

На правах рукописи

Янушин Вячеслав Сергеевич

**МУЛЬТИМОДАЛЬНОЕ НОСИМОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОНИТОРИНГА
СОСТОЯНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО-ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ
ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ СНА**

Направление 12.04.04 – Биотехнические системы и технологии
Направленность «Фотоника и электроника в медико-биологической практике»

АВТОРЕФЕРАТ

Магистерской выпускной квалификационной работы

Орел, 2025

Работа выполнена на кафедре приборостроения, метрологии и сертификации
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
научно-технологического центра
биомедицинской фотоники,
профессор кафедры приборостроения,
метрологии и сертификации
Дунаев Андрей Валерьевич

Официальный рецензент: кандидат технических наук, доцент
инженерно-исследовательского факультета
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики» (г. Санкт-Петербург)
Маргарянц Никита Борисович

Защита состоится 27 июня 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной
экзаменационной комиссии по адресу: 302020, РФ, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.

С выпускной квалификационной работой можно ознакомиться на кафедре
приборостроения, метрологии и сертификации ФГБОУ ВО «Орловский
государственный университет имени И.С. Тургенева»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сон играет важную роль в жизни человека, оказывая влияние на физическое, психическое и эмоциональное здоровье. Сон обеспечивает поддержание баланса гормонов, влияющих на аппетит, метаболизм и стресс. Однако по данным Всемирной организации здравоохранения от нарушений сна на регулярной основе страдает около трети населения, тогда как более половины людей во всем мире испытывают эпизодические проблемы со сном. Наиболее распространенным сомнологическим расстройством является инсомния (бессонница), которая представляет собой клинический синдром, характеризующийся жалобами на расстройство ночного сна и связанные с этим нарушения в период дневного бодрствования. Нарушения сна могут быть вызваны множеством факторов. Стрессовые ситуации и хроническая тревожность часто становятся причинами бессонницы, так как мозг в состоянии повышенной активности не может легко переключаться на режим отдыха. Вредные привычки, отсутствие режима и недостаток физической активности также негативно сказываются на качестве сна. Психические расстройства, особенно депрессивные и тревожные состояния, сопровождаются трудностями при засыпании и поддержании сна.

Сердечно-сосудистые заболевания являются одним из наиболее серьезных последствий нарушений сна. Сомнологические расстройства, такие как хроническая бессонница, апноэ сна и другие патологии, оказывают значительное влияние как на систему кровообращения, так и на иммунную, эндокринную, пищеварительную, репродуктивную и нервную. Длительное недосыпание и прерывистый сон приводят к повышенному стрессу для организма, что может вызывать снижение защитных ресурсов организма, развитие неврологических нарушений, нарушения метаболизма, увеличение уровня артериального давления, а также негативно сказываться непосредственно на функционировании сердца и сосудов. Несмотря на сосредоточенность современной сомнологии на мозговой активности во сне, контроль периферического кровотока и окислительного метаболизма биотканей во время сна является важным аспектом мониторинга общего состояния здоровья организма человека. При процессах восстановления организма и репарации, протекающих, когда организм спит, оптимальная микроциркуляция крови особенно важна для поддержания клеточного здоровья и функционирования органов. Недостаточное кровообращение и снижение согласованности кровеносной системы доставки кислорода и питательных веществ с метаболическими потребностями клеток может привести к нарушению этих процессов, что, в свою очередь, может способствовать развитию различных заболеваний, включая сердечно-сосудистые расстройства, нейродегенеративные заболевания и ухудшение когнитивных функций.

Люди, страдающие от хронических нарушений сна, имеют повышенный риск развития гипертонии, ишемической болезни сердца, инсультов и сердечных приступов. Это подчеркивает важность своевременной

диагностики и лечения нарушений сна для профилактики и управления сердечно-сосудистыми заболеваниями, ежегодно занимающим первое место по количеству смертельных исходов.

В клинической практике для выявления патологий, связанных с нарушениями сна, основное внимание уделяется нейрофизиологическим параметрам, при этом изменение физиологических параметров, таких как микроциркуляция крови и уровень окислительного метаболизма биологической ткани, изучено недостаточно.

В настоящее время существует общепринятое деление сна на четыре фазы на основе электроэнцефалографии (ЭЭГ), что представлено таблице 1.

Таблица 1 – Фазы сна

Фаза сна	Описание
Фаза 1 (NREM1)	Дремота, переход от бодрствования ко сну
Фаза 2 (NREM2)	Лёгкий сон, возникновение К-комплексов и сонных веретён
Фаза 3 (NREM3)	Глубокий сон, активация парасимпатической регуляции, возникновение медленных дельта-волн на ЭЭГ
Фаза REM	Быстрый сон, парадоксальная активация симпатического отдела вегетативной нервной системы при активации мозговой деятельности

В связи с вышесказанным, поиск новых методов диагностики нарушений микроциркуляции крови и метаболических процессов, возникающих у пациентов с расстройствами сна, и разработка устройств, реализующих данные методы, является актуальной задачей.

Цели исследования. Разработать мультимодальный носимый анализатор для мониторинга изменений параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна с апробацией в условиях клинической практики на примере пациентов с сомнологическими расстройствами.

Задачи исследования:

1) обзор методов оптической неинвазивной диагностики и анализ научно-технической литературы с целью выявления существующих технических решений в области оптической диагностики физиологических параметров человека в режиме реального времени;

2) анализ методов регистрации нейрофизиологических, параметров человека в динамике сна с целью выявления сомнологических расстройств и оценки динамики их терапии;

3) обоснование принципа получения диагностической информации о состоянии микроциркуляторно-тканевых систем организма человека, основанного на совместном применении методов лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии;

4) разработка мультимодального носимого устройства для мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна;

5) составление документации для осуществления постпродажного технического обслуживания разрабатываемого устройства;

6) проведение пилотных исследований с участием здоровых добровольцев для оценки точности и воспроизводимости измерений;

7) клинические испытания на пациентах с нарушениями сна (апноэ, бессонница, синдром беспокойных ног) для выявления паттернов микроциркуляторных изменений.

Объектом исследования являются микроциркуляторно-тканевые системы (МТС) организма человека.

Предметом исследования является мультимодальное носимое устройство для мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем организма человека, реализующее методы лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись аналитические и экспериментальные методы, методы синтеза и математической статистики.

Научная новизна заключается в том, что при решении поставленных задач исследования предложены:

1) принцип построения мультимодального носимого устройства на основе методов лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии, позволяющий осуществлять долговременный мониторинг параметров МТС организма человека в динамике сна;

2) метод комплексной оценки параметров МТС и нейрофизиологических параметров, регистрируемых с помощью ЭЭГ в рамках полисомнографического анализа, позволяющий выявлять корреляционные взаимосвязи между фазами сна и локальными микроциркуляторными изменениями, а также метаболической активностью биологической ткани.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложен принцип построения мультимодального носимого устройства для мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна, позволяющий реализовать неинвазивный и непрерывный контроль состояния микроциркуляции крови и тканевого метаболизма, востребованный в клинической медицине, научных исследованиях, а также для персонального мониторинга здоровья и профилактики сомнологических расстройств.

