

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра Оптики и биофотоники
наименование кафедры

**Анализ variability оптических биосигналов периферического звена
сосудистого русла в разноуровневой структуре сна**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента (ки) 4 курса 4082 группы

направления 12.03.04 Биотехнические системы и технологии
код и наименование направления (специальности)

Институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Крючков Егор Сергеевич

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

19.06.2025

подпись, дата

М.О. Цой

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

Оптики и биофотоники

полное наименование кафедры

Проф., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

должность, уч. степень, уч. звание

19.06.2025

подпись, дата

В.В. Тучин

инициалы, фамилия

Саратов 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

Сон — один из фундаментальных физиологических процессов, играющий ключевую роль в регуляции жизнедеятельности организма, восстановлении нейровегетативного баланса и поддержании гомеостаза. Современные исследования показали, что во время сна происходят характерные изменения в работе сердечно-сосудистой системы, особенно выраженные в разной степени в зависимости от фазы сна. Эти изменения отражают сложную динамику вегетативной регуляции, в частности, баланса между симпатической и парасимпатической активностью [1].

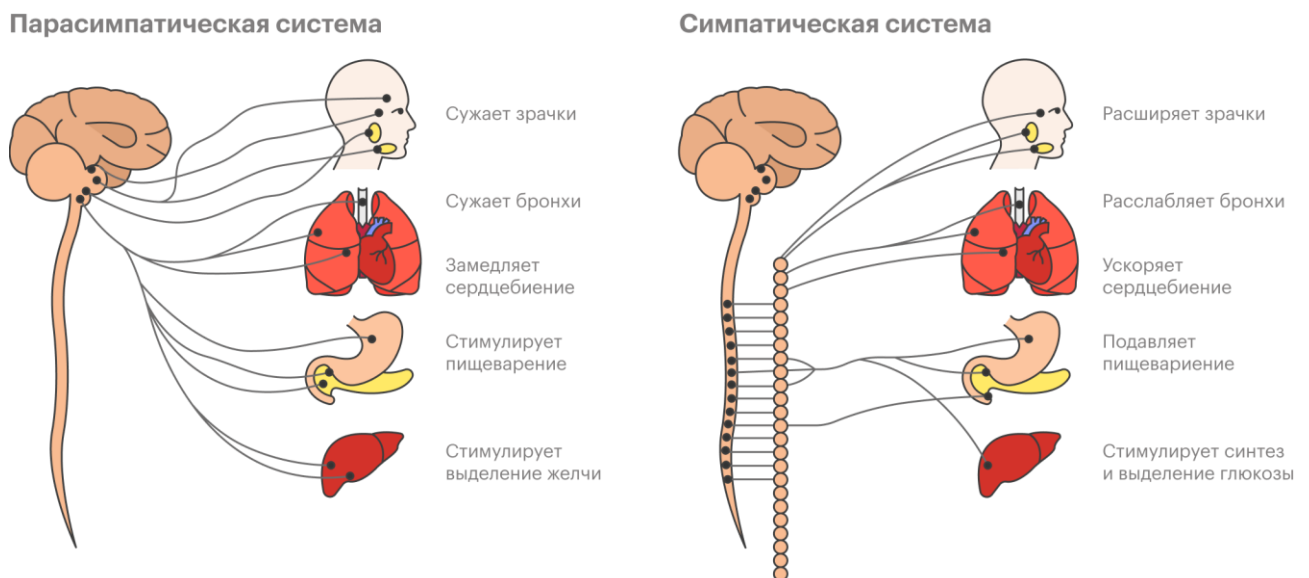


Рисунок 1. – Парасимпатическая и симпатическая системы

Особый интерес в последние годы вызывает исследование периферического звена сосудистого русла в структуре сна — области, традиционно недооцениваемой по сравнению с центральной гемодинамикой. Применение методов биофотоники, таких как лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), позволяет неинвазивно оценивать микроциркуляцию крови в коже, что открывает новые перспективы для анализа вариабельности оптических биосигналов во время сна [2]. В отечественной научной среде одним из ведущих инструментов ЛДФ является прибор «ЛАЗМА», созданный в рамках российских разработок [3].

