

**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 биологической обратной связи в контуре регуляции ритма**  
**сердца**

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

Чепурнова Юлия Олеговна

фамилия, имя, отчество

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

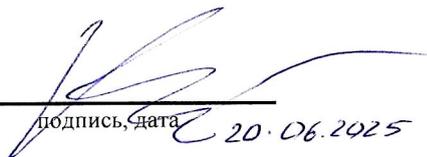


подпись, дата  
20.06.2025

*«Отлично»*

Е.И. Боровкова

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



подпись, дата  
20.06.2025

А.С. Караваев

Саратов 2025

**Введение.** Медленное дыхание является центральным компонентом биологической обратной связи variability сердечного ритма. Было выявлено, что медленное дыхание на резонансной частоте человека оказывает терапевтическое значение и может быть полезно для пациентов с высоким артериальным давлением, бессонницей и тревогой и может применяться в качестве профилактики стресса и повышения работоспособности [1].

Актуальность работы заключается в том, что в настоящее время открытым является вопрос о стабильности резонансной частоты при повторных экспериментах. До сих пор неизвестно, достаточно ли двухминутных записей для оценки резонансной частоты и достоверно ли оно по сравнению с пятиминутными записями. Также существует вопрос, способно ли ритмичное напряжение скелетных мышц рук и ног заменить медленное дыхание при оценке резонансной частоты.

Целью работы является исследование воздействия биологической обратной связи на функциональные показатели организма.

Основными задачами являются:

- 1) проведение обзора методов организации биологической обратной связи с контуром автономной регуляции кровообращения с частотой около 0.1 Гц;
- 2) проведение эксперимента, в котором будет организована биологическая обратная связь, реализуемая посредством стимулированного глубокого дыхания на частоте барорефлекторного резонанса данного испытуемого, управляемого ритмичного сокращения скелетных мышц с заданной частотой;
- 3) исследование воздействия биологической обратной связи, реализуемой посредством контролируемого медленного дыхания и ритмичного напряжения скелетной мускулатуры на физиологические параметры организма, такие как variability сердечного ритма (BCR), синхронизация механизмов автономной регуляции кровообращения и синхронизация дыхания и процессов парасимпатической регуляции.

Научная новизна заключается в разработке подхода оценки частоты резонанса барорефлекса, анализ возможности замещения тестов с глубоким дыханием на тесты с ритмичным сокращением скелетной мускулатуры с заданной частотой.

Структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников.

Глава 1 «Биологическая обратная связь» содержит описание сердечно-сосудистой системы, вариабельности сердечного ритма, описание барорецепторного рефлекса и стандартный протокол оценки резонансной частоты.

Глава 2 «Эксперимент» содержит дизайн эксперимента и экспериментальные данные.

Глава 3 «Методы» содержит описание методов, которые применялись в работе.

Глава 4 «Анализ вариабельности ритма сердца» содержит полученные результаты.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

**Основное содержание работы.** Первая глава «Биологическая обратная связь». ВСР представляет собой колебания временных интервалов между последовательными сердечными сокращениями, которые называются RR-интервалами [2]. У здоровых людей ВСР довольно высокая, однако снижение показателей ВСР говорит о нарушениях сердечно-сосудистой системы [3]. Биологическая обратная связь по ВСР широко используется для лечения целого ряда расстройств, например, астмы, депрессии, проблем со сном.

Медленное дыхание со скоростью 6 вдохов в минуту приводит к значительному увеличению синхронизации сердечно-дыхательной системы [4].

Такие интегрированные системы как вегетативная, сердечно-сосудистая, центральная нервная, эндокринная и дыхательная используют обратную связь от барорецепторов (рецепторов, которые определяют изменения артериального

давления) и хеморецепторов (рецепторов, которые контролируют химические вещества, такие как газы крови [5]). Такое явление называется барорецепторный рефлекс. Барорефлекс играет ключевую роль в понимании биологической обратной связи по ВСП и представляет собой механизм регуляции артериального давления, который активируется при стимуляции барорецепторов. Эти рецепторы расположены в стенках крупных артерий большого круга кровообращения [6]. Они чувствительны к изменению давления внутри артерий и передают информацию об изменениях в мозг. Далее, эти сигналы обрабатываются мозгом и отправляются обратно к сердцу через блуждающий нерв, чтобы замедлить скорость его сокращения.