Личный вклад автора заключается в проведении обзора текущего состояния вопросов диагностики состояния микроциркуляторно-тканевых систем организма человека, формулировке требований к разрабатываемому устройству, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных и оформлении результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1) разработанное мультимодальное носимое устройство позволяет осуществлять непрерывный и неинвазивный мониторинг физиологических данных во время сна, обеспечивая контроль параметров микроциркуляции и уровня тканевого метаболизма для диагностики сомнологических расстройств;

2) применение распределенной системы мультимодальных носимых анализаторов для мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна позволяет проводить диагностику параметров микроциркуляторного русла и окислительного метаболизма биотканей с учетом регионарных особенностей областей исследования;

3) предложенная методика контроля технического состояния (КТС) обеспечивает контроль метрологических характеристик устройства, что гарантирует его безопасное использование при соблюдении правил руководства по эксплуатации.

Апробация результатов. Работы по теме исследования были поддержаны в рамках гранта РФФ №25-25-00546, грантом Фонда содействия инновациям по программе «Студенческий стартап» по проекту «Мультимодальный мониторинг микроциркуляторно-тканевых систем организма человека для анализа сна» (договор № 2207ГССС15-L/87971)

Основные результаты работы доложены и обсуждены на 4 научно-технических и научно-практических конференциях всероссийского и международного уровней:

1) Всероссийская конференция «Современные методы исследования в клеточной биологии и медицине» (Орел, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 16-17 ноября 2025 г.);

2) XIII Конгресс молодых ученых ИТМО (Россия, г. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 8-11 апреля 2024);

3) XVI Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2024» – Владимир-Суздаль, Россия;

4) XII Symposium: Optics and Biophotonics – Saratov Fall Meeting (Саратов 2024);

5) Четвертая международная научно-практической конференции «Экспериментальные и клинические аспекты микроциркуляции и функции эндотелия», 10-11 октября 2024 года;

6) XXII Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы (Самара, 12–16 ноября 2024 г.);

7) XII Международный форум «Сон-2025» (Россия, г. Москва, Медицинский научно-образовательный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, 13 – 15 марта 2025 г.);

8) Внутривузовская конференция «Неделя науки – 2025» ОГУ имени И.С. Тургенева, секция «Биомедицинская фотоника и электроника» (Россия, г. Орел, 24 апреля 2025 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных трудов, включая 1 статью в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, и 1 статью в журнале, входящем в базы данных Web of Science/ Scopus, относящиеся к квартилю Q3 и включённым в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Выпускная квалификационная работа изложена на **178** страницах машинописного текста, включая приложения, иллюстрируется **71** рисунками, **23** таблицами, состоит из введения, **3** глав, основных выводов и результатов, списка использованных источников, включающего **47** наименований и **4** приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и определены задачи проведения исследования, выделены объект и предмет исследования, приведена научная новизна и практическая значимость проведенного исследования.

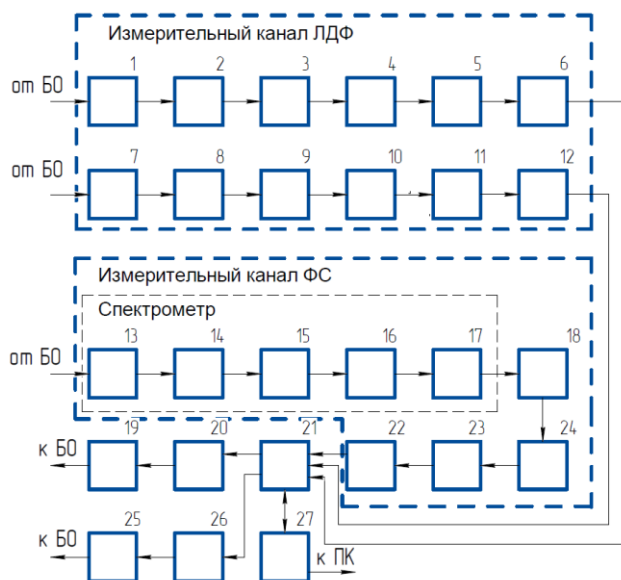
В первой главе представлено медико-биологическое обоснование разработки устройства, а также приводится обзор используемых на сегодняшний день методов оптической неинвазивной диагностики состояния периферического кровотока и окислительного метаболизма биотканей и методов, используемых для исследования сомнологических расстройств. По результатам анализа отмечено, что рассмотренные методы диагностики расстройств сна способны регистрировать только нейрофизиологические параметры, в то время как комплексная оценка параметров МТС обладает высокой диагностической значимостью, так как позволяет выявлять начальные стадии развития патологических процессов организма человека. В этой связи особую актуальность приобретает разработка мультимодального устройства регистрации кожного кровотока и метаболических процессов биотканей, позволяющего проводить неинвазивный мониторинг микроциркуляторно-тканевых систем организма в динамике сна.

Основой разработки носимого анализатора для мониторинга МТС организма человека является мультимодальный подход, заключающийся в совмещении в одном устройстве методов оптической неинвазивной диагностики – лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) для диагностики состояния микроциркуляторного русла, и флуоресцентной спектроскопии (ФС) для регистрации параметров метаболических процессов. ЛДФ является одним из наиболее распространенных неинвазивных методов оценки состояния микроциркуляции крови, позволяющих выявлять особенности работы механизмов регуляции периферического кровотока, его резервные возможности и адаптивные особенности. Метод ФС активно применяется для получения информации о содержании характеризующих метаболические процессы в биологических тканях веществ путем регистрации эндогенной

флуоресценции. Благодаря совмещению методов ЛДФ и ФС в одном устройстве возможно получать комплексную диагностическую информацию об эффективности работы системы доставки питательных веществ сердечно-сосудистой системой и их утилизации при метаболизме.

Также в данной главе было сформулировано техническое задание, на основе которого разработано мультимодальное носимое устройство для мониторинга МТС организма человека во время сна. Была предложена его структурная схема, представленная на рисунке 1, на основе которой была разработана схема электрическая принципиальная каналов ЛДФ и ФС, произведен выбор и расчет их элементов, описан принцип работы устройства и составлено математическое описание, проведен анализ точности и надёжности.

Мультимодальное носимое устройство для мониторинга сна работает следующим образом. Оптическое излучение от лазерного излучателя (1) проходит через биологический объект. Мощность излучения, вышедшая из биологического объекта, регистрируется фотодиодом (2), фотодиод преобразует мощность излучения в фототок, далее с помощью преобразователь ток-напряжения (3) ток преобразуется в напряжение, после чего напряжение усиливается до необходимого значения с помощью усилителя (4). Напряжение после усилителя подаётся на ФНЧ (5). Далее сигнал подаётся на ФВЧ (6) после чего обработанный сигнал поступает на АЦП (7) для дальнейшей обработки.



Измерительный канал ЛДФ: 1,7 – фотодиод; 2,8 – преобразователь ток-напряжения; 3,9 – усилитель; 4,10 – фильтр верхних частот; 5,11 – фильтр нижних частот; 6,12 – аналого-цифровой преобразователь; 19 – лазерный излучатель 850 нм; 20 – драйвер лазерного излучателя 850 нм. Измерительный канал ФС: 13 – входная щель; 14 – коллиматор; 15 – дифракционная решетка; 16 – фокусирующий элемент; 17 – ПЗС-матрица; 18 – преобразователь ток-напряжения; 22 – аналого-цифровой преобразователь; 23 – фильтр нижних частот; 24 – усилитель; 26 – драйвер лазерного излучателя 850 нм; 21 – микроконтроллер; 25 – лазерный излучатель 365 нм; 27 – модуль Bluetooth.

