

СВЯЗЬ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МОДУЛЯЦИЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА С УРОВНЕМ АКТИВНОСТИ СЕНСОМОТОРНОЙ КОРЫ

© 2020 г. К. И. Павлов^{1, *}, В. Н. Мухин², А. В. Сырцев¹, А. Н. Архимук¹,
Н. М. Андиева¹, М. И. Петренко¹

¹Военный учебно-научный центр Военно-морского флота “Военно-морская академия”,
Санкт-Петербург, Россия

²Институт экспериментальной медицины, Санкт-Петербург, Россия
*e-mail: youngexp@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.09.2019 г.

После доработки 19.11.2019 г.

Принята к публикации 19.11.2019 г.

Актуальность исследования обусловлена недостатком работ, дающих физиологическое обоснование параметров variability сердечного ритма и ее связи с биоэлектрической активностью сенсомоторной коры головного мозга в процессе когнитивной деятельности. Цель исследования: определить связи периодических модуляций сердечного ритма с уровнем активности сенсомоторной коры в процессе когнитивной деятельности. Объем выборки составил 42 курсанта первого курса Военного института (военно-морского) Военного учебно-научного центра Военно-морского флота “Военно-морская академия”. Средний возраст обследуемых – 18 ± 0.7 лет. Использовались методы электроэнцефалографии и электрокардиографии. Взаимосвязь variability сердечного ритма с уровнем активности сенсомоторной коры головного мозга оценивалась одновременно с предъявлением психофизиологических методик – “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова”, “Часы с поворотом”, “Реакция на движущийся объект” (РДО), “Устный счет” при закрытых глазах. Эти методики были направлены на оценку восприятия, селективного внимания, рабочей памяти, пространственной ориентации и мышления. Установлено, что при решении задач на восприятие изменений пространственно-временных событий (РДО) обнаруживаются отрицательные корреляции между активностью сенсомоторной коры левого полушария и значениями амплитуд модуляций сердечного ритма в частотной зоне около 0.05 (0.043–0.056) колебаний на кардиоинтервал (кол/ки). При выполнении арифметических задач (Устный счет при закрытых глазах) такие корреляции обнаружены на частотах около 0.13 кол/ки (0.126–0.136 кол/ки), а в ходе выполнения задач на пространственную ориентацию (Часы с поворотом) – на частотах около 0.44 кол/ки (0.430–0.446 кол/ки). Связь амплитуды модуляций на частотах 0.3–0.45 кол/ки с уровнями активности сенсомоторной коры стабильно отмечается во всех функциональных пробах. Процессы активации сенсомоторной коры, вызванные когнитивной нагрузкой, сопровождаются уменьшением амплитуды периодических колебаний сердечного ритма на частотах от 0.05 до 0.13 кол/ки.

Ключевые слова: variability сердечного ритма, структура периодических модуляций сердечного ритма, электроэнцефалография, активация сенсомоторной коры, десинхронизация ЭЭГ, частотный и спектральный анализ

DOI: 10.31857/S0869813920020089

Изучение роли сердечно-сосудистой системы, во многом определяющей успешность физиологической адаптации организма к экстремальным условиям среды (в

том числе, к условиям военной службы), в модуляции когнитивных функций является одной из важнейших практических задач военной психофизиологии. В наших предыдущих работах было показано, что вариабельность сердечного ритма (BCP), а именно, амплитуда периодических колебаний сердечного ритма связана с электрофизиологическими проявлениями психической работоспособности – уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом лобном отведении [1, 2]. В предыдущих наших работах было установлено, что курсанты с высоким уровнем развития внимания и мышления, характеризовались выраженным уровнем десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении, свидетельствующего об активации сенсомоторной коры правого полушария, а также высокими значениями общей спектральной мощности модулирующей сердечного ритма и относительной мощности в диапазоне высоких частот (HF). У этих же курсантов были обнаружены самые многочисленны корреляционные связи между активностью сенсомоторной коры и BCP [3].

Наличие связей между когнитивными функциями и BCP отмечается и в ряде работ других авторов. Так, сниженные значения BCP (SDNN и pNN 50%) связываются с уменьшением эффективности процессов рабочей памяти и внимания, а также с замедлением времени реакции в психомоторных тестах и снижением эффективности их выполнения [4–6]. Напротив, увеличение значений временных характеристик BCP – SDNN и RMSSD с одновременным уменьшением QTVI (QT – variability index) коррелировало с результативностью выполнения психофизиологических проб (теппинг-теста, и др.) и сокращением времени психомоторных реакций [7].

Связь спектральных параметров BCP с механизмами долговременной памяти показана в рамках сомнологических исследований. Увеличение индекса HF в течение сна, по мнению авторов, отражает работу механизмов консолидации следов памяти и активацию ассоциативных процессов в мозге [8].

Изучение физиологических механизмов процессов восприятия, рабочей памяти, внимания, принятия решения, распознавания значимых и незначимых сигналов при решении сенсомоторных задач с помощью метода когнитивных вызванных потенциалов позволило установить множественные связи между индексами BCP (rMSSD, pNN 50%, HF), временными и амплитудными характеристиками волны P300. Авторы делают вывод о высокой чувствительности метода анализа BCP в оценке когнитивных функций и функционального состояния [9].

Обнаружено влияние психоэмоционального состояния на когнитивные функции, активность коры и BCP. Так, у военнослужащих при моделировании боевых действий наблюдаются существенные изменения показателей внимания, памяти, принятия решений, тревожности, биохимических показателей крови (глюкозы) и уровня ее оксигенации, температуры тела, активации коры, происходящие вместе с возрастанием относительной мощности низкочастотных колебаний (LF) и снижением относительной мощности в диапазоне высоких частот (HF). Исследователи утверждают, что психоэмоциональное напряжение в условиях моделирования боевых действий вызывает выраженный психофизиологический ответ организма на стресс, обуславливающий селективные нарушения памяти, характер которых зависит от силы и интенсивности витальной угрозы [10].

Отметим, что оценка эффективности когнитивных функций в большинстве имеющихся в литературе работ, происходит с помощью психомоторных тестов и психофизиологических проб, в основе которых лежит анализ времени реакций на стимулы разной модальности. Возможно, именно поэтому в наших исследованиях наиболее выраженные взаимосвязи отмечаются между BCP и биоэлектрической активностью сенсомоторной и лобной коры, ответственных за обеспечение сенсомоторной интеграции, принятие решений и высшие интегративные функции мозга.

Несмотря на имеющиеся в литературе сведения, касающиеся изучения взаимосвязей между электрофизиологическими проявлениями когнитивных функций и

ВСП, данные, полученные разными авторами, нередко трудно сопоставимы между собой. С одной стороны, это происходит из-за того, что авторы в своих исследованиях по-разному определяют частотные диапазоны периодических модуляций сердечного ритма [11–15]. С другой стороны, большая часть работ выполнена авторами с опорой на традиционно выделяемые частотные диапазоны модуляций сердечного ритма (VLF 0.0033–0.04 Гц; LF 0.04–0.15 Гц; HF 0.15–0.40 Гц), что затрудняет определение более узкого частотного диапазона, непосредственно связанного с когнитивной деятельностью. Некоторые авторы подчеркивают наличие малого числа исследований, посвященных поиску точных физиологических доказательств существования неперекрывающихся частотных зон колебаний сердечного ритма и четких границ между ними [16].

С учетом всего вышеизложенного мы вправе предположить, что периодические модуляции сердечного ритма на более коротких отрезках спектрального диапазона могут быть связаны с активностью сенсомоторной коры при когнитивной нагрузке.