Кроме того, точная регистрация фаз сна с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) и построение гипнограммы позволяют сопоставлять состояние периферической гемодинамики с конкретными стадиями сна. Таким образом, интеграция данных ЛДФ и ЭЭГ предоставляет уникальную возможность выявить корреляционные и регуляторные закономерности, отражающие взаимодействие между мозговой активностью и функцией сосудистой системы [4, 5].

Актуальность темы исследования

Углублённое понимание процессов регуляции микроциркуляции в зависимости от фаз сна представляет важную задачу для нейрофизиологии, сомнологии и клинической медицины. Изменения периферического кровотока во время сна могут служить маркерами нарушений вегетативной регуляции, ранними индикаторами кардиоваскулярных рисков или функциональных расстройств сна. Несмотря на это, системный анализ вариабельности оптических биосигналов, получаемых от периферического звена сосудистого русла, в контексте разноуровневой структуры сна, до сих пор остаётся недостаточно изученным [2, 6].

Сочетание неинвазивных оптических методов и технологий нейрофизиологического мониторинга открывает перспективы для повышения точности диагностики и мониторинга функциональных состояний организма.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является анализ вариабельности оптических биосигналов периферического звена сосудистого русла в разноуровневой структуре сна на основе сопоставления данных ЛДФ (прибор «ЛАЗМА») с фазами сна, определёнными по ЭЭГ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Провести обзор литературы по физиологии сна, вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы и методам оптической диагностики [1, 4];
- Выполнить экспериментальную регистрацию ЛДФ-сигналов во время сна с параллельной ЭЭГ-записью;
- Построение гипнограммы;
- Провести анализ вариабельности ЛДФ-сигналов во время сна, сопоставить их характеристики с фазами NREM-сна и выявить корреляционные зависимости между параметрами микроциркуляции и стадиями сна с учётом особенностей вегетативной регуляции. [6].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Современные методы биофотоники, в частности лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), открывают уникальные возможности для неинвазивного изучения процессов микроциркуляции. Периферическое звено сосудистого русла, как индикатор общего состояния вегетативной регуляции, особенно чувствительно к фазовым переходам сна, сопровождающимся глубокой перестройкой нейровегетативной активности. Несмотря на значительное количество работ в области полисомнографии и сердечно-сосудистой физиологии, исследования, сочетающие ЛДФ-анализ с фазовой структурой сна, остаются крайне ограниченными.

Микроциркуляция во сне подвержена влиянию ряда физиологических ритмов — от медленных колебаний сосудистого тонуса до дыхательных и пульсовых осцилляций. Каждая из этих компонент несёт в себе специфическую информацию о работе различных уровней регуляции (эндотелиальный, нейрогенный, миогенный, дыхательный, сердечный). Применение частотно-временного анализа позволяет не только количественно оценить динамику этих колебаний, но и установить фазозависимые закономерности, отражающие сложные механизмы адаптации организма.

В данном исследовании разработан и реализован протокол синхронной регистрации ЛДФ-сигнала и полисомнографических параметров (ЭЭГ, ЭОГ, ЭМГ), что позволило провести сравнение мощности биофизических компонент ЛДФ на различных стадиях сна (Wake, N1, N2, N3). Ключевым инструментом анализа выступил вейвлет-преобразование, применённое для декомпозиции сигналов по биофизически значимым частотным диапазонам.

Научная значимость работы заключается в том, что впервые проведён системный анализ вариабельности оптических биосигналов в структуре сна с фокусом на фазоспецифическую регуляцию микроциркуляции. Установлены достоверные изменения в амплитуде и дисперсии эндотелиального и

нейрогенного компонентов в глубоких стадиях сна, а также описан характер дыхательной и пульсовой модуляции в фазах N1 и N2. Эти данные подтверждают наличие многослойной и фазозависимой регуляции сосудистого русла во сне.

