

УДК 612.821

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВСР ПРИ КОГНИТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И СТЕПЕНЬ УСВОЕНИЯ РИТМА СВЕТОВЫХ МЕЛЬКАНИЙ

^{1,2}Каратыгин Н.А., ¹Коробейникова И.И., ²Венерина Я.А., ²Бирюкова Е.В.

¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина»,
Москва, e-mail: nikol.karatygin@yandex.ru, i_korobeinikova@mail.ru;

²ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова» Минздрава РФ, Москва

У испытуемых ($n = 42$; мужчины 18–21 года) изучали показатели variability сердечного ритма в исходном состоянии и при выполнении компьютеризованного теста «Красно-черные таблицы Горбова – Шульте» в двух вариантах. Первый вариант представлял собой классический тест, во втором варианте выполнение идентичного теста было осложнено введением голосовой помехи – чтение диктором цифр от 1 до 25 в случайном порядке. В конце обследования проводили функциональную пробу с фотостимуляцией частотой в 5, 10, 15 и 20 Гц с регистрацией ЭЭГ. Испытуемые с низким значением коэффициента усвоения ритма на частоте 10 Гц (KY_{10}), отличались от лиц с высокими значениями KY_{10} , более высокой скоростью выполнения заданий и меньшим количеством ошибок. Кроме этого у них имели место исходно высокие значения HF, низкие значения LF/HF, а также выраженная динамика показателя LF/HF при выполнении тестов относительно исходного фона. У испытуемых с низким KY_{10} в ситуации выполнения задания, осложненного голосовой помехой, наблюдались более высокие значения LF/HF, чем при выполнении задания в отсутствии помехи. Обсуждается возможность использования степени усвоения ритмической стимуляции 10 Гц в исходном состоянии в качестве прогностического критерия, на основе которого возможно будет определить различные паттерны вегетативного реагирования при увеличении сложности когнитивных заданий и успешность их выполнения.

Ключевые слова: ЭЭГ, световая стимуляция, параметры результата деятельности, ВСР, 10 Гц

DYNAMICS OF HRV PARAMETERS DURING COGNITIVE TASK PERFORMANCE AND DEGREE OF THE LIGHT FLASH RHYTHM ASSIMILATION

^{1,2}Karatygin N.A., ¹Korobeynikova I.I., ²Venerina Ya.A., ²Biryukova E.V.

¹P.K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow,
e-mail: nikol.karatygin@yandex.ru, i_korobeinikova@mail.ru;

²First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
(Sechenov University), Moscow

Heart rate variability parameters were studied in 43 subjects ($n = 43$; males, 19–21 years old) at the initial state and while performing two versions of Gorbov-Shulte's computer-aided test. First version of the test was classical one, and the second version posed classical test accompanied by the voice noise – speaker pronounced numbers from 1 to 25 randomly. Finally, EEG was registered while subjects were examined with the functional probe with light flash stimulation with different frequency 5, 10, 15 and 20 Hz. Subjects with low 10 Hz-assimilation coefficient (AC_{10}) were characterized by higher speed of task performing and lower amount of mistakes rather than subjects high AC_{10} . Moreover, subjects with low AC_{10} demonstrated high meanings of the HF at the initial state, low meanings of the LF/HF, and a significant dynamics of LF/HF parameter while performing test compared to the initial state. Subjects with low AC_{10} demonstrated higher meanings of LF/HF while performing task, accompanied by the voice noise rather than performing task without the voice noise. Basing on this date, we can suppose that the degree of the light flash 10 Hz – rhythm assimilation at the initial state may be considered as a prognostic criterion, which would be able to determine different patterns of vegetative reactions during increasing of cognitive task complexity and success rate of its performing.

