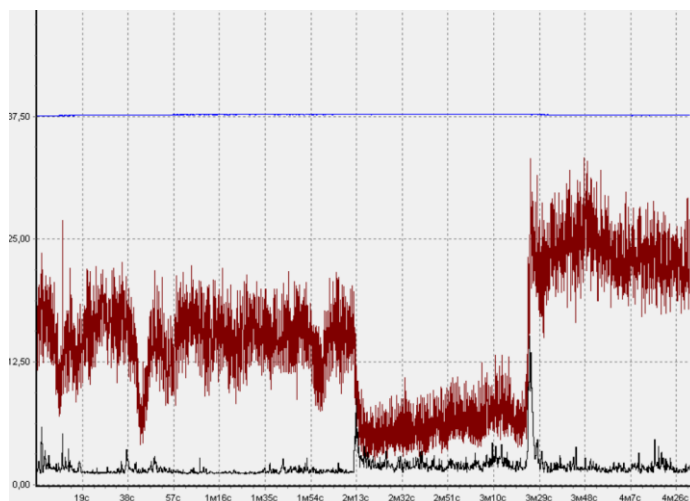


Рис.12 –ЛДФ-грамма гравитационной пробы одного из испытуемых при комплексном тесте

При последующем опускании руки (Рис.12) ниже уровня сердца зарегистрирован соответствующий паттерн - показатели перфузии повысились, что характерно для типичной реакции при гиперемии. Такой результат может объясняться комбинированным действием двух факторов: с одной стороны, гравитационный приток крови вызывает переполнение сосудистого русла, а с другой - тепловая вазодилатация приводит к перераспределению кровотока и относительной гипоперфузии в зоне измерения. Особый интерес представляет тот факт, что изменение положения руки с «на уровне сердца» до «выше уровня сердца» сопровождался менее заметным изменением показателя микроциркуляции в отличие от последующего опускания конечности.

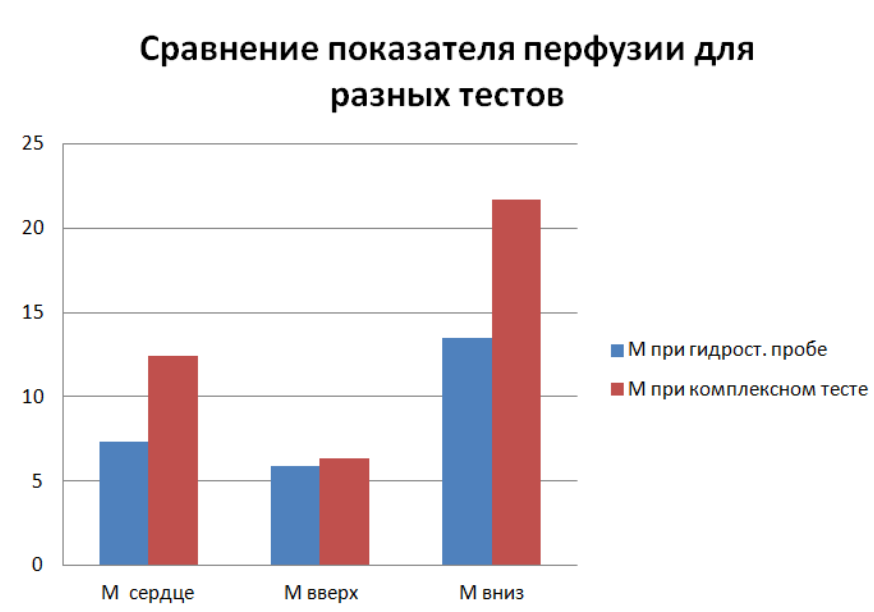


Рис.13- Сравнение показателя перфузии для разных тестов

Показатель М стол –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель М вверх –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель М вниз –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

На представленном рисунке (Рис.13) отображены показатели микроциркуляции, зарегистрированные при выполнении гидростатической пробы и комплексного теста. Данные визуализированы в виде столбчатой диаграммы, где синие столбцы отражают значения перфузии, полученные при различных положениях верхней конечности в рамках изолированной гидростатической пробы, тогда как красные столбцы демонстрируют показатели перфузии, зафиксированные при проведении одновременно двух функциональных проб.