Модель резонансной частоты предсказывает, что мы можем лучше всего стимулировать барорефлекс на уникальной для каждого человека резонансной частоте. Эта модель также предполагает, что дыхание и ритмичное напряжение скелетных мышц рук и ног на резонансной частоте (около 0.1 Гц) могут увеличить ВСП [2]. Внешняя стимуляция, такая как медленное дыхание или ритмичное напряжение скелетных мышц рук и ног вблизи точной резонансной частоты человека [7], вызывает наибольшее увеличение ВСП и увеличивает усиление барорефлекса.

Оценка резонансной частоты определяет уникальную частоту дыхания [8], которая наилучшим образом стимулирует барорефлекс. В таблице 1 указаны частоты дыхания, которые колеблются от 4.5 до 7.5 вдохов в минуту для взрослых и соответствующие им пиковые частоты.

Таблица 1 - Частота дыхания и соответствующие пиковые частоты

<b>Частота дыхания, вд./мин</b>	<b>Частота, Гц</b>
4.5	0.075
5.0	0.08
5.5	0.09
6.0	0.10
6.5	0.11
7.0	0.12
7.5	0.13

Вторая глава «Эксперимент». Для 7 здоровых добровольцев ( $21 \pm 2$  года) со средним уровнем физической активности и без выявленных патологий сердечно-сосудистой системы, был проведен эксперимент для оценки резонансной частоты и оценки характеристик дыхательных сигналов и системы кровообращения у здоровых испытуемых в ходе экспериментов с биологической обратной связью, реализуемой посредством: стимулированного глубокого дыхания на частоте барорефлекторного резонанса данного испытуемого и управляемого ритмичного сокращения скелетных мышц рук и ног с заданной частотой.

Эксперимент состоял из пяти серий, с недельным интервалом между сериями. Первые четыре серии имели одинаковый экспериментальный дизайн. Добровольцев просили глубоко дышать с определённым режимом, который соответствовал частоте дыхания около 0.1 Гц. Участники дышали в течение пяти минут с фиксированной частотой, которая постепенно изменялась от 4.5 до 7.5 вдохов/мин (от 0.075 Гц до 0.13 Гц) с шагом 0.5 вдохов/мин. Каждый этап глубокого дыхания чередовался с пятиминутными интервалами отдыха, в течение которых участники дышали в комфортном для них ритме (около 0.25 Гц). Стимулом ко вдоху и выдоху испытуемого был звуковой сигнал, издаваемый специальной программой для компьютера. В последнем пятом эксперименте человек под специальный звуковой сигнал, исходящий от компьютера, ритмично сокращал скелетные мышцы рук и ног с частотой от 0.075 Гц до 0.13 Гц с шагом 0.5 Гц. Во время всех экспериментов с медленным дыханием и сокращением мышц рук и ног проводилась регистрация сигналов электрокардиограммы (ЭКГ), дыхания и фотоплетизмограммы (ФПГ).

Третья глава «Методы». Стандартное отклонение RR-интервалов (SDRR) — это один из базовых линейных показателей variability сердечного ритма (BCR). Оно отражает, насколько сильно общее отклонение длительности RR-интервалов от их среднего значения. RR-интервалы представляют собой временные промежутки между последовательными пиками R на ЭКГ, то есть между ударами сердца [9]. SDRR используется для оценки общей

вариабельности сердечного ритма за заданный период времени, что важно для диагностики состояния нервной системы и сердца.

Критерий  $\chi^2$  — это статистический метод, используемый для оценки степени соответствия между двумя распределениями. Критерий  $\chi^2$  позволяет статистически формализовать сравнение RRi-сигналов, что делает его полезным инструментом в научной работе по анализу состояния вегетативной нервной системы и её реакций на экспериментальные воздействия [10].