Цель исследования: определить связи периодических модуляций сердечного ритма с уровнем активности сенсомоторной коры в процессе когнитивной деятельности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объем выборки составил 42 курсанта первого курса Военного института (военно-морского) Военного учебно-научного центра Военно-морского флота “Военно-морская академия”. Средний возраст обследуемых – 18.0 ± 0.7 лет. Все испытуемые были праворукими.

Регистрация электроэнцефалографических и электрокардиографических параметров происходила одновременно с предъявлением тестовых задач, требующих для их решения задействование когнитивных функций восприятия, селективного внимания, рабочей памяти, пространственной ориентации, принятия решения и мышления.

Критериями включения в выборку психофизиологического обследования являлись: добровольное согласие на проведение исследования, положительная субъективная оценка самочувствия и качества сна, отсутствие противопоказаний к прохождению обследования по причине заболеваний, объективная положительная оценка текущего нервно-психического состояния, полученная с помощью Теста цветовых выборов Люшера по показателям вегетативного коэффициента и суммарного отклонения от аутогенной нормы.

Для проведения психофизиологического исследования использовался аппаратный комплекс объективного психологического анализа и тестирования “Реакор” с частотой дискретизации – 250 Гц (производитель Медиком МТД, г. Таганрог). Регистрация электроэнцефалографических и электрокардиографических показателей с одновременным предъявлением психофизиологических тестов производилась с каждым испытуемым индивидуально в течение 40–45 мин.

Каждому обследуемому предъявлялось восемь серий функциональных проб (ФП) в следующей последовательности:

1. в состоянии покоя с закрытыми глазами (фон);
2. в состоянии покоя с открытыми глазами;
3. в период выполнения теста “Красно-черные таблицы Шульце–Платонова” (7×7 ячеек);
4. во время выполнения теста “Часы с поворотом”;
5. в момент выполнения теста “Реакция на движущийся объект” (РДО);
6. при предъявлении задачи “Устный счет” при закрытых глазах;
7. в состоянии покоя с открытыми глазами после когнитивных функциональных проб (КФП);
8. в состоянии покоя с закрытыми глазами после КФП.

Время регистрации электрофизиологических параметров в каждой серии – 5 мин.

Методика “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” использовалась в качестве когнитивной нагрузки, требующей задействования свойств переключения и распределения внимания; методика “Часы с поворотом” служила для активации функции восприятия пространственных признаков и пространственной ориентации; методика РДО использовалась для изучения восприятия изменений пространственно-временных событий; методика “Устный счет” при закрытых глазах предназначалась для оценки быстроты мыслительных процессов при выполнении простых арифметических действий. Для решения данной задачи задействовались вербально-логическое мышление, оперативная память, внимание, проявлялись способности к выполнению числовых операций и счетные навыки. Выполнение устного счета при закрытых глазах предполагает значительную когнитивную нагрузку и при этом максимально минимизирует влияние электроокулографических артефактов при одновременной регистрации электроэнцефалографических параметров.

Биоэлектрическая активность головного мозга регистрировалась в левом и правом центральных отведениях (С3 и С4), расположенных по стандартной системе 10–20 в симметричных точках правого и левого полушария. Выбор таких отведений обусловлен спецификой функций сенсомоторной коры мозга, где происходят процессы сенсомоторной интеграции, а также регистрируются электрические потенциалы с минимальным количеством артефактов, возникающих в ходе выполнения КФП [17].

Референтные электроды (А1, А2) располагались в области сосцевидных отростков. Величина импеданса не превышала 10 кОм. Полученные записи были обработаны полосовым фильтром 0.5–35.0 Гц. Оценка уровня биоэлектрической активности сенсомоторной коры головного мозга проводилась по уровню десинхронизации ЭЭГ по каждому отведению, которая заключается в увеличении частоты и уменьшении амплитуды основных ритмов и свидетельствует о возрастании функциональной активности коры и подкорковых образований головного мозга.

Вначале определялись абсолютные значения мощностей (АЗМ) по основным зонам спектра ЭЭГ в каждом из отведений (мкВ^2). Для этого каждый пятиминутный участок электроэнцефалограммы был разделен на сегменты длительностью в одну секунду, что позволило проанализировать около 300 эпох и провести спектральный анализ ЭЭГ на основе преобразования Фурье. Далее выполнялась z-стандартизация показателей АЗМ, полученных данных по формуле: $z = x - x_c / \sigma$, где z – стандартизованное значение АЗМ; x – значение АЗМ; x_c – среднее арифметическое АЗМ по всей выборке испытуемых; σ – стандартное отклонение по всей выборке испытуемых. Способ оценки уровня десинхронизации ЭЭГ состоял в том, что для каждого отведения определяли диапазон, в котором стандартизованное значение АЗМ максимально. В соответствии со шкалой от 1 до 6 баллов определялся уровень десинхронизации ЭЭГ в каждом из отведений. Уровень десинхронизации в 1 балл соответствовал преобладанию стандартизованного значения мощности ЭЭГ в дельта-1-диапазоне (0.50–2.0 Гц), 2 балла соответствовали дельта-2-диапазону (2.0–4.0 Гц), 3 балла – тета-диапазону (4.0–8.0 Гц), 4 балла – альфа-диапазону (8.0–13.0 Гц), 5 баллов – бета-1-диапазону (13.0–24.0 Гц), 6 баллов соответствовали частотной полосе бета-2 (24.0–35.0 Гц). Таким образом, был применен интегральный подход к оценке суммарного уровня биоэлектрической активности мозга, основанный на определении уровня десинхронизации ЭЭГ, который успешно использовался нами и в предыдущих исследованиях [1–3, 18, 19].

Сердечный ритм регистрировался электрокардиографически. Электроды для записи электрокардиограммы (ЭКГ) располагались на запястье левой руки и нижней трети шеи слева и впереди от грудино-ключично-сосцевидной мышцы.

С помощью программного обеспечения аппаратного комплекса “Реакор” на ЭЭГ были выявлены и вручную удалены выраженные глазодвигательные и мышечные ар-

тефакты. Для подавления оставшихся электрокардиографических, миографических и окулографических артефактов при выполнении когнитивных задач использовались такие функции программного обеспечения как сглаживание и интерполяция выбросов и ошибочных данных. Участки записи ЭКГ, на которых выявлены нарушения ритма и проводимости были исключены из анализа. Из оставшихся участков для каждого испытуемого выделен непрерывный ряд, состоящий из 300 RR-интервалов. Анализ ВСП заключался в частотном анализе этих рядов. С помощью численного преобразования Фурье получена периодограмма сердечного ритма. Определены 150 ($N/2 = 300/2 = 150$) гармоник колебаний RR-интервалов в диапазоне частот от 0 до 0.5 колебаний на кардиоинтервал (кол/ки) и с шагом в $1/300$ кол/ки. Таким образом, были получены амплитуды периодических модуляций сердечного ритма на определенных частотах, показывающие насколько секунд замедлялся или, наоборот, ускорялся сердечный ритм за соответствующий период.

Для установления взаимосвязей между параметрами ВСП и уровнями десинхронизации ЭЭГ для каждой серии ФП проводился корреляционный анализ Спирмена. Оценка положительных и отрицательных корреляций между показателями ВСП и ЭЭГ позволила определить прямые и обратные функциональные связи между сенсомоторной корой, отвечающей за осуществление сенсомоторной интеграции стимулов при решении когнитивных задач и деятельностью сердечно-сосудистой системы, непосредственно реализующей адаптационные реакции организма. Критериями статистической значимости результатов были: коэффициент корреляции r_s с соответствующим значением уровня достоверности ($p \leq 0.05$; $p \leq 0.01$; $p \leq 0.001$), построение скаттерограмм для визуального анализа репрезентативности корреляционных связей.