Практическая ценность исследования заключается в перспективе применения полученных результатов для разработки автоматизированных систем анализа сна, биофидбэк-платформ и персонализированного мониторинга сосудистой регуляции при различных функциональных и патологических состояниях.

Таким образом, работа опирается на современные достижения биофотоники, физиологии сна и математической обработки сигналов, и вносит вклад в формирование новых подходов к изучению вегетативной регуляции на микроуровне в условиях физиологического сна.

РЕЗУЛЬТАТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ЭЭГ-записи с построением гипнограммы позволил выделить участки непрерывного пребывания испытуемых в фазах Wake, N1, N2 и N3, соответствующие критериям AASM (30-секундные эпохи, учёт ЭОГ/ЭМГ). На примерах гипнограмм хорошо видна классическая циклическая структура сна с преобладанием переходов Wake→N1→N2→N3 и обратно в первые 2–3 часа записи. Вейвлет-спектр ЭЭГ демонстрирует ожидаемые изменения: рост дельта-активности при переходе в N3, уменьшение альфа-активности уже в N1–N2, частичное нарастание тета-ритма в N1–N2 и снижение бета-активности во всех стадиях NREM по сравнению с бодрствованием.

Для каждого этапа сна (Wake, N1, N2, N3) были выделены стационарные отрезки ЛДФ-сигнала (60–180 с), очищенные от артефактов движения и внешних помех. Применялись два подхода:

Спектральный (БПФ): интегральные мощности в физиологических диапазонах:

- Эндотелиальный (0,005–0,02 Гц);
- Нейрогенный (0,02–0,05 Гц);
- Миогенный (0,05–0,15 Гц);
- Респираторный (0,15–0,4 Гц);
- Пульсовый (0,4–1,6 Гц).

Вейвлет-анализ: для отслеживания динамики мощности внутри длительных сегментов и в переходах (особенно N2→N3 и обратно).

Результаты далее обобщены по всем испытуемым (n=5) в виде средних значений, медиан и распределений мощности в каждом диапазоне для фаз Wake, N1, N2, N3.