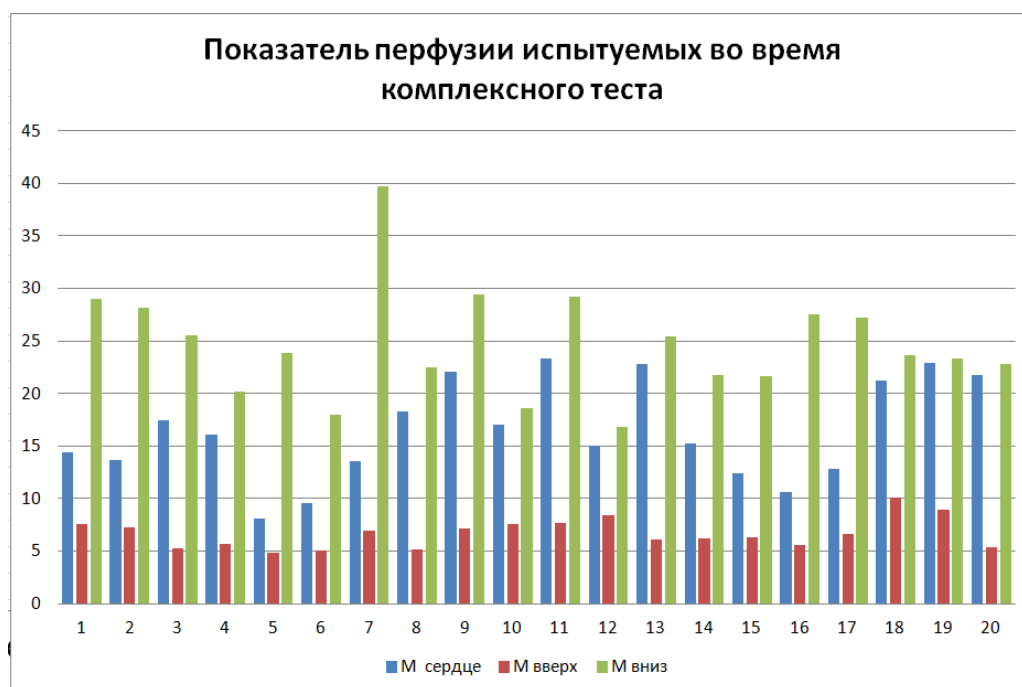


Рис.14– Показатели перфузии при комплексном тесте всех испытуемых

Показатель М стол –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель М вверх –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель М вниз –средняя перфузия на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

Выявленный в эксперименте факт более выраженного увеличения перфузии после опускания руки при проведении гидростатической пробы в сочетании с тепловым воздействием по сравнению с реакцией на подъем руки, указывает на наличие синергетического эффекта между локальной термодилатацией и гидростатическим усилением кровотока. Это отражает более мощную вазодилатационную реакцию сосудистого русла в условиях комбинированной стимуляции — тепловой и позиционной (Рис.14).

С физиологической точки зрения это можно объяснить тем, что нагрев активирует эндотелий-зависимые механизмы расширения сосудов (прежде всего через NO-путь), тогда как опущенное положение руки увеличивает артериовенозный градиент давления, способствуя усиленному наполнению микроциркуляторного русла. При этом предварительно расширенные (теплом) сосуды становятся более чувствительными к изменениям градиента давления, что и объясняет резкое возрастание перфузии.

На Рис.15 представлен пример записи вейвлет-спектра во время комплексного теста, включающего одновременное проведение тепловой и гравитационной проб.