Далее параметры ЭЭГ и ВСП, продемонстрировавшие тесные корреляционные связи на уровне значимости $p \leq 0.01$ и $p \leq 0.001$, после предварительной z-стандартизации, включались в факторный анализ. Для обоснования методологического приема оценки адекватности примененного нами анализа ряда последовательных значений коэффициентов корреляции и выявления наиболее значимых связей проводился эксплораторный факторный анализ методом главных компонент.

С целью уточнения результатов корреляционного анализа и определения параметров ВСП, обнаруживающих наиболее тесную связь с активностью сенсомоторной коры головного мозга в каждой ФП, был использован множественный регрессионный анализ с шаговым отбором наиболее значимых параметров ВСП, включенных в уравнение линейной множественной регрессии. Такие параметры ВСП представляли собой независимые переменные, влияющие на уровень десинхронизации ЭЭГ – зависимую переменную. Критериями включения параметров в уравнение была вероятность $F \leq 0.05$, а критерием исключения была вероятность $F \geq 0.1$. Рассчитывался коэффициент детерминации R^2 для оценки доли объясненной дисперсии, а также критерий Фишера и уровень статистической значимости для подтверждения адекватности построенной регрессионной модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружены множественные взаимосвязи между амплитудами периодических модуляций сердечного ритма и уровнями десинхронизации ЭЭГ, зависящие от вида когнитивных задач.

Перед детальным рассмотрением обнаруженных связей целесообразно рассмотреть средние значения уровней десинхронизации ЭЭГ в левом и правом центральном отведении, а также величины амплитуд модуляций сердечного ритма во всех сериях исследования (табл. 1).

Таблица 1. Значения уровней десинхронизации ЭЭГ в отведениях С3 и С4 и амплитуд модуляций сердечного ритма в восьми сериях
Table 1. The levels of EEG desynchronization in C3 and C4 leads and the amplitudes of modulations of the heart rate in 8th series

Серия/индекс Series/index	Длительность RR-интервалов, мс Duration of RR- intervals, ms	C3, α/β , у.е. C3, α/β , a.u.	C4, α/β , у.е. C4, α/β , a.u.	C3, баллы C3, points	C4, баллы C4, points	0.023 кол/ки 0.023 oscillation/cardio interval	0.103 кол/ки 0.103 oscillation/cardio interval	0.436 кол/ки 0.436 oscillation/cardio interval	0.053 кол/ки 0.053 oscillation/cardio interval	0.129 кол/ки 0.129 oscillation/cardio interval	0.486 кол/ки 0.486 oscillation/cardio interval
Фон "Глаза закрыты" Functional test with "Closed eyes"	872.40 ± ± 1.35	10.93 ± ± 1.21	9.98 ± ± 1.15	3.71 ± ± 0.26	3.60 ± ± 0.28	2609.19 ± ± 154.67	4557.92 ± ± 539.09	4576.75 ± ± 763.04	2936.38 ± ± 210.14	6075.29 ± ± 1056.64	5266.09 ± ± 735.61
ФП "Глаза открыты до КФП" Functional test with "Opened eyes" before psychophysiological tests	867.30 ± ± 1.31	5.16 ± ± 0.50	5.00 ± ± 0.55	3.60 ± ± 0.27	3.55 ± ± 0.28	2231.63 ± ± 184.55	5429.48 ± ± 699.97	5888.33 ± ± 864.85	3527.06 ± ± 440.35	5105.79 ± ± 529.97	5131.31 ± ± 779.61
КФП "Красно-черные таблицы Шульце-Платонова" Psychophysiological test – "Schulte's test"	821.64 ± ± 1.53	2.66 ± ± 0.11	2.70 ± ± 0.14	3.38 ± ± 0.27	3.76 ± ± 0.25	3609.58 ± ± 347.22	7334.07 ± ± 915.32	10160.25 ± ± 1992.89	4213.67 ± ± 307.29	8727.08 ± ± 1470.80	8560.45 ± ± 1681.87
КФП "Часы с поворотом" Psychophysiological test – "Clock with a turn"	838.79 ± ± 0.77	2.98 ± ± 0.13	2.95 ± ± 0.19	3.67 ± ± 0.26	3.71 ± ± 0.27	2670.97 ± ± 228.43	7140.37 ± ± 939.64	7178.59 ± ± 1374.11	3352.18 ± ± 231.04	8152.14 ± ± 1332.41	7865.22 ± ± 1648.01
КФП "Реакция на движущийся объект" Psychophysiological test – "Reaction to a moving object"	889.31 ± ± 1.31	3.42 ± ± 0.26	3.62 ± ± 0.30	3.69 ± ± 0.28	3.60 ± ± 0.28	2741.52 ± ± 182.35	5705.05 ± ± 786.03	10949.36 ± ± 2470.68	3046.76 ± ± 156.46	6092.11 ± ± 1022.01	8107.28 ± ± 1356.59

Таблица 1. Окончание

Серия/индекс Series/index	Длительность RR-интервалов, мс Duration of RR-intervals, ms	C3, α/β , у.е. C3, α/β , a.u.	C4, α/β , у.е. C4, α/β , a.u.	C3, баллы C3, points	C4, баллы C4, points	0.023 кол/ки 0.023 oscillation/cardio interval	0.103 кол/ки 0.103 oscillation/cardio interval	0.436 кол/ки 0.436 oscillation/cardio interval	0.053 кол/ки 0.053 oscillation/cardio interval	0.129 кол/ки 0.129 oscillation/cardio interval	0.486 кол/ки 0.486 oscillation/cardio interval
КФП “Устный счет” Psychophysiological test – “Mental arithmetic” with closed eyes	830.74 ± ± 1.16	8.63 ± ± 0.80	7.94 ± ± 0.82	3.76 ± ± 0.29	3.71 ± ± 0.27	2525.49 ± ± 242.26	7856.42 ± ± 1398.06	6001.66 ± ± 952.55	3035.32 ± ± 185.87	6446.10 ± ± 1087.40	5431.36 ± ± 752.69
ФП “Глаза открыты после КФП” Functional test with “Opened eyes” after psychophysiological tests	890.71 ± ± 1.35	4.98 ± ± 0.48	4.51 ± ± 0.47	3.64 ± ± 0.28	3.62 ± ± 0.26	2465.36 ± ± 214.70	5234.92 ± ± 525.33	6147.66 ± ± 958.29	3514.58 ± ± 309.92	7146.45 ± ± 1159.91	7019.65 ± ± 1171.47
ФП “Глаза закрыты после КФП” Functional test with “Closed eyes” after psychophysiological tests	906.88 ± ± 1.37	10.27 ± ± 1.14	9.65 ± ± 1.09	3.38 ± ± 0.28	3.62 ± ± 0.28	2096.61 ± ± 139.30	5903.67 ± ± 608.93	7124.97 ± ± 1274.80	2908.09 ± ± 212.07	6240.00 ± ± 1059.55	6078.57 ± ± 985.00

В таблице представлены средние значения и стандартные ошибки средних значений изучаемых показателей в 8-ми сериях исследования; цветом в одной строке, парами, выделены показатели, продемонстрировавшие наиболее тесные корреляционные связи.
In the table are presented the mean values and standard errors of mean values in 8 series of research; the correlations locates in colored steams of cells in one line of the table.

