

УДК 612.84

ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МОЗГА В ПРОЦЕССЕ ВЕРБАЛЬНОГО И НЕВЕРБАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОБЕСЕДНИКОВ

© 2019 г. О. В. Шемелева¹, О. В. Жукова^{1,2, *}, Ю. Е. Шелепин^{1,2, **},
Г. А. Моисеенко¹, П. П. Васильев¹

¹ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: volgazhukova@gmail.com

**E-mail: yshelepin@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.11.2018 г.

После доработки 28.03.2019 г.

Принята к публикации 04.04.2019 г.

Проведено сравнение различных видов показателей ЭЭГ собеседников в условиях вербальной и невербальной коммуникации. Разработан аппаратно-программный комплекс и методика одновременной регистрации электрической активности мозга каждого из собеседников “ЭЭГ-гиперсканирование” при различном расположении испытуемых: “лицом к лицу” и “спина к спине”, в условиях комбинаций: наблюдения, прослушивания, монолога и диалога. Обнаружена связь суммарной мощности ЭЭГ с включением и исключением вербального и невербального компонента коммуникации у собеседников. Установлена статистически значимая разница мощности ЭЭГ при расположении собеседников “лицом к лицу” и “спина к спине”. Наибольшей суммарной мощностью ЭЭГ отличается положение “лицом к лицу” в сравнении со “спина к спине”, что подчеркивает важность невербальных компонентов. Другой важнейший показатель ЭЭГ – спектральный состав, также изменяется в зависимости от способов коммуникаций собеседников. Происходит перераспределение ритмов в различных отведениях ЭЭГ. Показано, какие показатели ЭЭГ могут служить маркерами, отражающими режимы взаимодействия собеседников.

Ключевые слова: восприятие мимики и речи, вербальная и невербальная коммуникация, ЭЭГ, спектральный анализ ЭЭГ, “ЭЭГ-гиперсканирование”, “зеркальные” нейроны, нейронные сети.

DOI: 10.1134/S0131164619060110

Наши исследования направлены на выявление закономерностей перестройки нейронных сетей головного мозга в процессе вербальной и невербальной коммуникации собеседников методом “ЭЭГ-гиперсканирование” [1]. В данной работе изучали особенности изменения характеристик ЭЭГ как маркеров откликов нейронных сетей головного мозга каждого из собеседников, вовлеченных в диалог.

В настоящее время метод “ЭЭГ-гиперсканирование” открывает широкие возможности для понимания механизмов формирования и взаимодействия членов команды, будь то в медицине, промышленности, армии, транспорте, спорте, музыке, театре, педагогике и т.д. [1–5]. Для оптимизации согласования и обучения членов команды в ее состав включали еще и искусственные интеллектуальные анализирующие и управляющие системы. Сигналы на них поступают от датчиков ЭЭГ, ЭМГ, ЭКГ, движений глаз и других.

Цель данной статьи минимизирована – выделить информативные маркеры состояния нейронных сетей головного мозга по данным паттернов ЭЭГ двух собеседников во время диалога, с учетом вербальной и невербальной коммуникации. Для достижения цели минимизировано число отведений и предпочтение отдано простоте обработки данных.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 18 добровольцев – 9 мужчин и 9 женщин (возрастной диапазон от 22 до 29 лет, средний возраст по группе 25.4 ± 1.7). В основном выборку составили студенты и аспиранты Санкт-Петербургского государственного университета, Института физиологии им. И.П. Павлова РАН и Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и опти-

ки. Все собеседники были знакомы друг с другом (учились на одном курсе указанных учебных заведений). Критериями включения участников в выборку являлись: отсутствие хронических заболеваний, судорожной и пароксизмальной активности в анамнезе, нормальный слух, нормальная острота зрения или скорректированное до нормы зрение при помощи очков или контактных линз.

