
ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

ДИНАМИКА МЕЖПОЛУШАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ПРИ БОС-ТРЕНИНГЕ¹

© 2016 г. Е. В. Асланян*, В. Н. Кирой**, А. С. Столетний***, Д. М. Лазуренко****,
О. М. Бахтин*****, Н. Р. Миняева*****, Р. И. Кирой*****

* Кандидат биол. наук, научный сотрудник НИИ нейрокибернетики
им. А.Б. Когана Академии биологии и биотехнологии ЮФУ, Ростов-на-Дону;
e-mail: evaslanyan@sfedu.ru

** Доктор биол. наук, профессор, главный научный сотрудник, там же;
Действительный член Российской академии информатизации образования,
член-корр. МАНВШ и РАМН, Ростов-на-Дону;
e-mail: kiroy@sfedu.ru

*** Аспирант факультета психологии ЮФУ, Ростов-на-Дону;
e-mail: stoletniynk@inbox.ru

**** Аспирант НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана Академии биологии и биотехнологии;
e-mail: mityasky@ya.ru

***** Кандидат биол. наук, научный сотрудник, там же;
e-mail: kiroy@krinc.ru

***** Кандидат биол. наук, научный сотрудник, там же;
e-mail: dangyen@mail.ru

***** Канд. биол. н., доцент кафедры биофизики и биокибернетики ЮФУ, Ростов-на-Дону;
e-mail: rkiroy@gmail.com

Создание и эффективная эксплуатация интерфейсов “мозг–компьютер”, использующих параметры функционирования мозга для управления техническими устройствами, является актуальной проблемой психофизиологии. На 17 добровольцах исследовалась способность человека к произвольному управлению характером межполушарных отношений в центральных областях коры в альфа-диапазоне частот с помощью биологической обратной связи (БОС). Показано, что после непродолжительного обучения человек не только способен произвольно сдвигать фокус максимальной выраженности альфа-частот в сторону левого или правого полушария, но и делать это в достаточно локальной области. Многофакторный дисперсионный анализ показал, что большинство респондентов в ходе тренировок смогли добиться изменений контролируемых параметров. Эффективность управления характером межполушарных отношений различалась у лиц, обладающих разной степенью выраженности таких свойств личности, как психотизм, экстраверсия и уравновешенность нервных процессов. Результаты показали, что необходим индивидуальный подход к разработке программ обучения и реабилитации с помощью БОС-тренингов, учитывающий не только уровень мотивации, но и индивидуальные психологические особенности обучающихся.

Ключевые слова: электроэнцефалография, биологическая обратная связь, свойства личности, амплитудные спектры, дисперсионный анализ, межполушарная асимметрия.

В последние годы интерес исследователей привлекает проблема создания так называемых BCI систем (*brain–computer interface*), использующих параметры функционирования мозга для управления разного рода техническими

устройствами. Такие системы изначально проектировались для социальной реабилитации лиц, лишенных вследствие травмы или болезни иных (естественных) каналов коммуникации и управления, но обладающих сохранным интеллектом [17, 19, 21, 27, 31, 34]. Однако в последние годы сфера применения таких систем существенно возросла [9]. Они стали использоваться для создания нового поколения компьютерных игр;

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ (грант № 12-06-00034), базовой части госзадания № 2014/174 и внутренних грантов ЮФУ № 213.01-2014/001 БЧВГ и № 213.01-07.201/04 ПЧВГ.

рассматриваются перспективы их использования для оснащения человека-оператора дополнительными каналами коммуникации и управления.

Наиболее перспективным показателем, на основе которого идет разработка неинвазивных *BCI*, является суммарная биоэлектрическая активность мозга, регистрируемая с помощью ЭЭГ. Однако при этом возникает целый ряд проблем: определение параметров ЭЭГ, пригодных для управления; формирование развитого “алфавита” управляющих команд; разработка средств их оперативной идентификации из непрерывно регистрируемой ЭЭГ; способность пользователя произвольно генерировать или изменять паттерны активности собственного мозга.

Экспериментально показано, что способность произвольно управлять параметрами биоэлектрической активности собственного мозга – тренируемое свойство [30], а эффективность управления определяется уровнем мотивации пользователя [18], его функциональным состоянием [25, 28, 35] и индивидуальными особенностями [17, 29]. Обычно при подобного рода тренингах используют процедуру биологической обратной связи – БОС (*Biofeedback*), предполагающую предъявление человеку информация о состоянии и изменении контролируемых физиологических процессов, в частности, ЭЭГ (ЭЭГ-БОС).

Процедура ЭЭГ-БОС-тренинга достаточно широко используется как при лечении различных психофизиологических расстройств, так и при восстановлении адаптационных возможностей организма и считается одним из наиболее перспективных нелекарственных средств регуляции функционального состояния человека [13]. Однако в большинстве случаев БОС-тренинг используется как вспомогательная процедура, предназначенная исключительно для контроля и визуализации результатов основного тренинга (например, быстрой релаксации, максимального напряжения мышц, решения задач на распознавание, усиления памяти и т.д.). Сравнительный анализ способности к тренировке тех или иных ЭЭГ-показателей и влияния на эффективность этого процесса психологических особенностей личности практически не проводился. Кроме того, в качестве контролируемых ЭЭГ-параметров используются, как правило, мощность основных частотных диапазонов ЭЭГ или их соотношение в определенных отведениях. Способность к управлению уровнем межполушарной асимметрии ЭЭГ, а также степень влияния на нее индивидуально-типологических особенностей практически не исследована. Остается открытым и вопрос

о специфичности наблюдаемых изменений для тех или иных областей регистрации ЭЭГ.

В связи со всем вышесказанным, целью настоящей работы стал поиск ответов на три вопроса, а именно: (1) можно ли произвольно управлять характером межполушарного распределения ЭЭГ-частот, (2) насколько локальны/генерализованы наблюдаемые в условиях ЭЭГ-БОС тренинга изменения, (3) какие психологические особенности личности связаны с эффективностью данного управления.

МЕТОДИКА

Участники исследования. В исследовании приняли участие 17 студентов Южного федерального университета (13 девушек и 4 юноши, средний возраст 20 ± 1.3 лет), из них 14 человек – правши, 2 – амбидекстры и 1 – левша.

Методики и аппаратура. Перед началом тренинга все участники проходили психологическое обследование, включающее тесты Айзенка [22], Стреляу [12], Спилбергера–Ханина [14], Аннет [15], Ефремцева [5] и корректурную пробу Бурдона [10].

Для организации БОС-тренинга и регистрации ЭЭГ использовали реабилитационный психофизиологический комплекс “РЕАКОР” фирмы Медиком МТД (г. Таганрог, Россия). Во время тренингов респондент располагался в экранированной затемненной камере в кресле в удобной для него позе. Эффективность тренинга контролируемого ЭЭГ-показателя влияла на уровень зашумленности черными квадратами цветного изображения, предъявляемого на экран монитора, расположенный на расстоянии 1 м на уровне глаз участника (рис. 1, А). В рамках настоящего исследования задачей респондента являлось снизить уровень шума и распознать изображение, изменив соотношение альфа-индекса ЭЭГ, регистрируемой от сенсомоторных областей коры ($C3$, $C4$), в пользу левого или правого полушария. Так называемый “левополушарный” сценарий (ЛПс) предусматривал необходимость увеличить разницу $\alpha C3 - \alpha C4$, “правополушарный” (ППс) – $\alpha C4 - \alpha C3$. Указанные разницы являлись контролируемыми параметрами (КП) для данных сценариев.