Keywords: EEG, light flash stimulation, parameters of activity results, HRV, 10 Hz

Ритмическая световая стимуляция – один из наиболее доступных методов, с помощью которого можно влиять на осцилляторную активность нейронных ансамблей головного мозга. Этот метод широко применяется в клинике для провокации эпилептиформной активности и выявления ряда других патологий [1]. В ряде исследований на здоровых людях было показано, что внешняя ритмическая стимуляция сенсорных зон коры при помощи повторяющихся сенсорных стимулов может существенным об-

разом влиять на эндогенную ритмику нейронных ансамблей [2] и на эффективность и временные параметры процессов восприятия и внимания [3–5].

В научной сфере широко исследуется феномен усвоения ритма световых мельканий, при котором мощность колебаний биопотенциалов альфа-диапазона ЭЭГ может усиливаться при ритмической световой стимуляции, особенно, если стимуляция предъявляется на частоте, совпадающей или кратной частоте индивидуального аль-

фа-пика. В большинстве исследований для внешней стимуляции используется частотный диапазон альфа-ритма, так как альфа-ритм является одним из наиболее ярких феноменов электрической активности мозга и ритмическая стимуляция с частотой около 10 Гц оказывает наиболее сильное влияние на процессы зрительного восприятия и внимания [3].

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что индивидуальные особенности нейронных ансамблей, способствующие большей или меньшей зависимости эндогенной осцилляторной активности от ритмики внешних раздражителей, будут проявляться не только в фоновых электрофизиологических характеристиках, но и могут оказывать влияние на параметры выполняемой когнитивной деятельности.

В наших предыдущих исследованиях была установлена связь степени усвоения ритма (10 Гц) с различными характеристиками успешности выполнения когнитивной деятельности [6]. Эти и другие данные дают основание считать показатель степени усвоения ритма световых мельканий в 10 Гц перспективным прогностическим критерием.

При проведении настоящего исследования было крайне важно учитывать, что 10 Гц является одной из основных частот, на которых происходит взаимодействие между центральной и вегетативной нервными системами, включая ритмическую активность симпатических нервов, иннервирующих сердце [7]. Такое тесное взаимодействие между центральной и вегетативной нервными системами выражается в изменениях параметров сердечной деятельности под влиянием большого набора внешних факторов, включая выполнение человеком тех или иных когнитивных задач. Поэтому неудивительно, что во многих исследованиях отмечается связь различных показателей работы сердца с альфа-активностью ЭЭГ [8, 9] и с эффективностью протекания когнитивных процессов [10].

Исходя из вышеизложенного, целью настоящего исследования явилось изучение связи степени усвоения ритма световых мельканий с результативностью когнитивной деятельности и особенностями вегетативной регуляции по показателям ВСР.

Материалы и методы исследования

В исследовании на основе добровольного информированного согласия участвовали 42 испытуемых (мужчины в возрасте 18–21 года). Процедура обследования соответствовала стандартам локального этического комитета Первого МГМУ им. И.М. Сеченова. В качестве зрительно-моторной задачи использовался

компьютеризированный тест Горбова – Шульце (красно-черные таблицы). Во время обследования испытуемый находился в кресле перед экраном монитора (17 дюймов). На мониторе отображалась таблица (7x7 квадратов), содержащая 24 красных и 25 черных квадратов, на каждом из которых имелся собственный номер.

Обследование включало два задания – ТЕСТ1 и ТЕСТ2. В задании ТЕСТ1 испытуемый должен был на основе предварительной инструкции выбрать (указать курсором мышки) по очереди черные и красные квадраты, черные в порядке возрастания, а красные в порядке убывания: 1 черный, 24 красный, 2 черный, 23 красный и т.д. Паттерны расположения квадратов для каждого задания были изначально заданы методом случайной генерации. Для всех испытуемых использовался одинаковый набор паттернов. Задание ТЕСТ2 было идентично заданию ТЕСТ1, но его выполнение было осложнено введением голосовой помехи – чтение диктором цифр от 1 до 25 в случайном порядке, не совпадающим с порядком указания испытуемым номеров квадратов и с частотой одна цифра в две секунды.

По результатам выполнения компьютерной задачи для каждого испытуемого вычисляли время между последовательными кликами по квадратам, величина которого усреднялась по обоим заданиям (среднее время клика, мс) и число допущенных при этом ошибок, которое также усреднялось по обоим заданиям.

