УДК 612.825:612.821.2
DOI 10.34014/2227-1848-2019-1-85-92

ИЗМЕНЕНИЕ ПАТТЕРНА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ У ПРАВШЕЙ И ЛЕВШЕЙ ПРИ ВООБРАЖЕНИИ ДВИЖЕНИЙ

К.А. Моренова, О.А. Ведясова

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева», г. Самара, Россия

e-mail: morenova_ks@mail.ru

Цель работы – анализ изменений паттерна электроэнцефалограммы (ЭЭГ) у правшей и левшей при мысленном представлении движений ведущей и неведущей ног.

Материалы и методы. Обследованы студенты (40 правшей и 20 левшей), профиль моторного доминирования у которых определяли по стандартным тестам. ЭЭГ регистрировали на нейровизоре NVX 36 digital DC EEG по системе «10–20» в покое и при воображении вращательных движений правой, затем левой ногами. Анализировали амплитуду ритмов ЭЭГ стандартных частотных диапазонов, также оценивали коэффициенты межполушарной асимметрии изменений фронтальных и центральных альфа- и бета1-ритмов как ЭЭГ-коррелятов воображаемой деятельности.

Результаты. Воображение движений вызывало снижение амплитуды альфа-, бета1-, тета- и дельта-ритмов на ЭЭГ у всех испытуемых, при этом выраженность наблюдаемых изменений у правшей и левшей различалась в симметричных отведениях. Что касается фронтального и центрального альфа- и бета1-ритмов, маркирующих изменения паттерна ЭЭГ при представлении движений, то у правшей уровень их депрессии в симметричных корковых областях существенно зависел от воображаемого использования ведущей и неведущей ног и доминировал в левом или правом полушариях соответственно. У левшей изменения альфа- и бета1-волн при мысленных движениях ведущей и неведущей ног значимо не различались и в обоих случаях доминировали в правой гемисфере.

Выводы. Внутри- и межполушарная динамика паттерна ЭЭГ в процессе формирования замысла и программы сложных двигательных актов ногами у левшей является альтернативной по сравнению с правшами.

Ключевые слова: *ЭЭГ, альфа-ритм, бета1-ритм, воображаемые движения ног, межполушарная асимметрия, правши, левши.*

Введение. В настоящее время значительно возрос интерес к нейронным механизмам и электрофизиологическим коррелятам моторной деятельности человека, в частности к особенностям ЭЭГ при мысленном представлении различных двигательных актов. Изучение паттернов ЭЭГ при воображаемых движениях актуально в плане решения проблемы нейрокомпьютерных интерфейсов [1], а также важно для понимания причин двигательных расстройств центрального генеза и выбора стратегии их коррекции [2, 3]. Успешное решение этих задач требует детального изучения нейрофизиологических основ двигательных функций с применением анализа ЭЭГ-коррелятов движений у людей, в т.ч. с учетом их индивидуальных эндофенотипов. Среди последних важнейшим является тип функциональной межполушарной асимметрии, который определяет не только индивидуальный профиль моторного доминирования, но и характер внутрицентральных взаимодействий в процессе планирования и реализации двигательных актов [4, 5]. В первую очередь об этом свидетельствуют ЭЭГ-корреляты движений рук. Например, показано, что у правшей и левшей при воображении действий руками имеются различия в изменениях частоты и амплитуды мю-ритма в париетальных и фронтальных отведениях правого и левого больших полушарий [6]. Установлена неодинаковая связь между характером пространственно-временной организации ритмов ЭЭГ альфа- и тета-диапазонов и уровнем

межполушарной когерентности ЭЭГ в симметричных центральных отведениях у правшей и левшей при использовании ведущей и неведущей рук [7]. Что касается динамики ритмов ЭЭГ при реальных и воображаемых движениях ног у представителей с разными профилями моторного доминирования, то этот вопрос, от решения которого зависит понимание многих теоретических и клинических аспектов двигательной асимметрии, до сих пор остается практически не изученным.

