

*Е.В. Асланян, В.Н. Кирой, Д.М. Лазуренко, Н.Р. Миняева,
О.М. Бахтин*

ОСОБЕННОСТИ МЕЖПОЛУШАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ БЕТА-2- АКТИВНОСТЬЮ ЛОБНЫХ ОБЛАСТЕЙ

НИИ нейрокибернетики ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия

A.B.Kogan Research Institute for Neurocybernetics Southern Federal University,
Rostov-on-Don, Russia

ОСОБЕННОСТИ МЕЖПОЛУШАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ БЕТА-2-АКТИВНОСТЬЮ ЛОБНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Е.В. Асланян, В.Н. Кирой, Д.М. Лазуренко, Н.Р. Миняева, О.М. Бахтин

С использованием процедуры БОС-тренинга 17 добровольцев (средний возраст $20,3 \pm 1,3$ года) обучали произвольно увеличивать мощность бета-2-частот в лобных областях одного из полушарий. За 12 тренингов эффективность обучения составила 76,5% для правого полушария (ППС) и 52,9% – для левого (ЛПС). Дисперсионный анализ показал, что особенности межполушарных отношений на частотах до 20 Гц отражают формирование функционального состояния, оптимального для конкретного вида когнитивной деятельности, тогда как специфика самой деятельности проявляется на более высоких частотах. В зависимости от условий сценария БОС-тренинга успешное управление имело место при параллельном увеличении мощности и усилении доминирования тренируемого полушария (левого – для ЛПС и правого – для ППС), причем, не только в тренируемых, но и в других областях данного полушария. Наличие парциального доминирования в пределах передних и задних областей коры снижало эффективность управления даже при наличии однонаправленных изменений спектральной мощности ЭЭГ

Ключевые слова: БОС-тренинг, межполушарные отношения, бета-2-активность, коэффициент асимметрии

SPECIFIC FEATURES OF INTERHEMISPHERIC RELATIONS UNDER VOLUNTARY BETA-2 ACTIVITY CONTROL IN THE FRONTAL LOBES

Y. Aslanyan, V. Kiroy, D. Lazurenko, N. Minyayeva, O. Bakhtin

17 volunteers (average age of $20,3 \pm 1,3$ years) underwent training featuring biofeedback procedure to voluntarily increase the power of the beta-2 frequencies in the frontal lobe of one of the hemispheres. Over 12 sessions, the efficiency of training was 76.5% for the right hemisphere (RHS) and 52.9% for the left hemisphere (LHS). Dispersion analysis has demonstrated that specific features of interhemispheric relations on frequencies up to 20 Hz reflect the forming of a functional state optimal for a specific type of cognitive activity while the specific features of the activity itself manifest themselves on higher frequencies. Depending on the biofeedback training scenario conditions, successful control was present in parallel increasing of spectral power and the dominance of the hemisphere in training (the left one for LHS, and the right one for RHS), which is, in fact, relevant not only to the lobes in training but also for other lobes of the hemisphere in training. The presence of partial dominance within the frontal and the lateral lobes caused a decrease in the efficiency of control even when co-oriented changes in EEG spectral power is present.

Key words: biofeedback training, interhemispheric relations, beta-2 activity, skewness.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18454/ASY.2016.10.3549>

Одним из актуальных направлений исследований и разработок, проводимых в последние десятилетия, является создание так называемых интерфейсов мозг-компьютер (ИМК или Brain-Computer-Interface – BCI), позволяющих человеку управлять внешними устройствами с помощью произвольно генерируемых биоэлектрических паттернов, в частности, на основе ЭЭГ. Главное направление использования таких систем – это социально-психологическая реабилитация парализованных больных, утративших естественные каналы управления и коммуникации, но обладающих сохранным интеллектом (Cunhan, Stokes, 2003, Dornhege et al., 2007). В настоящее время на основе этой технологии предпринимаются попытки создания нового поколения компьютерных игр, специальных систем для лиц, работающих в особых условиях, в частности, с целью расширения каналов приема информации и управления различными техническими устройствами при работе в космосе.

Одной из проблем при создании подобного рода систем является обнаружение специфических электрографических паттернов, пригодных для использования в качестве управляющих команд. Эти паттерны должны быть достаточно короткими (до 200 мс), иметь устойчивую структуру и поддаваться

выделению в режиме реального времени. Кроме того, для успешного управления требуется не менее 5-6 таких паттернов, которые должны устойчиво генерироваться человеком в произвольные моменты времени.

В настоящее время существует достаточно большое количество BCI-систем, как инвазивных, так и неинвазивных, использующих для управления различные электрографические паттерны, начиная от импульсной активности отдельных нейронов или их групп и заканчивая ЭЭГ и ВП (см. обзор Кирой, 2011). К сожалению, эффективность работы этих систем недостаточно высока, поэтому поиск новых паттернов, потенциально пригодных для управления, продолжается и в настоящее время.