После выполнения испытуемыми заданий проводилась функциональная проба на усвоение ритмических вспышек света длительностью 20 мс от стандартного фотостимулятора, расположенного на расстоянии 25 см от испытуемого и находящегося на уровне его глаз. Испытуемому, сидящему с закрытыми глазами, предъявляли последовательно четыре десятисекундные серии вспышек фиксированных частот 5, 10, 15, 20 Гц. Интервал между частотными сериями составлял 10 с.

С помощью пакета программ BRAINSYS проводили картирование 10-секундных отрезков ЭЭГ, соответствующих частоте стимуляции. На каждом отрезке рассчитывали спектральную мощность частотных потенциалов затылочных отведений (O2, O1) ЭЭГ, точно соответствующую частоте стимуляции (например, для отрезка со стимуляцией 10 Гц – спектральную мощность на 10 Гц и т.д.).

При анализе фоновой ЭЭГ, зарегистрированной при открытых глазах, проводили картирование 10-секундного безартефактного отрезка и определяли спектральную мощность потенциалов на частотах 5, 10, 15 и 20 Гц. Для каждой используемой частоты стимуляции рассчитывали коэффициент усвоения ритма (КУ) с учетом спектральных мощностей в исходном состоянии и при стимуляции светом указанных частот по формуле

$$КУ = \frac{((СтО1 - ФО1) + (СтО2 - ФО2))}{(ФО1 + ФО2)},$$

где Ст – спектральная мощность потенциалов в отведении O2 и O1 при стимуляции светом той же частоты;

Ф – исходная спектральная мощность потенциалов в отведениях O2 и O1 в диапазоне 5, 10 Гц, и т.д.;

ЭЭГ регистрировали с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-спектр» (г. Иваново) монополярно по схеме «10–20» в затылочных (O2, O1) отведениях.

Объединённые референтные электроды располагались на мочках ушей. Полоса фильтрации составляла 0,5–35,0 Гц, постоянная времени – 0,32 с, режективный фильтр – 50 Гц. После регистрации все записи ЭЭГ были переведены в компьютерную систему анализа и топографического картирования электрической активности мозга «BRAINSYS» для Windows и обработаны с помощью аппаратно-программного комплекса «НЕЙРО-КМ» (ООО «Статокин», г. Москва). Артефакты исключали из анализируемой записи с использованием возможностей программного комплекса BRAINSYS. Спектральный анализ ЭЭГ проводили на основе быстрого преобразования Фурье (пакет программ BRAINSYS).

ЭКГ регистрировали в исходном состоянии (ФОН до), во время выполнения испытуемыми заданий (ТЕСТ1 и ТЕСТ2) и в состоянии спокойного бодрствования после выполнения заданий (ФОН после). ЭКГ регистрировали (в III стандартном отведении) с использованием электрокардиографа «Полиспектр 8Е» и соответствующего программного обеспечения фирмы «Нейрософт» (Россия, 2008) и записывали на диск компьютера. Эпоха анализа в пределах каждого этапа составляла 3 мин. Качество записи контролировалось с помощью монитора. Оцифровка сигналов осуществлялась с частотой 2000 Гц. Обработку ЭКГ проводили на основе пакета программ «ПолиСпектрРитм» фирмы «Нейрософт», осуществляющих анализ variability сердечного ритма в соответствии с рекомендациями «Международного стандарта».

Использовали статистические характеристики и результаты спектрального анализа variability сердечного ритма: RRNN (мс) – средняя длительность RR-интервалов; CV (%) – коэффициент вариации длительности RR-интервалов; TP (мс²) – общая мощность спектра (0,003–0,40 Гц); HF (мс²) – мощность в высокочастотном диапазоне (0,15–0,40 Гц); LF (мс²) – мощность в низкочастотном диапазоне (0,04–0,15 Гц); VLF (мс²) – мощность в очень низкочастотном диапазоне (0,003–0,04 Гц); LF/HF (отн. ед.) – соотношение нормализованной мощности.