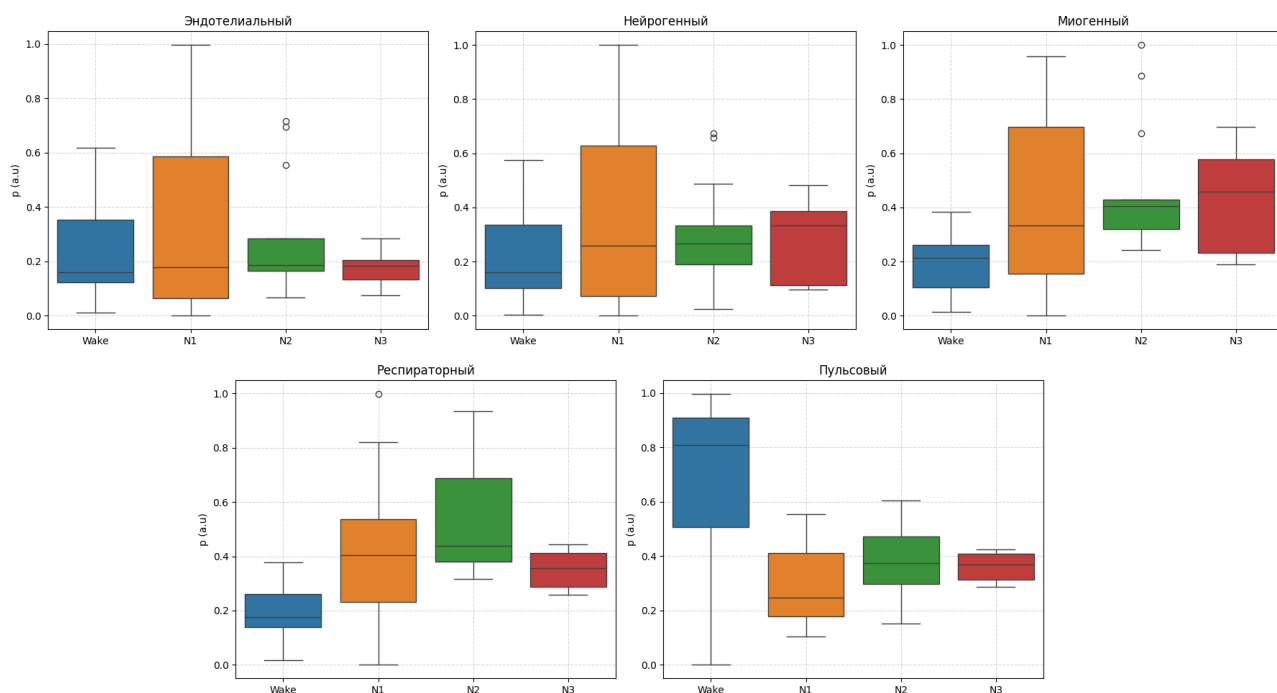


Рисунок 1. – Распределение ритмов ЛДФ по фазам сна на основе метода БПФ

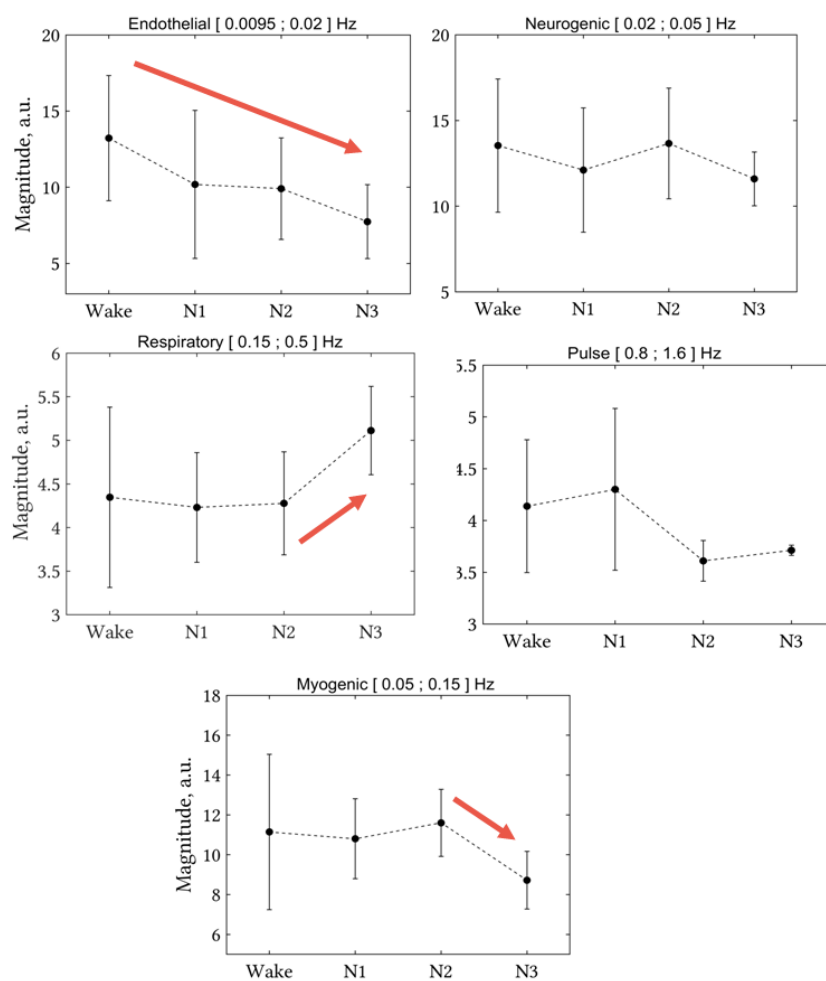


Рисунок 2. – Распределение ритмов ЛДФ по фазам сна на основе метода вейвлет-преобразования