Из табл.1 видно, что самый высокий уровень десинхронизации ЭЭГ отмечался при решении арифметических задач в отведении C3 (3.76 ± 0.29), а также при выполнении теста “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” в отведении C4 (3.76 ± 0.25). Цветом по строкам выделены пары показателей уровня десинхронизации ЭЭГ и амплитуд модуляций сердечного ритма на определенных частотах, продемонстрировавших наиболее тесные связи. Отметим, что при выполнении ФП с закрытыми и открытыми глазами до и после КФП длительность RR-интервалов была больше, чем при решении когнитивных задач. Самые низкие значения длительностей RR-интервалов отмечались в КФП “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” и “Устный счет”, это может являться свидетельством того, что данные тесты являлись для обследуемых наиболее энергозатратными.

Подтверждением этого служит также и то, что при решении арифметических задач у большинства курсантов (26.2%) наблюдался максимальный уровень десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении (табл. 2). Необходимо отметить, что максимальный уровень десинхронизации ЭЭГ в 6 баллов, в рамках предложенного нами метода, означает то, что бета-2 диапазон несколько более выражен, а более низкочастотные диапазоны ослаблены по сравнению со средним уровнем десинхронизации в этих диапазонах. Таким образом, значения уровней

Таблица 2. Количество курсантов (%) с преобладанием того или иного уровня десинхронизации ЭЭГ в отведениях С3 и С4 в восьми сериях**Table 2.** Sampling fraction (%) of cadets with various levels of EEG desynchronization in C3 and C4 leads in 8th series

Уровень десинхронизации ЭЭГ, баллы Levels of EEG desynchronization, points	Фон "Глаза закрыты" Functional test with "Closed eyes"		ФП "Глаза открыты до КФП" Functional test with "Opened eyes" before psychophysiological tests		КФП "Красно-черные таблицы Шульце–Платонова" Psychophysiological test – "Schulte's test"		КФП "Часы с поворотом" Psychophysiological test – "Clock with a turn"		КФП "Реакция на движущийся объект" Psychophysiological test – "Reaction to a moving object"		КФП "Устный счет" Psychophysiological test – "Mental arithmetic" with closed eyes		ФП "Глаза открыты после КФП" Functional test with "Opened eyes" after psychophysiological tests		ФП "Глаза закрыты после КФП" Functional test with "Closed eyes" after psychophysiological tests	
	С3	С4	С3	С4	С3	С4	С3	С4	С3	С4	С3	С4	С3	С4	С3	С4
1	9.5	16.7	19.0	19.0	19.0	14.3	9.5	14.3	14.3	16.7	16.7	16.7	19.0	16.7	21.4	19.0
2	21.4	19.0	11.9	14.3	19.0	7.1	19.0	14.3	16.7	16.7	16.7	11.9	14.3	14.3	19.0	14.3
3	16.7	11.9	11.9	11.9	14.3	21.4	19.0	14.3	14.3	14.3	7.1	11.9	9.5	9.5	9.5	9.5
4	16.7	16.7	23.8	21.4	14.3	21.4	23.8	21.4	21.4	16.7	19.0	19.0	19.0	26.2	19.0	21.4
5	11.9	11.9	14.3	14.3	19.0	16.7	4.8	14.3	7.1	14.3	14.3	23.8	16.7	16.7	11.9	14.3
6	23.8	23.8	19.0	19.0	14.3	19.0	23.8	21.4	26.2	21.4	26.2	16.7	21.4	16.7	19.0	21.4

Жирным шрифтом выделены максимальные значения долей курсантов (%) с преобладанием того или иного уровня десинхронизации ЭЭГ.

The maximum sampling fraction (%) of cadets with various levels of EEG desynchronization allocates in cells with extra bold.

десинхронизации ЭЭГ нельзя интерпретировать так же, как и значения спектральной мощности. Это утверждение подтверждается в ходе рассмотрения динамики индексов α/β , рассчитанных по показателям абсолютных спектральных мощностей, в разных сериях исследования. Из табл. 1 видно, что индексы α/β максимальны в сериях до и после КФП при закрытых глазах, что полностью согласуется с известным феноменом усиления альфа-активности при проведении этой ФП. Напротив, при проведении КФП, происходит усиление спектральной мощности в бета-диапазоне.

Далее рассмотрим связи между уровнями десинхронизации ЭЭГ и периодическими модуляциями сердечного ритма на различных частотах подробнее, обратившись к результатам корреляционного анализа.

Так, количество корреляций установленных в условиях разных ФП существенно различается. Самое большое количество корреляционных связей отмечается в серии "Часы с поворотом" (25 шт.) (табл. 3).

Минимальное число связей определено при выполнении КФП "Красно-черные таблицы Шульце–Платонова" (1 шт.), а также в ходе регистрации фоновых показателей до предъявления КФП (3 шт.).

Количество статистически значимых корреляций в функциональных пробах с открытыми (8 шт.) и закрытыми глазами (9 шт.) после КФП меньше, чем в КФП "Часы с поворотом" (25 шт.) и "Устный счет" (13 шт.) (табл. 4).

Можно предположить, что при когнитивной нагрузке в виде необходимости решения пространственных и арифметических задач отношения между показате-

Таблица 3. Корреляции между частотой модуляций сердечного ритма (кол/ки) и уровнем десинхронизации ЭЭГ в отведениях С3 или С4 в разных ФП**Table 3.** Correlations between frequencies of the heart rhythm modulations (oscillation/cardio interval) and levels of EEG desynchronization in C3 and C4 leads in various functional tests

Число корреляций Number of correlations	Коррелирующие параметры Correlations	r_s	p
Фон “Глаза закрыты” Functional test with “Closed eyes”			
1	0.023 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
2	0.026 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.32	0.04
3	0.469 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	0.33	0.03
КФП “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” Psychophysiological test – “Schulte’s test”			
1	0.103 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	−0.34	0.03
КФП “Часы с поворотом” Psychophysiological test – “Clock with a turn”			
1	0.093 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.34	0.03
2	0.096 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.34	0.03
3	0.123 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
4	0.126 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.32	0.04
5	0.15 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
6	0.23 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.34	0.03
7	0.233 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
8	0.236 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.32	0.04
9	0.266 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.31	0.04
10	0.36 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.32	0.04
11	0.363 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
12	0,383 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
13	0.386 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.32	0.04
14	0.389 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.31	0.04
15	0.426 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.37	0.02
16	0.43 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.39	0.01
17	0.433 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.47	0.002
18	0.436 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.49	0.001
19	0.439 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.46	0.002
20	0.443 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.42	0.01
21	0.446 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.38	0.01
22	0.453 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.31	0.04
23	0.456 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.31	0.04
24	0.463 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.33	0.03
25	0.476 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	−0.31	0.04

Таблица 3. Окончание

Число корреляций Number of correlations	Коррелирующие параметры Correlations	r_s	p
КФП “Реакция на движущийся объект” Psychophysiological test – “Reaction to a moving object”			
1	0.043 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.37	0.02
2	0.046 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.37	0.02
3	0.05 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.4	0.01
4	0.053 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.42	0.01
5	0.056 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.32	0.04
6	0.353 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.31	0.05
7	0.36 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.33	0.03
8	0.4 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	-0.32	0.04

лями ВСП и активностью сенсомоторной коры головного мозга становятся более выраженными в сравнении с этими отношениями в состоянии относительного покоя.