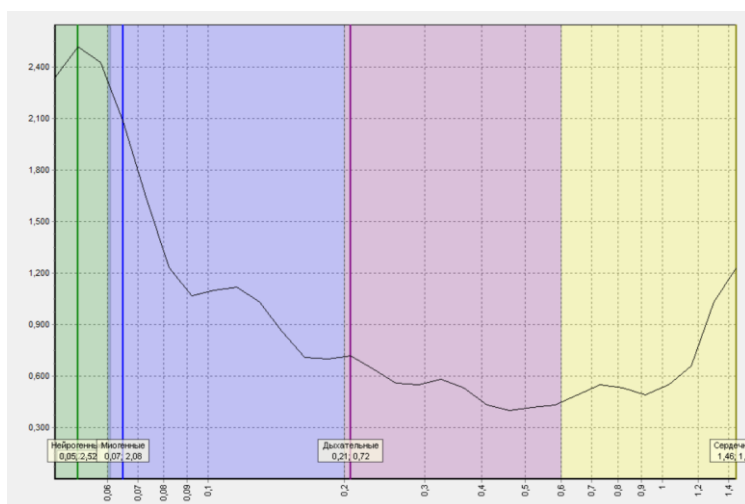


Рис.15- Амплитудно-частотный спектр колебаний одного из испытуемых при комплексном тесте рука на уровне сердца

При применении комплексного нагрузочного теста все амплитуды выросли за счёт уменьшения тонуса сосудов в результате локального нагрева конечности.

При тепловом воздействии на организм (Рис. 15-17) рефлексy симпатической нервной системы практически не участвуют. Основную роль в этом случае играет аксон-рефлекс с участием сенсорных нервных волокон, который является первичным механизмом вазодилатации. Дальнейшая вазодилатация развивается благодаря высвобождению клетками эндотелия оксида азота. В связи с этим амплитуды нейrogenной и миогенной

составляющей вместе с показателем перфузии при гравитационной пробе возросли.

При локальном или общем повышении температуры тела наблюдаются следующие изменения:

- Выраженная вазодилатация за счет прямого теплового воздействия на гладкие мышцы сосудов и усиленного выделения оксида азота (NO).
- Снижение симпатического тонуса, что дополнительно уменьшает нейрогенную вазоконстрикцию.
- Увеличение амплитуды миогенных колебаний из-за снижения базального тонуса сосудов.

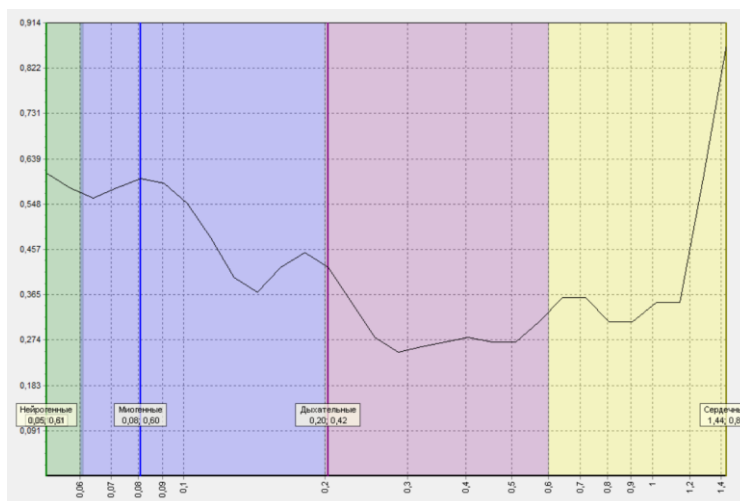


Рис.16- Амплитудно-частотный спектр колебаний одного из испытуемых при комплексном тесте рука выше сердца

При поднятии руки:

- Гравитационный отток крови частично компенсируется тепловой вазодилатацией.
- Снижение амплитуд нейрогенного/миогенного компонентов будет менее выраженным, чем без нагрева, так как тепловое расширение сосудов противодействует симпатической вазоконстрикции.

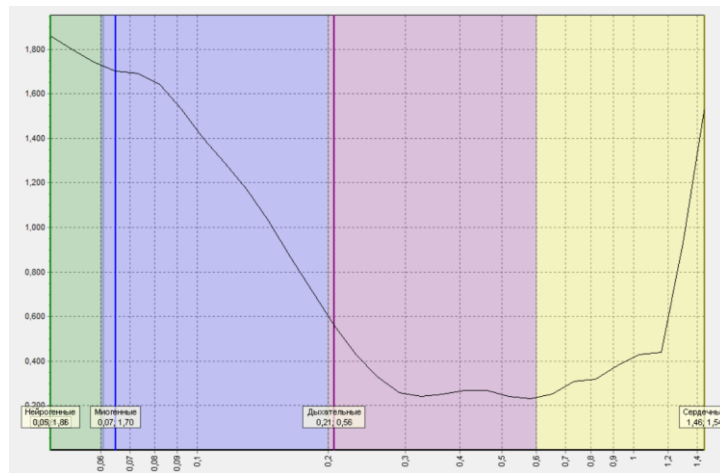


Рис.17- Амплитудно-частотный спектр колебаний одного из испытуемых при комплексном тесте рука ниже сердца