Фазовая синхронизация — это метод, используемый для оценки согласованности колебаний между двумя сигналами на уровне их фаз.

В анализе биосигналов, таких как RR-интервалы, ФПГ и дыхание, фазовая синхронизация позволяет выявить, как ритмы в разных физиологических системах (сердечно-сосудистой, дыхательной, вегетативной) соотносятся друг с другом во времени.

Total Power (TP) — это показатель, который отражает общую мощность спектра BCP в заданном частотном диапазоне. TP рассчитывается как сумма мощностей в диапазонах HF, LF и VLF [5], где VLF, LF и HF — диапазоны сердечного ритма.

Четвертая глава «Анализ вариабельности ритма сердца». Из ЭКГ добровольцев в каждом эксперименте был выделен сигнал RR-интервалов (RRi). Для сигналов RRi во всех этапах эксперимента был посчитан спектр мощности. Затем экспериментальные данные RRi, дыхания и ФПГ анализировались отдельно для каждого этапа эксперимента. Далее для каждого RRi рассчитывались линейные показатели BCP, такие как стандартное отклонение RRi (SDRR), мощность в диапазонах низких (LF) и высоких частот (HF), суммарная мощность в LF- и HF-диапазонах (TP), а также критерий  $\chi^2$  между одномерными функциями распределения вероятностей RRi [11]. Для оценки того, как взаимодействуют системы регуляции между HF-колебаниями RRi и дыханием был вычислен коэффициент specific phase coherence (SPC) [12], а для LF-колебаний RRi и ФПГ определялся суммарный процент фазовой синхронизации (S) [12]. Для определения статистической значимости

межгрупповых различий применялись U-тест Манна–Уитни [13] и тест Краскела–Уоллиса [14]. Значение  $p$  считалось статистически значимым при  $p < 0.05$ .

Были получены результаты, показывающие, что получились более статистически значимые значения характеристик во время этапов стимулированного медленного дыхания на частоте, соответствующей резонансной частоте барорефлекса каждого испытуемого, чем значения, полученные при дыхании на комфортной частоте каждого добровольца и ритмичном сокращении мышц рук и ног. Значимость всех индексов во время глубокого дыхания по тесту Краскела–Уоллиса составляет  $p < 0.05$  [10] для всех индексов и по U-тесту Манна-Уитни составляет  $p < 0.05$  для всех индексов [11]. Полученные результаты указывают на чувствительность индексов к физиологическим изменениям, которая обусловлена биологической обратной связью, выполняемой при помощи глубокого медленного дыхания на резонансной частоте барорефлекса.

Для всех испытуемых не удалось выделить одну единственную частоту, которая бы демонстрировала значимое отличие от остальных частот. Можно выделить только несколько частоты, которые демонстрируют отличную оценку. В таблице 2 указаны результаты оценки этапов экспериментов для всех испытуемых, которые демонстрируют статистически значимое ( $p < 0.05$ ) различие оценок линейных и нелинейных характеристик в серии повторных экспериментов.

Таблица 2 - Полученные результаты резонансных частот каждого добровольца, которые демонстрируют статистически значимое ( $p < 0.05$ ) межгрупповое различие оценок линейных и нелинейных характеристик в серии повторных экспериментов организации барорефлекторного резонанса, реализуемого посредством глубокого дыхания

Доброволец	Частоты, Гц
#1	0.075, 0.08, 0.09, 0.1, 0.11
#2	0.11
#3	0.08
#4	0.08, 0.09
#5	0.09, 0.1, 0.11
#6	0.075
#7	0.075, 0.08, 0.09

Данные результаты свидетельствуют о том, что резонансная частота определенного человека не является стабильной величиной и может варьироваться в пределах низкочастотного диапазона от эксперимента к эксперименту, что, по всей видимости, связано с нестационарной природой исследуемых биологических систем.