Установлено, что вид когнитивной задачи по-разному влияет на характер корреляционных связей между параметрами ВСП и уровнями десинхронизации ЭЭГ в правом и левом центральных отведениях.

Из табл. 1 и 2 видно, что в КФП “Часы с поворотом” и “РДО” значения амплитуд периодических модуляций сердечного ритма коррелируют с уровнями десинхронизации ЭЭГ, зарегистрированных только в левом центральном отведении. В ходе КФП “Устный счет” при закрытых глазах статистически значимые корреляции отмечаются между амплитудами модуляций ритма сердца и уровнями десинхронизации ЭЭГ в обоих центральных отведениях.

Следовательно, задачи на пространственную ориентацию с необходимостью слежения за изменениями пространственно-временных событий требуют в большей степени активации морфофункциональных связей параметров ВСП с сенсомоторной корой левого полушария. В тоже время решение арифметических задач сопровождается расширением спектра связей, вероятно, отражающих взаимно модулирующее воздействия ритма сердца на активность сенсомоторной коры обоих полушарий. Это подтверждает то, что решение математических задач является более сложной и энергозатратной КФП, требующей использование всех интегративных функции мозга, включая активацию вегетативной нервной системы. Высокая сложность данной КФП подтверждена опросом курсантов после завершения обследования.

Необходимо отметить, что наибольшее число сильных корреляционных связей ($r_s \leq -0.31$) наблюдается между параметрами амплитуд модуляций сердечного ритма и уровнями десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении.

Так, в серии “Часы с поворотом” наиболее тесная отрицательная связь обнаружена между уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении и значениями амплитуд периодических модуляций сердечного ритма на частотах 0.430–0.446 кол/ки (рис. 1).

При выполнении КФП “РДО” наиболее сильные отрицательные корреляции показателей ВСП с уровнем десинхронизации ЭЭГ в том же отведении наблюдаются на частотах близких к 0.05 кол/ки (0.043–0.056 кол/ки) (рис. 2).

Таблица 4. Корреляции между частотой модуляций сердечного ритма (кол/ки) и уровнем десинхронизации ЭЭГ в отведениях С3 или С4 в разных ФП (продолжение)**Table 4.** Correlations between frequencies of the heart rhythm modulations (oscillation/cardio interval) and levels of EEG desynchronization in C3 and C4 leads in various functional tests (continuation)

Число корреляций Number of correlations	Коррелирующие параметры Correlations	r_s	p
КФП “Устный счет” Psychophysiological test – “Mental arithmetic”			
1	0.003 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.35	0.02
2	0.006 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.34	0.03
3	0.039 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.32	0.04
4	0.043 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.32	0.04
5	0.05 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.32	0.04
6	0.073 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.35	0.02
7	0.076 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.31	0.05
8	0.079 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.31	0.04
9	0.083 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.32	0.04
10	0.126 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.35	0.02
11	0.129 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.41	0.01
12	0.133 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.34	0.03
13	0.136 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.35	0.02
ФП “Глаза открыты после КФП” Functional test with “Opened eyes” after psychophysiological tests			
1	0.093 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.31	0.04
2	0.096 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.36	0.02
3	0.096 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.36	0.02
4	0.1 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.32	0.04
5	0.103 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.37	0.02
6	0.176 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.31	0.04
7	0.18 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.33	0.03
8	0.203 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.31	0.05
ФП “Глаза закрыты после КФП” Functional test with “Closed eyes” after psychophysiological tests			
1	0.1 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.32	0.04
2	0.103 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.31	0.05
3	0.37 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.32	0.04
4	0.373 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.34	0.03
5	0.483 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.32	0.04
6	0.486 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C3	–0.32	0.04
7	0.486 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.36	0.02
8	0.49 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.34	0.03
9	0.493 кол/ки (oscillation/cardio interval) & C4	–0.31	0.04



Рис. 1. Связь периодограммы сердечного ритма на различных частотах (колебаний на кардиоинтервал) с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении при выполнении КФП “Часы с поворотом”. Штриховая линия – уровень достоверности корреляции больше 95%.

Fig. 1. Correlations between periodogram of heart rhythm on various frequencies (oscillation/cardio interval) and levels of EEG desynchronization in the left central lead in the psychophysiological test – “Clock with a turn”. The note: the dashed line - the level of significance of correlation is more than 95%.

В ходе решения арифметических задач были обнаружены наиболее тесные отрицательные корреляционные связи уровня десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении с периодическими модуляциями ритма сердца с максимум значения коэффициента корреляции на частоте 0.13 кол/ки (0.126–0.136 кол/ки) (рис. 3).

Таким образом, результаты корреляционного анализа демонстрируют то, что характер взаимосвязей показателей ВСП с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении зависит от вида решаемых когнитивных задач. Можно предположить, что чем выше уровень активности сенсомоторной коры левого полушария, тем ниже значения амплитуд модуляций сердечного ритма. Так, при решении сенсомоторных задач РДО максимумы отрицательных значений r_s отмечаются в частотной зоне около 0.05 кол/ки, при выполнении арифметических задач – на частоте около 0.13 кол/ки, а в ходе выполнения задач на пространственную ориентацию – на частоте около 0.45 кол/ки.

Отметим, что данные значения являются последовательным рядом коэффициентов корреляции r_s , образующего волну последовательного их увеличения и уменьшения при переходе от частоты к частоте. Анализ амплитуд волны, представляющей собой ряд значений r_s , в отличие от оценки отдельного коэффициента корреляции является более надежным и наглядно исключает случайные “выскакивающие” значения этого показателя.

Результаты корреляционного анализа подтверждались данными факторного анализа, в который были включены параметры ВСП и ЭЭГ, имеющие наиболее

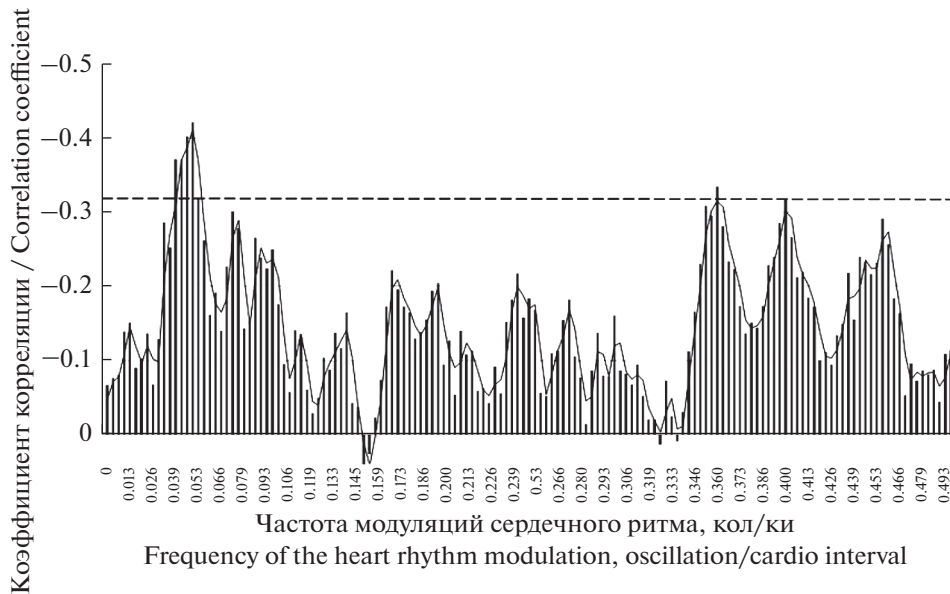


Рис. 2. Связь периодограммы сердечного ритма на различных частотах (колебаний на кардиоинтервал) с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении при выполнении КФП “РДО”. Штриховая линия – уровень достоверности корреляции больше 95%.

