

## ВЛИЯНИЕ МЕНТАЛЬНОГО СТРЕССА НА КОГЕРЕНТНОСТЬ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И КАРДИОРЕСПИРАТОРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Дмитрий Алексеевич Дмитриев<sup>1</sup>, Ольга Сергеевна Индейкина<sup>2</sup>, Леонид Николаевич Воронов<sup>3</sup>, Игорь Анатольевич Сушков<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup> Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева, Чебоксары, Россия

<sup>3</sup> Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

<sup>1</sup> rothman68@mail.ru, ORCID: ID: 0000-0002-8102-7074

<sup>2</sup> indeykinaolga@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8996-9429

<sup>3</sup> lvoronov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0504-4216

<sup>4</sup> sushkov28@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7888-5755

© Дмитриев Д.А., Индейкина О.С., Воронов, Л.Н., Сушков И.А., НПЦ "ПСН", 2025

**Аннотация.** Когерентность сердечного ритма и респираторная синусовая аритмия являются взаимосвязанными физиологическими феноменами, высокий уровень которых ассоциируется со здоровьем, состоянием психологического благополучия и высокой когнитивной продуктивностью. Целью нашего исследования является оценка влияния ментального стресса на респираторную синусовую аритмию и когерентность. Двадцать три студента университета обследованы во время покоя и при выполнении арифметических вычислений в уме (пятиминутная запись электрокардиограммы (ЭКГ), определение дыхательного паттерна на основе ЭКГ. На основе полученных сигналов определяли коэффициент когерентности сердечного ритма (HRCR), пиковую частоту когерентности ритма сердца (Fpeak\_RR), респираторную синусовую аритмию (PCA), пиковую частоту дыхания (Fpeak\_Resp), среднюю частоту дыхания (Fmean\_Resp), частоту сердечных сокращений (ЧСС). Ментальный арифметический стресс вызвал существенное повышение ЧСС и снижение PCA, что свидетельствует о повышении относительного тонуса симпатической нервной системы и снижении влияния дыхания на динамику ритма сердца. Нами не было выявлено статистически значимых изменений параметров дыхания при ментальной арифметике по сравнению с покой, что может быть связано с отсутствием вербализации результатов вычисления испытуемыми. Ментальная арифметика не сопровождалась существенными изменениями Fpeak\_RR. Исследование реакции системы регуляции ритма сердца не ментальную арифметическую нагрузку показало существенное снижение индекса когерентности сердечного ритма HRCR. Таким образом, значительная ментальная нагрузка в форме ментальной арифметики сопровождается когнитивной перегрузкой и стрессом, вследствие чего происходит активация симпатической нервной системы и подавление активности парасимпатического отдела ВНС. Наше исследование показало, что выполнение заданий ментальной арифметики вызывает снижение синхронизации сердечного ритма, что свидетельствует о значительной перестройке взаимодействия между осцилляторами системы регуляции ритма сердца.

**Ключевые слова:** ментальный стресс, вариабельность сердечного ритма, дыхательная синусовая аритмия, когерентность.

## INFLUENCE OF MENTAL STRESS ON HEART RATE COHERENCE AND CARDIORESPIRATORY INTERACTION

Dmitry A. Dimitriev<sup>1</sup>, Olga Sergeevna Indeikina<sup>2</sup>, Leonid Nikolaevich Voronov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University, Cheboksary, Russia

<sup>3</sup> Chuvash State University named after I.N. Ulyanova, Cheboksary, Russia

<sup>1</sup> rothman68@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8102-7074

<sup>2</sup> indeykinaolga@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8996-9429

<sup>3</sup> lvoronov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0504-4216