Не менее важным фактором является доступность и низкая стоимость процедуры регистрации подобных паттернов. Наиболее полно всем перечисленным требованиям соответствует ЭЭГ. Несмотря на то, что эволюционно ЭЭГ не предназначалась для произвольного управления, показало, что человек способен целенаправленно изменять характеристики тета- (Reiner et al., 2014), альфа- (Frederick, 2012), бета- (Gruzelier, 2014) и гамма- (Keizer et al., 2010) активности собственного мозга. Эти данные были получены с использованием технологии биологической обратной связи (БОС

или biofeedback) на основе ЭЭГ. Эта технология давно и успешно используется в клинической и спортивной медицине (Кучкин, 1998, Федотчев, Ким, 2009, Горбачев, 2011).

Еще одной из задач, решаемых при создании ВСИ-систем, является обучение потенциальных пользователей произвольной генерации паттернов ЭЭГ. Для этого используется технология БОС. При организации БОС-тренинга по управлению активностью собственного мозга используют, как правило, различные мысленные представления. Эффективность тренинга оценивают по величине контролируемых параметров ЭЭГ, которая представляется респонденту, как правило, в виде управления каким-либо внешним объектом (например, перемещением курсора по экрану монитора). Как было показано нами ранее (Aslanyan et al., 2015, Kirov et al., 2016), мысленные представления являются достаточно сложными когнитивными действиями, которые связаны с системными процессами мозга и затрагивают не только контролируемые, но и соседние области коры и частотные диапазоны, анализ динамики ЭЭГ-показателей которых представляет самостоятельный интерес.

В данной работе предпринята попытка выяснить, как изменяется характер межполушарных отношений различных корковых зон при обучении пользователя произвольному увеличению спектральной мощности бета-2-частот в лобных отведениях только одного из полушарий (правого или левого).

Материалы и методы. В обследовании приняли участие 17 добровольцев (13 девушек и 4 юноши, средний возраст $20,3 \pm 1,3$ года), студенты Южного федерального университета. В соответствии с протоколом, утвержденным комитетом по этике ЮФУ, все участники дали на это свое письменное согласие.

При проведении БОС-тренинга обследуемые располагались в экранированной затемненной камере в кресле в удобной для них позе. Тренинги проводились по 2 сценариям – левополушарному (ЛПС) и правополушарному (ППС) – которые различались контролируемыми параметрами. Во время ЛПС обучаемому требовалось увеличить суммарную спектральную мощность (СпМ) бета-2-частот в лобных отведениях левого ($F3+F7$) полушария. Для этого ему предлагалось выполнять в уме арифметические действия (последовательно вычитать 7 из 1000). Основанием для таких рекомендаций послужили данные об участии лобной коры левого полушария в формировании рабочей памяти, обеспечивающей активное сохранение энграмм, и в решении вербально-логических задач (Volf et al., 2007, Fockert et al., 2001). Во время ППС обучаемому требовалось увеличить СпМ бета-2-частот в лобных отведениях правого полушария ($F4+F8$), для чего ему рекомендовалось представлять эмоционально неприятные (негативные) образы. Основанием для этих рекомендаций послужили данные об участии правой лобной коры в оценке эмоциональной

экспрессии и степени приятности/неприятности объектов (Данилова, 2001, Kayser et al., 1997).

При организации БОС-тренинга и регистрации ЭЭГ использовали реабилитационный психофизиологический комплекс «РЕАКОР» фирмы Медиком МТД (г. Таганрог, Россия). Каждый сценарий включал следующие этапы: фон, по которому рассчитывались стартовые значения контролируемых параметров (КП) (1 мин); инструкцию с предложением способа достижения полезного результата (20 с); собственно управление (4 мин); отдых для предотвращения влияния предыдущего тренинга на последующий (1 мин). В день проводили по одному тренингу, в котором сценарии следовали друг за другом. Всего каждый обследуемый в течение 3 недель участвовал в 12 тренингах. Информация о качестве управления КП во время тренинга предъявлялась на экран монитора, расположенного на расстоянии 1 м на уровне глаз обследуемых, в виде цветного изображения, наполовину закрытого черными квадратами. Указанная степень зашумления соответствовала стартовым значениям КП. Задачей обследуемого являлось полностью избавиться от шума на изображении, увеличив суммарную мощность бета-2-частот в соответствующих отведениях. Для контроля функционального состояния перед началом и после окончания обследования регистрировали ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с открытыми и закрытыми глазами.