Цель исследования. Проанализировать изменения паттерна ЭЭГ у правшей и левшей при мысленном представлении движений ведущей и неведущей ног.

Материалы и методы. Исследование проведено на 60 студентах (юношах и девушках) в возрасте 18–23 лет, подписавших добровольное информированное согласие на участие в эксперименте. Индивидуальный профиль моторного доминирования устанавливали по результатам тестов на определение ведущей руки и ноги [7]. В группу правшей были включены испытуемые со значениями коэффициентов праворукости/правоногости более 15 % (n=40), в группу левшей – с коэффициентами менее -15 % (n=20).

Для регистрации ЭЭГ использовали нейровизор NVX 36 digital DC EEG, шлем-сетку и набор электродов, располагаемых по системе «10–20». Референтный (объединенный ушной) электрод закрепляли на мочке правого уха. Испытуемые в процессе электроэнцефалографии размещались в удобном кресле с закрытыми глазами в темной звукоизолированной комнате. ЭЭГ записывали в следующем порядке: в покое (20 с), при мысленном представлении движения (вращение педали велосипеда) сначала правой, затем левой ногами. Двигательные задания выполнялись по звуковой команде в течение 5 с каждое, интервал между заданиями составлял 10 с. Анализировали изменения амплитуды (мкВ) ритмов ЭЭГ стандартных частотных диапазонов: альфа (8–13 Гц), бета1 (13–22 Гц), тета (4–8 Гц), дельта (0,3–4 Гц). Отводимые сигналы обрабатывались автоматически с помощью быстрых преобразований Фурье. Дополнительно рассчитывали коэффициенты межполушарной асимметрии (КМА) изменений амплитуды альфа- и бета1-ритмов при воображении движений правой и левой ног:

$$КМА = \frac{(А_{пок} - А_{вд})_{ЛП} - (А_{пок} - А_{вд})_{ПП}}{(А_{пок} - А_{вд})_{ЛП} + (А_{пок} - А_{вд})_{ПП}} \times 100\ \%,$$

где ($А_{пок} – А_{вд}$) – разность между значениями амплитуды ритмов ЭЭГ в левом (ЛП) и правом (ПП) больших полушариях в покое ($А_{пок}$) и при воображении движения ($А_{вд}$).

Для статистической обработки применяли программный пакет SigmaPlot 12.5 (Systat Incorporated, USA). Полученные данные представляли в виде средних арифметических значений и их ошибок. Нормальность распределения выборок оценивали по методу Шапиро–Уилка, достоверность изменений амплитуды ритмов ЭЭГ определяли с помощью t-теста. Статистически значимыми считали различия с уровнем $p<0,05$.

Результаты и обсуждение. Анализ изменений паттерна ЭЭГ в процессе воображения движений ногами выявил у всех испытуемых снижение амплитуды альфа-, бета1-, тета- и дельта-волн в большинстве отведений. При этом закономерный интерес в плане понимания механизмов активации мозга при воображаемых движениях вызывает динамика ритмов ЭЭГ более высоких частот. Согласно литературным данным, одним из электрофизиологических коррелятов воображения и выполнения движений может служить активация сенсомоторных корковых зон, оцениваемая по реакции десинхронизации/синхронизации альфа- и бета1-ритмов во фронтальных и центральных отведениях [8–10]. У обследованных нами правшей и левшей мысленные движения правой и левой ног сопровождались десинхронизацией альфа- и бета1-ритмов как в отведениях F3, F4, так и C3, C4. Выраженность наблюдаемых изменений различалась у лиц с правым и левым профилями моторного доминирования (табл. 1).