**Abstract.** Heart rate coherence and respiratory sinus arrhythmia are interrelated

physiological phenomena, high levels of which are associated with health, psychological well-being, and high cognitive performance. The aim of our study was to evaluate the impact of mental stress on respiratory sinus arrhythmia and heart rate coherence. Twenty-three university students were examined at rest and while performing mental arithmetic calculations (a five-minute electrocardiogram (ECG) recording and ECG-based respiratory pattern determination. The obtained signals were used to determine the heart rate coherence coefficient (HRCR), peak heart rate coherence frequency (Fpeak\_RR), respiratory sinus arrhythmia (RSA), peak respiratory rate (Fpeak\_Resp), average respiratory rate (Fmean\_Resp), and heart rate (HR). Mental arithmetic stress caused a significant increase in HR and a decrease in RSA, indicating an increase in the relative tone of the sympathetic nervous system and a decrease in the influence of respiration on heart rate dynamics. We did not find statistically significant changes in respiratory parameters during mental arithmetic compared to rest, which may be due to the lack of verbalization of the calculation results by the subjects. Mental arithmetic was not accompanied by significant changes in Fpeak\_RR. A study of the heart rhythm regulation system's response to mental arithmetic tasks revealed a significant decrease in the heart rhythm coherence index (HRCR). Thus, significant mental load in the form of mental arithmetic is accompanied by cognitive overload and stress, resulting in activation of the sympathetic nervous system and suppression of the parasympathetic division of the autonomic nervous system. Our study demonstrated that performing mental arithmetic tasks causes a decrease in heart rhythm synchronization, indicating a significant restructuring of the interactions between the oscillators of the heart rhythm regulation system.

**Keywords:** mental stress, heart rate variability, respiratory sinus arrhythmia, coherence.

**Введение.** Первое наблюдение взаимодействия между системой внешнего дыхания и сердечно-сосудистой системой было сделано Stephen Hales в XVII веке: было установлено, что дыхательный цикл сопровождается существенным колебанием уровня артериального давления, что влияет на функцию сердечно-сосудистой системы [19]. Несколько десятилетиями позже André Cournand провел исследования давления в сердце и тока крови, которые заложили основы для понимания механизмов этого феномена в современной физиологии [16].

Кардиореспираторная динамика обусловлена взаимодействием между дыхательной системой, симпатическими и парасимпатическими механизмами регуляции деятельности сердца, которое можно обнаружить на различных уровнях структурно-функциональной организации нервной системы, и она играет значимую роль в поддержании гомеостаза [10]. Это динамическое кардиореспираторное взаимодействие может иметь большой диагностический потенциал для оценки функциональных состояний [10], но его значение для функционирования головного мозга все еще остается недостаточно изученным.

Координация между дыханием и функциональными параметрами сердечно-сосудистой системы происходит, прежде всего, на уровне ствола мозга, в котором локализованы нейроны, регулирующие процессы вдоха и выдоха: эти нейроны оказывают существенное влияние на функционирование симпатической и парасимпатической нервной системы, что позволяет им осуществлять тонкую настройку активности отделов вегетативной нервной системы [25]. Дыхательная и сердечно-сосудистая системы работают согласованно, что позволяет синхронизировать дыхание с транспортом кислорода к тканям и, тем самым, изменяя сердечный выброс и региональный кровоток таким образом, чтобы они показатели соответствовали метаболическим запросам мозга [8].

Нарушения кардиореспираторного взаимодействия может быть следствием нейродегенеративных заболеваний или вегетативной дисфункции и, в свою очередь, влиять на когнитивные функции и состояние общего психического благополучия [7; 20]. Исследования кардиореспираторного фитнесса показали его критически важное значение для поддержания здоровья мозга, что обусловлено влиянием кардиореспираторного взаимодействия на базовые физиологические процессы в мозге, включая обмен газами с

кровью, транспорт энергии и питательных веществ и очистку мозга от продуктов метаболизма и распада клеток (клиренс) [24].

Дыхательная и сердечно-сосудистые системы взаимодействуют друг с другом посредством процесса, который можно обозначить как кардиореспираторное сопряжение (cardiorespiratory coupling), который регулируется вегетативной нервной системой. Это сопряжение можно наблюдать при проведении таких физиологических тестов, как фотоплетизмография (ФПГ) и электрокардиография (ЭКГ), где паттерны дыхания можно выявить при анализе ритма сердца [22]. При выдохе повышается венозный возврат, что вызывает растяжение правого предсердия и активацию локализованных в его стенке стреч-рецепторов; это вызывает повышение частоты сердечных сокращений посредством повышения активности симпатических центров продолговатого мозга – рефлекс Бэйнбрижда [6]. Таким образом, ВНС согласует ритм сердца с дыхательным паттерном.