Процедура исследования. В рамках каждого сценария каждый участник проходил 12 тренингов (по одному в день в течение трех недель). Схема одного тренинга представлена на рис. 1, Б. Каждый тренинг предварялся инструкцией, в которой для решения поставленной задачи респонденту предлагалось выполнять воображаемые

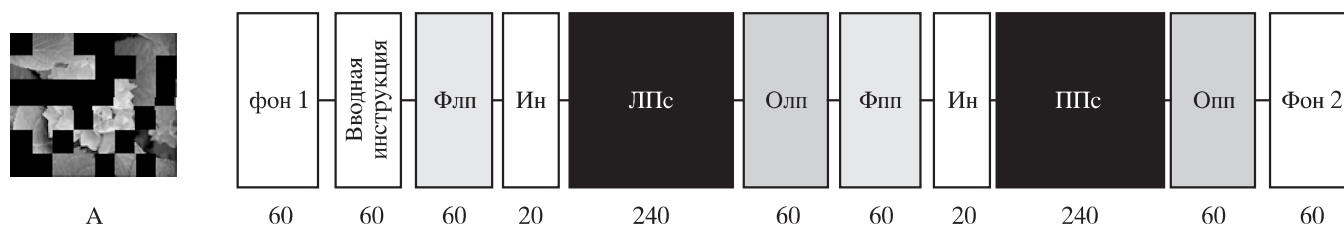


Рис. 1. Предъявляемое изображение (А) и схема ЭЭГ-БОС-тренинга (Б). Фон1 – фон до, Фон2 – фон после завершения тренинга, ЛПс и ППс – тренинг по “левополушарному” и “правополушарному” сценариям, Флп и Фпп – фоны перед сценариями, Ин – инструкции, Олп и Опп – отдых после тренингов.

движения левой (для ЛПс) или правой (для ППс) руками. Для предотвращения влияния предыдущего тренинга на последующий они были разделены 60-секундными периодами отдыха.

Регистрация показателей. ЭЭГ регистрировали монополярно от 14 областей коры ($F3$, $F4$, $F7$, $F8$, $C3$, $C4$, $T3$, $T4$, $T5$, $T6$, $P3$, $P4$, $O1$, $O2$) по системе 10×20 с референтными электродами, расположенными на мочках ушей (референт объединенный). Частота дискретизации сигнала составляла 250 Гц по каждому каналу, полоса пропускания частотных фильтров – $1 \div 70$ Гц. Для удаления сетевой наводки использовался режекторный фильтр 50 Гц.

Перед началом каждого тренинга ЭЭГ регистрировали в состоянии покоя с открытыми (ГО) и закрытыми (ГЗ) глазами. Регистрация ЭЭГ в этих состояниях использовалась для оценки изменений в разные дни проведения тренингов; в покое перед началом (Фон 1) и после завершения (Фон 2) тренинга – для контроля динамики функционального состояния мозга в пределах одного тренинга; в покое перед различными сценариями (Флп и Фпп) – для расчета среднего уровня контролируемого параметра (КП), с которого начиналось управление изображением на экране во время самого тренинга.

На всех этапах тренинга для анализа отбирали не содержащие артефактов немозгового происхождения ЭЭГ-эпохи длительностью 1 с, по которым рассчитывали амплитудные спектры (СПА) в диапазонах 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) частот. Для каждого человека на этапах фонов, длительность которых составляла 1 минуту, отбиралось от 30 до 56 эпох, а на этапе тренинга (4 минуты) – от 100 до 200 и более эпох.

Для каждой частотной полосы рассчитывали коэффициент асимметрии (Кас) по формуле $\text{Кас} = (\text{ПП} - \text{ЛП}) / (\text{ЛП} + \text{ПП}) * 100\%$. Рост величины

Кас соответствовал усилению правополушарного доминирования, а снижение – левополушарного; смена знака указывала на смену доминирующего полушария.

В целях анализа ЭЭГ-перестроек, связанных с процессами управления активностью собственного мозга, для каждого участника за исходную точку принимался тренинг, от которого фиксировалась устойчивая положительная динамика КП (начало, Н). Именно по отношению к этому тренингу оценивались эффекты, формирующиеся к его окончанию (конец, К). Для оценки эффективности тренингов по каждому сценарию был проведен анализ динамики КП, для чего по результатам 12 тренингов методом линейной регрессии были рассчитаны персональные тренды. Чтобы оценить специфичность происходящих изменений, ЭЭГ анализировалась не только в “тренируемых”, но и во всех указанных выше отведениях и частотных диапазонах.

Статистические критерии. Статистическое сравнение значений СПА и Кас проводили с использованием многофакторного дисперсионного анализа *ANOVA/MANOVA*, реализованного в пакете прикладных программ *Statistica 10*. Дизайн анализа включал следующие факторы: ГРУППЫ (уровни: 1 и 2 гр.), ЭТАПЫ (Начало и Конец тренингов), СОСТОЯНИЯ (ГЗ, ГО, Фон 1, Фон 2, ЛПс, ППс), ОТВЕДЕНИЯ (14 отведений) и РИТМ (6 ритмов). При $p \leq 0.05$ различия считались достоверными, при $0.05 < p \leq 0.08$ – констатировали наличие тренда.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Психологическое тестирование. Перед началом тренинга все участники проходили расширенное психологическое обследование. На основании совокупности баллов, набранных во всех тестах, был проведен факторный анализ, который выделил два основных фактора с весами 3.31 и

Таблица 1. Факторный анализ, проведенный по результатам психологического тестирования

Свойства личности	Фактор 1	Фактор 2
Личностная тревожность	-0.498933	0.230720
Уравновешенность	0.697266	-0.359119
Подвижность	0.724856	0.411229
Сила процесса торможения	-0.125170	0.212663
Сила процесса возбуждения	0.865543	-0.174495
Нейротизм	-0.217391	0.211250
Экстраверсия / интроверсия	0.886588	0.455820
Психотизм	0.382890	-0.287493
Устойчивость внимания	0.072243	-0.380168
Переключаемость внимания	0.217574	-0.395253
Кинестетическая ПМ организация	0.409489	0.307959
Аудиальная ПМ организация	0.161721	0.683492
Визуальная ПМ организация	0.240903	0.392432
<i>Expl.Var</i>	3.309692	1.778787
<i>Prp.Totl</i>	0.254592	0.136830

Примечание. Выделены значения факторов >0.7.

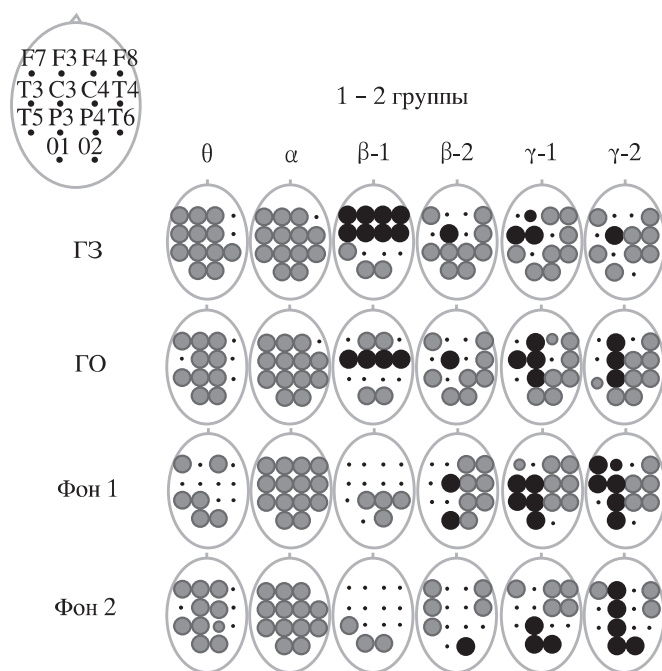


Рис. 2. Графическое изображение межгрупповых различий ЭЭГ в состояниях спокойного бодрствования (ГЗ, ГО) и оперативного покоя (Фон1, Фон 2). Обозначения: чёрные круги — более высокие, серые — более низкие значения СПА у лиц второй группы по сравнению с первой, большие круги — достоверные различия ($p \leq 0.05$), малые — тренд ($0.05 < p \leq 0.08$).