У правшей более выраженная десинхронизация альфа-ритма отмечалась в центральных зонах коры, причем особенно заметно в отведении C3 доминирующего левого полушария, где амплитуда уменьшалась на 12,44±0,96 мкВ ($p<0,001$) при воображении движения правой и на 11,92±0,76 мкВ

(p<0,001) – левой ногой. Во фронтальных зонах у правшей изменения альфа-ритма были несколько слабее, но при этом в большей мере зависели от латерализации воображаемого движения: в случае ведущей ноги амплитуда ритма сильнее снижалась в ипсилатеральном (F3), а в случае неведущей – в контралатеральном (F4) полушарии (рис. 1А).

Таблица 1

Изменение амплитуды альфа- и бета1-ритмов во фронтальных и центральных отведениях у студентов при воображении движений, % от покоя

Ритм ЭЭГ	Действие	Правши				Левши			
		F3	F4	C3	C4	F3	F4	C3	C4
Альфа	ВДПН	-18,6 *	-13,6 *	-24,3 ***	-17,3 **	-4,8	-10,7	-28,7 ***	-29,7 ***
	ВДЛН	-12,7 *	-18,3 *	-23,3 ***	-17,1 **	-0,2	-4,4	-16,1 *	-12,4 *
Бета1	ВДПН	-38,9 ***	-44,9 ***	-29,6 ***	-32,0 ***	-32,2 ***	-39,6 ***	4,0	5,6
	ВДЛН	-26,9 ***	-14,8 ***	-11,0 *	-14,6 *	-55,2 ***	-62,2 ***	2,5	9,6

Примечания: 1. ВДПН – воображаемое движение правой ноги, ВДЛН – воображаемое движение левой ноги. 2. * – p<0,05; ** – p<0,01; *** – p<0,001 – статистически значимые различия по сравнению с покоем.

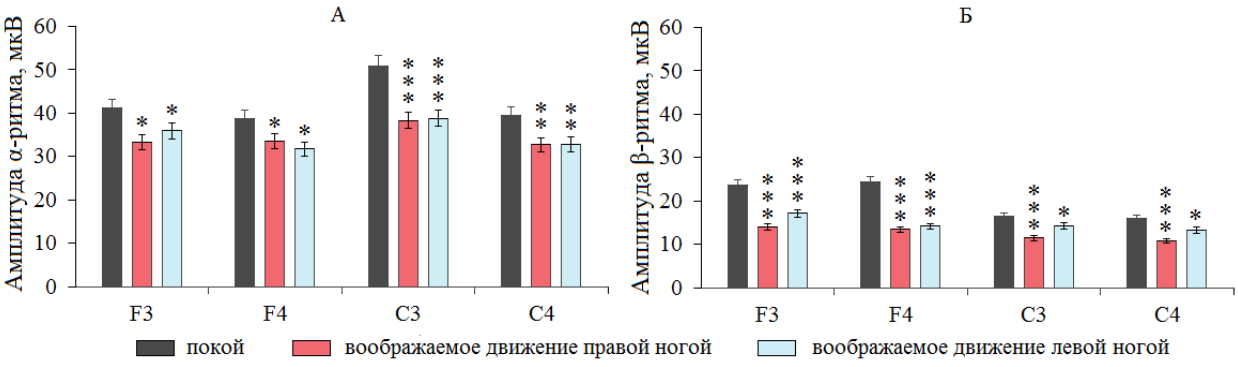

Рис. 1. Изменение амплитуды (мкВ) альфа- (А) и бета1- (Б) ритмов у правшей при мысленных движениях ног
(* – p<0,05; ** – p<0,01; *** – p<0,001 – статистически значимые различия по сравнению с покоем)

Бета1-ритм у правшей при воображаемой деятельности, напротив, более выраженно угнетался во фронтальных отведениях (табл. 1). Представление движения правой ноги снижало амплитуду бета1-волн в F3 и F4 в среднем на 10,38±0,75 мкВ (p<0,001) относительно покоя, а левой – на 6,53±0,69 мкВ (p<0,001) в левом (F3) и 10,35±0,61 мкВ (p<0,001) в правом (F4) полушариях мозга. В центральных отведениях (C3, C4) более существенное подавление бета1-ритма у правшей отмечалось в случае воображения движения ведущей ноги, при этом снижение амплитуды составляло в среднем 5,15±0,39 мкВ (p<0,001) в обеих гемисферах (рис. 1Б).