Согласно теории, разработанной McCraty и соавторами [11], функциональные связи и согласованность между висцеральными системами и головным мозгом представляют собой основу для поддержания нормального функционирования организма в условиях стресса. Для описания этих связей автор использовал термин «когерентность». Теория физиологической когерентности основывается на общей теории динамических систем и постулирует важность здоровой вариабельности физиологических сигналов, обратной связи, ингибиции и реципрокного взаимодействия в иерархии функциональных систем. Термин «когерентность» используется для описания и измерения порядка работы системы, стабильность и гармонию в осцилляции сигналов регуляторных систем во времени; когерентность повышается и снижается по мере повышения и снижения эффективности адаптационных процессов. Одним из проявлений когерентности является согласованность дыхательного паттерна и сердечного ритма [11].

Ментальный стресс представляет собой эмоциональное и когнитивное состояние напряжения, которое возникает вследствие того, что предъявляемые человеку требования превосходят его когнитивные и физиологические ресурсы; частым проявлением ментального стресса, особенно хронического, являются тревога/тревожность или дистресс. В исследованиях чаще всего изучают лабораторный стресс, индуцированный разнообразными заданиями повышенной сложности, зачастую в комбинации с мотивацией [18]. Данные о влиянии ментального стресса на кардиореспираторную когерентность носят противоречивый характер [12; 14].

Целью нашего исследования является оценка влияния ментального стресса на респираторную синусовую аритмию и когерентность.

**Материалы и методы исследования.** В исследовании приняли участие 23 студента Чувашского государственного педагогического университета имени И. Я. Яковлева (средний возраст  $21,14 \pm 1,5$  лет, 16 мужчин). Все обследуемые были здоровы, не курили, не принимали кофеин в день обследования. Для создания ментального стресса нами был разработан скрипт для Excel, который создает в случайном порядке последовательность чисел с возрастающей сложностью для суммации. Более подробно процедура описана в статье [1].

Запись ЭКГ осуществлялась дважды – в состоянии покоя и во время выполнения задания. Анализ сигнала проводился с помощью программы CVRanalysis [15]. На первом этапе ЭКГ подвергалась предварительной обработке с целью детекции и коррекции артефактов, дрейфа базовой линии, низкочастотного и высокочастотного шума с применением соответствующих фильтров. Определение зубцов R ЭКГ проводилось с использованием метода, основанного на алгоритме Chen и соавторов [4; 17]. Полученные таким образом интервалы RR были проанализированы на наличие артефактов с последующей их коррекцией.

Определение дыхательного паттерна проводилось с использованием алгоритма EDR для оценки паттерна дыхания, который доказал свою точность и эффективность как в клинике, так и при проведении физиологических исследований [23]. Анализ респираторной синусовой аритмии и когерентности осуществлялся с применением спектрального анализа, в

ходе которого вычислялись следующие показатели: 1) коэффициент когерентности сердечного ритма (heart rhythm coherence ratio HRCR= (Пиковая мощность/(Общая мощность – пиковая мощность))<sup>2</sup>); 2) пиковая частота когерентности ритма сердца (Fpeak\_RR, Гц) – пиковая частота в диапазоне 0,04-0,26 Гц; 3) респираторная синусовая аритмия (PCA) в частотном диапазоне 0,15-0,4 Гц, 4) ЧСС (уд/мин); 4) пиковая частота дыхания Fpeak\_Resp (Гц и дых/мин); 5) средняя частота дыхания Fmean\_Resp (Гц и дых/мин).

**Статистическая обработка.** Поскольку не все меры ВСР и дыхания имели нормальное распределение, то для проведения сравнительного анализа в покое и при выполнении вычислений в уме нами был использован критерий Уилкоксона для связанных выборок (уровень значимости  $p < 0,05$ ).