Fig. 2. Correlations between periodogram of heart rhythm on various frequencies (oscillation/cardio interval) and levels of EEG desynchronization in the left central lead in the psychophysiological test – “Reaction to a moving object”. The note: the dashed line – the level of significance of correlation is more than 95%.

тесные корреляционные связи, а последовательные значения полученных r_s образуют плавную волну линии тренда на графиках связей периодограммы сердечного ритма на различных частотах с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении в разных КФП.

Показана двухфакторная структура изучаемых параметров (критерий выборочной адекватности Кайзера–Мейера–Олкина равен 0.72, а критерий сферичности Бартлетта меньше 0.0001). Во второй фактор с максимальным весом вошли амплитуда периодических модуляций сердечного ритма на частотах 0.046; 0.05; 0.053 и 0.056 кол/ки, а также уровень десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении при выполнении серии “РДО” (табл. 5).

Анализ знаков факторных нагрузок позволяет сделать заключение о том, что чем больше уровень активности сенсомоторной коры левого полушария при решении сенсомоторных задач на восприятие изменений пространственно-временных событий, тем меньше амплитуда модуляций сердечного ритма в частотной зоне 0.05 кол/ки.

Результаты факторного анализа наглядно демонстрируют адекватность примененного нами анализа ряда последовательных значений коэффициентов корреляции. Также отметим, что методика РДО основана на расчетах скоростных и временных показателей сенсомоторных реакций и в наибольшей степени соответствует изучению функций сенсомоторной коры. Математическое подтверждение этого соответствия мы также видим при рассмотрении результатов факторного анализа.

Регрессионный анализ в целом подтвердил результаты корреляционного анализа, и позволил выделить наиболее важные показатели ВСП, связанные с уровнями



Рис. 3. Связь периодограммы сердечного ритма на различных частотах (колебаний на кардиоинтервал) с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении при выполнении КФП “Устный счет”. Штриховая линия – уровень достоверности корреляции больше 95%.

Fig. 3. Correlations between periodogram of heart rhythm on various frequencies (oscillation/cardio interval) and levels of EEG desynchronization in the left central lead in the psychophysiological test – “Mental arithmetic”. The note: the dashed line - the level of significance of correlation is more than 95%.

десинхронизации ЭЭГ. Из табл. 6 видно, что в фоновой серии уровень активности сенсомоторной коры левого полушария связан с показателями амплитуд периодических модуляций сердечного ритма на частотах близких к 0.02 и 0.3 кол/ки, что подтверждается результатами корреляционного анализа.

Отметим, что в серии “Глаза открыты после КФП” значения периодических модуляций сердечного ритма на частотах 0.1 и 0.5 кол/ки связаны с уровнем десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении, что отражает взаимосвязь активности сенсомоторной коры правого полушария с изучаемыми параметрами ВСР.

Можно предположить, что состояние, предшествующее когнитивной нагрузке отражает мобилизацию ресурсов ЦНС и готовность к выполнению когнитивных задач, и сопровождается интеграцией связей между сенсомоторной корой левого полушария, ВНС, автономными и гуморально-метаболическими механизмами регуляции сердечной деятельности. Напротив, состояние после завершения когнитивной нагрузки характеризовалось усилением связей между деятельностью сердечно-сосудистой системы, проявляющейся в показателях ВСР, и активностью сенсомоторной коры правого полушария. Это согласуется с работами, в которых показано, что при понижении активности коры правого полушария наблюдается снижение активности симпатического отдела вегетативной нервной системы, частоты сердечных сокращений, артериального давления, при этом показатель HF увеличивался. Между тем, при снижении активности левого полушария происходит уменьшение активности парасимпатического отдела вегетативной нервной си-

Таблица 5. Факторная структура связей параметров ВСР и уровней десинхронизации ЭЭГ в отведениях С3 и С4**Table 5.** Factor structure of correlations between parameters of heart rate variability and levels of EEG desynchronization in C3 and C4 leads

Показатели Indexes	Фактор Factor	
	1	2
0.133 кол/ки в КФП “Устный счет” 0.133 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Mental arithmetic”	0.92	0.09
0.129 кол/ки в КФП “Устный счет” 0.129 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Mental arithmetic”	0.91	0.09
0.136 кол/ки в КФП “Устный счет” 0.136 oscillation / cardio interval in psychophysiological test – “Mental arithmetic”	0.90	0.09
0.126 кол/ки в КФП “Устный счет” 0.126 oscillation / cardio interval in psychophysiological test – “Mental arithmetic”	0.89	0.22
0.436 кол/ки в КФП “Часы с поворотом” 0.436 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Clock with a turn”	0.74	0.40
0.439 кол/ки в КФП “Часы с поворотом” 0.439 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Clock with a turn”	0.74	0.39
0.443 кол/ки в КФП “Часы с поворотом” 0.443 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Clock with a turn”	0.73	0.39
0.433 кол/ки в КФП “Часы с поворотом” 0.433 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Clock with a turn”	0.59	0.48
С3 в КФП “Устный счет” С3 in psychophysiological test – “Mental arithmetic”	-0.20	0.06
0.05 кол/ки в КФП “РДО” 0.05 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Reaction to a moving object”	0.07	0.93
0.053 кол/ки в КФП “РДО” 0.053 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Reaction to a moving object”	0.12	0.90
0.046 кол/ки в КФП “РДО” 0.046 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Reaction to a moving object”	0.21	0.87
0.056 кол/ки в КФП “РДО” 0.056 oscillation/cardio interval in psychophysiological test – “Reaction to a moving object”	0.22	0.82
С3 в КФП “РДО” С3 in psychophysiological test – “Reaction to a moving object”	0.02	-0.51
С3 в КФП “Часы с поворотом” С3 in psychophysiological test – “Clock with a turn”	-0.14	-0.31

Таблица 6. Результаты множественного регрессионного анализа
Table 6. Results of the multiple regression analysis

Функциональная проба Functional test	Уравнение линейной множественной регрессии/бета-коэффициенты (β) Equation of the multiple linear regression/beta coefficients (β)	R^2	F	p
Фон “Глаза закрыты” Functional test with “Closed eyes”	$C3 = 5.844 - 0.001 \times F_{0.023} + 0.000061 \times F_{0.273}$; $\beta(F_{0.023}) = -0.61$; $\beta(F_{0.273}) = 0.47$	0.25	6.6	0.003
КФП “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” Psychophysiological test – “Schulte’s test”	$C3 = 3.394 + 0.000099 \times F_{0.43} - 0.000136 \times F_{0.113}$; $\beta(F_{0.43}) = 0.8$; $\beta(F_{0.113}) = -0.55$	0.36	11.1	0.0001
КФП “Часы с поворотом” Psychophysiological test – “Clock with a turn”	$C3 = 4.676 - 0.000132 \times F_{0.093} + 0.000166 \times$ $\times F_{0.196} - 0.000102 \times F_{0.443} - 0.000091 \times F_{0.239}$; $\beta(F_{0.093}) = -0.36$; $\beta(F_{0.196}) = 1.59$; $\beta(F_{0.443}) = -0.66$; $\beta(F_{0.239}) = -0.86$	0.45	7.4	0.0001
КФП “Реакция на движущийся объект” Psychophysiological test – “Reaction to a moving object”	$C3 = 6.356 - 0.002 \times F_{0.053} + 0.000057 \times F_{0.323} + 0.000704 \times$ $\times F_{0.059} - 0.000051 \times F_{0.3}$; $\beta(F_{0.053}) = -0.96$; $\beta(F_{0.323}) = 0.48$; $\beta(F_{0.059}) = 0.64$; $\beta(F_{0.3}) = -0.33$	0.45	7.5	0.0001
КФП “Устный счет” Psychophysiological test – “Mental arithmetic”	$C4 = 5.225 - 0.000505 \times F_{0.039} + 0.000124 \times F_{0.256} -$ $- 0.000276 \times F_{0.066}$; $\beta(F_{0.039}) = -0.37$; $\beta(F_{0.256}) = 0.64$; $\beta(F_{0.066}) = -0.47$	0.34	6.6	0.001
ФП “Глаза открыты после КФП” Functional test with “Opened eyes” after psychophysiological tests	$C4 = 4.514 - 0.00031 \times F_{0.103} + 0.000093 \times F_{0.496}$; $\beta(F_{0.103}) = -0.62$; $\beta(F_{0.496}) = 0.55$	0.31	8.8	0.001