При опускании руки были замечены следующие изменения:

- Тепловая гиперемия усиливает реактивный приток крови, приводя к более резкому росту перфузии.
- Амплитуды миогенных и нейрогенных колебаний увеличивается значительно, чем в норме, из-за сниженного исходного тонуса сосудов.
- Нейрогенный ответ: Симпатическая активация при гравитационном тесте ослабевает на фоне нагрева, что может привести к менее выраженному снижению амплитуды.
- Миогенный ответ: Тепло снижает чувствительность гладких мышц к растяжению, что уменьшает вазоконстрикторный ответ на гравитационный стресс.
- Пассивные компоненты (дыхательный/сердечный): Их вклад останется незначительным, но на фоне гиперемии возможен небольшой рост колебаний из-за увеличения пульсового давления.

Комбинированное воздействие нагревания и гравитационного теста приводит к конкуренции двух механизмов:

- Гравитация стремится уменьшить перфузию через вазоконстрикцию.
- Нагрев усиливает кровоток через вазодилатацию.

Итоговый эффект зависит от интенсивности нагрева:

- При умеренном нагреве сохранится общая закономерность реакции, но с сглаженными амплитудами.

-Интенсивное тепловое воздействие может полностью компенсировать эффект гравитационной нагрузки за счёт преобладания вазодилатационных механизмов

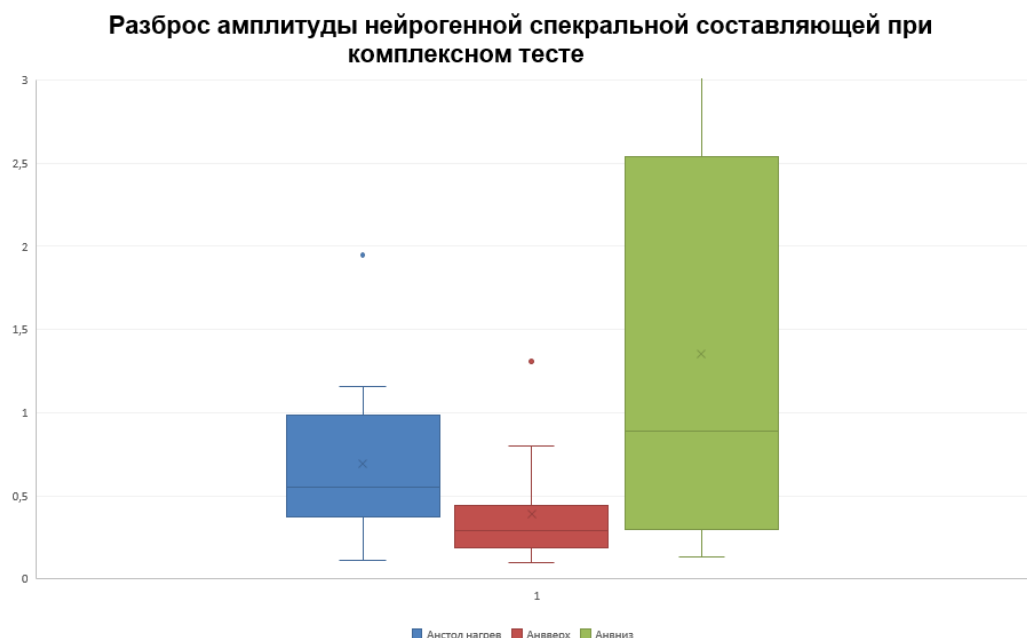


Рис.18- Разброс значений амплитуд нейрогенной составляющей при комплексном тесте

Показатель Ан сердце – разброс амплитуды нейрогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель Ан вверх – разброс амплитуды нейрогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель Ан вниз – разброс амплитуды нейрогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

Полученные результаты наглядно отражают адаптивную способность микроциркуляторного русла, проявляющуюся в изменении рефлекторных сосудистых реакций под влиянием внешних факторов. Такие данные имеют важное значение для понимания механизмов сосудистой регуляции в условиях

гипертермии и свидетельствуют о высокой чувствительности микроциркуляции к физиологическим воздействиям.