Регистрация ЭЭГ осуществлялась непрерывно в течение всего

обследования монополярно от 14 отведений (F3, F4, F7, F8, C3, C4, T3, T4, T5, T6, P3, P4, O1, O2) по системе 10×20 с объединенными референтными электродами, расположенными на мочках ушей. Частота дискретизации сигнала составляла 250 Гц по каждому каналу, полоса пропускания частотных фильтров – 1÷70 Гц. Для удаления сетевой наводки использовался режекторный фильтр 50 Гц.

С целью детального анализа изменений, регистрируемых в ЭЭГ в динамике обучения, на всех этапах отбирались не содержащие артефактов немозгового происхождения 1-секундные эпохи. Для каждой эпохи рассчитывали спектральную мощность в 6 диапазонах частот: тета (4÷7 Гц), альфа (8÷13 Гц), бета-1 (14÷19 Гц), бета-2 (20÷30 Гц), гамма-1 (31÷48 Гц) и гамма-2 (52÷70 Гц). Для каждой пары симметричных отведений в каждом частотном диапазоне определяли доминирующее полушарие. Доминирующим считалось полушарие, в котором спектральная мощность соответствующего частотного диапазона была достоверно выше, чем в симметричном отведении. Коэффициенты асимметрии рассчитывали по формуле: $K_{ас} = (ПП - ЛП) / (ПП + ЛП) \times 100\%$.

Статистическую оценку полученных результатов осуществляли с помощью многофакторного дисперсионного анализа ANOVA/MANOVA, реализованного в пакете прикладных программ Statistica 10. Использовали процедуру повторных измерений

(repeated measures ANOVA) для 2 уровней значимости: при $p \leq 0,05$ различия считались достоверными, при $0,05 < p \leq 0,08$ – существенными (тренд).

Результаты. Анализ персональной динамики КП, проведенный с использованием метода LS linear trend отдельно для каждого сценария, показал, что изменения в разные дни обследований носили нелинейный и индивидуальный характер. Устойчивый рост КП наблюдался не у всех обследуемых, мог начинаться ни с первого тренинга и завершаться раньше окончания всего тренировочного цикла. Учитывая указанные особенности, на кривых трендов выделяли периоды эффективного обучения, внутри которых наблюдалась относительно устойчивая положительная динамика КП. Обучение считалось эффективным, если к концу такого периода значения КП достоверно отличались от величин, зарегистрированных на его начальном этапе в соответствии с условиями сценария.

Согласно проведенному анализу, целенаправленно увеличивать мощность бета-2-частот в ЭЭГ

лобных отведений в рамках ППС успешно обучились 13 человек из 17 (76,5% выборки), а в рамках ЛПС – только 9 (52,9%). Поэтому, для каждого сценария все обследуемые делились на 2 группы: лица, успешно справившиеся с задачами («успешные»), и лица, не научившиеся произвольно управлять активностью собственного мозга в рамках данного сценария («неуспешные»).

Для оценки изменений межполушарных отношений сравнивали между собой СпМ в отведениях правого и левого полушарий на начальном (Н) и конечном (К) этапах периода эффективного обучения, а также анализировали направление изменений Кас к концу обучения, по сравнению с началом (Н-К). Отрицательные значения Кас указывали на доминирование левого полушария, положительные – правого.

Левополушарный сценарий. MANOVA-анализ показал, что у лиц, успешно справившихся с заданием, в начале обучения в целом наблюдалось доминирование правого, а в конце – левого полушария, которое было выражено значительно сильнее (Табл.).

Таблица. Результаты MANOVA-анализа межполушарных отношений в частотном диапазоне 1÷70 Гц (приведены только М.е.)

Состояние	Этап	Успешные				Неуспешные			
		df	F	p	Кас	df	F	p	Кас
ЛПС	Н	1, 2740	4,13	0,042	1,13	1, 1808	4,75	0,029	-1,32
	К	1, 2608	97,28	0,000	-5,83	1, 2470	16,89	0,000	-2,48
ППС	Н	1, 4276	4,95	0,026	-1,03	1, 780	50,89	0,000	5,86
	К	1, 3708	0,33	0,565	0,26	1, 878	5,99	0,014	-2,34

Обозначения: F – критерий Фишера, p – уровень значимости, df (effect, error) – числа степеней свободы, **жирный шрифт** – достоверные различия в СпМ между правым и левым полушариями.

Детализация полученных результатов с помощью однофакторного анализа (breakdown & one-way ANOVA) показала, что в диапазонах тета, альфа, бета-1 и бета-2-частот преимущественно наблюдалось доминирование правого полушария, а гамма-2 – левого (Рис. 1,

«успешные»). К концу обучения у лиц данной группы наблюдалось выраженное доминирование левого полушария, которое на тета- и альфа-частотах наблюдалось только в передних отведениях, а на бета- и гамма- – во всех отведениях.