**Результаты и их обсуждение.** Пример изменения спектра интервалов RR и спектра дыхания приведены на рисунке 1.

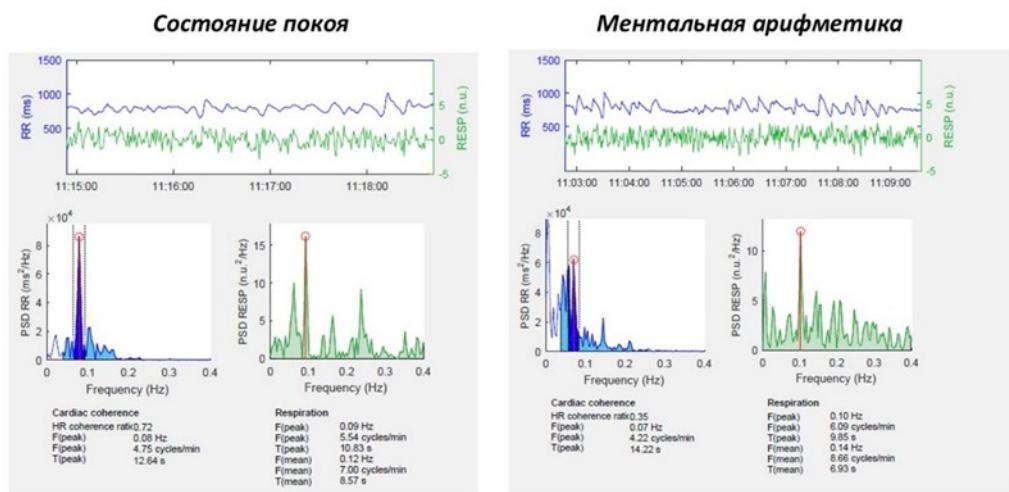


Рис. 1. Примеры ритмограмм, записей дыхательных движений, PSD (спектральная плотность мощности) сигналов и результатов вычисления спектральных показателей для одного испытуемого в покое и при вычислении в уме

На рисунке 1 показаны значения HRCR одного участника для каждой стадии эксперимента. Каждое значение HRCRmax представлено соответствующим паттерном сердечного ритма и спектральной плотностью мощности (PSD). Более высокие значения HRCR наблюдались в состоянии покоя, чем при выполнении вычислений в уме, но значение пиковой частоты практически не изменилось – в обе стадии эксперимента она была приблизительно равна 0,1, что согласуется с представлениями о механизмах когерентности. Сравнительный анализ графиков спектральной плотности дыхания демонстрирует практически полную идентичность паттернов дыхания в состоянии покоя и при выполнении заданий по ментальной арифметике. В то же время спектр колебаний продолжительности кардиоинтервалов достаточно сильно меняется при переходе от покоя к ментальной арифметике (табл. 1).

Таблица 1  
Сравнение показателей вариабельности сердечного ритма и дыхания в покое и при выполнении заданий по ментальной арифметике (МА)

Показатель	Покой	МА	Р
ЧСС (уд/мин)	$70,22 \pm 2,00$	$74,17 \pm 1,96$	0,000162
PCA (мс <sup>2</sup> )	$1206,83 \pm 207,82$	$790,97 \pm 164,68$	0,000419
HRCR	$0,32 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,03$	0,001920
F_peak_RR (Гц)	$0,12 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,01$	0,210835

F_peak_RESP (Гц)	0,21±0,02	0,22±0,02	0,761014
F_peak_RESP (дых/мин)	12,61±0,99	13,30±1,12	0,761014
F_mean_RESP (Гц)	0,15±0,01	0,15±0,01	0,903169
F_mean_RESP (дых/мин)	9,20±0,35	9,16±0,42	0,903169

Сопоставление состояний покоя и ментальной арифметики и тестирование достоверности различий с использованием критерия Уилкоксона выявило значимое увеличение ЧСС при выполнении вычислений в уме (табл. 1). Среднее и пиковое значение частоты дыхания также изменилось существенно, как и спектральные показатели, характеризующие дыхательный паттерн. Для ментальной арифметики было характерно снижение РСА, которое нельзя объяснить изменениями в дыхательном паттерне.