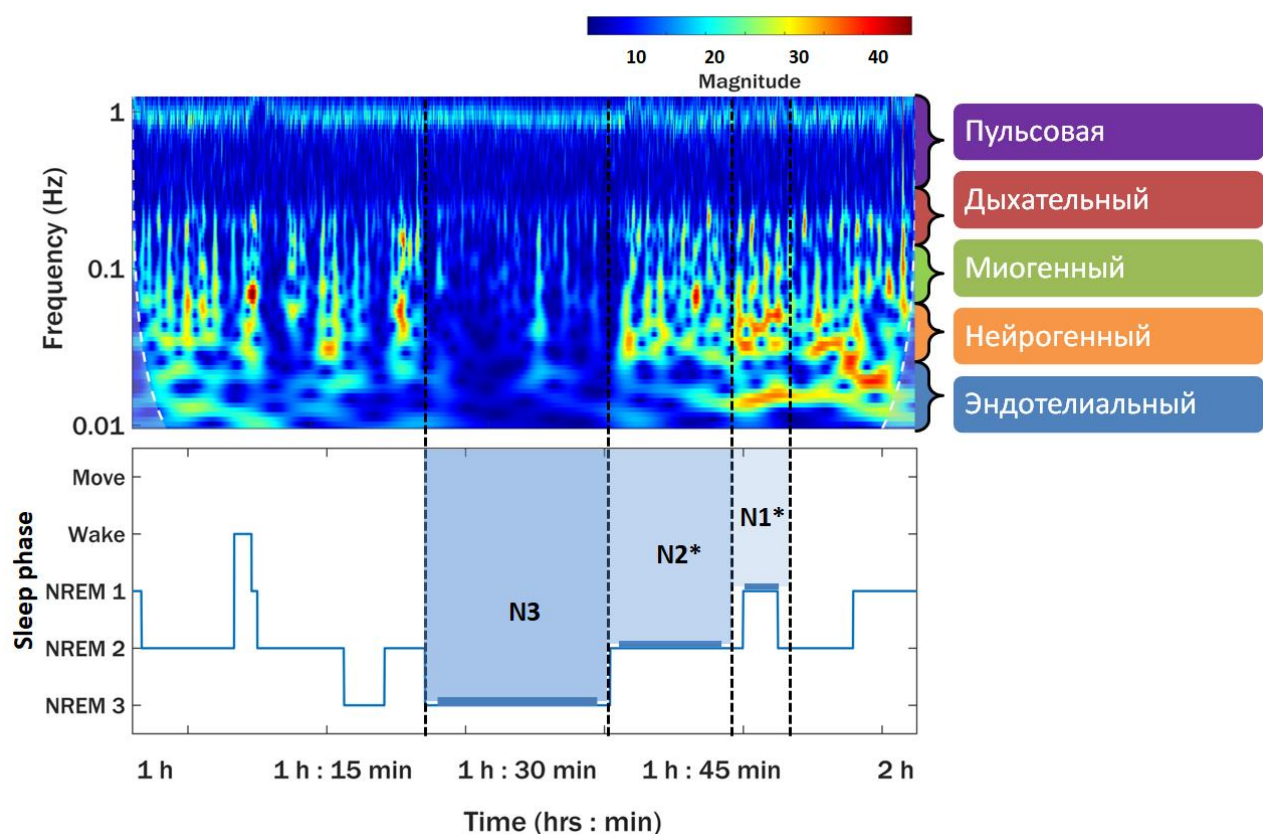


Рисунок 3. – Сопоставление частотно-временного анализа ЛДФ и гипнограммы

1. Эндотелиальная мощность (0,005–0,02 Гц)

Распределение по фазам сна. В бодрствовании («Wake») медианное значение эндотелиальной мощности составляло $\approx 0,31$ а.е., затем последовательно снижалось в N1 ($\approx 0,27$ а.е.), N2 ($\approx 0,22$ а.е.) и достигало минимума в N3 ($\approx 0,18$ а.е.).