Рисунок 1 – Структурная схема разработанного устройства

Выполнен расчет эффективной спектральной энергетической освещенности E_s канала флуоресценции (365 нм) для долговременного мониторинга параметров МТС, которая равна $0,864 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$, что соответствует предельным значениям лазерного излучения воздействующего на биологический объект, в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62471-2013. С учетом того, что интервалы между сериями измерений равны 30 мин, максимально допустимая длительность мониторинга равна 17 ч, что позволяет безопасно производить мониторинг флуоресценции биоткани во время сна.

Произведена оценка энергетической освещенности (E) участка кожи канала ЛДФ (850 нм), равная $178 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, что соответствует предельным значениям в соответствии с ГОСТ ИЕС 60825-1-2013. Канал ЛДФ безопасен для мониторинга сна человека в течение 22 ч.

Таким образом, на основе анализа литературы и выполненных расчётов, обоснованы следующие специализированные медико-технические требования для ФС-канала с учётом специфики безопасности УФ-облучения при мониторинге сна в течение 8 ч:

- длина волны зондирования тканей: 365 ± 12 нм;
- длительность импульса: не более 250 мс;
- мощность импульса: не более 1,4 мВт;
- период импульса: 1 с;
- длительность серии импульсов: 4 мин.
- паузы между сериями импульсов: 30 мин.

Во второй главе составлена методика контроля технического состояния (КТС) разрабатываемого мультимодального носимого устройства для мониторинга МТС организма человека, а также технологический регламент технического обслуживания разрабатываемого устройства. На рисунке 2 изображена локальная поверочная схема разрабатываемого канала ЛДФ.

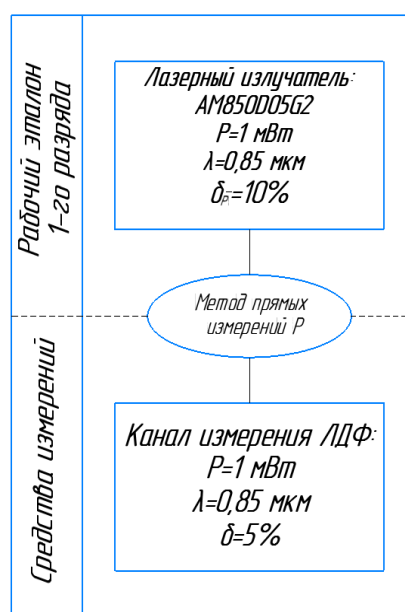


Рисунок 2 – Локальная поверочная схема измерительного канала ЛДФ

Также проведено описание метрологических характеристик, определяемых при КТС разрабатываемого устройства, произведен выбор технических средств и определены условия КТС, составлено описание процедуры проведения КТС разрабатываемого устройства и предложена форма протокола КТС.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования параметров МТС организма человека во время сна с участием здоровых добровольцев и пациентов с сомнологическими расстройствами. Исследования проводились с помощью распределенной системы носимых мультимодальных анализаторов «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва). Данные устройства реализуют метод ЛДФ для оценки параметров микрокровотока, а также метод ФС для регистрации интенсивности флуоресценции кофермента НАДН. В качестве источников излучения используется поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором на длине волны 850 нм (для реализации метода ЛДФ) и светодиод с рабочей длиной волны 365 нм (для реализации метода ФС). Изначальная мощность лазерного излучения канала ФС не была адаптирована для долговременного мониторинга во время сна. В связи с этим в рамках данной работы совместно с предприятием ООО НПП «ЛАЗМА» была разработана специализированная модификация устройства «ЛАЗМА ПФ», предназначенная для длительного мониторинга состояния параметров МТС организма человека, которая отличается увеличенной скважностью импульса лазерного излучения с 4 до 8, а также адаптированное для задач сомнологии программное обеспечение, позволяющее сохранять полученные данные в автоматическом режиме, проводить как непрерывную регистрацию параметров МТС, так и выполнять записи регулируемой длительности с возможностью установления задержки между циклами записи и выбора каналов регистрации данных.

Для проведения исследований с участием здоровых добровольцев впервые разработан и модифицирован комплексный протокол, включающий запись параметров МТС в областях волярной стороны дистальной фаланги третьего пальца правой и левой руки, а также в области плантарной стороны дистальной фаланги первого пальца правой и левой ноги с одновременной записью электрической активности мозга методом электроэнцефалографии. В исследовании приняли участие 8 волонтеров (5 мужчин и 2 женщины) в возрасте от 20 до 25 лет не имеющих проблем со сном. Для каждого добровольца выполнено минимум по 3 записи сна, продолжительностью от 5 до 8 часов. Регистрация данных проводилась в домашних условиях без предварительной депривации сна. Производилась оценка таких параметров как показатель микроциркуляции крови, уровень нутритивного и шунтового кровотока, нормированная амплитуда флуоресценции НАДН, амплитуды активных и пассивных механизмов регуляции микрокровотока.

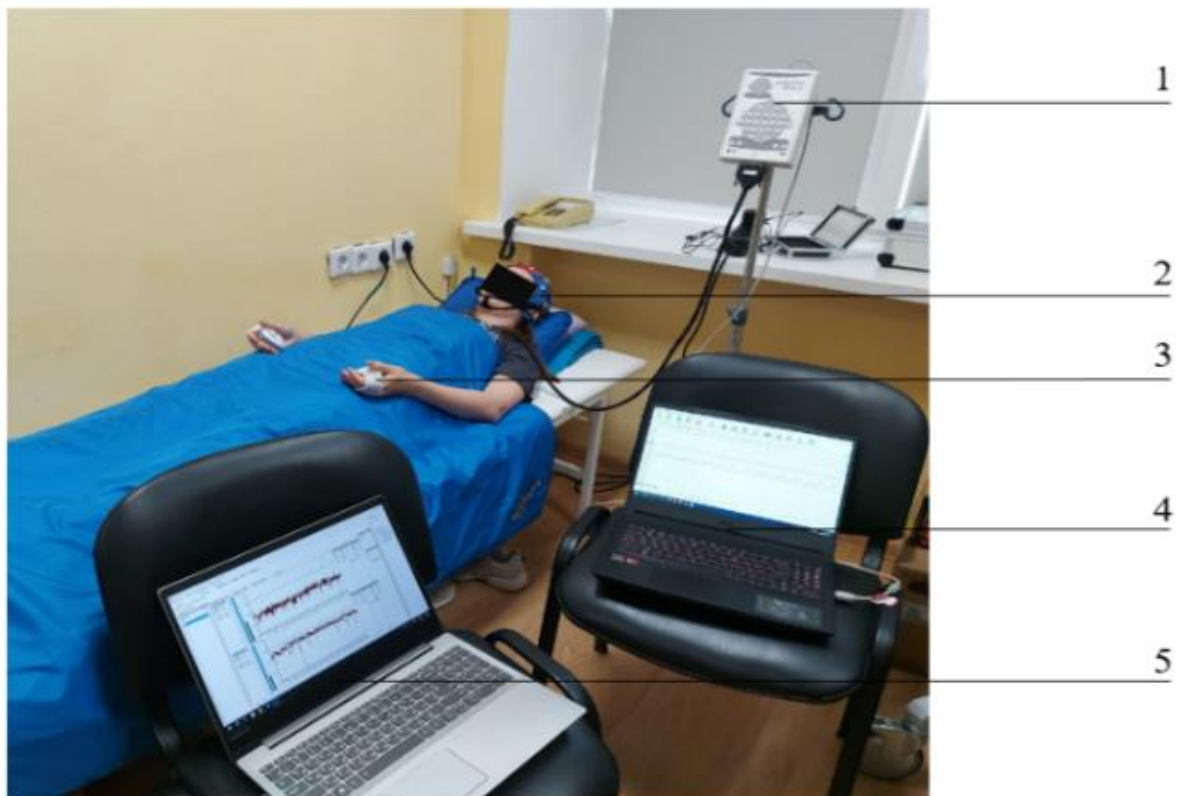
На рисунке 3 представлено расположение исследуемых областей.