Методы исследования. В качестве основного метода использовали регистрацию биоэлектрической активности мозга – ЭЭГ. Регистрацию и обработку ЭЭГ проводили с помощью двух 31-канальных анализаторов с 8 полиграфическими каналами в каждом “Мицар-ЭЭГ-202” (частота дискретизации – 2000 Гц) и программы *WinEEG*, разработанной в Институте мозга человека РАН им. Н.П. Бехтеревой – В.А. Пономаревым и Ю.Д. Кропотовым. Электроды располагали в соответствии с международной системой 10–20 в отведениях $Fp_1, Fp_2, F_7, F_3, F_z, F_4, F_8, T_3, C_3, Cz, C_4, T_4, T_5, P_3, P_z, P_4, T_6, O_1, O_2$. Референтные электроды располагали на мочках ушей. В работе использовали монтаж отведений ЭЭГ относительно объединенного ушного референта. Сопротивление электродов не превышало 5 кОм.

Процедура исследования и инструкция. Было два расположения собеседников относительно друг друга: “лицом к лицу” и “спина к спине”. Расстояние между собеседниками составляло 1.5 м, что соответствовало комфортной дистанции при социальных контактах [6]. Длительность каждого из анализируемых режимов взаимодействия составляла 4 мин. Громкость речи собеседников составляла 40–60 дБ на расстоянии 1 м с пиком в области 1.71–2 кГц. Половина группы начинала с парадигмы “лицом к лицу”, а вторая – “спина к спине”. Исследования проводили в экранированной камере. Регистрацию времени появления речевых сигналов провели с помощью подключенных микрофонов.

Были разработаны несколько условий исследования, которые отличались типом деятельности собеседников и типом воспринимаемых ими сигналов во время коммуникации (рис. 1). Первое – пассивное (контрольное) состояние обоих собеседников (далее по тексту “фон”). Собеседники выполняли инструкцию сидеть с закрытыми глазами и молчать. Второе – активное состояние – оба собеседника производили и получали только невербальные сигналы. Испытуемые выполняли инструкцию смотреть на лицо партнера и молчать (далее по тексту “открытые глаза, молча”). Третье – активное состояние – один из собеседников производил только невербальный сигнал (смотрел на лицо партнера по общению), но получал оба сигнала: вербальный и невербальный. В рамках данного условия инструкция была внимательно слушать своего собеседника (далее

по тексту “прослушивание речи”). Четвертое – активное состояние – один из собеседников производил оба типа сигнала, но получал от партнера только невербальный сигнал. Инструкция заключалась в том, чтобы смотреть на лицо партнера и рассказывать о себе на заданную тему (далее по тексту “монолог”). Пятое условие – активное состояние – оба собеседника производили и получали оба типа сигналов. Инструкция в рамках данного условия была следующей: смотреть на лицо партнера и вести беседу на заданную тему (далее по тексту “диалог”).

При расположении “лицом к лицу” собеседники в условии открытых глаз должны были смотреть на лицо партнера. При расположении “спина к спине” собеседники выполняли указанные выше инструкции, но при этом, смотрели не на лицо, а на стену экранированной камеры (невербальная коммуникация отсутствовала).

При ведении разговора добровольцам предлагали беседовать на определенные темы в соответствии со стандартной анкетой отдела кадров: место рождения, состав семьи, образование, опыт работы, увлечение, хобби и т.д. Выбор данных тем был обусловлен универсальностью предмета разговора, возможностью каждого человека в независимости от уровня образования и интересов вести и поддерживать беседу на заданную тему.