1.78, выбирающих соответственно 25.46 и 13.68% дисперсии (табл. 1).

Факторный анализ показал, что наиболее значимыми для разделения являются такие свойства личности, как экстра-/интровертированность,

сила процесса возбуждения и подвижность нервных процессов, чуть меньше — нейротизм и личностная тревожность. Группы, выделенные по этим свойствам, затем ранжировались и усреднялись для каждого участника. В первую вошли 11 человек (2 юноши и 9 девушек), а во вторую — 6 человек (2 юноши и 4 девушки). В целом представители первой группы характеризовались более высоким уровнем экстраверсии и более низким уровнем личностной тревожности и нейротизма, большей силой процесса возбуждения и более высоким уровнем подвижности нервных процессов.

Межгрупповые различия. На уровне ЭЭГ межгрупповые различия были связаны с тем, что в состоянии спокойного бодрствования как с закрытыми, так и с открытыми глазами в ЭЭГ участников второй группы представленность тета- и альфа-частот практически во всех отведениях была ниже, чем первой (рис. 2). В области быстрых (гамма-) частот различия между группами носили выраженную полушарную зависимость: у второй группы в отведениях левого полушария мощность обоих гамма-диапазонов была выше, а в правом — ниже, чем у представителей первой группы.

Аналогичные межгрупповые различия наблюдались и на этапах оперативного покоя (Фоны 1 и 2), что указывает на их неспецифический характер. Кроме того, у лиц второй группы в покое выраженность бета-1-частот в ЭЭГ передних областей (лобные, височные и центральные) были выше, чем первой. Последнее может быть связано с более высоким уровнем их предстартовой напряженности, определяемым более высоким уровнем личностной тревожности. Это предположение подтверждается тем, что при включении в знакомую деятельность (на этапах оперативного покоя) различия в области бета-1-частот исчезали.

Анализ межполушарной асимметрии. Интегральная оценка межполушарной асимметрии (МПА) выраженности ЭЭГ в целом по мозгу показала, что у первой группы достоверные различия между полушариями появлялись только к концу обучения во время реализации обоих сценариев. В фоновых состояниях ни в начале, ни в конце обучения достоверных различий не было (табл. 2). У второй группы выраженная асимметрия появлялась уже на этапе тренингов в начале обучения и усиливалась к концу. Анализ, проведенный отдельно для контролируемых параметров — альфа-диапазона в центральных областях коры, показал, что более выраженные межполушарные различия наблюдались у представителей первой

Таблица 2. Результаты *MANOVA*-анализа значений СпА ЭЭГ, зарегистрированной в отведениях правого и левого полушарий (только *Main effects*)

Гр.	Этап	Состояние	df	В целом по мозгу					Только КП (α в С3/4)				
				F	p-level	Mean			F	p-level	Mean		
						Кас	s	d			Кас	s	d
1	Н	Фон 1	1; 2336	0.70	0.40	-0.46	13.0	12.9	11.80	0.00	-3.32	19.3	18.1
		Фон 2	1; 2766	0.48	0.49	0.34	13.2	13.2	6.38	0.01	-2.43	19.6	18.6
		ЛПс	1; 3222	0.64	0.42	0.39	12.7	12.8	18.03	0.00	-2.97	18.8	17.7
		ППс	1; 3442	0.76	0.38	0.38	13.1	13.2	47.60	0.00	-7.03	23.1	20.1
	К	Фон 1	1; 2228	0.70	0.40	-1.73	13.5	13.0	15.36	0.00	-4.06	22.3	20.5
		Фон 2	1; 2200	0.48	0.49	-1.92	13.8	13.3	11.94	0.00	-3.81	24.0	22.2
		ЛПс	1; 3496	18.08	0.00	-1.96	13.3	12.8	65.11	0.00	-6.84	24.1	21.1
		ППс	1; 3398	22.28	0.00	-2.17	13.7	13.1	6.38	0.01	-2.28	22.8	21.7
2	Н	Фон 1	1; 1374	1.82	0.18	-1.10	12.0	11.7	0.59	0.44	1.34	16.4	16.9
		Фон 2	1; 1434	0.00	0.94	0.08	12.3	12.3	0.15	0.69	0.76	17.7	18.0
		ЛПс	1; 1928	6.39	0.01	1.77	11.4	11.8	6.72	0.01	3.35	15.7	16.7
		ППс	1; 1682	10.04	0.00	-2.57	11.0	10.4	3.67	0.06	-2.29	14.5	13.9
	К	Фон 1	1; 1428	15.01	0.00	-3.15	12.1	11.4	0.18	0.67	-0.81	16.4	16.1
		Фон 2	1; 1356	24.59	0.00	-4.00	12.6	11.6	0.00	0.98	0.04	16.6	16.6
		ЛПс	1; 1864	28.53	0.00	-3.89	11.6	10.8	5.42	0.02	-3.57	17.2	16.0
		ППс	1; 1870	16.66	0.00	-2.88	11.8	11.1	0.47	0.49	1.14	15.9	16.2

Примечание. *df* (effect; error) – числа степеней свободы, *F* – критерий Фишера, *p* – уровень значимости, *Mean* – средние значения СпА для отведений левого (*s*) и правого (*d*) полушарий, полужирный шрифт – достоверные различия ($p < 0.05$), курсив – тренд ($0.05 < p < 0.08$), Кас – коэффициент асимметрии (в %). Отрицательные значения Кас – доминирование левого полушария, положительные – правого.

группы. Доминирование левого полушария регистрировалось на всех анализируемых этапах. У второй группы МПА появлялась только на этапах тренинга, причем если в начале обучения при реализации ЛПс выраженность альфа-частот была выше справа, то к концу обучения – слева (как того требовали условия тренинга). Для ППс наблюдалась обратная тенденция.

Детализация полученных результатов с использованием однофакторного анализа показала (рис. 3), что в ЭЭГ участников первой группы на начальных этапах обучения наблюдалось преимущественно правополушарное доминирование в пределах височных и теменно-затылочных областей, которое к концу тренингов сменялось левополушарным. В фоне оно затрагивало в основном передние области, а в процессе тренинга распространялось и на теменно-затылочные, причем независимо от сценария (ЛПс или ППс). Особенно хорошо это видно в области быстрых (бета- и гамма-) частот. Существенной разницы в характере доминирования альфа-частот в ЭЭГ центральных (контролируемых) областей, зарегистрированной в покое до и после завершения всех тренингов, а также во время самих тренингов, не наблюдалось.

У участников второй группы межполушарная асимметрия в распределении ЭЭГ частот была более выражена, чем у первой (рис. 3), что нашло свое отражение в интегральной оценке (табл. 2). В состояниях покоя (Фон 1, Фон 2) наблюдалось отчетливое доминирование правого полушария в области тета- и альфа- и левого – бета-2-, гамма-1- и гамма-2-частот. К концу ЭЭГ-БОС-тренинга эти соотношения усиливались. Кроме того, левое полушарие начинало доминировать и в области бета-1-частот, чего не наблюдалось в начале обучения.