Рисунок 3 – Расположение анализаторов на волярной поверхности дистальной фаланги третьего пальца обеих рук (а) и на плантарной поверхности дистальной фаланги первого пальца обеих стоп (б)

Запись электроэнцефалограммы проводилась с помощью устройства «Нейрон-Спектр-3» (ООО «Нейрософт», г. Иваново) и электродного шлема MCSCAP Clinic.

Расположение добровольцев во время измерения представлено на рисунке 4.



1 – электроэнцефалограф «Нейрон-Спектр-3»; 2 – электродный шлем MCSCAP; 3 – анализаторы «ЛАЗМА ПФ»; 4 – запись параметров электроэнцефалографа; 5 – запись параметров микроциркуляции кров

Рисунок 4 – Расположения добровольца и устройств во время проведения исследования

На рисунке 5 приведен пример записи показателя микроциркуляции крови и интенсивности флуоресценции кофермента НАДН для кожи волярной стороны дистальной фаланги третьего пальца правой руки и карта фаз сна, полученная с помощью электроэнцефалографа.

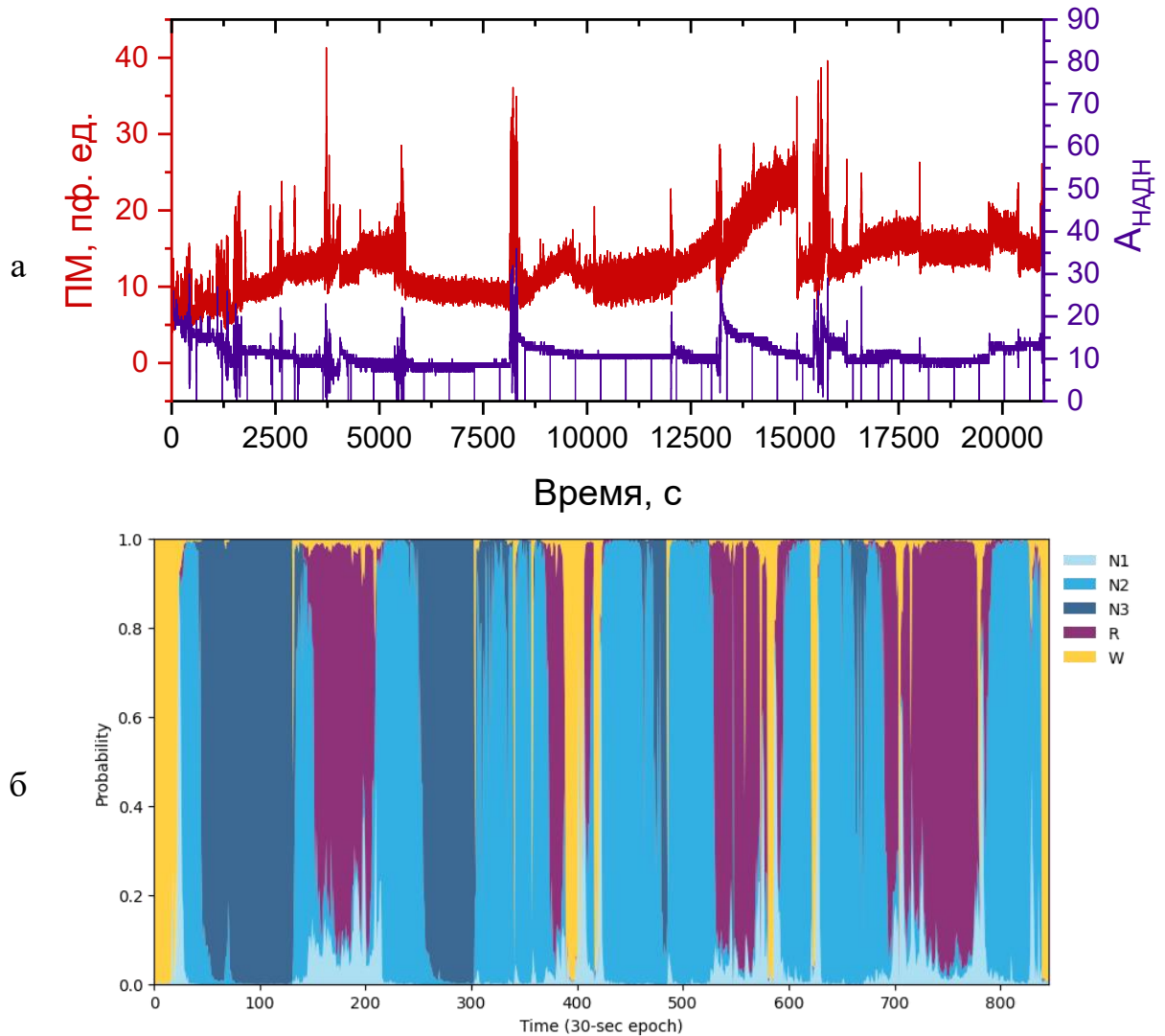
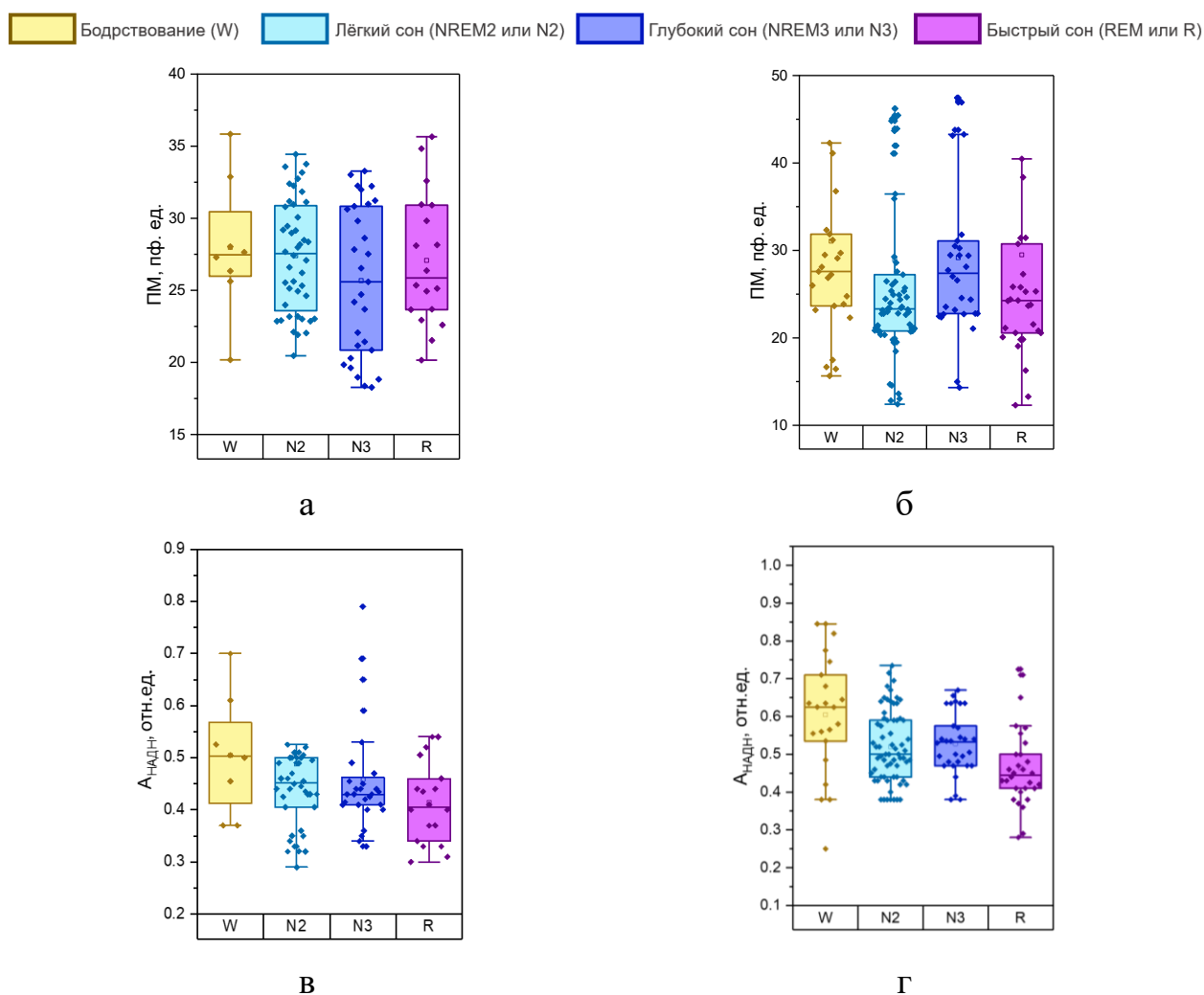