У левшей динамика альфа- и бета1-ритмов при мысленных движениях была менее закономерной (табл. 1). У них отмечалась депрессия центрального альфа-ритма (рис. 2А), причем сильнее при воображении движения неведущей (правой) ноги, когда амплитуда одинаково снижалась в обеих гемисферах

(С3, С4) в среднем на 17,84±2,47 мкВ ($p<0,001$) от уровня покоя. Во фронтальных отведениях значимых изменений альфа-ритма у левшей не наблюдалось, однако здесь имело место угнетение бета1-волн. Особенно заметно (на 10,36±0,87 мкВ; $p<0,001$) бета-волны снижались в ведущем полушарии (F4) при воображении движения левой ноги. Паттерн центрального бета1-ритма у левшей значимо не менялся (рис. 2Б).

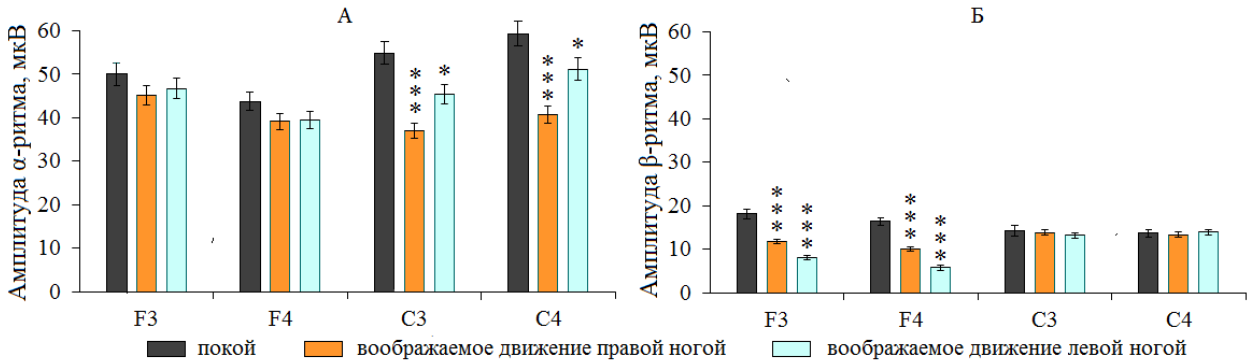

Рис. 2. Изменение амплитуды (мкВ) альфа- (А) и бета1- (Б) ритмов у левшей при мысленных движениях ног
(* – $p<0,05$; *** – $p<0,001$ – статистически значимые различия по сравнению с покоем)

Что касается низкочастотных ритмов, то у правшей в покое амплитуда тета- и дельта-волн в разных отведениях одного полушария и в симметричных право- и левосторонних зонах была примерно одинаковой. Во время воображения движений выраженность изменений указанных ритмов несколько различалась слева и справа, но при этом не зависела от латерализации представляемого действия. Усредненная по всем отведениям амплитуда дельта-волн уменьшалась по сравнению с покоем на 56,7 % ($p<0,001$) и 33,8 % ($p<0,05$), тета-волн – на 29,4 % ($p<0,05$) и 44,1 % ($p<0,01$) слева и справа соответственно. У левшей, напротив, имела место исходная межполушарная асимметрия низкочастотной ЭЭГ-активности: амплитуда тета- и дельта-ритмов в правом полушарии была в среднем на 17,9 % ($p<0,05$) больше, чем в левом. При мысленных движениях ведущей и неведущей ног значимого ослабления этих ритмов у левшей не наблюдалось, причем более стабильными у них оказались тета-волны.