Исследование реакции системы регуляции ритма сердца на ментальную арифметическую нагрузку показало существенное снижение индекса когерентности сердечного ритма HRCR.

Интенсивная ментальная нагрузка в форме ментальной арифметики создает когнитивную перегрузку и стресс, который интерпретируется регуляторными системами организма как физический стресс, вследствие чего происходит активация симпатической нервной системы и подавление активности парасимпатического отдела ВНС [5]. Наблюдаемое нами повышение ЧСС соответствует этому теоретическому положению и может рассматриваться как проявление повышенного адренергического влияния на водителя ритма, которое было выявлено в ряде работ, посвященных ментальному стрессу [3].

Снижение респираторной синусовой аритмии (РСА) представляет собой важный показатель активности парасимпатической нервной системы, которое свидетельствует о повышении риска кардиоваскулярных нарушений и снижении адаптационных возможностей организма [13]. Арифметическая ментальная нагрузка вызвала существенное снижение РСА, что, в том числе указывает на уменьшение выраженности кардиореспираторного взаимодействия [2]. Снижение РСА вследствие ментального стресса было выявлено и в других исследованиях ВСР при когнитивной перегрузке [5].

В нашем исследовании не обнаружено существенных изменений частоты дыхания при выполнении арифметических вычислений в уме; противоречие с результатами других исследований ментального стресса объясняется тем, что в нашем исследовании полностью отсутствует вербализация результатов вычисления участником исследования [9].

Наше исследование показало, что выполнение заданий ментальной арифметики сопровождается снижением синхронизации сердечного ритма, что согласуется с данными Mejía-Mejía [12] о снижении уровня синхронизации при ментальном стрессе, что указывает на значительные перестройку взаимодействия между осцилляторами, осуществляющими регуляцию ритма сердца [11].

**Заключение.** Проведенное нами исследование показало, что ментальная нагрузка, вызванная проведением вычисления в уме, сопровождается значительными изменениями в работе механизмов регуляции сердечного ритма, обеспечивающих синхронизацию как внутри этой регуляторной системы, так и ритмом сердца и паттерном дыхания. Мы не выявили существенного изменения дыхательного ритма, что может быть связано с отсутствием вербализации результатов вычислений.

### Список источников (References)

1. Димитриев Д.А., Галигрова С.Р., Салимов Э.Р. Сравнительный анализ спектральных характеристик вариабельности сердечного ритма и электрической активности кожи при ментальном арифметическом стрессе и жевании // Вестник психофизиологии. 2024. № 2. С. 53-59. – DOI 10.34985/NPCPCN.2024.15.67.007 [Dimitriev D.A., Galigrova S.R., Salimov E.R. Comparative analysis of spectral characteristics of heart rate variability and electrical activity of the skin during mental arithmetic stress and chewing // Bulletin of Psychophysiology. 2024. No. 2. pp. 53-59. – DOI 10.34985/NPCPCN.2024.15.67.007].