Рисунок 5 – Пример записи параметров МТС в коже волярной стороны дистальной фаланги третьего пальца правой руки (а) и карта фаз сна (б).

Для построения карты фаз сна данные электроэнцефалографии обрабатывались с использованием специализированного программного обеспечения. Полученная карта сна сопоставлялась по времени с параметрами ЛДФ и ФС. В случае, если в пределах десятиминутного интервала записи ЛДФ происходила смена фаз сна, такие участки исключались из дальнейшей обработки. Результаты зарегистрированных параметров МТС представлены на рисунке 6.



а – показатель микроциркуляции крови в области пальцев рук; б – показатель микроциркуляции крови в области пальцев ног; в – нормированная амплитуда интенсивности флуоресценции НАДН в области пальцев рук; г – нормированная амплитуда интенсивности флуоресценции НАДН в области пальцев ног

Рисунок 6 - Результаты зарегистрированных параметров МТС для условно здорового добровольца

Результаты данного исследования показали, что глубокий сон (NREM3) характеризуется снижением показателя микроциркуляции крови в области пальцев рук по сравнению с фазой глубокого сна в области пальцев ног. В утренние часы наблюдается снижение нормированной амплитуды интенсивности флуоресценции НАДН, что свидетельствует о повышении активности метаболической активности биологической ткани. Результаты продемонстрировали регионарные особенности строения МТС и подчеркивают важность использования распределенной системы носимых анализаторов.

В данной главе также представлены результаты исследования параметров МТС пациента, страдающего расстройством сна. Исследования проводилось на базе университетской клиники медицинского научно-

образовательного центра МГУ имени М.В. Ломоносова. В исследовании принял участие 1 пациент мужского пола в возрасте 30 лет с апноэ сна. При апробации в клинической практике протокол исследования был модифицирован. Устройства закреплялись в области предплечья обеих рук и голени обеих ног. Области закреплений устройств представлены на рисунке 7.

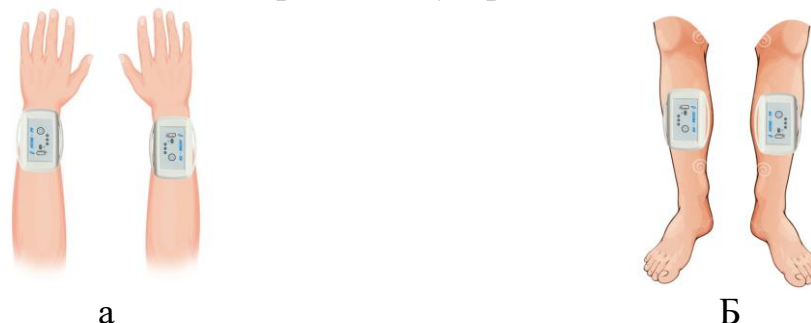


Рисунок 7 – Расположение анализаторов на предплечье (а) и на голени (б)

На рисунке 8 изображен пример зарегистрированных параметров МТС пациента в различные фазы сна.