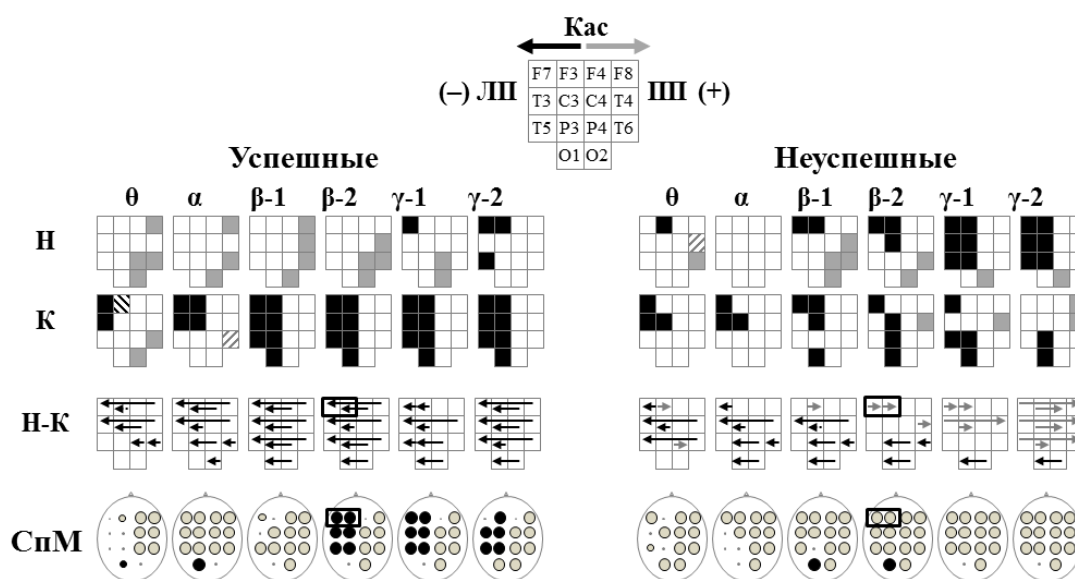


Рис. 1. Результаты ANOVA-анализа межполушарных отношений в начале (Н) и конце (К) периода эффективного обучения в рамках ЛПС, а также изменений Кас (Н-К) и спектральных характеристик (СпМ) в конце этого периода, по сравнению с началом. Обозначения: черные клетки – доминирование левого полушария, серые – правого, сплошная заливка – достоверно, штриховка – тренд; черные стрелки – снижение значений Кас, серые – увеличение, короткие – сохранение доминирования, средние и длинные – смена доминирующего полушария, сплошные стрелки – достоверно, пунктир – тренд; черные круги – рост СпМ, серые – снижение, большие круги – достоверно, малые – тренд; в рамке – КП.

Анализ динамики Кас показал, что на завершающем этапе обучения в рамках ЛПС сценария у группы лиц, успешно справившихся с заданием, практически во всех частотных диапазонах происходило выраженное усиление левополушарного доминирования в большинстве

отведений, как правило, сопровождающееся сменой лидирующего полушария. Однако, качественно сходные изменения Кас, наблюдаемые в разных частотных диапазонах, достигались разными способами. В области тета-, альфа- и бета-1-частот преимущественно

наблюдалось снижение СпМ, более выраженное в отведениях правого полушария. В области бета-2- и гамма-частот – снижение СпМ слева и ее рост – справа. В контролируемых областях (F3 и F7) у лиц, успешно справившихся с заданием, к концу обучения наблюдалось не только усиление СпМ бета-2-частот, но и переход доминирования от правого полушария к левому.

У группы лиц, не справившихся с заданием, уже на начальном этапе обучения регистрировалось доминирование левого полушария (Табл.), особенно в передних областях в диапазонах высоких (бета и гамма) частот (Рис. 1, «неуспешные»). К концу обучения это доминирование в целом несколько усиливалось, но связано это было с появлением левополушарного доминирования в области тета- и альфа-частот (особенно в передних областях) на фоне его некоторого ослабления на гамма-частотах. Анализ динамики Кас показал, что у данной группы лиц к концу обучения происходило усиление доминирования левого

полушария в области низких (тета, альфа, бета-1) и правого – высоких (гамма-1, гамма-2) частот. При этом СпМ практически всех частотных диапазонов в большинстве отведений достоверно снижались. Таким образом, сходные изменения спектральных характеристик, наблюдаемые в разных частотных диапазонах, приводили к разнонаправленным изменениям межполушарных отношений: в контролируемых областях наблюдалось снижение СпМ бета-2-частот и ослабление исходного доминирования левого полушария.

Правополушарный сценарий.