F – обозначение частоты периодических модуляций сердечного ритма.

F – frequencies of periodic modulations of the heart rhythm.

стемы, сочетающегося с увеличением частоты сердечных сокращений, показателей LF и LF/HF [20–23].

Рассмотрим взаимосвязи периодических модуляций сердечного ритма с уровнями активности сенсомоторной коры при решении когнитивных задач более подробно.

В КФП “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” определены взаимосвязи между уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении и периодическими модуляциями ритма сердца на частотах 0.1 и 0.4 кол/ки.

При выполнении задачи “Часы с поворотом” на уровень десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении влияет амплитуда модуляций сердечного ритма на частотах около 0.09, 0.2 и 0.4 кол/ки.

В серии КФП “РДО” отмечены статистически значимые связи между уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении и модуляциями сердечного ритма на частотах 0.05 и 0.3 кол/ки. Это частично подтверждается нашими ранними работами [1, 2]

Выполнение арифметических действий в серии “Устный счет” влияет на взаимосвязи между уровнями десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении и модуляциями сердечного ритма на частотах около 0.05, а также 0.26 кол/ки. Это подтверждает результаты корреляционного анализа, показывающего участие активности сенсомоторной коры обоих полушарий во взаимоотношениях с ВСР.

Из этого следует, что связь амплитуды модуляций на частотах 0.3–0.4 кол/ки с уровнями активности сенсомоторной коры стабильно отмечается во всех функциональных и когнитивных пробах. Это подтверждают и результаты корреляционного анализа данных КФП “Часы с поворотом”, свидетельствующие о наличии связей между уровнями десинхронизации ЭЭГ в отведении С3 и амплитудами модуляций сердечного ритма на частотах около 0.44 кол/ки (0.430–0.446 кол/ки). Таким образом, это дает основание для расширения диапазона частот до 0.3–0.45 кол/ки, обнару-

женных во всех ФП и КФП и, вероятно, несвязанного непосредственно с когнитивной деятельностью.

Напротив, диапазон значений частоты периодических колебаний от 0.05 до 0.13 кол/ки связан с когнитивной деятельностью. Так, в сериях КФП “РДО” и “Устный счет” связь активности сенсомоторной коры наблюдается с показателями модуляции сердечного ритма на частотах около 0.05 кол/ки. При этом в случае КФП “РДО” установлены связи этого показателя ВСР с уровнем десинхронизации ЭЭГ в левом центральном отведении, а в ходе решения арифметических задач отмечались связи этого показателя ВСР с уровнем десинхронизации ЭЭГ в правом центральном отведении.

Связь частоты модуляций сердечного ритма равной 0.1 кол/ки с активностью сенсомоторной коры левого полушария прослеживалось в сериях КФП “Красно-черные таблицы Шульте–Платонова” и “Часы с поворотом”. Наряду с этим связь частоты колебаний сердечного ритма около 0.13 кол/ки с активностью сенсомоторной коры левого полушария отмечалась в серии КФП “Устный счет при закрытых глазах”

Следовательно, лишь малый диапазон от 0.05 до 0.13 кол/ки связан с активностью сенсомоторной коры и процессом мышления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вид когнитивной задачи определяет наличие отрицательных связей между значениями амплитуд модуляций сердечного ритма на различных частотах и активностью сенсомоторной коры левого полушария. Так, при решении задач на восприятие изменений пространственно-временных событий отмечены отрицательные корреляции между активностью сенсомоторной коры левого полушария и значениями амплитуд модуляций сердечного ритма в частотной зоне около 0.05 кол/ки (0.043–0.056 кол/ки). При выполнении арифметических задач такие корреляции обнаружены на частотах около 0.13 кол/ки (0.126–0.136 кол/ки), а в ходе выполнения задач на пространственную ориентацию – на частотах около 0.44 кол/ки (0.430–0.446 кол/ки).

Связь амплитуды модуляций на частотах 0.3–0.45 кол/ки с уровнями активности сенсомоторной коры стабильно отмечается во всех функциональных и когнитивных пробах. Процессы активации сенсомоторной коры, вызванные когнитивной деятельностью, сопровождаются уменьшением амплитуды периодических колебаний сердечного ритма на частотах от 0.05 до 0.13 кол/ки.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения физиологических механизмов когнитивных функций, а также могут послужить основой для определения уровней военно-профессиональной адаптации курсантов и решения задач критериальной валидности психологических и психофизиологических методик, предполагаемых к применению в военном профотборе и, прежде всего, в интересах ВМФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухин В.Н., Яковлев Н.М. Связь вариабельности сердечного ритма с психической работоспособностью. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 97(8): 838–842. 2011. [Mukhin V.N., Yakovlev N.M. Association between level of intelligence and heart rate variability. Russ. J. Physiol. 97(8): 838–842. 2011. (In Russ)].
2. Мухин В.Н., Яковлев Н.М., Клименко В.М. Связь вариабельности сердечного ритма с уровнем активации лобной коры. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 97(11): 1281–1288. 2011. [Mukhin V.N., Yakovlev N.M., Klimenko V.M. Association of heart rate variability and frontal cortex activation. Russ. J. Physiol. 97(11): 1281–1288. 2011. (In Russ)].
3. Павлов К.И., Сырцев А.В., Мухин В.Н., Архимук А.Н., Михеев А.В., Копытова Ю.С., Хамитова Е.А., Сысоев В.Н., Петренко М.И. Определение информативности электрофизиологических показателей для оценки военно-профессиональной адаптации курсантов