Анализ ЭЭГ, зарегистрированной в процессе собственно тренингов, показал, что на начальном этапе обучения при реализации разных сценариев у лиц второй группы характер межполушарных отношений различался. При реализации ЛПс отмечалось доминирование частот (от тета до бета-2) в отведениях правого полушария, а при ППс – левого (особенно в передних областях коры). К концу тренингов (по сравнению с началом) в ЭЭГ этой группы респондентов наблюдалось сходное для обоих сценариев усиление межполушарных различий, характерных для состояния покоя, особенно в области быстрых (от бета-2 до гамма-2) частот. Для контролируемых

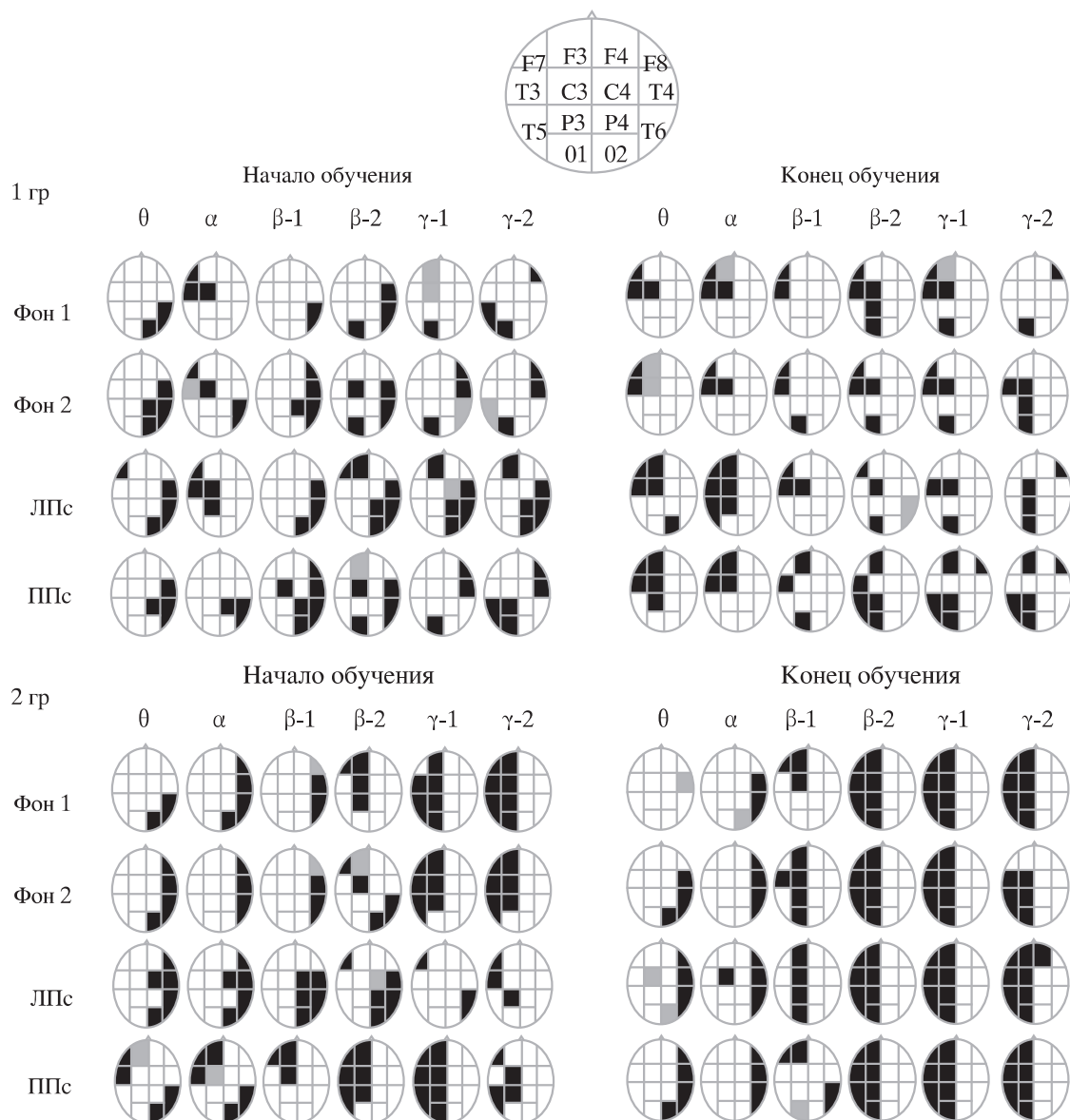


Рис. 3. Графическое изображение межполушарной асимметрии в распределении ЭЭГ частот у лиц 1 и 2 групп в начале и конце ЭЭГ-БОС-тренинга (результаты однофакторного анализа). Черный цвет – достоверное доминирование полушария (по сравнению с симметричной областью); серый цвет – тренд.

параметров (альфа-диапазон частот в C3 и C4) при реализации ЛПс наблюдалась смена доминирующего полушария с правого (в начале обучения) на левое (в конце), как того требовали условия БОС-тренинга, а при реализации ППс – ослабление исходного левополушарного доминирования вплоть до отсутствия каких-либо достоверных различий (рис. 3). В целом в ЭЭГ лиц этой группы изменения КП были более выражены, чем у представителей первой группы.

Динамика МПА. Характер межполушарных отношений является достаточно статичным показателем и может сохраняться, несмотря на протекающие в мозге процессы. Исходя из этого, нами

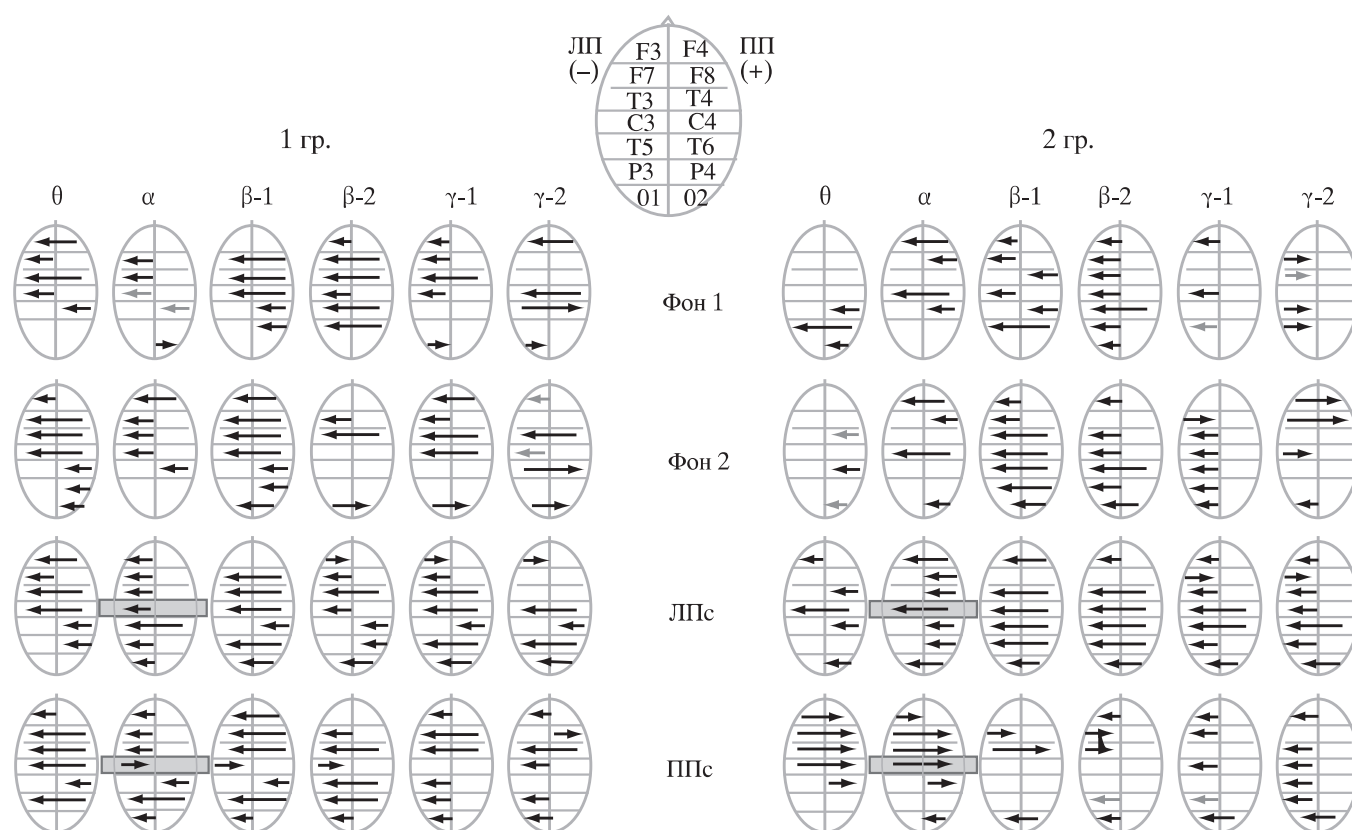
была отдельно проанализирована динамика Кас на разных этапах обучения. Для этого на каждом анализируемом этапе тренингов сравнивали между собой значения коэффициентов асимметрии (Кас), полученные в начале и конце обучения. Проведенный анализ подтвердил, что в процессе обучения навыкам произвольного управления активностью собственного мозга происходит существенное усиление влияния левого полушария (табл. 3).