Для статистической обработки использовался программный пакет STATISTICA v.8.0. При нормальном распределении анализируемых показателей вычисляли среднее значение (M) и стандартную ошибку среднего (m). Достоверность различий анализируемых показателей у испытуемых выделенных групп оценивали с помощью t-критерия для независимых выборок. При оценке характеристик спектрального анализа ВСР, имеющих распределение отличное от нормального, использовали методы непараметрической статистики. Достоверность различий оценивали по критериям Манна – Уитни и Вилкоксона.

Результаты исследования и их обсуждение

Для каждого испытуемого на каждой частоте стимуляции (5, 10 15 и 20 Гц) рассчитывался коэффициент усвоения ритма световых мельканий ($KU_{5,10,15,20}$). Средние значения KU составили: для KU_5 – $8,62 \pm 1,51$; для KU_{10} – $17,48 \pm 8,66$; для KU_{15} – $25,68 \pm 6,09$ и для KU_{20} – $34,17 \pm 8,85$.

Был проведен корреляционный анализ, в результате которого было выявлено, что достоверные корреляции с показателями

деятельности сердца наблюдались только для KU_{10} (в исходном состоянии (ФОН до) корреляция с показателем LF/HF $r = 0,34$; $p = 0,028$). Исходя из этого и из результатов наших предыдущих исследований [6], для формирования групп был выбран KU_{10} .

Было выделено две группы испытуемых. В 1-ю группу ($n = 11$) вошли лица, KU_{10} которых входил в нижний квартиль ($KU_{10} \leq 2,11$), а во 2-ю группу ($n = 11$) вошли испытуемые, KU_{10} которых входил в верхний квартиль ($KU_{10} \geq 11,50$). При этом средние значения показателя KU_{10} у лиц 1-й группы составляли $0,72 \pm 0,28$, а у лиц 2-й группы – $55,46 \pm 31,25$.

Анализ параметров результата ТЕСТ1 и ТЕСТ2 показал, что у испытуемых 1-й группы, по сравнению с испытуемыми 2-й, имело место достоверно меньшее среднее время клика ($3677,9 \pm 202,2$ мс и $4543,5 \pm 213,6$ мс, $p = 0,008$) и достоверно меньшее количество ошибок ($1,273 \pm 0,395$ и $3,591 \pm 0,639$, $p = 0,0058$).

Параметры variability сердечного ритма представлены в таблице. В исходном состоянии у испытуемых 1-й группы имели место значимо более высокие значения HF и более низкие значения LF/HF. Также у лиц 1-й группы наблюдались достоверно более низкие значения LF/HF в состоянии спокойного бодрствования после выполнения всех заданий (таблица).

Во время выполнения заданий у испытуемых 1-й группы показатель LF/HF значимо возрастал относительно исходного фона (ТЕСТ1 $p = 0,0076$; ТЕСТ2 $p = 0,0076$) и достоверно снижался на этапе ФОН после относительно ТЕСТ2 ($p = 0,0044$). У испытуемых 1-й группы значения показателя LF/HF при выполнении задания ТЕСТ1 были достоверно ниже, чем при выполнении ТЕСТ2 ($p = 0,0409$). У лиц 2-й группы показатель LF/HF на этапах обследования значимо не изменялся (рис. 1).

У испытуемых 1-й группы показатель HF достоверно снижался при выполнении задания ТЕСТ1 относительно исходного фона ($p = 0,0128$) и достоверно возрастал на этапе ФОН после относительно ТЕСТ2 ($p = 0,0262$). У испытуемых 2-й группы показатель HF на этапах обследования значимо не изменялся (рис. 2).

В предложенных в настоящем обследовании заданиях задействованы процессы рабочей памяти, удержания и переклочки внимания. Было установлено, что испытуемые, различающиеся по уровню навязывания ритмической стимуляции с частотой 10 Гц, отличались по успешности выполнения предлагаемых зрительно-моторных задач.