О вкладе симметричных зон коры в механизмы представления действий ног судили по значениям КМА, которые рассчитывали по изменениям амплитуды альфа- и бета1-волн. У правшей в большинстве взятых для анализа билатеральных отведений значения КМА достоверно различались при мысленных движениях правой и левой ног (табл. 2). Так, во фронтальных отведениях при воображении движения ведущей (правой) ноги КМА изменений альфа-ритма составлял 43,61 (отражает больший вклад левой гемисферы в моторную деятельность), а при воображении движения неведущей (левой) ноги происходила инверсия межполушарной асимметрии (КМА= -29,67), свидетельствующая о смещении фокуса активности в правую гемисферу. В центральных отведениях КМА изменений альфа-ритма при воображении движений ведущей и неведущей ног у правшей достоверно не различались. Межполушарная асимметрия бета1-ритма у этих студентов формировалась за счет доминирования изменений справа. Во фронтальных отведениях при воображении движения ведущей ноги КМА был равен -5,90, а во время воображения движения неведущей ноги КМА снижался до -37,24, т.е. происходило усиление правосторонней асимметрии. У левшей в большинстве случаев КМА имели отрицательные значения, существенных различий между КМА в процессе воображения движений ведущей и неведущей ног не наблюдалось, что в целом свидетельствует о большей роли правой гемисферы в организации двигательных актов.

Таблица 2

Значения КМА изменений амплитуды альфа- и бета1-ритмов в билатеральных фронтальных и центральных отведениях у правшей и левшей при воображении движений

Ритм ЭЭГ	Состояние	Правши		Левши	
		F3–F4	C3–C4	F3–F4	C3–C4
Альфа	ВДПН	43,61	23,46	-28,99	-28,84
	ВДЛН	-29,67 ***	27,11	-9,13	68,01
Бета1	ВДПН	-5,90	-12,56	-12,68	-22,46
	ВДЛН	-37,24 **	-68,43 *	-7,09	-44,78

Примечание. * – p<0,05; ** – p<0,01; *** – p<0,001 – статистически значимые различия между КМА при ВДПН и ВДЛН.

Обобщая полученные результаты, отметим, что наиболее типичной особенностью паттерна ЭЭГ при представлении движений ног у правшей и левшей была десинхронизация сенсомоторного альфа-ритма, что согласуется с данными других исследователей и может объясняться связью депрессии альфа-волн с активацией областей коры, отвечающих за подготовку и программирование движения [11]. Некоторые авторы рассматривают подавление центрального альфа-ритма как электрофизиологический показатель кинестетического воображения движений, а не зрительного, при котором угнетения альфа-волн не наблюдается [1]. Еще одним эффектом, характерным для всех испытуемых при мысленных движениях ног, был более высокий уровень депрессии бета1-ритма во фронтальных отведениях по сравнению с центральными. Это совпадает с данными об изменениях ЭЭГ при воображаемых движениях рук и, видимо, связано с тем, что моторная (центральная) область мозговой коры отвечает преимущественно за фактическую реализацию двигательных актов и при воображаемом движении, не подкрепленном реальным действием, активизируется слабее, чем управляющая (фронтальная) область [12].

Следует остановиться на различиях в паттернах ЭЭГ при воображении движений у правшей и левшей. В этом плане обращает на себя внимание тот факт, что у правшей мысленные движения ведущей и неведущей ног сопровождались депрессией альфа- и бета1-ритмов во фронтальных и центральных отведениях, тогда как у левшей альфа-ритм менялся преимущественно в центральных, а бета1-ритм – во фронтальных отведениях. То есть можно полагать, что динамическая кортикальная нейронная сеть, обеспечивающая мысленные двигательные манипуляции [13], у правшей кооперирована с моторными и сенсомоторными зонами теснее, чем у левшей. Кроме того, у правшей изменения высокочастотных ритмов ЭЭГ в правом и левом полушариях отличались большей асимметрией, чем у левшей. В частности, при воображении движения правой и левой ног у правшей в центральных областях коры головного мозга наблюдалось смещение фокуса изменений альфа-ритма в левое полушарие. Такая картина соответствует данным о том, что депрессия альфа-ритма наблюдается в корковой зоне, максимально вовлеченной в выполнение определенной задачи [14], отражает четкое моторное доминирование левого полушария и наличие внутриполушарных изменений и конкурентных межполушарных отношений у правшей [7].