Однофакторный анализ показал, что в Фонах достоверное смещение асимметрии влево происходило в большинстве областей коры практически во всех частотных диапазонах (рис. 4).

Таблица 3. Изменения показателей Кас в конце БОС-тренинга (по сравнению с его началом) в ЭЭГ участников разных групп (результаты 3-факторного анализа, только *Main effects*).

ГРУППА	СОСТ.	df	F	p-level	Уср. Кас		Направ. измен.
					Н	К	
1	Фон 1	1; 2282	19.43	0.00	-0.01	-1.36	←
	Фон 2	1; 2483	19.80	0.00	0.19	-1.13	←
	ЛПс	1; 3359	74.00	0.00	0.45	-1.73	←
	ППс	1; 3420	63.26	0.00	0.18	-1.82	←
2	Фон 1	1; 1401	9.33	0.00	-1.58	-2.77	←
	Фон 2	1; 1395	30.89	0.00	-0.42	-2.60	←
	ЛПс	1; 1896	205.58	0.00	1.48	-3.35	←
	ППс	1; 1776	1.72	0.19	-2.26	-1.80	→

Примечание. ← – снижение величины Кас и смещение доминирования влево, → – рост величины Кас и смещение доминирования вправо. Остальные обозначения, как в Табл. 1.

**Рис. 4.** Графическое изображение направленности изменений Кас ЭЭГ респондентов 1-й и 2-й групп в процессе ЭЭГ-БОС-тренинга. Черная стрелка – достоверные различия между началом и концом обучения, серая – тренд, длинная стрелка – смена полушария, короткая – сохранение исходного доминирования, в рамке выделены контролируемые параметры (КП).

Исключение составил гамма-диапазон (особенно гамма-2), для которого наблюдалось смещение асимметрии вправо. Последнее могло происходить либо в задних (участники первой группы), либо преимущественно в передних (участники второй группы) областях коры, однако это не всегда приводило к смене доминирующего полушария.

Используемые нами в процессе обучения сценарии были фактически направлены именно на тренинг смещения соотношения выраженности альфа-частот в сторону либо левого (в ЛПс), либо правого (в ППс) полушария. Полезный результат при этом мог достигаться разными способами: усилением исходного доминирования тренируемого полушария, ослаблением доминирования

противоположного либо сменой лидера (доминирующего полушария).

Анализ полученных результатов показал, что при ЛПс (когда требовалось увеличить разницу $\alpha C3-\alpha C4$) в контролируемых отведениях наблюдалось смещение Кас влево, которое приводило либо к усилению исходного доминирования альфа-частот в $C3$ (участники первой группы), либо к смене доминирующего полушария (участники второй группы) (рис. 4, в рамках). Направленность этих изменений совпадала с общемозговыми, что не позволяло оценить локальность изменений, связанных с особенностями БОС-сценария. При этом в ЭЭГ участников обеих групп наблюдалось некоторое усиление доминирования лобных областей правого полушария в гамма-диапазоне частот.

При реализации ППс (во время которого необходимо было увеличить разницу $\alpha C4-\alpha C3$) изменения КП также соответствовали тренируемому: происходило смещение Кас вправо. Однако если у лиц первой группы оно наблюдалось только в ЭЭГ заинтересованных (тренируемых) областей и выражалось в ослаблении исходного левополушарного доминирования, то у лиц второй группы затрагивало все передние области в широком (до бета-2) диапазоне частот, зачастую со сменой доминирующего полушария.

Личностные особенности. Для оценки связи эффективности тренинга и индивидуальных особенностей по результатам психологического тестирования участники были разделены на более локальные группы:

- по уровню психотизма: средний (С, 13 чел.) и низкий (Н, 4 чел.);
- по преобладающему типу психомоторной организации: визуалы (В, 6 чел.), аудиалы (А, 6 чел.) и кинестетики (К, 5 чел.);
- по экстраверсии: высокая (В, 8 чел.), средняя (С, 6 чел.) и низкая (Н, 3 чел.);
- по уравновешенности нервных процессов: уравновешенные (У, 7 чел.), неуравновешенные с преобладанием процесса возбуждения (НВ, 3 чел.) или торможения (НТ, 7 чел.);
- по уровню нейротизма: высокий (В, 9 чел.) и средний (С, 8 чел.);
- по силе процесса возбуждения: высокая (В, 13 чел.) и низкая (Н, 4 чел.);
- по подвижности нервных процессов: высокая (В, 13 чел.) и низкая (Н, 4 чел.);
- по уровню личностной тревожности: высокая (В, 6 чел.) и средняя (С, 11 чел.).

Все выделенные группы по списочному составу различались. Сила процесса торможения практически у всех респондентов (кроме одного) была высокой, что не позволило сформировать группы по данному фактору.

Спектральный анализ показал, что в целом по характеру межполушарных отношений группы достаточно сильно различались (табл. 4), причем на всех анализируемых этапах. В начальный период обучения у большинства групп достоверное доминирование одного из полушарий было слабо выражено в фоне и наблюдалось преимущественно во время тренингов (особенно ППс). К концу обучения происходило усиление доминирования левого полушария, что отражалось в увеличении числа достоверных различий и росте величин Кас.

Сравнительный анализ показал, что при реализации ЭЭГ-БОС-тренинга наиболее сильные межгрупповые различия в динамике Кас наблюдались для групп, различающихся по уровню психотизма, экстраверсии и уравновешенности нервных процессов (рис. 5).

В группе со средним уровнем психотизма наблюдалось выраженное смещение Кас влево почти во всех областях и всех частотных диапазонах при реализации обоих сценариев, тогда как в группе с низким уровнем к концу обучения усиливалось доминирование правого полушария. В группе с высоким уровнем экстраверсии также наблюдалось преимущественное смещение Кас влево, тогда как в двух других группах увеличивалась число областей, в которых наблюдалось усиление правополушарного доминирования. Но если в группе со средним уровнем экстраверсии оно затрагивало преимущественно бета-2- и гамма-частоты, то с низким уровнем экстраверсии – тета- и альфа-частоты и только при реализации ППс.

Между группами, выделенными на основании других психологических характеристик, различия были менее выражены.