- военно-морского института. *Авиакосм. и экологич. медицина*. 53(3): 57–66. 2019. [Pavlov K.I., Syrtsev A.V., Mukhin V.N., Arkhimuk A.N., Mikheev A.V., Kopytova Yu.S., Khamitova E.A., Sysoev V.N., Petrenko M.I. Analysis of informativity of electrophysiological data in context of rating military occupational adaptation of naval school students. *Авиакосм. и Экологич. Meditsina*. 53(3): 57–66. 2019. (In Russ)].
4. Mahinrad S., Jukema J.W., van Heemst D., Macfarlane P.W., Clark E.N., de Craen A.J., Sabayan B. 10-Second heart rate variability and cognitive function in old age. *Neurology*. 86(12): 1120–1127. 2016.
 5. Mahinrad S., Van Heemst D., Macfarlane P.W., Stott D.J., Jukema J.W., De Craen A.J., Sabayan B. Short-term heart rate variability and cognitive function in older subjects at risk of cardiovascular disease. *J. Hypertens.* 33: 33–40. 2015.
 6. Muthukrishnan S.P., Gurja J.P., Sharma R. Does Heart Rate Variability Predict Human Cognitive Performance at Higher Memory Loads? *Indian J. Physiol. Pharmacol.* 61(1): 14–22. 2017.
 7. Stenfors C.U., Hanson L.M., Theorell T., Osika W.S. Executive Cognitive Functioning and Cardiovascular Autonomic Regulation in a Population-Based Sample of Working Adults. *Front. Psychol.* 7: 1536. 2016.
 8. Whitehurst L.N., Cellini N., McDevitt E.A., Duggan K.A., Mednick S.C. Autonomic activity during sleep predicts memory consolidation in humans. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 113(26): 7272–7277. 2016.
 9. Luque-Casado A., Perales J.C., Cárdenas D., Sanabria D. Heart rate variability and cognitive processing: The autonomic response to task demands. *Biol. Psychol.* 113: 83–90. 2016.
 10. Delgado-Moreno R., Robles-Pérez J.J., Clemente-Suárez V.J. Combat Stress Decreases Memory of Warfighters in Action. *J. Med. Syst.* 41(8): 124. 2017.
 11. Sayers B.M. Analysis of heart rate variability. *Ergonomics*. 16:17–32. 1973.
 12. Taylor J.A., Carr D.L., Myers C.W. Eckberg D.L. Mechanisms underlying verylow frequency RR-interval oscillation in humans. *Circulation*. 98: 547–555. 1998.
 13. Aksyonov V.V. Methodical bases of cybernetic analysis of heart rate. In: Heart rate in sportsmen. Ed. Baevskiy R.M. *Fizkultura i sport*. Moscow. 1986.
 14. Pomeranz B., Macaulay R.J.B., Caudill M.A., Kutz I., Adam D., Gordon D., Kilborn K.M., Barger A.C., Shannon D.C., Cohen R.J., Benson M. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am. J. Physiol.* 248: 151–153. 1985.
 15. Akselrod S., Gordon D., Ubel F.A., Shannon D.C., Barger A.C., Cohen R.J. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat to beat cardiovascular control. *Science*. 213: 220–222. 1981.
 16. Vetter R., Celka P., Vesin J.M., Thonet G., Pruvot E., Fromer M., Scherrer U., Bernardi L. Sub-band modeling of the human cardiovascular system: new insights into cardiovascular regulation. *Ann. Biomed. Eng.* 26(2): 293–307. 1998.
 17. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей. 5-изд. М. Медпресс-информ. 2013. [Zenkov L.R., Ronkin M.A. *Funktsionalnaya diagnostika nervnykh bolezney: rukovodstvo dlya vrachey*. 5-izd. [Functional diagnosis of nervous diseases: a guide for physicians.] 5th ed. Moscow. Medpress-inform. 2013. (In Russ)].
 18. Pavlov K.I., Syrtsev A.V., Mukhin V.N., Arkhimuk A.N., Mikheeva E.A., Nikolaeva S.V., Andieva N.M., Kamenskaya V.G., Petrenko M.I. The effect of environmental factors on cognitive functions of cadets of military institute. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 55(10). 2019.
 19. Павлов К.И., Мухин В.Н., Сырцев А.В., Архимук А.Н., Сысоев В.Н., Петренко М.И. Вариабельность сердечного ритма в изучении когнитивных функций и военно-профессиональной адаптации. *Мед. академ. журн.* 17(4): 7–16. 2017. [Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V., Arkhimuk A.N., Sysoev V.N., Petrenko M.I. Heart rate variability method in the study of cognitive functions and military occupational adaptation (literature review). *Med. Academ. J.* 17(4): 7–16. 2017. (In Russ)].
 20. Wittling W., Block A., Genzel S., Schweiger E. Hemisphere asymmetry in parasympathetic control of the heart. *Neuropsychologia*. 36(5): 461–468. 1998.
 21. Zamrini E.Y., Meador K.J., Loring D.W., Nichols F.T., Lee G.P., Figueroa R.E. Unilateral cerebral inactivation produces differential left/right heart rate responses. *Neurology*. 40: 1408–1411. 1990.
 22. Yoon B.W., Morillo C.A., Cechetto D.F., Hachinski V. Cerebral hemispheric lateralization in cardiac autonomic control. *Arch. Neurol.* 54: 741–744. 1997.
 23. Avnon Y., Nitzan M., Sprecher E., Rogowski Z., Yarnitsky D. Autonomic asymmetry in migraine: augmented parasympathetic activation in left unilateral migraineurs. *Brain*. 127(9): 2099–2108. 2004.

Association between Periodic Modulations of the Heart Rate and Sensorimotor Cortex Activation

K. I. Pavlov^{a, *}, V. N. Mukhin^b, A. V. Syrtsev^a, A. N. Archimuk^a,
N. M. Andieva^a, and M. I. Petrenko^a

^a*Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia*

^b*Institute of Experimental Medicine, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: youngexp@yandex.ru*

The relevance of this study is a product of insufficient research into the relationships between the physiological substantiation of heart rate variability parameters and bioelectric activity of the sensorimotor cerebral cortex in cognitive work. Our aim was to study the association between the periodic modulations of the heart rate and the sensorimotor cortex activation during cognitive work. 42 first-year cadets of the Naval institute participated in the study ($n = 44$). The average age of the participants was 18 ± 0.7 years. Electroencephalography and electrocardiography were the primary techniques used in the study. The relationship between the heart rate variability and the level of sensorimotor cortex activation was evaluated simultaneously with the presentation of various psychophysiological tests – “Schulte’s test”, “Clock with a turn”, “Reaction to a moving object” (RMO), “Mental arithmetic” with closed eyes. These tests are used to evaluate the perception, selective attention, working memory, spatial orientation, decision making, and thinking. Negative correlations were detected between the activity of the sensorimotor cortex in the left hemisphere and the amplitudes of the heart rhythm modulations in the 0.05 (0.043–0.056) oscillations per cardio interval frequency zone while conducting the RMO-test for spatio-temporal events perception. Significant correlations were found for the 0.13 (0.126–0.136) oscillations per cardio interval frequency range while conducting the arithmetic tasks (“Mental arithmetic” with closed eyes) and for the 0.44 (0.430–0.446) oscillations per cardio interval range during the spatial orientation tasks (Clock with rotation). The relationship between the modulation amplitude at the 0.3–0.45 oscillations per cardio interval frequencies and the sensorimotor cortex activity levels was consistently observed in all functional tests. The activation of the sensorimotor cortex due to cognitive activity is accompanied by the decrease in the amplitude of the heart rate periodic modulations at the 0.05 to 0.13 oscillations per cardio interval frequency range.

Keywords: heart rate variability, the structure of heart rate periodic modulations, electroencephalography, sensorimotor cortex activation, EEG desynchronization, frequency and spectral analysis

ЦИТИРОВАТЬ:

Павлов К.И., Мухин В.Н., Сырцев А.В., Архимук А.Н., Андиева Н.М., Петренко М.И. Связь периодических модуляций сердечного ритма с уровнем активности сенсомоторной коры. Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 106(2): 205–223.

DOI: 10.31857/S0869813920020089

TO CITE THIS ARTICLE:

Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V., Archimuk A.N., Andieva N.M., Petrenko M.I. Association Between Periodic Modulations of the Heart Rate and Sensorimotor Cortex Activation. Russian Journal of Physiology. 106(2): 205–223.

DOI: 10.31857/S0869813920020089