

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии

Исследование кардиореспираторного взаимодействия в процессе здорового
старения

наименование темы выпускной квалификационной работы

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2281 группы
направления 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии»
профиль подготовки «Аппаратные и программные средства биомедицины»
институт физики
Сюденева Анара Вячеславовна

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель:
Доцент кафедры
динамического
моделирования и
биомедицинской инженерии,
к.ф.-м.н., доцент

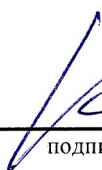
„Отлично“



Е.И. Боровкова

Подпись, дата
20.06.2025

Зав. кафедрой динамического
моделирования и
биомедицинской инженерии,
д.ф.-м.н., профессор



А.С. Караваев

подпись, дата
20.06.2025

Саратов 2025

Введение. Жизненные циклы человека, сопровождаются физиологическими изменениями в различных органах и системах организма, в частности, в сердечно сосудистой и дыхательной системах. Для своевременного выявления патологических изменений необходимо разрабатывать инструментальные методы неинвазивного контроля их тяжести. В этой работе мы изучим сигналы сердечно-сосудистой системы и дыхания людей различных возрастных групп без патологий сердечно-сосудистой системы и органов дыхания в состояниях бодрствования и на различных стадиях сна. Исследуем методы анализа когерентности амплитуд и фаз сигналов, количественно охарактеризуем возрастные изменения в кардио-респираторном взаимодействии. Выявим снижение когерентности изучаемых процессов с возрастом, как в состоянии бодрствования, так и на различных стадиях сна, что указывает на ухудшение координации дыхательной и сердечно-сосудистой систем с возрастом.

Актуальность данного исследования обусловлена несколькими факторами, связанными с процессом возрастных изменений и его воздействием на здоровье человека. Изменения в кардио-респираторной системе становятся важными индикаторами, которые могут сигнализировать о развитии неблагоприятных состояний и заболеваний.

Основные аспекты актуальности: увеличение продолжительности жизни: с ростом продолжительности жизни возрастает количество людей, страдающих от различных заболеваний. Эффективная оценка функционального состояния сердечно-сосудистой и дыхательной систем является критически важной для улучшения качества жизни и снижения заболеваемости. Необходимость ранней диагностики: раннее выявление изменений, связанных с возрастом, позволяет начать профилактические меры и корректирующее лечение до проявления явных симптомов заболеваний, что может значительно улучшить прогноз и снизить риск осложнений. Поддержка автоматизации диагностики: современные

технологии, такие как машинное обучение и обработка сигналов, делают возможным создание систем, способных автоматически классифицировать стадии сна и оценивать здоровье пациента на основе анализа когерентности сигналов, что актуально для врача и пациента.

Целью исследования является изучение степени когерентности процессов дыхания и парасимпатической регуляции ритма сердца в диапазоне 0.15-0.50 Гц в состоянии бодрствования и различных стадиях сна, а также в зависимости от возраста человека.

Для решения поставленной цели были решены задачи:

1) оценить когерентность процессов дыхания и парасимпатической регуляции частоты сердечных сокращений у здоровых испытуемых различных возрастных групп в состоянии бодрствования, быстрого сна с движениями глаз (REM) и глубокого сна (S2 и S3);

2) провести сравнительный анализ значений специфической когерентности (SPC) и максимальной когерентности в диапазоне HF (0.15-0.50 Гц) между различными возрастными группами и стадиями сна;

3) оценить статистическую значимость различий в значениях SPC и максимальной когерентности между реальными данными и суррогатными данными, используя методы, такие как тест Краскала-Уоллиса и U-тест Манна-Уитни;

4) исследовать влияние возраста на когерентность процессов дыхания и частоты сердечных сокращений, выявив закономерности и тенденции, связанные с возрастными изменениями в системе автономного контроля кровообращения.

Новизна данного исследования заключается в комплексном анализе когерентности взаимодействия между дыхательными процессами и парасимпатической регуляцией сердечного ритма в диапазоне 0.15–0.50 Гц, что ранее недостаточно подробно изучалось в контексте различных физиологических состояний и возрастных групп. В отличие от существующих

работ, исследование фокусируется на сравнении этих процессов в условиях бодрствования и различных стадий сна, а также учитывает влияние возрастных изменений, что позволяет выявить новые закономерности и особенности автономной регуляции организма. Такой подход способствует расширению научных представлений о динамике взаимодействия вегетативных систем и может стать основой для разработки более точных методов диагностики и мониторинга состояния здоровья человека.