Несмотря на наличие существенных межгрупповых различий в динамике Кас, при ЛПс контролируемые параметры во всех группах изменялись в соответствии с условиями БОС-тренинга (рис. 5). При этом практически во всех группах, независимо от критерия отбора, тренируемое усиление выраженности альфа-диапазона в $C3$ (по сравнению с $C4$) сопровождалось аналогичными изменениями в соседних областях (лобные, височные, теменные) коры и частотных диапазонах (тета и бета-1). Это правило нарушалось только для лиц, обладающих низким уровнем

Таблица 4. Характер межполушарных отношений в целом по мозгу у разных групп респондентов (по результатам 3-факторного анализа, Кас в %)

Психологическое свойство	Группы	Начало обучения				Конец обучения			
		Фон1	Фон2	ЛПс	ППс	Фон1	Фон2	ЛПс	ППс
Тип ПМ	В	-1.01	0.73	0.04	3.42	-1.11	0.34	0.53	0.86
	К	-0.38	<i>1.04</i>	2.81	-3.14	-1.39	-2.18	-4.10	-4.18
	А	-0.67	-1.13	-0.39	-2.43	-3.92	-5.07	-4.20	-3.69
Психотизм	С	-1.56	-0.85	0.07	-1.54	-2.69	-4.10	-4.29	-4.54
	Н	1.73	2.70	3.21	3.62	-0.38	3.32	2.65	4.51
	В	-0.98	0.47	0.46	2.07	-2.37	-2.57	-1.74	-1.30
Экстраверсия	С	0.27	0.21	1.35	-3.37	-0.95	-0.25	-1.03	-2.73
	Н	-2.47	-0.47	0.74	-2.63	-5.30	-9.22	-8.73	-4.85
	В	0.36	2.19	3.23	2.95	-0.84	1.75	0.46	2.74
Нейротизм	С	-1.71	-1.67	-1.15	-2.71	-3.67	-6.43	-4.99	-6.75
	В	-0.97	0.21	0.33	-0.16	-2.36	-3.61	-3.28	-2.46
	Н	0.11	0.40	2.54	<i>-1.86</i>	-1.94	0.01	0.11	-2.11
Сила возбуждения	В	-0.19	0.38	0.92	0.12	-1.36	-1.36	-1.35	-1.72
	Н	-2.66	-0.41	0.65	-3.03	-5.53	-8.22	-8.51	-5.51
	У	0.07	2.41	0.18	3.71	0.26	1.95	1.21	2.46
Уравновешенность	НВ	-3.20	-1.70	1.15	-5.36	-8.88	-13.06	-11.77	-9.74
	НТ	-0.66	-1.05	1.36	-3.81	-1.11	<i>-1.26</i>	-2.50	-3.70
	В	-1.09	-0.60	1.70	-2.52	-3.90	-4.73	-3.61	-2.93
Личностная тревожность	С	-0.49	0.70	0.39	0.36	-1.30	-1.47	-2.05	-2.12

Примечание. Полужирный шрифт – достоверные различия ($p < 0.05$), курсив – тренд ($0.05 < p < 0.08$).

психотизма, у которых наблюдалось одновременное увеличение выраженности в ЭЭГ альфа-частот в центральных областях левого и височных областях правого полушарий.

При обучении по ППс, когда требовалось увеличить выраженность альфа-частот в С4 (по сравнению с С3), в большинстве групп наблюдались достоверные изменения КП в соответствии с условиями тренинга. При этом они сопровождались либо аналогичными изменениями в соседних областях и частотных диапазонах, либо регистрировались достаточно изолированно. Последнее было характерно для лиц, обладающих средними уровнями психотизма, нейротизма и личностной тревожности, высокой подвижностью нервных процессов и высокой экстраверсией. В некоторых группах (аудиалы и лица с низкой силой процесса возбуждения) наблюдаемые изменения КП хотя и соответствовали тренируемому, но отмечались лишь на уровне тренда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный анализ показал, что в процессе обучения навыкам произвольного управления параметрами собственной ЭЭГ у всех участников обследования от первого занятия к 12-му измене-

ния тренируемых показателей носили волнообразный характер, связанный, в первую очередь, с функциональным состоянием. Период эффективного обучения, характеризующийся стабильными однонаправленными изменениями КП, у разных участников появлялся в разные дни после начала тренингов, что указывает на различающиеся по длительности периоды адаптации и вработывания. Кроме того, эффективное обучение наблюдалось не у всех, изменения КП были индивидуальны и различались для разных сценариев. Указанные особенности отмечают и другие авторы [20, 23, 24, 33].

Анализ ЭЭГ также показал, что во время обучения произвольному управлению выраженностью альфа-частот в отдельных (центральных) областях коры происходило одновременное изменение выраженности не только этого, но и других частотных диапазонов, причем в большинстве областей коры. Наблюдаемое в процессе ЭЭГ-БОС-тренинга усиление левополушарного доминирования в разных (а не только тренируемых) зонах коры может быть связано с тем, что сама процедура произвольного мысленного воспроизведения различных движений задействует различные области мозга. Для реализации этой деятельности требуется участие лобных областей