У левшей, наоборот, выраженность изменений альфа и бета1-ритмов в право- и левосторонних отведениях была, как правило, одинаковой. Это может объясняться развитыми взаимодействиями между полушариями [15], меньшей их специализацией и большей степенью синхронизации активности симметричных корковых зон [4] у лиц с доминированием правой гемисферы. В качестве от-

личительной особенности ЭЭГ у левшей при мысленных движениях ног также следует отметить относительную стабильность амплитуды тета-ритма, генератором которого является диффузная тета-система, входящая в морфофункциональный субстрат эмоций [16]. Сохранность тета-волн позволяет считать, что воображаемая двигательная деятельность у правополушарных лиц сопровождается более выраженным эмоциональным компонентом и, соответственно, более мощной активацией корковых и подкорковых лимбических структур, чем у левополушарных испытуемых.

Заключение. Анализ ЭЭГ-коррелятов воображаемых двигательных актов свидетельствует, что характер функциональных взаимоотношений между симметричными структурами головного мозга и вклад правого и левого полушарий в управление мысленными движениями ведущей и неведущей ног различаются у правшей и левшей. С учетом динамики альфа- и бета1-ритмов можно утверждать, что степень внутри- и межполушарной интеграции моторных и сенсомоторных корковых зон в механизмы формирования замысла и программы сложных движений ног у правшей выше, чем у левшей.

Литература

1. *Фролов А.А., Федотова И.Р., Гусек Д., Бобров П.Д.* Ритмическая активность мозга и интерфейс «мозг-компьютер», основанный на воображении движений. Успехи физиологических наук. 2017; 48 (3): 72–91.
2. *Kaplan F.Y.* Neurophysiological foundations and practical realizations of the brain-machine interfaces in the technology in neurological rehabilitation. Human physiology. 2016; 42 (1): 103–110.
3. *Котов С.В., Турбина Л.Г., Бобров П.Д., Фролов А.А., Павлова О.Г., Курганская М.Е., Бирюкова Е.В.* Применение комплекса «интерфейс «мозг-компьютер» и экзоскелет» и техники воображения движения для реабилитации после инсульта. Альманах клинической медицины. 2015; 39: 15–21.
4. *Жаворонкова Л.А.* Правши и левши: особенности межполушарной асимметрии мозга и параметров когерентности ЭЭГ. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2007; 57 (6): 545–662.
5. *Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Сергеева М.С., Захаров А.В., Антипов О.И., Коровина Е.С., Тюрин Н.Л., Глазкова Е.Н.* Информационные возможности использования мю- и бета-ритмов ЭЭГ доминантного полушария в конструировании нейрокомпьютерного интерфейса. Фундаментальные исследования. 2015; 2–5: 975–978.
6. *Маркина Л.Д., Баркар А.А.* Межполушарная асимметрия головного мозга: морфологический и физиологический аспекты. Тихоокеанский медицинский журнал. 2014; 1: 66–70.
7. *Жаворонкова Л.А.* Правши – левши: межполушарная асимметрия электрической активности мозга человека. М.: Наука; 2006. 222.
8. *Аликина М.А., Махин С.А., Павленко В.Б.* Сравнение эффектов реактивности сенсомоторного ритма ЭЭГ в условиях синхронной имитации биологического и небиологического движений. Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2017; 3 (4): 3–12.
9. *Hari R., Forss N., Avikainen S., Kirveskari E., Salenius S., Rizzolatti G.* Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1998; 95: 15061–15095.
10. *Pfurtscheller G., Brunner C., Schlögl A., Lopes da Silva F.H.* Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. NeuroImage. 2006; 31: 153–159.
11. *Александров А.А., Тугин С.М.* Изменения μ-ритма при различных формах двигательной активности и наблюдении движений. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2010; 96 (11): 46–54.
12. *Лазуренко Д.М., Кирой В.Н., Асланян Е.В., Шепелев И.Е., Бахтин О.М., Миняева Н.Р.* Электрографические характеристики связанных с движениями потенциалов. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2017; 67 (4): 430–444.
13. *Sasaoka T., Mizuhara H., Inui T.* Dynamic parieto-premotor network for mental image transformation revealed by simultaneous EEG and fMRI measurement. J. Cogn. Neurosci. 2014; 26 (2): 232–246.