Аналогичный анализ был проведен для ППС. Он показал, что у лиц, успешно справившихся с заданием, на начальном этапе обучения в целом доминировало левое полушарие (Табл.). Это наблюдалось практически во всех областях коры на бета-2- и гамма-частот (Рис. 2). На тета-, альфа- и бета-1-частотах достоверные различия между полушариями наблюдались только для отдельных пар отведений.

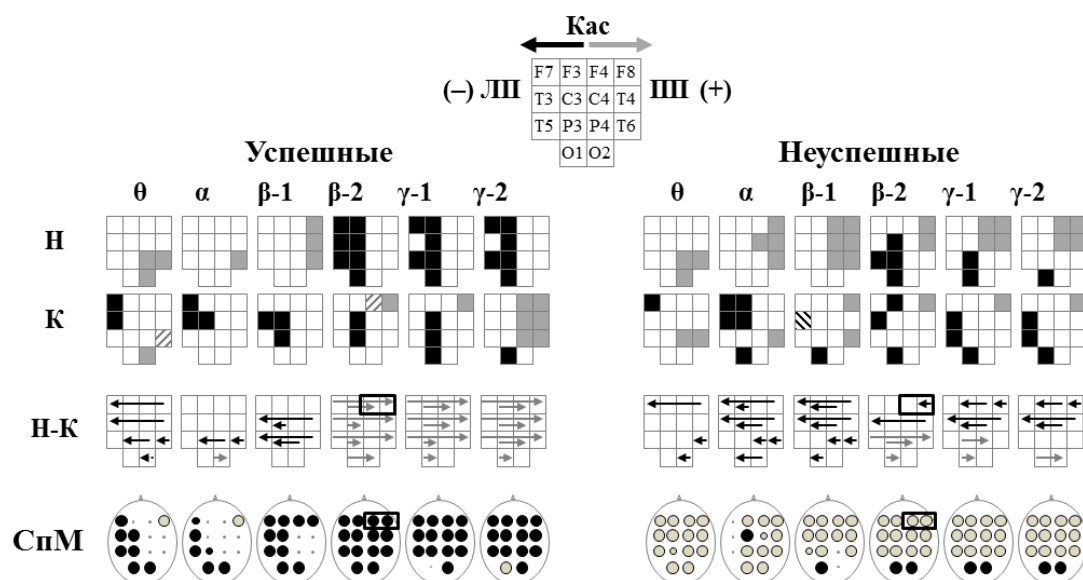


Рис. 2. Результаты ANOVA-анализа межполушарных отношений и СпМ в рамках ППС. Обозначения как на Рис. 1.

К концу периода эффективного обучения у «успешных» лиц в целом наблюдалось ослабление межполушарных различий. Однако детализация полученных результатов, основанная на наличии значимых взаимодействий, показала, что на тета-, альфа- и бета-1-частотах доминировало левое полушарие, а на гамма-2- — правое. Все это было характерно, прежде всего, для передних областей коры. На бета-2- и гамма-1-частотах в передних областях доминировало левое полушарие, а в центральных, теменных и затылочных — правое. Анализ динамики Кас показал, что в области низких (до бета-1 включительно) частот в конце обучения происходило ослабление правополушарного доминирования или его смена левополушарным, а на высоких частотах, напротив, ослабление левополушарного доминирования или его смена правополушарным. К концу обучения спектральный анализ показал существенный рост в ЭЭГ мощности высоких (бета-2, гамма-1, гамма-2)

частот — во всех, а низких (тета, альфа, бета-1) — только в отведениях левого полушария. Таким образом, у «успешных» лиц к концу обучения в контролируемых (F4 и F8) отведениях наблюдался не только рост СпМ бета-2-частот, но и смена исходного левополушарного доминирования на правополушарное.

У лиц, вошедших в группу «неуспешных», на начальном этапе обучения в целом наблюдалось достаточно выраженное правополушарное доминирование, которое на конечном этапе сменялось левополушарным (Табл.). Правополушарное доминирование на начальном этапе обеспечивалось более высокой мощностью, прежде всего, низких (кроме тета) частот в отведениях правого полушария (Рис. 2). В теменно-затылочных областях в диапазоне высоких частот наблюдалось доминирование левого полушария, степени которого снижалась от бета-2- к гамма-2- частотам. На конечном этапе обучения у данной группы лиц, в

основном, наблюдалось парциальное доминирование полушарий в разных отведениях с некоторым преимуществом левого полушария в передних областях на альфа-частотах и в задних областях – на гамма-частотах. Анализ динамики Кас показал, что у лиц, не справившихся с заданием, к концу обучения в передних, центральных и височных областях коры происходило ослабление доминирования правого и усиление – левого полушария, вплоть до смены лидера. В теменных, нижневисочных и затылочных областях в это время наблюдалось ослабление исходного правостороннего доминирования на тета-, альфа- и бета-1-частотах и его усиление – на бета-2- и гамма-частотах. Спектральный анализ показал, что у лиц, вошедших в группу «неуспешных», в конце обучения наблюдалось значительное снижение мощности всех частотных диапазонов во всех (кроме затылочных) отведениях. В контролируемых лобных отведениях правого полушария регистрировалось достоверное снижение СпМ бета-2-частот, но исходное доминирование правого полушария сохранялось, хотя и несколько ослабевало.