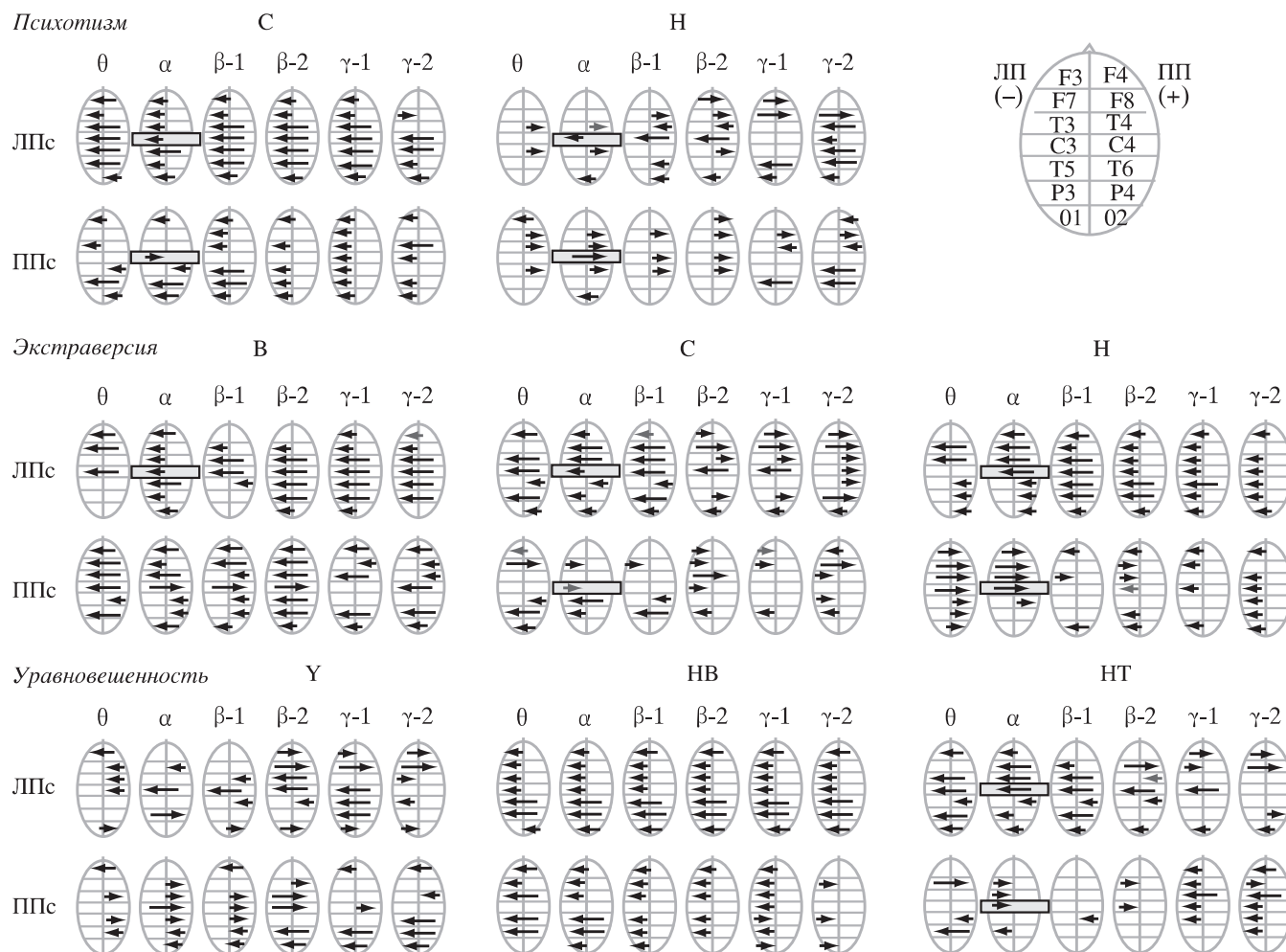


Рис. 5. Графическое изображение направленности изменений Кас ЭЭГ обследуемых с разными психологическими особенностями в процессе БОС-тренинга.

коры, связанных с организацией целенаправленного поведения [32], теменных, связанных с обеспечением избирательного внимания и рабочей памяти [6], височных, содержащих, в том числе, зеркальные нейроны [16], ответственные за анализ наблюдаемых движений и их соотнесение с выполняемыми. Кроме того, было показано [8], что у правшей (а их в нашей выборке было большинство) целый ряд структур левого полушария имеет большие размеры, чем симметричные области правого, а следовательно, содержит большее число нейронов. Можно предположить, что их одновременное вовлечение в работу приводит к усилению доминирования этого полушария. Было также показано [3], что правое полушарие участвует в управлении медленными движениями, такими как поддержание позы, тогда как левое регулирует преимущественно динамические движения: например, тонкую моторику руки, последовательность движений, жесты (что и требовалось от участников в процессе работы). Тот

факт, что перестройки были связаны, в первую очередь, с быстрыми (бета и гамма) частотами и затрагивали преимущественно передние области коры, указывает на активный характер деятельности, требующий постоянной концентрации внимания [3].

Ранее нами было показано [26], что изменения пространственно-временной организации биоэлектрической активности мозга, наблюдаемые при мысленном воспроизведении движений, сходны с таковыми при их реальном выполнении. В свою очередь, при реальном выполнении движений разными руками происходит изменение характера межполушарного доминирования (в том числе в центральных областях коры), которое, однако, не всегда приводит к смене доминирующего полушария [2]. Анализ МПА, проведенный в данной работе, показал, что к концу обучения практически во всех группах, выделяемых по результатам психологического тестирования, для контролируемых параметров

наблюдались тренируемые изменения Кас, однако их выраженность существенно различалась. К концу обучения реализация ЛПс во всех группах приводила к достоверному доминированию в альфа-диапазоне частот отведения СЗ, независимо от того, какое полушарие доминировало в начале. При обучении по ППс во всех группах наблюдалось смещение Кас вправо, однако оно не всегда было достоверным и не всегда приводило к доминированию в альфа-полосе частот отведения С4. В некоторых группах наблюдалось достоверное ослабление исходного левополушарного доминирования при сохранении лидерства. Эти различия между группами при реализации разных сценариев (ППс и ЛПс) могут быть связаны с тем фактом, что из 17 человек, принявших участие в обследовании, 14 были правшами, 2 – амбидекстрами и лишь 1 – левшой. Можно предположить, что организация мысленного движения левой рукой у правшей (ЛПс) требует активации большого числа областей коры, что приводит к формированию в них сходных для всех участников изменений ЭЭГ и сглаживанию межгрупповых различий. Мысленная реализация более привычных движений правой рукой (при ППс) связана с менее выраженными изменениями в ЭЭГ, поэтому исходные межгрупповые различия сохраняются.

В литературе неоднократно показано, что индивидуальные особенности личности оказывают существенное влияние на характер протекания различных когнитивных [7, 11] и вегетативных [4] процессов. Ранее нами было показано, что степень уравновешенности нервных процессов связана со способностью произвольно повышать мощность основных (альфа и бета-2) частотных диапазонов в передних и задних областях коры [1]. В данном случае у лиц, различающихся по степени уравновешенности нервных процессов, выраженное смещение доминирования влево наблюдалось в случае преобладания процесса возбуждения (НВ). Во всех остальных случаях наблюдалось усиление доминирования правого полушария либо в передних областях в диапазоне быстрых частот (для ЛПс), либо в височных и центральных областях в диапазоне низких частот (для ППс).

ВЫВОДЫ

1. Можно утверждать, что в целом имел место эффект обучения, причем в рамках обоих сценариев у обеих групп испытуемых, различающихся своими индивидуально-типологическими характеристиками. Следовательно, межполушарная

асимметрия альфа-частот может произвольно регулироваться человеком в заданную сторону, а значит, динамика этих изменений может использоваться в качестве управляющего параметра в системах типа *BCI*.

2. У испытуемых, характеризующихся средними уровнями психотизма, нейротизма и личностной тревожности, высокой подвижностью нервных процессов и высокой экстраверсией в определенных условиях, можно вызвать изменения межполушарных отношений, затрагивающие достаточно локальные, преимущественно тренируемые области коры (в нашем случае – центральные). Это позволяет надеяться на то, что в рамках других сценариев могут быть “обучены” другие области коры, что позволит увеличить алфавит потенциально пригодных для управления команд.

3. Динамика и эффективность тренинга связаны с индивидуально-типологическими особенностями обучаемого контингента. Это требует индивидуального подхода к разработке программ обучения, учитывающего не только уровень мотивации, но и индивидуально-психологические особенности обучающегося.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асланян Е.В., Киров В.Н., Лазуренко Д.М., Бахтин О.М. Свойства нервных процессов и эффективность БОС-тренинга // Психол. журн. 2013. Т. 34. № 2. С. 108–116.
2. Асланян Е.В., Киров В.Н., Лазуренко Д.М., Бахтин О.М., Миняева Н.Р. Спектральные характеристики ЭЭГ в динамике произвольной двигательной активности // Журн. высшей нервной деятельности. 2014. Т. 64. № 2. С. 147–158.
3. Боброва Е.В. Современные представления о корковых механизмах и межполушарной асимметрии контроля позы (обзор литературы по проблеме) // Журн. высшей нервной деятельности. 2007. Т. 57. № 6. С. 663–678.
4. Джебраилова Т.Д. Индивидуальные особенности взаимодействия функциональных систем при целенаправленной деятельности человека в условиях эмоционального напряжения. Автореф. дисс. ... д.б.н. М., 2005. 46 с.
5. Диагностика доминирующей перцептивной модальности (С. Ефремцева) / Фетискин Н.П., Козлов В.В., Мануйлов Г.М. Социально-психологическая диагностика развития личности и малых групп. М., 2002. С. 237–238.
6. Дудкин К.Н., Чуева И.В., Макаров Ф.Н. Нейрофизиологические принципы формирования когнитивных функций: роль межполушарной асимметрии