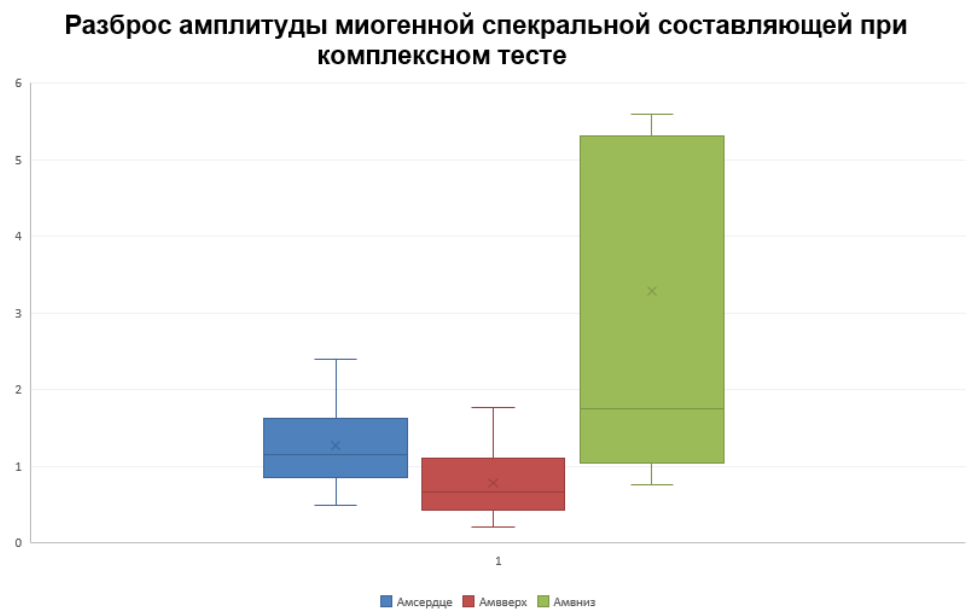


Рис.19- Разброс значений амплитуд миогенной составляющей при комплексном тесте

Показатель Ам сердце – разброс амплитуды миогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки на уровне сердца

Показатель Ам вверх – разброс амплитуды миогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки выше уровня сердца

Показатель Ам вниз – разброс амплитуды миогенной спектральной составляющей на фаланге пальца при положении руки ниже уровня сердца

В ряде случаев при проведении функциональных проб с использованием лазерной доплеровской флоуметрии отмечается, что амплитуда изменений нейрогенного компонента ЛДФ-сигнала выражена в меньшей степени по сравнению с миогенным компонентом. Данный феномен может иметь несколько физиологических объяснений. В первую очередь, это обусловлено различиями в механизмах регуляции сосудистого тонуса: миогенный компонент отражает локальную ауторегуляцию гладкомышечных клеток сосудистой стенки в ответ на изменения трансмурального давления, тогда как нейрогенный компонент

зависит от активности симпатической нервной системы и вегетативной модуляции сосудов.

Если при комплексной пробе преобладает миогенная реакция, это может указывать на то, что адаптация микроциркуляторного русла к изменениям внешних условий — таким как положение конечности или локальное тепловое воздействие — осуществляется преимущественно за счёт местных механизмов ауторегуляции, в то время как центральная вегетативная регуляция остаётся относительно стабильной. Кроме того, нейрогенный компонент может демонстрировать меньшую изменчивость в случаях, когда симпатическая активность изначально повышена, например, у тренированных лиц или в условиях стресса, что приводит к ограничению диапазона возможной регуляции и снижению амплитуды ответов на дополнительные раздражители.

Также стоит учитывать характер раздражителя: тепловые и гидростатические пробы преимущественно активируют локальные механизмы регуляции, тогда как для активации нейрогенного ответа требуются стимулы, вовлекающие симпатическую цепь более интенсивно — например, холод, болевое воздействие или ортостатическая нагрузка.