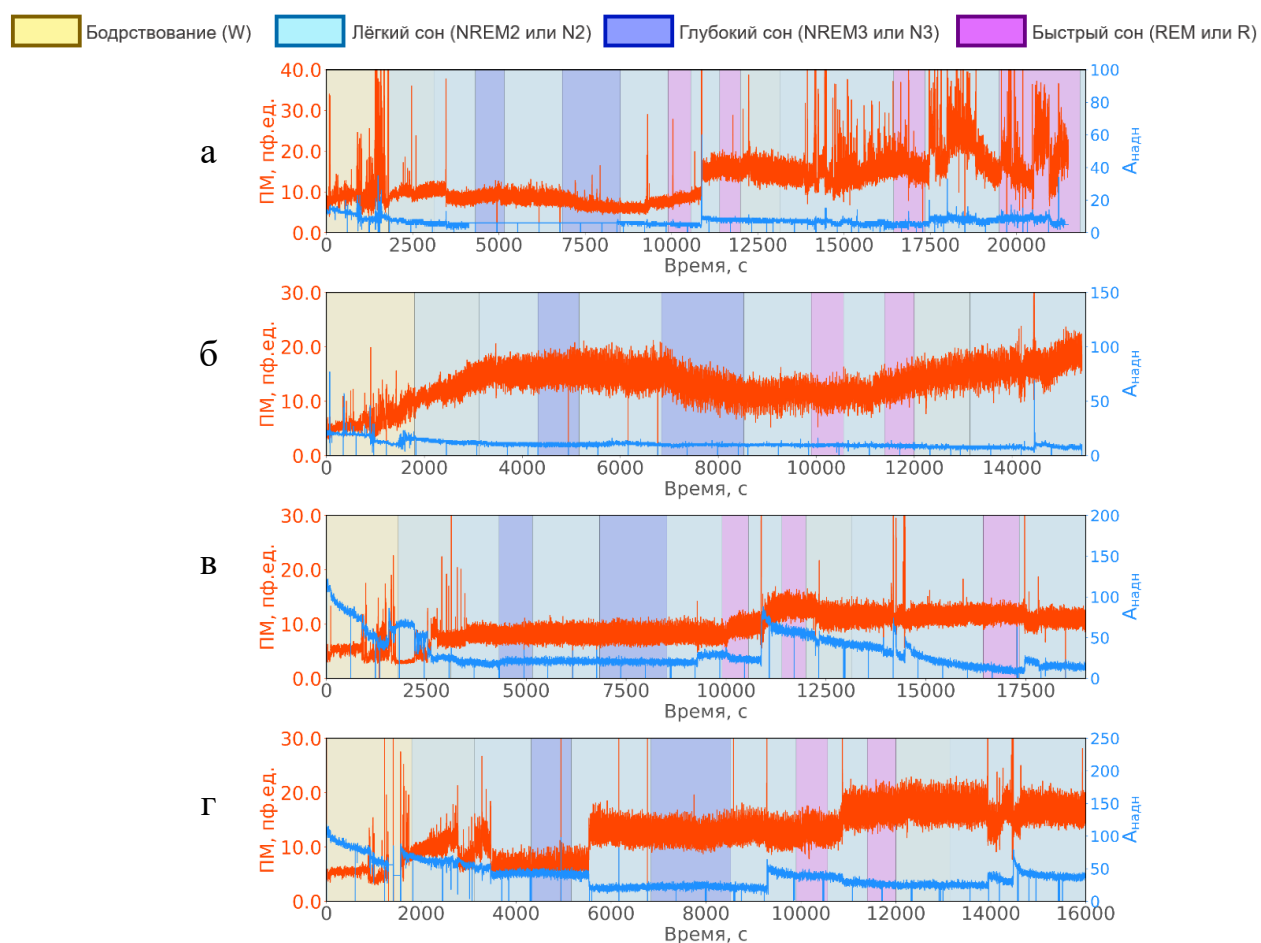


Рисунок 8 – Параметры микроциркуляторно-тканевой системы пациента, зарегистрированные в различные фазы сна в области правого (а) и левого (б) предплечья, а также правой (в) и левой (г) голени

На графиках представлены изменения показателя микроциркуляции крови и интенсивности флуоресценции НАДН во время сна в различных областях исследования. Наблюдаемые регионарные особенности МТС подчеркивают важность использования распределенной системы носимых анализаторов.

На рисунке 9 представлены усреднённые данные ЛДФ, измеренные с интервалом в 10 минут и соотносённые с соответствующими фазами сна.

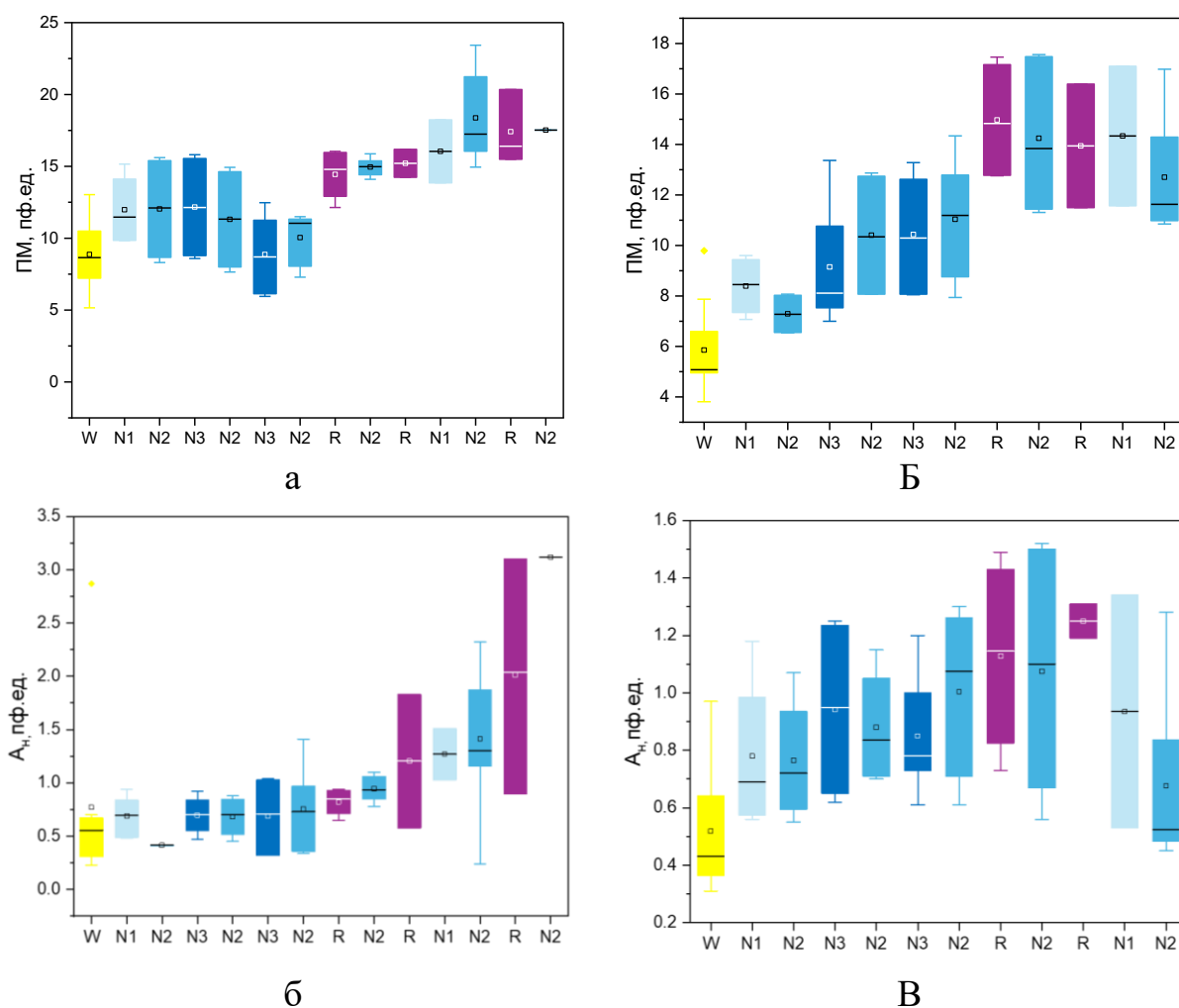


Рисунок 9 - Показатель микроциркуляции в области предплечья (а), области голени (б), амплитуды нейрогенного механизма в области предплечья (в) и голени (г)

Результаты исследования МТС пациента с апноэ показывают увеличение тканевой перфузии во время всех фаз сна по сравнению с периодом бодрствования. Во второй половине сна наблюдается увеличение параметра микроциркуляции крови преимущественно во время фазы быстрого сна, что говорит об увеличении интенсивности кровотока в периферическом отделе системы кровообращения. Данное увеличение наблюдается как в запястье, так и в голени. В области предплечий и голеней в утренние часы наблюдается увеличение амплитуд нейрогенных колебаний что говорит об

активации симпатической нервной системы. Также увеличение амплитуд нейрогенных колебаний является индикатором снижения сопротивления и возможного усиления кровотока по артериоло-венулярному шунту. Увеличение амплитуды нейрогенных составляющих в период ночного сна, может служить косвенным признаком наличия эпизодов апноэ сна у пациента и свидетельствовать о развитии нарушений нутритивного кровоснабжение в его следствии.