Коррекция и удаление артефактов. Для обработки данных использовали стандартные методы в программе *WinEEG*. Коррекцию артефактов морганий глаз провели с помощью метода независимых компонент [7]. Помимо этого из анализа исключали эпохи, содержащие артефакты, связанные с движением тела и головы, вызванные сильными эмоциональными реакциями при социальном взаимодействии. Эти пороговые значения были подобраны эмпирически, путем многократного выполнения обработки с различными параметрами и последующего визуального анализа результатов. В том числе для обнаружения артефактов проводили запись морганий и движений глаз. Влияние этих артефактов убирали с помощью программы *WinEEG*. Для контроля начала и конца речи каждого из собеседников использовали электромиографию (ЭМГ), с помощью которой контролировали напряжение лицевых мышц, а с помощью микрофона осуществляли запись звука.

Далее, чтобы выделить локальную активность коры головного мозга, применили преобразование ЭЭГ в “плотность источников тока” – “*current source density*” (*CSD*) [8], используя поверхностный Лапласиан. Оценку спектральной плотности провели с помощью дискретного преобразования Фурье. При расчете спектральной плотности весь анализируемый интервал разбивали на эпохи длительностью 4 с, перекрываю-

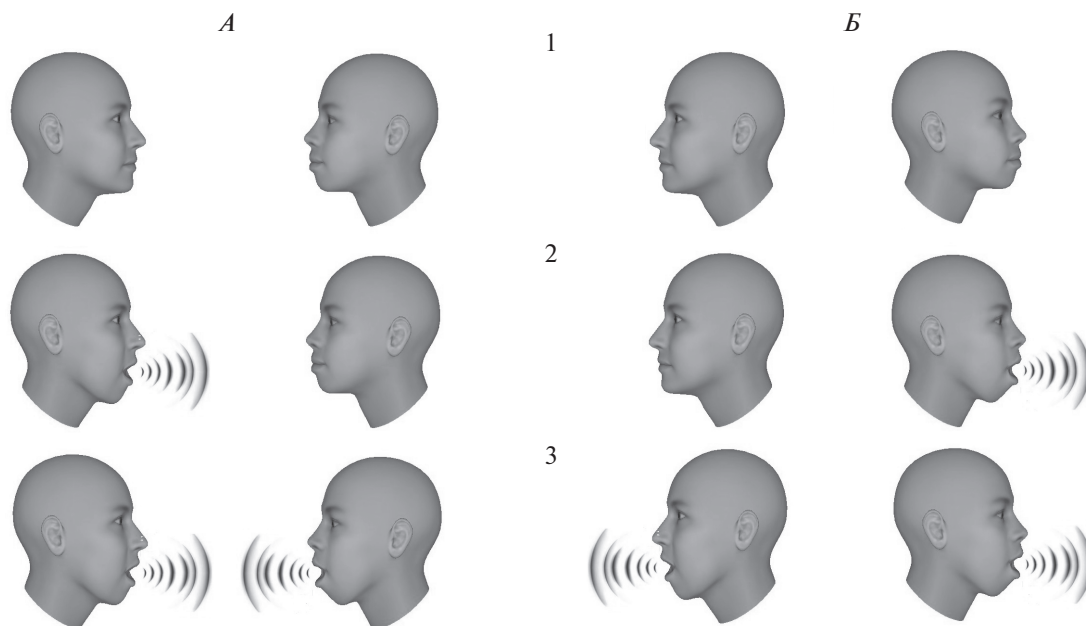


Рис. 1. Схема условий исследования общения собеседников при их расположении “лицом к лицу” (А) и “спина к спине” (Б).

1 – “открытые глаза, молча”, 1, А – оба собеседника передают и воспринимают только невербальные сигналы, 1, Б – невербальная коммуникация отсутствует; 2 – монолог и прослушивание речи, собеседники выполняют разные роли, 2, А – монолог одного и восприятие другим. Невербальная коммуникация у обоих. 2, Б – монолог, но оба собеседника слышат и воспринимают только вербальные сигналы; 3 – “диалог”. 3, А – оба собеседника передают и воспринимают и вербальные и невербальные сигналы, 3, Б – оба собеседника передают и воспринимают только вербальные сигналы.