Параметры variability сердечного ритма ($M \pm m$) на этапах обследования у испытуемых 1-й и 2-й групп

		Группа – 1	Группа – 2	p
ФОН до	ЧСС	77,818 ± 3,712	83,364 ± 3,3555	
	RRNN	787,364 ± 33,940	732,091 ± 29,2995	
	CV	7,997 ± 0,982	6,295 ± 0,4110	
	TP, мс ²	5584,770 ± 1624,515	3032,855 ± 430,0341	
	VLF, мс ²	2766,901 ± 1228,147	1354,368 ± 262,9557	
	LF, мс ²	1042,099 ± 161,372	1127,987 ± 165,2022	
	HF, мс ²	1775,770 ± 743,261	550,500 ± 140,6563	0,023486
	LF/HF	1,139 ± 0,209	3,084 ± 0,5879	0,009493
ТЕСТ1	ЧСС	87,364 ± 4,907	89,273 ± 3,4008	
	RRNN	698,091 ± 34,635	676,545 ± 21,9236	
	CV	7,628 ± 0,737	7,145 ± 0,5839	
	TP, мс ²	4400,614 ± 987,508	3722,159 ± 676,2026	
	VLF, мс ²	2403,321 ± 639,415	1859,262 ± 399,5493	
	LF, мс ²	1142,067 ± 174,259	1240,073 ± 225,2131	
	HF, мс ²	855,227 ± 263,548	622,824 ± 161,3378	
	LF/HF	2,224 ± 0,369	3,077 ± 0,6296	
ТЕСТ2	ЧСС	84,091 ± 5,039	87,273 ± 3,4168	
	RRNN	715,273 ± 41,434	677,727 ± 20,3247	
	CV	7,359 ± 0,800	7,013 ± 0,6811	
	TP, мс ²	4562,235 ± 1252,170	3583,428 ± 671,8653	
	VLF, мс ²	2342,358 ± 775,270	1856,858 ± 402,3871	
	LF, мс ²	1191,581 ± 185,663	1117,191 ± 239,9497	
	HF, мс ²	1028,297 ± 397,510	609,379 ± 189,6729	
	LF/HF	2,821 ± 0,508	2,881 ± 0,5898	
ФОН после	ЧСС	79,455 ± 4,222	84,182 ± 2,8662	
	RRNN	775,636 ± 41,074	720,636 ± 24,6249	
	CV	7,553 ± 0,887	6,342 ± 0,6462	
	TP, мс ²	4578,710 ± 995,865	3267,803 ± 744,8277	
	VLF, мс ²	1404,691 ± 296,303	1394,976 ± 371,8407	
	LF, мс ²	1397,398 ± 261,135	1342,757 ± 304,2872	
	HF, мс ²	1776,621 ± 678,473	530,070 ± 127,6891	
	LF/HF	1,824 ± 0,389	3,629 ± 0,9074	0,038599