На основе полученных данных на здоровых добровольцах разработан классификатор, позволяющий разделять фазу быстрого (REM) и глубокого сна (NREM3), представленный в формуле (1). Диаграмма рассеяния значений и ROC-кривая представлены на рисунке 10.

$$f = -4,98 \cdot A_{НАДН} + 48,46 \cdot \frac{A_{\text{э}}}{ПМ} - 0,19 \quad (1)$$

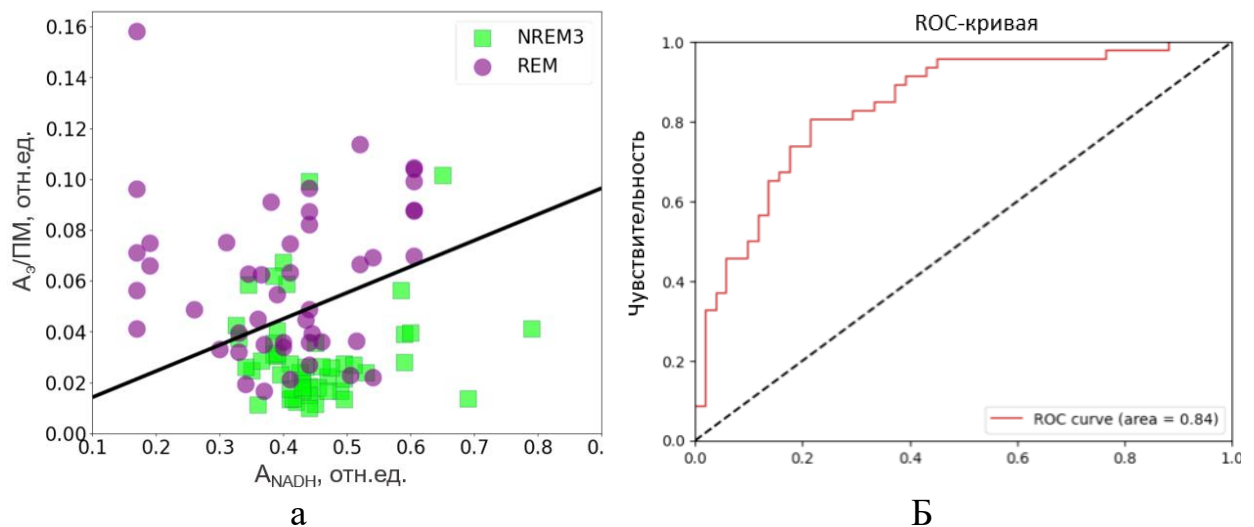


Рисунок 10 - Диаграмма рассеяния значений показателя микроциркуляции крови и амплитуд эндотелиальных осцилляций в области пальцев рук и пальцев ног (а) и ROC-кривая для оценки эффективности модели классификации (б)

Для данного решающего правила получены следующие параметры точности: чувствительность 0,86, специфичность 0,70, значение площади (AUC) под ROC-кривой 0,84. Параметры классификатора получены с помощью разработанного программного модуля, реализующего линейный дискриминантный анализ данных и построение дискриминантной функции.

Также произведен синтез алгоритма метода диагностики нарушений параметров МТС во время сна, изображенного на рисунке 11.