14. *Klimesch W.* Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. Trends Cogn. Sci. 2012; 16 (12): 606–617.
15. *Лукоянов М.В., Крылов В.Н.* Когерентность ЭЭГ при пассивном восприятии линий с различным углом наклона у левшей и правшей. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012, 5: 135–139.
16. *Demiralp T., Basar-Eroglu C.* Theta rhythmicities following expected visual and auditory targets. Int. J. Psychophysiol. 1992; 13: 147–160.

CHANGES IN ELECTROENCEPHALOGRAM PATTERN IN RIGHT- AND LEFT-HANDERS DURING IMAGINARY MOVEMENTS

K.A. Morenova, O.A. Vedyasova

Samara National Research University named after S.P. Korolev, Samara, Russia

e-mail: morenova_ks@mail.ru

The objective of the paper is to analyze changes in electroencephalogram (EEG) pattern in right- and left-handers during imaginary movements of leading and non-leading legs.
Materials and Methods. The authors examined 40 right-handers and 20 left-handers, whose motor domination profile was determined by standard tests. EEGs were recorded at rest and during imaginary rotational movements of the right and left legs. NVX 36 digital DC EEG neurovisor, "10–20" system, was used for this perpose. The authors also analyzed the amplitude of the EEG rhythms (standard frequency ranges), evaluated changes in hemispheric asymmetry coefficients of frontal and central alpha and beta1 rhythms as EEG correlates of imaginary activity.
Results. Imaginary movements caused a decrease in the amplitude of alpha, beta1, theta and delta rhythms on EEG in all trial subjects. The intensity of observed changes in right- and left-handers differed in symmetrical leads. As for frontal and central alpha and beta1 rhythms, which marked changes in the EEG pattern during imaginary movements, right-handers demonstrated that their depression level in symmetric cortical areas depended significantly on the imaginary movements of leading and non-leading legs and dominated in left or right hemispheres, respectively. For left-handers, changes in alpha and beta1 waves during imaginary movements of leading and non-leading legs did not differ significantly and in both cases dominated in the right hemisphere.
Conclusion. Thus, the intra- and inter-hemispheric dynamics of the EEG pattern, while forming the concept and program of complex motor leg actions in left-handers, is alternative in comparison to right-handers.

Keywords: *EEG, alpha rhythm, beta1 rhythm, imaginary leg movements, hemispheric asymmetry, right-handers, left-handers.*

References

1. Frolov A.A., Fedotova I.R., Gusek D., Bobrov P.D. Ritmicheskaya aktivnost' mozga i interfeys «mozg-komp'yuter», osnovannyy na voobrazhenii dvizheniy [Rhythmic brain activity and brain computer interface based on imaginary movements]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk*. 2017; 48 (3): 72–91 (in Russian).
2. Kaplan F.Y. Neurophysiological foundations and practical realizations of the brain-machine interfaces in the technology in neurological rehabilitation. *Human physiology.* 2016; 42 (1): 103–110.
3. Kotov S.V., Turbina L.G., Bobrov P.D., Frolov A.A., Pavlova O.G. Kurganskaya M.E., Biryukova E.V. Primenenie kompleksa «interfeys «mozg-komp'yuter» i ekzoskelet» i tekhniki voobrazheniya dvizheniya dlya reabilitatsii posle insul'ta [The use of a complex "brain-computer interface and exo-skeleton" and movement imagination technique for post-stroke rehabilitation]. *Al'manakh klinicheskoy meditsiny.* 2015; 39: 15–21 (in Russian).
4. Zhavoronkova L.A. Pravshi i levshi: osobennosti mezhpolusharnoy asimmetrii mozga i parametrov kogerentnosti EEG [Right- and left-handers: inter-hemispheric brain asymmetry and EEG coherence parameters]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I.P. Pavlova.* 2007; 57 (6): 545–662.
5. Pyatin V.F., Kolsanov A.V., Sergeeva M.S., Zakharov A.V., Antipov O.I., Korovina E.S., Tyurin N.L., Glazkova E.N. Informatsionnye vozmozhnosti ispol'zovaniya myu- i beta-ritmov EEG dominantnogo