2. Клименко В.М. и др. Респираторная синусовая аритмия как объективный критерий для изучения и оптимизации параметров речевого дыхания // Физиология человека. 2007. Т. 33. №. 4. С. 67-76 [Klimenko V.M. et al. Respiratory sinus arrhythmia as an objective criterion for studying and optimizing speech breathing parameters // Human Physiology. 2007. Vol. 33. No. 4. P. 67-76].
3. Castaldo R. et al. Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: A systematic review with meta-analysis // Biomedical Signal Processing and Control. 2015. Т. 18. С. 370-377.
4. Chen S. W., Chen H. C., Chan H. L. A real-time QRS detection method based on moving-averaging incorporating with wavelet denoising // Computer methods and programs in biomedicine. 2006. Т. 82. №. 3. С. 187-195.
5. Chen Y. et al. Short-term HRV in young adults for momentary assessment of acute mental stress // Biomedical Signal Processing and Control. 2020. Т. 57. С. 101746.
6. Crystal G. J., Salem M. R. The Bainbridge and the “reverse” Bainbridge reflexes: history, physiology, and clinical relevance // Anesthesia & Analgesia. 2012. Т. 114. №. 3. С. 520-532.
7. de Abreu R. M. et al. Cardiorespiratory coupling strength in athletes and non-athletes // Respiratory Physiology & Neurobiology. 2022. Т. 305. С. 103943.
8. Fisher J. P., Zera T., Paton J. F. R. Respiratory-cardiovascular interactions // Handbook of clinical neurology. 2022. Т. 188. С. 279-308.
9. Grassmann M. et al. Respiratory changes in response to cognitive load: A systematic review // Neural plasticity. 2016. Т. 2016. №. 1. С. 8146809.
10. Javorka M. et al. Respiratory sinus arrhythmia mechanisms in young obese subjects // Frontiers in neuroscience. 2020. Т. 14. С. 204.
11. McCraty R. et al. The coherent heart heart-brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order // Integral Review: A Transdisciplinary & Transcultural Journal for New Thought, Research, & Praxis. 2009. Т. 5. №. 2. Р. 10-115.
12. Mejía-Mejía E., Torres R., Restrepo D. Physiological coherence in healthy volunteers during laboratory-induced stress and controlled breathing // Psychophysiology. 2018. Т. 55. №. 6. С. e13046.
13. Menuet C. et al. Redefining respiratory sinus arrhythmia as respiratory heart rate variability: an international Expert Recommendation for terminological clarity // Nature Reviews Cardiology. 2025. С. 1-7.
14. Niizeki K., Saitoh T. Incoherent oscillations of respiratory sinus arrhythmia during acute mental stress in humans // American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology. 2012. Т. 302. №. 1. С. H359-H367.
15. Pichot V. et al. CVRanalysis: a free software for analyzing cardiac, vascular and respiratory interactions // Frontiers in Physiology. 2024. Т. 14. С. 1224440.
16. Pinsky M. R. Cardiopulmonary interactions: physiologic basis and clinical applications // Annals of the American Thoracic Society. 2018. Т. 15. С. 1. С. S45-S48.
17. Roche F., Charier D., Pichot V. Heart rate deceleration capacity as a marker of perioperative risk: identifying relevant patient phenotypes and surgical procedures // British Journal of Anaesthesia. 2024. Т. 133. №. 4. С. 734-737.
18. Salomon K. Mental stress // Encyclopedia of Behavioral Medicine. – Cham : Springer International Publishing, 2020. С. 1373-1374.
19. Shekerdemian L., Bohn D. Cardiovascular effects of mechanical ventilation // Archives of disease in childhood. 1999. Т. 80. №. 5. С. 475-480.
20. Silvani A. et al. Brain-heart interactions: physiology and clinical implications // Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, physical and engineering sciences. 2016. Т. 374. №. 2067. С. 20150181.
21. Sloan R. P., Korten J. B., Myers M. M. Components of heart rate reactivity during mental arithmetic with and without speaking // Physiology & behavior. 1991. Т. 50. №. 5. С. 1039-1045.
22. Stephenson M. D. et al. Applying heart rate variability to monitor health and performance in tactical personnel: A narrative review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Т. 18. №. 15. С. 8143.
23. Widjaja D. et al. ECG-derived respiration: comparison and new measures for respiratory variability // 2010 Computing in Cardiology. IEEE, 2010. С. 149-152.
24. Zhu N. et al. Cardiorespiratory fitness and brain volume and white matter integrity: The CARDIA Study // Neurology. 2015. Т. 84. №. 23. С. 2347-2353.

25. Zoccal D. B., Machado B. H., Moraes D. J. A. Cardiorespiratory interactions in health and disease // Primer on the autonomic nervous system. Academic Press, 2023. C. 165-169.