Статистическая значимость. Снижение мощности в N3 по сравнению с Wake и N1 оказалось статистически значимым ($p < 0,05$).

Интерпретация. Уменьшение эндотелиального компонента в глубоких стадиях сна отражает подавление эндотелиально-опосредованной вазодилатации, что согласуется с доминированием парасимпатической регуляции и снижением пульсовых нагрузок на сосудистую стенку.

Повышение эндотелиальной активности в N1→N2 может свидетельствовать об усилении локального эндотелиального регулирования при ранних стадиях погружения в сон, что согласуется с необходимостью

адаптации сосудов к снижению артериального давления и перераспределению кровотока. Снижение в глубоком сне (N3) может отражать установление устойчивой парасимпатической доминации, когда эндотелиальная регуляция переходит в более «экономный» режим, либо сигнализирует о том, что в фазе глубокого отдыха требуется менее активная эндотелиальная модуляция за счёт стабильного низкого тонуса сосудов.

2. Нейрогенная мощность (0,02–0,05 Гц)

Распределение по фазам сна. Нейрогенный компонент демонстрировал плавное убывание: Wake $\approx 0,34$ а.у. $\rightarrow$ N1 $\approx 0,31$ а.у. $\rightarrow$ N2 $\approx 0,28$ а.у. $\rightarrow$ N3 $\approx 0,24$ а.у.

Статистическая значимость. Различия между Wake и N3 оказались достоверными ($p < 0,05$).

Снижение нейрогенной мощности связано с уменьшением симпатической тонус-модуляции сосудов в фазах глубокого сна, что подтверждает известное подавление симпатической активности в NREM[1].

Рост нейрогенной компоненты при переходе к N1 может отражать перестройку вегетативной нервной регуляции сосудов при засыпании: даже при общем снижении симпатического тонуса наблюдаются флуктуации, связанные с активностью автономной нервной системы (возможно, колебания баланса симпато-/парасимпатической регуляции). Сохранение повышенного уровня в N2–N3 говорит о том, что автономная нервная система остаётся важным фактором модуляции сосудистого тонуса в медленном сне, пусть и с преобладанием парасимпатического влияния. Этот вывод соответствует литературным данным о том, что нейрогенная регуляция остаётся активной в NREM[4].

3. Миогенная мощность (0,05–0,15 Гц)

Распределение по фазам сна. Относительно стабильна: Wake $\approx 0,29$ а.у., N1 $\approx 0,27$ а.у., N2 $\approx 0,25$ а.у., N3 $\approx 0,26$ а.у.

Изменение дисперсии. Обратите внимание на уменьшение разброса (STD) в N3, указывающее на более однородное поведение гладкомышечных клеток сосудов.

Незначительное снижение миогенного компонента с сохранением высокой устойчивости может говорить о сохранении механизма ауторегуляции кровотока на локальном уровне, несмотря на изменение общей вегетативной регуляции.

Повышенная миогенная активность (реакция гладкомышечных клеток на локальное давление) в ранних стадиях сна (N1–N2) может быть связана с адаптацией сосудов к меняющемуся гемодинамическому фону (снижение артериального давления, изменение кровотока). Снижение в N3, но остающееся выше уровня Wake, указывает на устойчивую, но менее колебательную регуляцию сосудов во время глубокого сна. Литература отмечает активность миогенного механизма в NREM, что связано с поддержанием перфузии при низком давлении сна.

4. Респираторная мощность (0,15–0,4 Гц)

Распределение по фазам сна. Увеличивается из Wake ($\approx 0,21$ а.у.) в N1 ($\approx 0,35$ а.у.) и достигает максимума в N2 ($\approx 0,44$ а.у.), после чего в N3 слегка падает ($\approx 0,39$ а.у.).

Статистическая значимость. Рост респираторного компонента в N2 по отношению к Wake значим ($p < 0,05$).