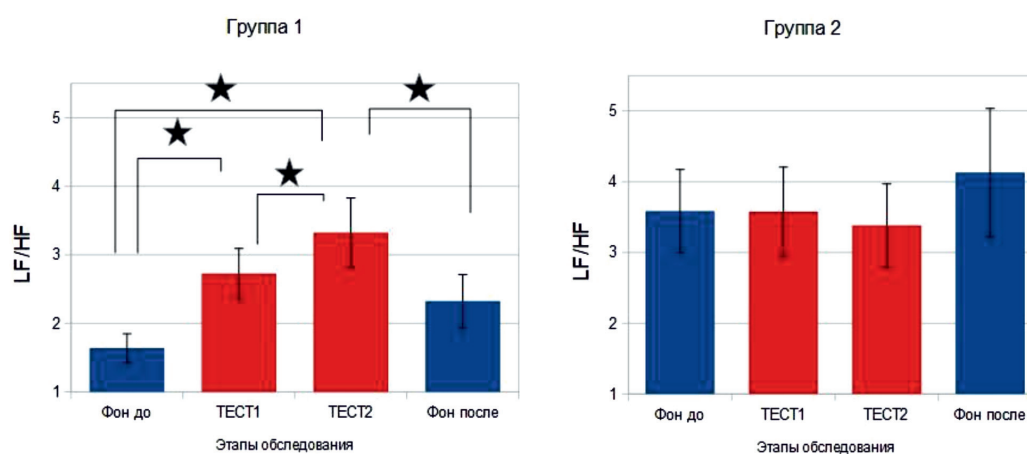


Рис. 1. Соотношение LF/HF (отн. ед.) у лиц выделенных групп на этапах обследования.
Примечание. * – достоверные изменения показателей, значения приведены в тексте

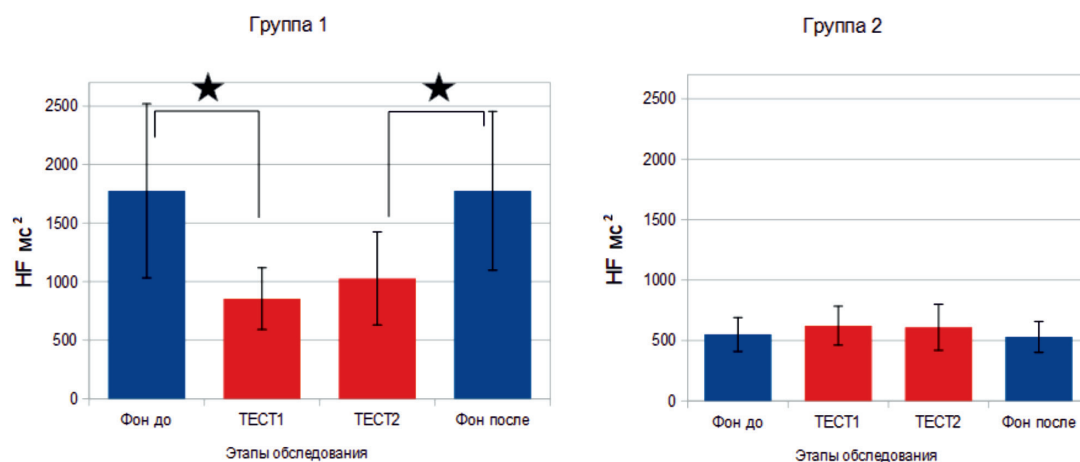


Рис. 2. Спектральная мощность в высокочастотном диапазоне ($HF мс^2$) у лиц выделенных групп на этапах обследования. Примечание. * – достоверные изменения показателей, значения приведены в тексте

Как показали результаты настоящего исследования, при выполнении когнитивных заданий, в которых задействованы процессы рабочей памяти, удержания и переключения внимания, лица, различающиеся по уровню навязывания ритмической стимуляции с частотой 10 Гц, достоверно различались и по успешности выполнения предлагаемых зрительно-моторных задач. Причем различия выявлялись как во временных характеристиках достижения результата, так и в количестве допущенных ошибок. Аналогичная закономерность уже была продемонстрирована нами в предыдущих исследованиях [6].

Как уже отмечалось, экзогенная ритмическая стимуляция может модулировать осцилляторную активность нейронных ансамблей первичных зрительных зон, что оказывает влияние на временные параметры восприятия и внимания, изменяя успешность распознавания околопороговых стимулов [5]. Однако в настоящий момент достаточно сложно назвать конкретные механизмы, благодаря которым удалось бы объяснить, как степень усвоения экзогенной ритмической стимуляции может влиять на комплексные когнитивные процессы внимания и памяти при выполнении зрительно моторных задач.