Обсуждение. Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что эффективность обучения в рамках ЛПС и ППС была различной: в рамках ППС успешно обучились 76,5%, а ЛПС – 52,9% участников обследования. Последнее могло быть связано, в частности, с характером когнитивной деятельности, используемой для достижения полезного результата. Тренинг в

рамках ППС предполагал формирование отрицательного эмоционального состояния через мысленное представление неприятных образов. Формирование эмоционального состояния связывают с активностью целого ряда неспецифических подкорковых структур (Ильин, 2001), которые могут оказывать на кору более существенное влияние, чем специфические воздействия, например, счет. К тому же, более 75% выборки были девушки, которые, как известно, более эмоциональны и имеют лучшую эмоциональную память (Ильин, 2003), чем юноши. Это способствовало тому, что эффективное представление эмоционально неприятных образов, вызывающее выраженные изменения спектральной мощности ЭЭГ в целом по коре, включая и КП, удалось большему числу участников во время БОС-тренинга по ППС. Выполнение арифметических вычислений, требуемых для реализации ЛПС, у части участников протекало на фоне менее выраженных изменений в ЭЭГ, не приводящих к достоверным изменениям КП, что в целом по выборке сделало ЛПС менее эффективным, чем ППС.

Анализ показал, что мысленное манипулирование как абстрактно-логическими (арифметические вычисления), так и образными (представление неприятных образов) конструкциями приводит к существенным перестройкам межполушарных отношений, которые по мере приобретения навыка ЭЭГ-управления сопровождаются усилением доминирования левого полушария. Даже в случае

целенаправленного формирования правополушарного доминирования, тренируемые изменения появлялись только в области высоких (бета-2 и гамма) частот, тогда как на низких частотах наблюдалось доминирование левого полушария.

Успешное управление имело место в тех случаях, когда тренируемое доминирование, обусловленное условиями сценария, не ограничивались только контролируемыми отведениями, а распространялись и на соседние зоны коры. Особенности сценария (ЛПС или ППС) отражались, в первую очередь, в области высоких частот (выше 20 Гц). У лиц, вошедших в группу «успешных», в этом диапазоне формировалось выраженное доминирование либо левого (ЛПС), либо правого (ППС) полушария практически во всех анализируемых зонах. При этом направления изменений спектральных характеристики ЭЭГ симметричных областей коры могли различаться: они могли быть как разнонаправленными (как в случае ЛПС), так и однонаправленными, но по-разному выраженными (как в случае ППС) справа и слева.

У лиц, которые оказались неспособны обучиться увеличивать СпМ бета-2-частот в лобных отведениях, в диапазоне высоких (бета-2 и гамма) частот формировались разные очаги доминирования в передних и задних областях. При реализации ЛПС в передних областях исходное доминирование левого полушария ослабевало и сменялось правополушарным, а в задних

областях параллельно происходило ослабление доминирования правого полушария и усиление – левого. При реализации ППС наблюдалась обратная картина: в передних областях происходило ослабление доминирования правого полушария, а в задних – левого. У данной группы обследуемых такая разная картина межполушарных отношений формировалась на фоне однонаправленных изменений СпМ, которая, независимо от сценария, снижалась во всех частотных диапазонах практически во всех областях коры (кроме затылочных). Это указывает на то, что успешное управление возможно только при вовлечении в процесс всех или большинства областей коры с формированием общего доминирования одного из полушарий в области высоких частот. В противном случае эффективного произвольного управления бета-2-активностью собственного мозга не происходит.

В области низких (тета, альфа и бета-1) частот, независимо от сценария и качества управления, наблюдалось усиление доминирования левого полушария. Низкие частоты традиционно связывают с формированием функционального состояния коры (Кирой, 1998, Шульгина, 2005, Palva, Palva, 2007), которое обеспечивает протекание информационных процессов. Последние, в свою очередь, связывают с высокими (бета-2 и гамма) частотами (Кирой, Чораян, 2000, Кирой, Белова, 2000, Думенко, 2007; Бехтерева, Нагорнова, 2007, Wu, Zhang, 2009). Принимая во внимание

тот факт, что условия проведения БОС-тренингов по обоим сценариям были одинаковыми, можно предположить, что к концу периода обучения у всех обучающихся формировалось сходное функциональное состояние мозга, о чем свидетельствует доминирование левого полушария в диапазоне низких (до 20 Гц) частот. Такие межполушарные отношения, по-видимому, были оптимальными для реализации мыслительных операций, поскольку сохранялись на фоне локальных изменений в отдельных отведениях.