Дыхательные колебания кровотока усиливаются при засыпании и в лёгких стадиях сна, что может быть связано с изменениями респираторного

паттерна (углубление дыхания, стабилизация дыхательных ритмов) и их влиянием на сосудистую регуляцию. Снижение в N3, остающееся на повышенном по сравнению с бодрствованием уровне, согласуется с более ровным, но всё ещё выраженным дыхательным вкладом в перфузию во время глубокого сна. Эти результаты коррелируют с данными о модификации дыхательных паттернов и их влиянии на вариабельность ЛДФ-сигнала в медленном сне.

5. Пульсовая мощность (0,4–1,6 Гц)

Распределение по фазам сна. Наивысшая в бодрствовании ($\approx 0,85$ а.е.), резкий спад в N1 ($\approx 0,38$ а.е.), небольшое повышение в N2 ($\approx 0,45$ а.е.) и умеренное снижение в N3 ($\approx 0,36$ а.е.).

Снижение пульсовой компоненты в фазах сна отражает уменьшение сердечного выброса и пульсовой амплитуды в медленном сне при прогрессивном парасимпатическом доминировании. Резкое снижение при переходе в N1 соответствует снижению ЧСС и пульсового давления при засыпании, а последующее сохранение на низком уровне в N2–N3 подтверждает устойчивую редукцию кардиального вклада в микроциркуляцию кожи при NREM. Это согласуется с известным физиологическим снижением гемодинамической активности во время сна.

6. Динамика октавного анализа во времени

На временном ряде видно, что при переходе из N2 в N3 энергия низкочастотных (эндотелиальных и нейрогенных) колебаний уменьшается, тогда как респираторный компонент сначала нарастает, а миогенный и пульсовый становятся менее вариабельными. Это подтверждает фазоспецифический характер регуляции микроциркуляции и снижает общую дисперсию сигналов в глубоком сне.

Уменьшение низкочастотных (эндотелиальных и нейрогенных)

осцилляций в глубоких стадиях сна согласуется с результатами Smits et al. (2020) и Jurysta et al. (2003), которые демонстрировали подавление системного и локального симпатико-парасимпатического баланса в N3[3,9].

Усиление респираторного компонента соответствует описанному Trinder et al. (2001) феномену «дыхательной модуляции» кровотока в NREM-сне[1].

Стабилизация миогенной и пульсовой составляющих в глубоких стадиях может служить маркером гомеостатического поддержания перфузии на локальном уровне.

Снижение дисперсии сигналов (STD) указывает на более однородные и менее «шаткие» колебания микроциркуляции в фазе N3, что соответствует концепции «энергосбережения» и «восстановления» организма во время глубокого сна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрированы возможности лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) как неинвазивного метода биофотоники для исследования микроциркуляторных процессов во время различных фаз сна.

Методологическая новизна и значимость.

Предложен и апробирован протокол одновременной регистрации ЛДФ-сигнала и полисомнографических параметров (ЭЭГ, ЭМГ, ЭОГ), что позволило установить прямые корреляции между фазовыми переходами сна и динамикой частотных компонентов ЛДФ.

Применён вейвлет-анализ для декомпозиции ЛДФ-сигнала на пять ключевых биофизических диапазонов (эндотелиальный, нейрогенный, миогенный, респираторный, пульсовой), что открыло углублённое понимание вегетативно-сосудистой регуляции во сне.

Основные результаты.

В фазе глубокого сна (N3) отмечено существенное снижение мощности низкочастотных эндотелиального (0,005–0,02 Гц) и нейрогенного (0,02–0,05 Гц) компонентов, что свидетельствует о подавлении симпато-парасимпатической активации на микроуровне.

Респираторный компонент (0,15–0,4 Гц) достигает максимума в лёгкой стадии N2, отражая усиленную дыхательную модуляцию кровотока.