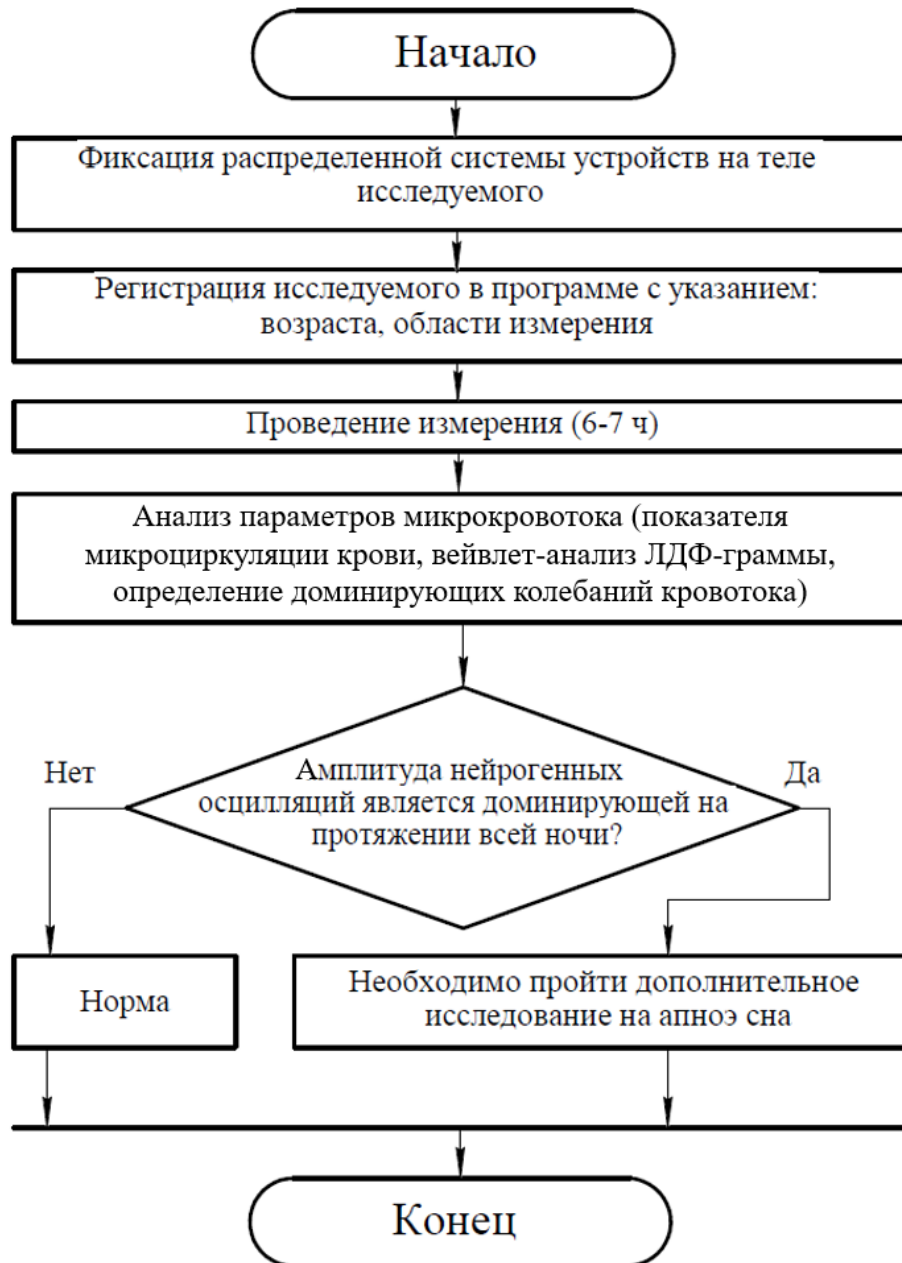


Рисунок 11 - Алгоритм метода диагностики апноэ сна на основе параметров МТС

Таким образом, благодаря применению распределенной системы портативных мультимодальных анализаторов, реализующих методы ЛДФ и ФС, с одновременной регистрацией ЭЭГ, можно анализировать изменения параметров МТС организма человека во время различных фаз сна, что позволяет всесторонне изучить сомнологические расстройства и в дальнейшем оценить эффективность их терапии, а также разработать критерии ранней диагностики нарушений сна.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1) проведён обзор методов оптической неинвазивной диагностики физиологических и нейрофизиологических параметров человека во время сна;
- 2) предложен принцип построения мультимодального носимого устройства для мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна;
- 3) составлена документация для осуществления постпродажного технического обслуживания разрабатываемого устройства
- 4) проведена оценка лазерной безопасности каналов ФС и ЛДФ, подтвердившая возможность их безопасного использования для суточного мониторинга во время сна при определенных режимах облучения;
- 5) предложенный принцип получения диагностической информации о микроциркуляторно-тканевых системах, основанный на совместном применении методов лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии, получил экспериментальное подтверждение своей эффективности;
- 6) разработан алгоритм метода диагностики апноэ сна на основе параметров МТС, позволяющий выявлять эпизоды дыхательных нарушений во сне по изменениям амплитуд нейрогенных осцилляций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science Core Collection

1. Loktionova, Y.I. Wearable Multimodal Analyzers in the Microcirculatory-Tissue Systems Monitoring During Different Sleep Stages / Y.I. Loktionova, E.V. Zharkikh, D.F. Kleeva, **V.S. Yanushin**, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, A.V. Dunaev, // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO), 2024, 501.
2. Дунаев, А.В. Возможности флуоресцентной спектроскопии биотканей человека в портативном мультимодальном исполнении / А.В. Дунаев, **В.С. Янушин**, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких // Современные технологии в медицине. – 2025 – Т.17, № 3. – С. 29-38.
Dunaev, A.V. Capabilities of human biotissue fluorescence spectroscopy in the wearable multimodal version / A.V. Dunaev, **V.S. Yanushin**, Yu.I. Loktionova, E.V. Zharkikh // *Sovremennye tehnologii v medicine*. – 2025. – Vol. 17, No. 3. – P. 29-38.

Прочие публикации

3. **Янушин, В.С.** Мониторинг микроциркуляторно-тканевых систем организма человека во время сна с помощью мультимодальных портативных анализаторов / В.С. Янушин, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких, Д.Ф. Клеева,

В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин, А.В. Дунаев. // XVI Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ’2024» – Владимир-Суздаль, Россия, Доклады, 182–187 (2024).

4. **Янушин, В.С.** Мониторинг микроциркуляторно-тканевых систем в конечностях организма человека во время различных фаз сна / В.С. Янушин, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких, Д.Ф. Клеева, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин, А.В. Дунаев // Материалы четвертой международной научно-практической конференции «Экспериментальные и клинические аспекты микроциркуляции и функции эндотелия», 10-11 октября 2024 года, С.170-173.

5. **Янушин, В.С.** Влияние дыхательной и ортостатической пробы на изменение параметров микроциркуляции крови при измерении методом лазерной доплеровской флоуметрии в разных анатомических участках кожи / В.С. Янушин, А.Д. Легостаев, А.Е. Новосёлов, Е.В. Русина, А.А. Спиридонова, В.Е. Паршакова, Ю.И. Локтионова, Е.В. Жарких. // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2024 [текст]: сб. тр. XXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студ., мол. ученых и спец., 4-6 декабря 2024 г. / под общ. ред. В.И. Жулева. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2024. – С. 68-72.

6. **Янушин, В.С.** Флуоресцентная спектроскопия с временным разрешением и портативный мультимодальный анализатор в оценке окислительного метаболизма биотканей / В.С. Янушин, Е.В. Жарких, Ю.И. Локтионова, И.А. Горюнов, В.В. Шуплецов, А.В. Дунаев. // Флуоресцентная спектроскопия с временным разрешением и портативный мультимодальный анализатор в оценке окислительного метаболизма биотканей // XXII Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы: сборник тезисов (Самара, 12–16 ноября 2024 г.) [Электронное издание]. – М.: Тривант, 2024. – С. 242-244.

7. **Янушин, В.С.** Исследование взаимосвязи параметров микроциркуляции крови и окислительного метаболизма биоткани при окклюзионной пробе / В.С. Янушин, Ю.И. Локтионова, А.В. Дунаев, Е.В. Жарких. // Труды XIII Всероссийского конгресса молодых ученых – (Санкт-Петербург, 2024 г.) – СПб: Университет ИТМО, 2024.

8. **Янушин, В.С.** Исследование взаимосвязи параметров флуоресценции биоткани и микроциркуляции крови с помощью портативного мультимодального анализатора / Е.В. Жарких, А.В. Дунаев. // Исследование взаимосвязи параметров флуоресценции биоткани и микроциркуляции крови с помощью портативного мультимодального анализатора // Современные методы исследования в клеточной биологии и медицине: сборник трудов Всероссийской конференции, г. Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева. – С. 56 (2023).

9. Локтионова, Ю.И. Влияние фаз сна на микроциркуляторно-тканевую систему организма человека / Е.В. Жарких, **В.С. Янушин**, Д.Ф. Клеева, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин, А.В. Дунаев. // НейроБайкал 2024:

Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с международным участием по нейробиологии и биофотонике «НейроБайкал 2024», пос. Большие Коты, оз. Байкал, 22-27 июля 2024 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ОГУ имени И.С. Тургенева ; редкол. : А.Ю. Абрамов [и др.]. – г. Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024. – С. 27.

10. Дунаев, А.В., Возможности распределённой системы носимых оптических сенсоров для мониторинга параметров микроциркуляторно-тканевой системы организма человека во время сна / А.В. Дунаев, Ю.И. Локтионова, **В.С. Янушин**, Е.В. Жарких, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин // Сон – 2024: XI Международный форум сна, 14–16 марта 2024 года, Москва, Россия: Сборник материалов / Под редакцией В. Б. Дорохова, А. Л. Калинкина, В. М. Ковальзона, Г. В. Коврова. – Москва, 2024. – В печати

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025615457. Программный модуль для выделения фаз сна на основе параметров микроциркуляторно-тканевых систем организма человека / Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., **Янушин В.С.**, Паршакова В.Е., Дунаев А.В., – М.: РосПатент; – заявл. 20.02.2025; опубл. 05.03.2025