Определенное понимание нейронных основ этих процессов может дать ряд недавно проведенных исследований. Во-первых, работа Wittevrongel с соавт., проведенная с использованием данных интракраниальных электродов, позволила на уровне отдельных нейронов проследить влияние ритмической зрительной стимуляции на осцилляторную активность клеток зрительной

коры [11]. Кроме того, в этой работе была прослежена связь ритмической стимуляции с модулированием активности фронтальных корковых зон, что выражалось в усилении активности в тета-диапазоне ЭЭГ. Во-вторых, в эксперименте, проведенном на животных, было продемонстрировано, что ритмическая экзогенная стимуляция вызывает сдвиги нейронной ритмики не только в первичной сенсорной коре, но и в структурах лимбической системы: в гиппокампе, миндалине, энторинальной коре и медиальном септуме [12].

Данные этих исследований позволяют высказать предположение о глобальном влиянии ритмической стимуляции на ритмическую деятельность мозга, а следовательно, и на протекание комплексных когнитивных процессов. Результаты нашего исследования свидетельствуют о том, что эти глобальные влияния существенно зависят от индивидуальных характеристик испытуемых. Показано, что разная степень навязывания ритмической стимуляции сочетается с разным профилем вегетативной активности испытуемых, что согласуется с литературными данными. Отмечается, что при увеличении когнитивной нагрузки у разных групп испытуемых степень изменений показателей вегетативной нервной системы разная [13], что имело место и в нашей работе. Так, у испытуемых выделенных групп наблюдалась разная динамика изменений показателей HF и LF/HF. Если у лиц с меньшей выраженностью навязывания ритма были зарегистрированы значимые изменения этих показателей, то у испытуемых с высокой степенью навязывания

вания такой закономерности не наблюдалось. Кроме того, у испытуемых с низкой степенью навязывания наблюдалось увеличение значений LF/HF в соответствии со сложностью заданий.

В ряде исследований установлена связь LF/HF с когнитивной нагрузкой [14, 15]. Соотношение высокочастотного и низкочастотного компонентов (LF/HF) чаще всего рассматривают как отражение ваго-симпатического баланса. Нами показано, что у лиц с низкой степенью навязывания ритмической стимуляции с частотой 10 Гц исходно имеют более выраженный сдвиг баланса в сторону парасимпатической регуляции.

Результаты настоящего исследования позволяют предположить, что различия в динамике вегетативных показателей, проявляющиеся при выполнении зрительно-моторных задач, могут быть спрогнозированы еще в исходном состоянии. Так у испытуемых с низкой степенью навязывания ритма в исходном состоянии наблюдались более высокие значения мощности высокочастотного компонента (HF) и более низкие значения отношения нормализованной мощности низкочастотного и высокочастотного компонентов (LF/HF). Таким образом, степень усвоения ритмической стимуляции 10 Гц в исходном состоянии может служить прогностическим критерием, на основе которого возможно будет определить различные паттерны вегетативного реагирования при увеличении сложности когнитивных заданий и успешность их выполнения.

Выводы

1. У испытуемых с низкой степенью навязывания ритма световых мельканий с частотой 10 Гц успешность выполнения зрительно-моторных тестов была выше.

2. В исходном состоянии испытуемые с низкой степенью навязывания ритма отличались от лиц с высокой степенью навязывания более низкими значениями показателя LF/HF и более высокими – показателя HF. После выполнения заданий у испытуемых с низкой степенью навязывания имели место более низкие значения показателя LF/HF.

3. У лиц с низкой степенью навязывания наблюдалась выраженная динамика показателей ВСР (HF и LF/HF) на разных этапах обследования, у лиц с высокой степенью навязывания подобных изменений не зарегистрировано.

4. У испытуемых с низкой степенью навязывания ритма соотношение LF/HF компонентов спектра было достоверно выше при выполнении задания, осложненного голосовой помехой, чем при выполнении задания без нее, что позволяет рассматривать соотно-

шение LF/HF в качестве критерия, чувствительного к когнитивной сложности задания.