Специфика мыслительной деятельности (абстрактно-логическая или образная) отражалась в характере отношений, складывающихся между полушариями в диапазоне частот выше 20 Гц, а также в динамике изменений СпМ, в первую очередь, в заинтересованных областях.

Анализ показал, что изменения межполушарных отношений и спектральной мощности ЭЭГ могли протекать достаточно независимо. Это позволяет связывать изменения уровня локальной синхронизации и межполушарных отношений с функционированием различных нейрофизиологических механизмов.

Обращает на себя внимание тот факт, что у лиц, успешно справлявшихся с заданием, по мере приобретения навыка величина контролируемых параметров постепенно нарастала от тренинга к тренингу. У лиц, вошедших в группу «неуспешных», напротив, к концу периода обучения наблюдались изменения, противоположные тренируемым. Это могло быть связано с тем, что лица, вошедшие в группу

«неуспешных», использовали неэффективную стратегию управления, которая обеспечивала успех только на начальных этапах тренинга. Можно предположить, что последнее связано с их индивидуальными особенностями, в частности, неспособностью длительно концентрировать внимание на конкретном виде когнитивной деятельности, вследствие чего они теряли интерес к работе и качество их управления бета-2-активностью собственного мозга существенно снижалось.

Заключение. Проведенный анализ показал, что человек способен достаточно успешно научиться произвольно усиливать бета-2-активность в лобных областях собственного мозга уже за 10-12 тренингов. Эффективность управления зависит от характера когнитивной деятельности, используемой для достижения полезного результата, и индивидуальных особенностей. Доля наиболее успешно обучавшихся лиц, прогрессивно улучшавших качество управления активностью собственного мозга за счет существенного увеличивая выраженности бета-2-частот в ЭЭГ лобных областей, составила, в зависимости от сценария БОС-тренинга, от 53 до 77% выборки. Последнее указывает на необходимость учета индивидуальных особенностей при разработке персональных траекторий обучения потенциальных пользователей ВСИ-систем.

Произвольное управление активностью собственного мозга,

независимо от мысленных операций, используемых для достижения полезного результата, приводило к существенным изменениям не только спектральных характеристик ЭЭГ, но и характера межполушарных отношений, которые наблюдались во всех частотных диапазонах и областях коры. Было показано, что эти показатели могут изменяться достаточно независимо, что позволяет использовать их в качестве разных контролируемых параметров при организации управления в ВСИ-системах, увеличивая, тем самым, алфавит возможных команд.

Межполушарные отношения, устанавливающиеся на низких (до 20 Гц) частотах, по-видимому, отражают формирование функционального состояния, оптимального для данного вида когнитивной деятельности. Специфические особенности самой деятельности отражаются в характере доминирования полушарий в области высоких (выше 20 Гц) частот и изменениях уровня локальной синхронизации. В зависимости от условий сценария БОС-тренинга успешное управление имело место при параллельном увеличении СпМ и усилении доминирования тренируемого полушария (левого – для ЛПС и правого – для ППС), причем, не только в тренируемых, но и в других областях данного полушария. Существенные различия в доминировании в пределах передних и задних областей коры снижали эффективность управления даже при наличии односторонних изменений СпМ ЭЭГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части государственного задания № 213.01-11/2014-30 и внутреннего гранта ЮФУ № 213.01-07.201/04 ПЧВГ.

Список литературы:

1. Бехтерева Н.П., Нагорнова Ж.В. Динамика когерентности ЭЭГ при выполнении заданий на невербальную (образную) креативность // Физиология человека. – 2007. – Т. 33. – № 5. – С. 5-13.
2. Горбачев Д.В. Исследование возможности оптимизации функционального состояния борцов методом БОС-тренинга по параметрам огибающей электромиограммы: автореф. дис.... канд. мед. наук. – Ульяновск. – 2011. – 22 с.
3. Данилова Н.Н. Психофизиология: учебник для вузов. М.:Аспект Пресс. 2001. 373 с.
4. Думенко В.Н. Феномен пространственной синхронизации между потенциалами коры головного мозга в широкой полосе частот 1-250 Гц // Журн. высш. нерв. деят. – 2007. – Т. 57. – № 5. – С. 520-532.
5. Ильин Е.П. Эмоции и чувства. СПб: Питер. – 2001. – 752 с.
6. Ильин Е.П. Дифференциальная психофизиология мужчины и женщины. СПб: Питер. – 2003. – 393 с.
7. Кирой В.Н. Электроэнцефалография. Ростов-на-Дону:Изд-во РГУ. – 1998. – 239 с.
8. Кирой В.Н. Интерфейс мозг-компьютер (история, современное состояние, перспективы). Ростов-на-Дону:Изд-во ЮФУ. – 2011. – 240 с.
9. Кирой В.Н., Белова Е.И. Механизмы формирования и роль осцилляторной активности нейронных популяций в системной деятельности мозга // Журн. высш. нерв. деят. – 2000. – Т. 50. – № 2. – С. 179-191.
10. Кирой В.Н., Чораян О.Г. К теории нейронных ансамблей мозга // Успехи