**Заключение.** В ходе данной работы был проведен обзор методов организации биологической обратной связи с контуром автономной регуляции кровообращений с частотой около 0.1 Гц, проведен эксперимент, в котором была организована биологическая обратная связь, реализуемая посредством стимулированного глубокого дыхания на частоте барорефлекторного резонанса данного испытуемого, управляемого ритмичного сокращения скелетных мышц с заданной частотой, исследовалось воздействие биологической обратной связи, реализуемой посредством контролируемого медленного дыхания и ритмичного напряжения скелетной мускулатуры на физиологические параметры организма, такие как вариабельность сердечного ритма (ВСР), синхронизация механизмов автономной регуляции кровообращения и синхронизация дыхания и процессов парасимпатической регуляции

Был выявлен резонансный ответ со стороны контуров симпатической и парасимпатической регуляции сердечного ритма на стимулирующий сигнал медленного дыхания с разной частотой.

Было получено, что медленное дыхание на резонансных частотах имело более высокие статистически значимые результаты в сравнении с ритмичным сокращением скелетных мышц рук и ног и комфортным дыханием. Данная значимость была подтверждена тестом Краскела – Уоллеса и U-тестом Манна-Уитни ( $p < 0.05$  для всех индексов).

Было показано, что ритмичное сокращение мышц рук и ног на резонансных частотах около 0.1 Гц может также стимулировать барорефлекс, однако глубокое дыхание показывает наиболее выраженную эффективность по сравнению с сокращением мышц. Это показывает о невозможности полностью заменить медленное дыхание на частоте барорефлекторного резонанса около 0.1 Гц на ритмичное сокращение мышц рук и ног.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sevoz-Couche C., Laborde S. Heart rate variability and slow-paced breathing: when coherence meets resonance. // *Neurosci Biobehav Rev.* – 2022. - №135. – С. 26–83.
2. Vaschillo, E. G., Vaschillo, B., and Lehrer, P. M. Characteristics of resonance in heart rate variability stimulated by biofeedback // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* – 2006. - №31. - С.129–142.
3. Shaffer F., Zachary M. M. A Practical Guide to Resonance Frequency Assessment for Heart Rate Variability Biofeedback // *Front. Neurosci.* – 2020. - №2. - С. 1350–1430.
4. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // *Circulation.* – 1996. – №93. – С. 1043–1065.
5. Vaschillo, E., Lehrer, P., Rische, N., and Konstantinov, M. Heart rate variability biofeedback as a method for assessing baroreflex function: a preliminary study of resonance in the cardiovascular system // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* - 2002. - №27. - С. 1-27.
6. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В., Гаврилушкин А. П., Довгалевский П. Я., Кукушкин Ю. А., Миронова Т. Ф., Прилуцкий Д. А., Семенов Ю. Н., Федоров В. Ф., Флейшман А. Н., Медведев М. М. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // *Вестник аритмологии.* - 2001. - № 24.
7. Chattopadhyay S. The Importance of Time-Domain HRV Analysis in Cardiac Health Prediction // *Series of Cardiology Research.* – 2022. - №4. – С. 19–23.
8. Karavaev AS, Prokhorov MD, Ponomarenko VI, Kiselev AR, Gridnev VI, Ru-ban EI, Bezruchko BP. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // *Chaos.* - №19. - 2009.

9. Schafer, A., Vagedes, J. How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability? A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram // Int. J. Cardiol. – 2013. - №166. - C. 15–29.

10. Morelli A, Kraemer J. Phase synchronization between breathing and PPG signals in sleep events recordings of adult subjects. // Eighth National Congress of Bioengineering – 2023. - № 9. - C. 10-14.

11. Saini R. Heart Rate Variability Investigation of ECG Signal By Means of Windows and Wavelet Transform // 1st International Conference on Innovations in High Speed Communication and Signal Processing (IHCSPP). – 2023. - № 5. - C. 168-172.

12. Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Kiselev A. R., Prokhorov M. D., Penzel T. Decrease of coherence between the respiration and parasympathetic control of the heart rate with aging // Chaos. - 2021. - №31.

13. Mann H. B., Whitney D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // Ann. Math. Stat. - 1947. №18. - C. 50–60.

14. Kruskal W. H., Wallis W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis // J AmStatAssoc. - 1952. - №47. - C. 583–621.

20.06.2025

ay  
Сонька -

Ченцова 100