Основное содержание работы. Мы проанализировали данные 96 здоровых добровольцев (59 женщин и 37 мужчин), 36 человек в возрасте от 20 до 34 лет, 23 человека в возрасте от 35 до 49 лет, 17 человек в возрасте от 50 до 64 лет и 20 человек в возрасте от 65 лет и старше. Данные были собраны в восьми лабораториях сна в рамках проекта Европейского союза SIESTA.

Исследование было одобрено местными институциональными комиссиями по этике лабораторий сна, участвовавших в исследовании; все участники предоставили письменное информированное согласие. Критериями исключения участников были наличие одышки, обструктивного апноэ и гипопноэ, а также выявленные патологии сердечно-сосудистой системы.

Мы проанализировали электрокардиограмму (ЭКГ) и дыхательные сигналы испытуемых. Для каждого испытуемого из 8-часовой ночной записи мы выделили по одному эпизоду в состоянии бодрствования, быстрого сна с движением глазных яблок и глубокого сна (который включает в себя фазы S2 и S3) в соответствии с классификацией. Продолжительность каждого эпизода не превышала 5 минут. Далее мы проанализировали одновременно записанные сигналы ЭКГ и дыхания для выбранных эпизодов. Из ЭКГ мы извлекли последовательность RR-интервалов, то есть временных интервалов между каждой парой последовательных пиков R в соответствии с известными рекомендациями. Выбранную неравноотстоящую последовательность RR-интервалов мы аппроксимировали кубическими сплайнами и передискретизировали с равными временными интервалами 0.05 с (частота дискретизации 20 Гц). Для дальнейшей обработки мы использовали равноотстоящий временной ряд RR-интервалов и сигнал дыхания с частотой дискретизации 20 Гц.

Для проверки значимости SPC и $C_{\max}$ мы изучаем изменения между показателями, полученными на основе реальных и замещающих данных. Для каждого исходного сигнала $s_x(t)$ и $s_y(t)$ мы сгенерировали $M=100$ замещающих

временных рядов, задав равномерное случайное распределение начальных фаз гармоник в разложении сигнала в ряд Фурье. Этот метод подготовки замещающих данных сохраняет периодограммы анализируемых сигналов, но разрушает когерентность между ними. Затем для каждой i -й пары суррогатных данных мы рассчитали SPC^i и $C_{\max}^i$, $i=1, \dots, M$. Для ансамблей $i=1, \dots, M$ суррогатных данных мы рассчитали среднее значение показателей SPC^i и $C_{\max}^i$ и построили их распределение. На рисунках показан 95-й квантиль таких распределений, который соответствует уровню статистической значимости $p < 0,05$.

Чтобы проверить значимость различий в оценках средних показателей сравниваемых групп, мы использовали критерий Краскела-Уоллиса и U-критерий Манна-Уитни.

Анализ данных, полученных от здоровых людей всех возрастных групп во время сна и бодрствования, показывает изменение степени согласованности дыхательного сигнала и процесса парасимпатического контроля частоты сердечных сокращений на разных этапах. Мы получили более низкие значения SPC и $C_{\max}$ во время фазы быстрого сна (0.80 ± 0.02 и 0.87 ± 0.01 соответственно) и в состоянии бодрствования (0.87 ± 0.01 и 0.91 ± 0.01 соответственно), чем во время фазы медленного сна (0.91 ± 0.02 и 0.94 ± 0.01 соответственно). Это указывает на примерно 11-процентное увеличение мгновенной фазовой когерентности для SPC и 4-процентное увеличение амплитудной и фазовой когерентности $C_{\max}$ для перехода от фазы быстрого сна к фазе медленного сна. Значимость различий в показателях SPC и $C_{\max}$ между стадиями сна мы подтвердили с помощью критерия Краскела-Уоллиса ($H(2)=40.86$, $p<0.0001$ и $H(2)=62.25$, $p<0.0001$ для показателей SPC и $C_{\max}$ соответственно) и U-критерия Манна-Уитни ($p<0.0001$ для обоих показателей). Эти результаты показывают чувствительность используемых показателей когерентности к физиологическим

изменениям в ответ на влияние высших нервных центров на системы, контролирующие процессы дыхания и частоту сердечных сокращений.