Список литературы

1. Kasteleijn Nolst Trenité D., Rubboli G., Hirsch E., Martins da Silva A., Seri S., Wilkins A., Parra J., Covanis A., Elia M., Capovilla G., Stephani U. Methodology of photic stimulation revisited: updated European algorithm for visual stimulation in the EEG laboratory. *Epilepsia*. 2012. vol. 53. no.1. P. 16–24. DOI: 10.1111/j.1528-1167.2011.03319.x.
2. Notbohm A., Kurths J., Herrmann C.S. Modification of brain oscillations via rhythmic light stimulation provides evidence for entrainment but not for superposition of event-related responses. *Frontiers in human neuroscience*. 2016. vol. 10. P. 10. DOI: 10.3389/fnhum.2016.00010.
3. Gulbinaite R., van Viegen T., Wieling M., Cohen M.X., VanRullen R. Individual alpha peak frequency predicts 10 Hz flicker effects on selective attention. *Journal of Neuroscience*. 2017. vol.37. no.42. P. 10173–10184. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.11663-17.2017.
4. Mathewson K.E., Prudhomme C., Fabiani M., Beck D.M., Lleras A., Gratton G. Making waves in the stream of consciousness: entraining oscillations in EEG alpha and fluctuations in visual awareness with rhythmic visual stimulation. *Journal of cognitive neuroscience*. 2012. vol. 24. no.12. P. 2321–2333. DOI: 10.1162/jocn_a_00288.
5. Haegens S., Golumbic E.Z. Rhythmic facilitation of sensory processing: a critical review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2018. vol. 86. P. 150–165. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2017.12.002.
6. Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А. Спектральные характеристики тета-ритма ЭЭГ при интеллектуальной деятельности у студентов с разной степенью навязывания ритма световых мельканий // Тюменский медицинский журнал. 2017. Т. 19. № 3. С. 51–54.
7. Başar E. A review of alpha activity in integrative brain function: fundamental physiology, sensory coding, cognition and pathology. *International Journal of Psychophysiology*. 2012. vol. 86. no. 1. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2012.07.002.
8. Джебраилова Т.Д., Коробейникова И.И., Каратыгин Н.А., Дудник Е.Н. Динамика параметров альфа-активности ЭЭГ и вариабельности сердечного ритма при интеллектуальной деятельности // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 4. С. 1–13. DOI: 10.7868/S0131164615040074.
9. Yu X., Zhang J., Xie D., Zhang C. Relationship between scalp potential and autonomic nervous activity during a mental arithmetic task. *Autonomic Neuroscience*. 2009. vol. 146. no.1–2. P. 81–86. DOI: 10.1016/j.autneu.2008.12.005.
10. Waselius T., Wikgren J., Halkola H., Penttonen M., Nokia M.S. Learning by heart: cardiac cycle reveals an effective time window for learning. *Journal of neurophysiology*. 2018. vol. 120. no. 2. P. 830–838. DOI: 10.1152/jn.00128.2018.
11. Wittevrongel B., Khachatryan E., Hnazaee M.F., Carrette E., De Taeye L., Meurs A., Boon P., Van Roost D., Van Hulle M.M. Representation of steady-state visual evoked potentials elicited by luminance flicker in human occipital cortex: An electrocorticography study. *NeuroImage*. 2018. vol. 175. P. 315–326. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.04.006.
12. Bondar A., Shubina L. Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs. *Brain research bulletin*. 2018. vol. 143. P. 73–82. DOI: 10.1016/j.brainresbull.2018.10.002.
13. Singh N., Aggarwal Y., Sinha R.K. Heart rate variability analysis under varied task difficulties in mental arithmetic performance. *Health and Technology*. 2018. P. 1–11. DOI: 10.1007/s12553-018-0272-0.
14. Alaimo A., Esposito A., Orlando C., Tesoriere G. A Pilot mental workload case study in a Full Flight Simulator. *Aerospaciale Missili & Spazio*. 2018. vol.97. no.1. P. 27–33. DOI: 10.1007/BF03404762.
15. Wang X., Liu B., Xie L., Yu X., Li M., Zhang J. Cerebral and neural regulation of cardiovascular activity during mental stress. *Biomedical engineering online*. 2016. vol. 15. no. 2. P. 160. DOI: 10.1186/s12938-016-0255-1.