polushariya v konstruirovanii neyrokomp'yuternogo interfeysa [Information possibilities of using dominant hemisphere EEG mu- and beta-rhythms in neurocomputer interface]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015; 2–5: 975–978 (in Russian).

6. Markina L.D., Barkar A.A. Mezhpolusharnaya asimmetriya golovnogo mozga: morfologicheskiy i fiziologicheskiy aspekty [Inter-hemispheric brain asymmetry: morphological and physiological aspects]. *Tikhookeanskiy meditsinskiy zhurnal.* 2014; 1: 66–70 (in Russian).
7. Zhavoronkova L.A. *Pravshi – levshi: mezhpolusharnaya asimmetriya elektricheskoy aktivnosti mozga cheloveka* [Right- and left-handers: hemispheric asymmetry of the human brain electrical activity]. Moscow: Nauka; 2006. 222 (in Russian).
8. Alikina M.A., Makhin S.A., Pavlenko V.B. Sravnenie effektov reaktivnosti sensomotornogo ritma EEG v usloviyakh sinkhronnoy imitatsii biologicheskogo i nebiologicheskogo dvizheniy [Comparison of reactivity effects of EEG sensorimotor rhythm under simultaneous imitation of biological and non-biological movements]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya.* 2017; 3 (4): 3–12 (in Russian).
9. Hari R., Forss N., Avikainen S., Kirveskari E., Salenius S., Rizzolatti G. Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1998; 95: 15061–15095.
10. Pfurtscheller G., Brunner C., Schlögl A., Lopes da Silva F.H. Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. *NeuroImage.* 2006; 31: 153–159.
11. Aleksandrov A.A., Tugin S.M. Izmeneniya μ-ritma pri razlichnykh formakh dvigatel'noy aktivnosti i nablyudenii dvizheniy [Changes in μ-rhythm under various forms of motor activity and movement assessment]. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I.M. Sechenova.* 2010; 96 (11): 46–54 (in Russian).
12. Lazurenko D.M., Kiroy V.N., Aslanyan E.V., Shepelev I.E., Bakhtin O.M., Minyaeva N.R. Elektrograficheskie kharakteristiki svyazannykh s dvizheniyami potentsialov [Electrographic characteristics of movement-related potentials]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I.P. Pavlova.* 2017; 67 (4): 430–444 (in Russian).
13. Sasaoka T., Mizuhara H., Inui T. Dynamic parieto-premotor network for mental image transformation revealed by simultaneous EEG and fMRI measurement. *J. Cogn. Neurosci.* 2014; 26 (2): 232–246.
14. Klimesch W. Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends Cogn. Sci.* 2012; 16 (12): 606–617.
15. Lukoyanov M.V., Krylov V.N. Kogerentnost' EEG pri passivnom vospriyatii liniy s razlichnym uglom naklona u levshey i pravshey [EEG coherence with passive perception of lines with different angles of inclination for left-handers and right-handers]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo.* 2012, 5: 135–139 (in Russian).
16. Demiralp T., Basar-Eroglu C. Theta rhythmicities following expected visual and auditory targets. *Int. J. Psychophysiol.* 1992; 13: 147–160.