Анализ данных, полученных от здоровых испытуемых на всех стадиях сна, отдельно для каждой возрастной группы, показывает снижение согласованности дыхания и процесса парасимпатического контроля частоты сердечных сокращений с увеличением возраста. Для показателя SPC разница в согласованности между самой молодой и самой старшей группой (критерий Манна-Уитни $p=0.0009$) составляет 6%. Для показателя $C_{\max}$ разница в согласованности между самой молодой и самой старой группами (U-критерий Манна-Уитни, $p<0.0001$) составляет 7%. Монотонное снижение согласованности изучаемых процессов с увеличением возраста. Для показателя $C_{\max}$ наиболее выраженное снижение наблюдается в двух старших возрастных группах. Это указывает на ускорение возрастных изменений после 50 лет.

Известно, что дыхание существенно влияет на динамику частоты сердечных сокращений. Парасимпатические волокна иннервируют гладкую мускулатуру дыхательных путей, обеспечивая доминирующий контроль над тонусом гладкой мускулатуры и, следовательно, над диаметром дыхательных путей, а также над железами и микроциркуляцией в дыхательных путях. В этом случае петли обратной связи от рецепторов растяжения лёгких и артериальных барорецепторов воздействуют через ядро NTS на комплекс Бётцингера, расположенный в понтомедуллярной области моста, который обеспечивает регуляцию кардио-вагального парасимпатического оттока с помощью генератора дыхательного ритма. Такая сложная кольцевая динамическая система обеспечивает гибкую регуляцию процесса дыхания у здоровых людей. Её активность проявляется в высокочастотном диапазоне последовательности RR-интервалов при частоте дыхания. Соответственно, модуляция активности нервных волокон парасимпатического отдела вегетативной нервной системы, вызванная физиологическими процессами в организме и возрастными

патологическими изменениями, отражается в изменении когерентности дыхательного сигнала и колебаний в высокочастотном диапазоне последовательности RR-интервалов.

Полученные результаты в целом согласуются с известными наблюдениями и предоставляют полезные дополнительные инструменты для оценки характеристик сердечно-дыхательного взаимодействия у испытуемых в различных физиологических состояниях. Изученные нами показатели когерентности могут служить дополнительной информацией для классификации стадий сна в физиологических исследованиях без регистрации электроэнцефалограммы, что считается перспективным направлением. Кроме того, продемонстрированная чувствительность использованных в этой работе показателей когерентности к возрастным изменениям показывает их перспективность для решения задач неинвазивной экспресс диагностики респираторных патологий и неврологических патологий, затрагивающих вегетативную нервную систему.

Заключение. В ходе проведенного исследования было проведено изучение степени когерентности процессов дыхания и парасимпатической регуляции ритма сердца в диапазоне 0.15-0.50 Гц в состоянии бодрствования и различных стадиях сна, а также в зависимости от возраста испытуемых.

Для решения поставленных задач была проведена комплексная оценка когерентности процессов дыхания и частоты сердечных сокращений у здоровых испытуемых различных возрастных групп. Результаты показали, что когерентность этих процессов варьируется в зависимости от стадии сна и возраста, что подтверждает значимость возрастных изменений в системе автономного контроля кровообращения. Анализ показал монотонное снижение когерентности этих процессов с увеличением возраста, что объясняется возрастными разрушительными изменениями в системе автономного контроля кровообращения.

Сравнительный анализ значений когерентности и в диапазоне HF выявил различия между возрастными группами и стадиями сна, что указывает на необходимость учета этих факторов при оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

Оценка статистической значимости различий между реальными и суррогатными данными с использованием тестов Краскала-Уоллиса и U-теста Манна-Уитни подтвердила надежность полученных результатов и их значимость для дальнейших исследований в данной области.

Изучение скоординированного поведения систем человеческого организма предоставляет полезную информацию о функционировании организма в целом. Эти результаты подчеркивают важность дальнейшего изучения взаимодействия дыхательных и сердечно-сосудистых процессов для понимания их роли в поддержании здоровья и диагностики заболеваний.


Агеева А.В.
20.06.2025