Слабая выраженность нейрогенной активности может быть также обусловлена временными характеристиками теста, поскольку нейрогенные колебания имеют низкую частоту и развиваются медленнее, чем миогенные, и при краткосрочном анализе они могут быть недостаточно выражены. В совокупности, преобладание миогенного компонента при стабильном или слабо изменяющемся нейрогенном фоне может рассматриваться как показатель сохранённой местной сосудистой регуляции при одновременном снижении или ограничении нейрогуморальной модуляции. Этот паттерн может быть использован в клинической практике для диагностики ранних нарушений вегетативной регуляции микроциркуляции, а также для оценки функционального состояния сосудов в условиях повышенной или сниженной адаптационной способности организма. Однако оба спектральных показателя действуют односторонне.

Полученные данные демонстрируют сложное взаимодействие нейрогенных и миогенных механизмов регуляции сосудистого тонуса при комбинированном воздействии гравитационного стресса и теплового фактора. Тепловое воздействие, с одной стороны, нивелирует ожидаемое снижение перфузии при поднятии конечности, но с другой - приводит к повышению перфузионных показателей при опускании руки при одновременном действии разнонаправленных факторов. Эти результаты имеют важное значение для понимания адаптационных механизмов периферического кровообращения и должны учитываться при проведении физиотерапевтических процедур, связанных с тепловым воздействием.

Заключение

Результаты проведённого комплексного исследования убедительно демонстрируют высокую чувствительность и адаптационные возможности микроциркуляторного русла кожи к различным физиологическим воздействиям. Применение гравитационного теста в сочетании с локальной гипертермией позволило выявить тонкие механизмы регуляции периферического кровотока, обусловленные синергетическим взаимодействием локальных (миогенных) и центральных (нейрогенных) механизмов. Выявлено, что изменение положения конечности относительно уровня сердца вызывает статистически значимые и воспроизводимые колебания уровня перфузии, при этом наибольшее усиление кровотока наблюдается при опускании руки ниже уровня сердца, а минимальные значения фиксируются при её поднятии. Эти данные отражают влияние градиента гидростатического давления на микроциркуляцию и подтверждают адекватность сосудистых механизмов ауторегуляции у обследуемых добровольцев.

Дополнение пробы локальным нагревом привело к значительному усилению реактивных изменений перфузии, особенно в фазе гиперемии при опущенной руке. Это свидетельствует о выраженном вазодилатационном эффекте теплового воздействия, реализуемом через аксон-рефлексы и эндотелий-зависимое высвобождение оксида азота. Снижение тонуса сосудов на фоне тепловой стимуляции приводит к увеличению амплитуды как миогенных, так и нейрогенных компонент ЛДФ-сигнала. Однако в спектральном анализе было установлено, что амплитуда миогенного компонента превышает нейрогенный при всех условиях тестирования. Это отражает преимущественную роль локальных миогенных механизмов в быстрой ауторегуляции кровотока, обусловленную прямой реакцией гладкомышечных клеток сосудов на изменения давления, в то время как нейрогенная регуляция характеризуется большей инерционностью и меньшей амплитудой реакции.

Выраженное преобладание миогенной активности особенно чётко проявляется в условиях ортостатической нагрузки, когда требуется мгновенная компенсация перераспределения объёма циркулирующей крови. Наличие у некоторых испытуемых сниженного базального уровня перфузии в нейтральной фазе теста сопровождается ослаблением выраженности сосудистого ответа, что может служить ранним признаком индивидуальных различий в регуляции микроциркуляции или патологических изменений. Использование комплексной пробы позволило нивелировать часть этих различий, что подчёркивает диагностический потенциал мультифакторных воздействий для оценки сосудистой реактивности.

Таким образом, комплексное применение гравитационного теста и локального теплового воздействия в рамках лазерной доплеровской флоуметрии представляет собой информативную функциональную пробу для изучения состояния регуляторных механизмов микроциркуляции. Этот метод может быть рекомендован для ранней диагностики нарушений сосудистой реактивности, оценки эффективности лечебных и реабилитационных мероприятий, а также для фундаментальных исследований, направленных на изучение физиологии периферического кровообращения. Полученные данные подчёркивают важность комплексного подхода к исследованию микроциркуляции и демонстрируют потенциал ЛДФ как высокочувствительного диагностического инструмента.