щиеся на 50%. Для сглаживания спектров использовали окно Ханна. Далее рассчитывали мощность в диапазонах Δ (1.5–4 Гц), θ (4–7.5 Гц), α (7.5–14 Гц), β_1 (14–20 Гц), β_2 (20–30 Гц), γ (30–40 Гц) для каждого электрода, условия и каждого человека отдельно и полученные данные логарифмировались для нормализации их распределений.

Статистическую значимость эффектов, наблюдаемых в мощности в каждом из диапазонов в отдельности, оценивали с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями. Оценку статистической значимости взаимодействия факторов выполняли с учетом поправки *Huynh-Feldt* в условиях расположения людей “спина к спине” в связи с небольшим отклонением от сферичности. Также использовали *t*-критерий парных выборок. Для устранения ложно позитивных ошибок при множественных сравнениях использовали коррекцию Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Средняя мощность ЭЭГ в зависимости от типа коммуникации. На рис. 2 представлена средняя мощность ЭЭГ-сигналов в различных условиях исследования. При расположении испытуемых “лицом к лицу” минимальная мощность в θ -, β_1 -, β_2 - и γ -диапазонах наблюдается в контрольном

условии при отсутствии вербальных и явных невербальных сигналов коммуникации (от 1.42 ± 0.37 до 1.76 ± 0.30). При этом в α -диапазоне мощность ЭЭГ-сигнала в контрольном условии доминирует над всеми остальными (2.32 ± 0.33). При усложнении задачи – появлении невербального сигнала мощность возрастает во всех частотных диапазонах (от 1.75 ± 0.22 до 2.12 ± 0.42). Максимальная мощность в данном исследовании принадлежит условиям, где присутствовал и вербальный и невербальный сигнал одновременно (от 1.97 ± 0.21 до 2.37 ± 0.45). Таким образом, наблюдается постепенное увеличение мощности сигнала ЭЭГ при усложнении уровня коммуникации (появлении новых зрительных и слуховых каналов передачи и восприятия сообщений). Сходные результаты получены и при расположении собеседников “спина к спине”.

Интересным является тот факт, что при сравнении режимов коммуникации по отношению друг к другу показана наибольшая суммарная мощность ЭЭГ в режиме “монолог”.

Общее сравнение условий исследования в отдельных частотных диапазонах и отведениях ЭЭГ. Изменение мощности ЭЭГ-сигнала анализировалась с помощью дисперсионного анализа (с повторными измерениями) с внутрииндивидуальными факторами Фв1 (5 уровней). Показано, что в каждом частотном диапазоне ЭЭГ суще-