Миогенный (0,05–0,15 Гц) и пульсовой (0,4–1,6 Гц) диапазоны сохраняют свою относительную стабильность и демонстрируют уменьшение дисперсии в глубоких фазах, что указывает на гомеостатическое выравнивание локальных сосудистых ответов.

Временная динамика колебаний подтверждает фазоспецифический характер регуляции микроциркуляции: при переходе в N3 наблюдается «затихание» вариабельности и повышение устойчивости биофотонного сигнала.

Практическая и научная ценность.

Разработанная методика позволяет неинвазивно мониторить тонус и адаптивность периферических сосудов в режиме сна, что имеет потенциал для ранней диагностики сосудистых и нейровегетативных нарушений.

Полученные данные формируют основу для дальнейшего создания автоматизированных алгоритмов сегментации и классификации фаз сна на основе анализа ЛДФ-сигнала, расширяя спектр применения биофотонических методов в сомнологии и кардиологии.

Ограничения и перспективы.

Текущий эксперимент охватывает только NREM-фазы сна; дальнейшее включение REM-сна и расширение кросс-популяции (возрастные и патологические когорты) будет способствовать верификации выявленных закономерностей.

Интеграция многоканальной ЛДФ-съемки (разные участки периферии) и применение машинного обучения для кластеризации временных паттернов обещают более высокую точность и клиническую релевантность.

Таким образом, проведенное исследование не только подтвердило ключевую роль оптических методов (ЛДФ) в изучении микроциркуляции во сне, но и заложило методологический фундамент для разработки новых диагностических инструментов, способных оценивать состояние сосудистого русла в реальном времени и с высокой фазовой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trinder J., Kleiman J., Carrington M. Autonomic activity during human sleep as a function of time and sleep stage // J. Sleep Res. — 2001. — Vol. 10, No. 4. — P. 253–264.
2. Дунаев А.В., Потапова Е.В., Королева А.К. и др. Основы медицинской биофотоники. — Орёл: Орловский гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2019. — 207 с.
3. Жарких Е.В., Дунаев А.В., Потапова Е.В. и др. Исследование оптических свойств кожи под воздействием низкочастотного ультразвука // Spectroscopy and Spectral Analysis. — 2020. — Т. 40, № 5. — С. 1463–1468.
4. Jurysta F., Kempenaers P., Lanquart I. et al. A study of the dynamic interactions between sleep EEG and heart rate variability in healthy young men // Clin. Neurophysiol. — 2003. — Vol. 114, No. 11. — P. 2146–2155.
5. Karavaev A.S., Kiselev A.R., Borovkova E.I. et al. Synchronization of low-frequency oscillations in the cardiovascular system: Application to the analysis of nocturnal blood pressure dipping // Chaos, Solitons & Fractals. — 2021. — Vol. 143. — Article 110619.
6. Abbas A., Salarian S., Alakbarova S. Automated detection of sleep apnea from ECG signals using long short-term memory network // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 106594–106603.
7. Патент РФ № 2169382. Способ неинвазивного определения параметров кожного кровотока и устройство для его осуществления / НПП «Лазма». — 2001.
8. Иванов П.Ч., Маценко В.С., Киселев А.Р. и др. Нелинейная динамика вариабельности сердечного ритма и потока крови // Журнал технической физики. — 2020. — Т. 90, № 7. — С. 1023–1031.
9. Smits M., Vink E.E., van Montfrans G.A. et al. Skin blood flow during sleep: physiological basis and methodological aspects of laser-Doppler flowmetry in sleep research // Sleep Medicine Reviews. — 2020. — Vol. 50. — 101253.

10. Tuchin V.V. Handbook of Optical Biomedical Diagnostics. 2nd ed. — SPIE Press, 2016. — 989 p.
11. Addison P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook. 2nd ed. — CRC Press, 2017. — 468 p.
12. Berry R.B., Brooks R., Gamaldo C.E. et al. The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications. Version 2.6. — Darien, IL: American Academy of Sleep Medicine, 2020. — 198 p.