Литература

1. Мяделец, О. Д. Функциональная морфология и общая патология кожи : монография / О. Д. Мяделец, В. П. Адаскевич ; Витебский государственный медицинский университет. - Витебск : [б. и.], 1997. - 269 с.
2. Анатомия человека. Атлас / Г. Л. Билич, В. А. Крыжановский. — 1-е изд. — Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2013. — 792 с.
3. Мизева И.А., Голдобин Д.С., Айрих Д.В. Комплекс неинвазивных экспериментальных методик для мониторинга системы микрогемоциркуляции // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2017. №3.
4. Петроченко, Е. П. Механизмы регуляции микрогемоциркуляции и реологических свойств крови в норме, и при нарушениях кровообращения : специальность 03.00.13 «Физиология » : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Петроченко Елена Петровна ; Ярославский государственный педагогический университет им .К.Д. Ушинского. — Ярославль, 2009. — 134 с.
5. Charkoudian N. Mechanisms and modifiers of reflex induced cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans. *J Appl Physiol* (1985). 2010;109(4):1221-1228. doi:10.1152/jappphysiol.00298.2010
6. Johnson, John M. and D L Kellogg. “Local thermal control of the human cutaneous circulation.” *Journal of applied physiology* 109 4 (2010): 1229-38 .
7. Мордвинова Е.В., Ощепкова Е.В., Федорович А.А., Рогоза А.Н. Функциональное состояние сосудов микроциркуляторного русла у больных артериальной гипертонией 1-2-й степени различной степени сердечно-сосудистого риска // Системные гипертензии. - 2014. - Т. 11. - №2. - С. 29-35. doi: [10.26442/SG29017](https://doi.org/10.26442/SG29017)

8. Физиологические функции сосудистого эндотелия / А. Х. Каде, С. А. Занин, Е. А. Губарева [и др.]. —/Фундаментальные исследования. — 2011. — № 11 (часть 3). — С. 611-617.
9. Глазков, А. А. Лазерная доплеровская флоуметрия в персонализированной оценке нарушений кожной микроциркуляции : специальность 03.03.01 «Физиология » : диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Глазков Алексей Андреевич ; Московский областной научно-исследовательский клинический институт имени М. Ф. Владимирского. — Москва, 2020. — 156 с.
10. *Крупаткин А.И., Сидоров В.В., Меркулов М.В. и др.* Функциональная оценка периваскулярной иннервации конечностей с помощью лазерной доплеровской флоуметрии. Пособие для врачей. М., 2004.- 26с.
11. Бранько В.В., Богданова Э.А., Камшилина Л.С., Маколкин В.И., Сидоров В.В. Метод лазерной доплеровской флоуметрии в кардиологии, Пособие для врачей, М., 1999, 48с.
12. Крупаткин, А. И. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров. — 3-е издание. — Москва : Медицина, 2005. — 256 с. — Текст : непосредственный.
13. Мяделец ОЛ -. Адашкевич В.П. Функциональная морфология и общая патология кожи. Витебск: Издательство Витебского медицинского института, 1997. - 269 с
14. Крупаткин А.И. Колебания кровотока - новый диагностический язык в исследовании микроциркуляции. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2014;13(1):83-99. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2014-13-1-83-99>
15. Функциональные изменения микроциркуляции крови в коже стопы при тепловых пробах у пациентов с сахарным диабетом / М. А. ФИЛИНА, Е. В.

ПОТАПОВА, И. Н. МАКОВИК [и др.]. — Физиология человека. — 2017. — № 6. — С. 95-102.

16. Зубарева Н.А., Подтаев С.Ю., Паршаков А.А. Диагностика нарушений вазодилатации микрососудов кожи у больных с синдромом диабетической стопы при проведении локальной тепловой пробы. *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2015;14(3):27

33. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2015-14-3-27-33>

17. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Колебания, информация, нелинейность. Руководство для врачей / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров. — 978-5-9710-3329-5 . — Москва : Ленанд, 2016. — 496 с.