- корковых структур головного мозга // Материалы конференции с международным участием “Функциональная асимметрия и пластичность мозга”. М., 2012. С. 56–60.
7. Думенко В.Н., Козлов М.К., Курова Н.С., Черемушкин Е.А. Межполушарные соотношения мощности корковых потенциалов в полосе 1–60 Гц при формировании когнитивной установки на лицевую экспрессию // Журн. высшей нервной деятельности. 2009. Т. 55. № 5. С. 658–680.
 8. Жаворонкова Л.А. Правши и левши: особенности межполушарной асимметрии мозга и параметров когерентности ЭЭГ // Журн. высшей нервной деятельности. 2007. Т. 57. № 6. С. 645–662.
 9. Кирой В.Н. Интерфейс мозг–компьютер. Ростов-н/Д., 2011.
 10. Корректирующая проба (Тест Бурдона) / Альманах психологических тестов. М., 1995. С. 107–111.
 11. Михайлова Е.С., Розенберг Е.С. Индивидуально-типологические особенности опознавания лицевой эмоциональной экспрессии и вызванные потенциалы мозга человека // Журн. высшей нервной деятельности. 2006. Т. 56. № 4. С. 481–490.
 12. Стреляу Я., Краевски А. Индивидуальный стиль деятельности и сила нервной системы // Психфизиологические особенности становления профессионала. 1974. С. 170.
 13. Федотчев А.И., Бондарь А.Т. Метод двойной обратной связи от ЭЭГ ритмов пациента для коррекции функциональных расстройств, вызванных стрессом // Журн. высшей нервной деятельности. 2008. Т. 58. № 3. С. 376–381.
 14. Ханин Ю.Л. Спилбергера–Ханина тест: Краткое руководство к применению шкалы реактивной и личностной тревожности. Л.: ЛНИИФК, 1976.
 15. Annett M. The distribution of manual asymmetry // British Journ. of Psychology. 1972. Т. 63. № 3. С. 343–358.
 16. Arbib M.A., Mundhenk T.N. Schizophrenia and the mirror system: and essay // Neuropsychologia. 2005. Vol. 43. P. 268–280.
 17. Birbaumer N., Ghanayim N., Hinterberger T., Iversen I., Kotchoubey B., Kübler A., Perelmouter J., Taub E., Flor H. A spelling device for the paralyzed // Nature. 1999. Vol. 398. P. 297–298.
 18. Birbaumer N., Kubler A., Ghanayim N., Hinterberger T., Perelmouter J., Kaiser J., Iversen I., Kotchoubey B., Neumann N., Flor H. The thought translation device (TTD) for completely paralyzed patients // IEEE Trans. Rehabil. Eng. 2000. Vol. 8. P. 190–192.
 19. Curran E.A., 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 Cogn. 2003. Vol. 51. P. 326–336.
 20. Dekker M., Sitskoorn M., Denissen A., van Boxtel G. The time-course of alpha neurofeedback training effects in healthy participants // Biological Psychology. 2014. Vol. 95. P. 70–73.
 21. Dornhege G., Millán J.R., Hinterberger T., McFarland D., Müller K.-R. (Eds.) Toward Brain–Computer Interfacing. Cambridge: MIT Press, MA, 2007.
 22. Eysenck H. J. et al. Eysenck personality inventory. San Diego: Educational and Industrial Testing Service, 1968.
 23. Frederick J.A. Psychophysics of EEG alpha state discrimination // Conscious cogn. 2012. Vol. 21. № 3. P. 1345–1354.
 24. Hart T.J. Auto control of EEG Alpha // Psychophysiology. 1968. Vol. 4. P. 506–514.
 25. Ince N.F., Tewfik A.H., Arica S. Extraction subject-specific motor imagery time–frequency patterns for single trial EEG classification // Computers in Biology and Medicine. 2007. Vol. 37. Is. 4. P. 499–509.
 26. Kiroi V.N., Vladimirovskii B.M., Aslanyan E.V., Bakhtin O.M., Minyaeva N.R. Electrographic Correlates of Actual and Imagined Movements: Spectral Analysis // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2012. Vol. 42. № 1. P. 21–27.
 27. Millán J.R. Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Cambridge: MIT Press, 2002.
 28. Model D., Zibulevsky M. Learning subject-specific spatial and temporal filters for single-trial EEG classification // NeuroImage. 2006. Vol. 32. Is. 4. P. 1631–1641.
 29. Neuper C., Müller G., Kübler A., Birbaumer N., Pfurtscheller G. Clinical application of an eeg-based brain-computer interface: A case study in a patient with severe motor impairment // EEG and Clin. Neurophysiol. 2003. Vol. 114. N. 3. P. 399–409.
 30. Perelmouter J., Birbaumer N. A binary spelling interface with random errors // IEEE Trans. Rehabil. Eng. 2000. Vol. 8. P. 227–232.
 31. Pfurtscheller G., Neuper C., Guger C., Harkam W., Ramoser R., Schlögl A., Obermaier B., Pregenzer M. Current Trends in Graz Brain-computer Interface (BCI) // IEEE Trans. Rehab. Eng. 2000. Vol. 8. № 2. P. 216–219.
 32. Pribram K.H. The far frontal cortex as executive processor: proprieties, priorities and practical inference / Downward Processes in the Perception Representation Mechanisms / (Eds) Taddei-Ferretti C.L., Musio K. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Science, 1998. P. 546–578.
 33. Vernon D., Egner T., Cooper N., Compton T., Neillands C., Sheri A. et al. The effect of training distinct neurofeedback protocols on aspects of cognitive performance // International Journ. of Psychophysiology. 2003. Vol. 47. № 1. P. 75–85.

34. Wolpaw J.R., Birbaumer N., McFarland D.J., Pfurtscheller G., Vaughan T.M. Brain-computer interfaces for communication and control // EEG and Clin. Neurophysiol. 2002. Vol. 113. № 6. P. 767–791.
35. Yoon J.W., Roberts St.J., Dyson M., Gan J.Q. Adaptive classification for Brain Computer Interface systems using Sequential Monte Carlo sampling // Neural Networks. 2009. Vol. 22. № 9. P. 1286–1294.

DYNAMICS OF INTERHEMISPHERIC RELATIONS DURING BIOFEEDBACK TRAINING

E. V. Aslanyan^{*}, V. N. Kirov^{}, A. S. Stoletniy^{***}, D. M. Lazurenko^{****},
O. M. Bakhtin^{*****}, N. R. Minyaeva^{*****}, R. I. Kirov^{*****}**

^{*} *PhD, Senior researcher, A.B. Kogan Research Institute of Neurocybernetics, SFU, Rostov-on-Don;*

^{**} *Sc.D. (biology), Director, the same place; full member of Russian academy of informatization of education, corresponding member of IASHS and RAMTS, Rostov-on-Don;*

^{***} *Post-graduate, A.B. Kogan Research Institute of Neurocybernetics, SFU, Rostov-on-Don;*

^{****} *Post-graduate, the same place;*

^{*****} *PhD, Senior researcher, the same place;*

^{*****} *PhD, Researcher, the same place;*

^{*****} *PhD, Associate Professor, Department of Biophysics and Biocybernetics, SFU, Rostov-on-Don.*

The ability to control interhemispheric relations in the central regions of the cortex in the alpha frequency range was investigated at 17 volunteers using biofeedback. It is indicated that after a short period of training subjects not only able to move arbitrarily the focus of the maximum expression of alpha-frequency towards the left or right hemisphere, but also to do it in the sufficiently local area. Multivariate analysis of variance showed all subjects were able to achieve changes in the monitored parameters, but changes not always reliable. Control effectiveness of inter-hemispheric relations varied significantly among individuals with different severity levels of personal features as psychoticism, extraversion and steadiness of nerve processes.

Key words: electroencephalography, biofeedback, personality traits, spectral analysis, analysis of variance, hemispheric asymmetry.