- физиологических наук. – 2000. – Т. 31. – № 2. – С. 23-39.
11. Кучкин С.Н. Биоуправление в медицине и физической культуре. Волгоград:Изд-во ВГАФК. – 1998. – 155 с.
12. Федотчев А.И., Ким Е.В. Особенности лечебных сеансов биоуправления с обратной связью по ЭЭГ при нормальном и отягощенном протекании беременности // Журнал выш. нервн. деят. – 2009. – Т. 59. – № 4. – С. 421-428.
13. Шульгина Г.И. Генез ритмики биопотенциалов и её роль в обработке информации // Физиология человека. – 2005. – Т. 31. – № 3. – С. 59-71.
14. Aslanyan E.V., Kiroi V.N., Lazurenko D.M. et al. EEG Spectral Characteristics during Voluntary Motor Activity // Neuroscience and Behavioral Physiology. – 2015. – V. 45. – № 9. – P. 1029-1037. – DOI 10.1007/s11055-015-0182-9
15. Curran ET AL., Stokes M.J. Learning to control brain activity: A review of the production and control of EEG components for driving brain-computer interface (BCI) systems // Brain Cognition. – 2003. – Т. 51. – С. 326-336.
16. Dornhege G., Millán J.R., Hinterberger T., McFarland D., Müller K.-R. (Eds.) Toward Brain-Computer Interfacing, MIT Press, Cambridge, MA. 2007. 512 p.
17. Fockert J.W., Rees G., Frith C.D., Yavie N. The role of working memory in visual selective attention // Science. 2001. V. 291. P. 1803.
18. Frederick J.A. Psychophysics of EEG alpha state discrimination // Conscious cogn. – 2012. – V. 21. – № 3. P. – 1345-1354.
19. Gruzelier J.H. Differential effects on mood of 12–15 (SMR) and 15–18 (beta1) Hz neurofeedback // International Journal of Psychophysiology. – 2014. – V. 93. – № 1. – P. 112-115.
20. Kayser J., Tenke C., Nordby H. et al. Event-related potential (ERP) asymmetries to emotional stimuli in a visual haff-field paradigm // Psychophysiology. – 1997. – V. 34. – P. 414-426.
21. Keizer A.W., Verment R.S., Hommel B. Enhancing cognitive control through neurofeedback: a role of gamma-band activity in managing episodic retrieval // NeuroImage. – 2010. – V. 49. – P. 3404-3413.
22. Kiroi V., Aslanyan Y., Lazurenko D. et al. Efficiency analysis of voluntary control of human's EEG spectral characteristics // Journal of Integrative Neuroscience. 2016. DOI: 10.1142/S0219635216500072
23. Palva S., Palva J.M. New vistas for alpha-frequency band oscillations // Trends Neurosci. – 2007. – V. 30. – № 4. – P. 150-158.
24. Reiner M., Rozengurt R., Barnea A. Better than sleep: Theta neurofeedback training accelerates memory Consolidation // Biological Psychology. – 2014. – V. 95. – P. 45-53.
25. Volf N.V., Razumnikova O.M., Tarasova I.V. EEG-mapping study of sex differences during verbal creative thinking // Focus on Brain Research / Resch C.J. (Ed). N-Y, USA:Nova Sci. Publ. – 2007. – P. 123.
26. Wu X., Zhang D. Early induced beta/gamma activity during illusory contour perception // Neuroscience Letters. – 2009. – V. 462. – № 3. – P. 244-247.

Сведения об авторах:

Асланиян Елена Власовна, к.б.н., н.с. НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета (НИИНК АБиБ ЮФУ), моб. 8 9094208049, evaslanyan@sfedu.ru или kiroy@krinc.ru

Кирой Валерий Николаевич, д.б.н., профессор, главный научный сотрудник, зав. Лабораторией исследований нейрофизиологических механизмов психической деятельности НИИНК, зав. Кафедрой биофизики и биоклибернетики физического факультета ЮФУ, kiroy@sfedu.ru

Лазуренко Дмитрий Михайлович, аспирант, мл.н.с. НИИНК, mityasky@ya.ru

Миняева Надежда Руслановна, к.б.н., научный сотрудник НИИНК, dangyen@mail.ru

Бахтин Олег Маркович, к.б.н., научный сотрудник НИИНК, bachto@rambler.ru