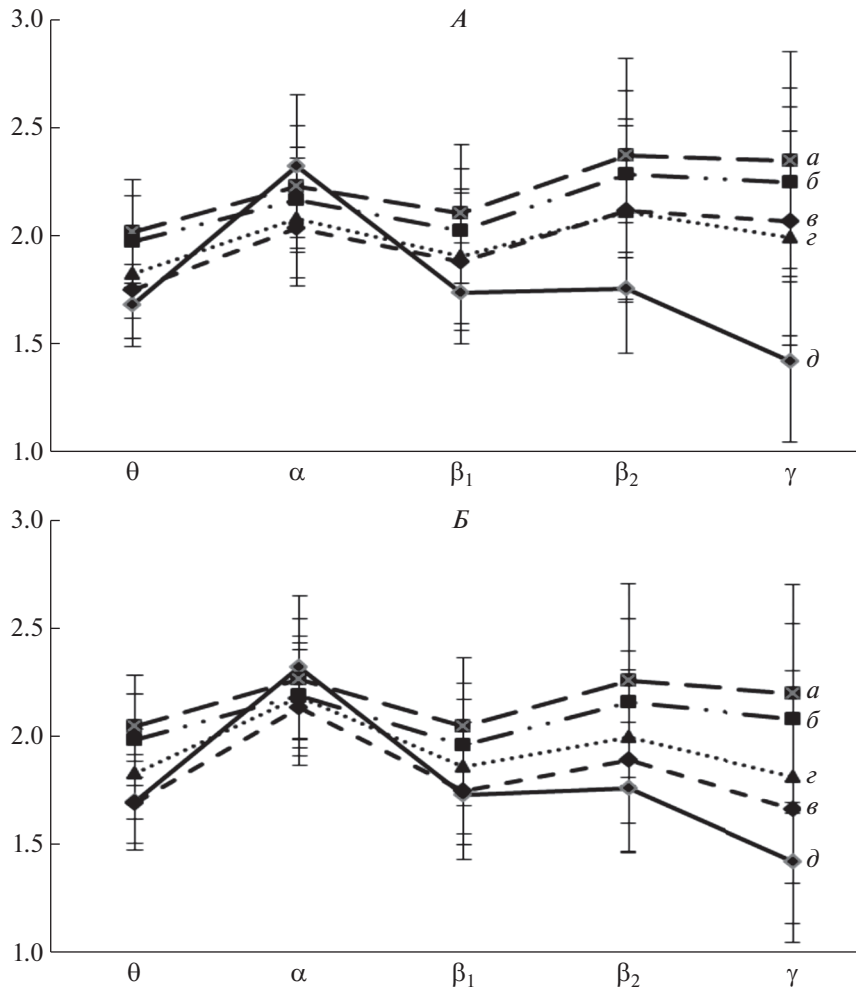


Рис. 2. Средняя мощность ЭЭГ-сигналов в различных условиях исследования при расположении испытуемых “лицом к лицу” (А) и “спина к спине” (Б). *a* – “монолог”, *b* – “диалог”, *c* – “открытые глаза, молча”, *c* – “прослушивание речи”, *d* – “фон”. По оси абсцисс – частотные диапазоны, по оси ординат – мощность сигнала в мкВ². Данные усреднены по группе из 18 чел. ($M \pm SD$) и логарифмированы для нормализации их распределений.

ствуют статистически значимые отличия между всеми условиями исследования. Так, при расположении собеседников “лицом к лицу” показаны отличия по мощности сигнала в θ ($F(4, 64) = 10.36, p = 0.000$)-, α ($F(4, 64) = 4.74, p = 0.002$)-, β_1 ($F(4, 64) = 6.28, p = 0.000$)-, β_2 ($F(4, 64) = 9.64, p = 0.000$)- и γ ($F(4, 64) = 15.64, p = 0.001$)-диапазонах. При расположении “спина к спине” – в θ ($F(2, 33) = 28.09, p = 0.000$)-, β_1 ($F(3, 50) = 12.91, p = 0.000$)-, β_2 ($F(3, 43) = 14.15, p = 0.000$)- и γ ($F(4, 68) = 18.66, p = 0.000$)-диапазонах. Исключением является α -ритм при расположении “спина к спине”, где статистической разницы в эффектах не обнаружено ($F(3, 59) = 2.64, p = 0.05$).

Больше всего отличий между разными видами коммуникации наблюдаются в височных отведениях головного мозга и префронтальных отведениях, что отражено на рис. 3. Это характерно при

расположении добровольцев как “лицом к лицу”, так и “спина к спине”.

Анализ результатов показал, что существуют статистически значимые отличия между всеми режимами коммуникации и при расчете суммарной мощности ЭЭГ.

Увеличение мощности при низких и в высоких частотах в лобных и височных отведениях связано либо с активностью речевых и двигательных центров мозга, либо деятельностью речевых мышц, так как наибольшей мощностью сигнала обладает режим монолога. Однако авторы данной статьи преднамеренно не разделяют источники сигнала, так как важно выявление маркера коммуникации. Имеется достоверная разница в откликах на электродах T_3 и T_4, F_3 и F_4 , расположенных слева и справа, над речевыми центрами левого и правого полушарий. В данной работе

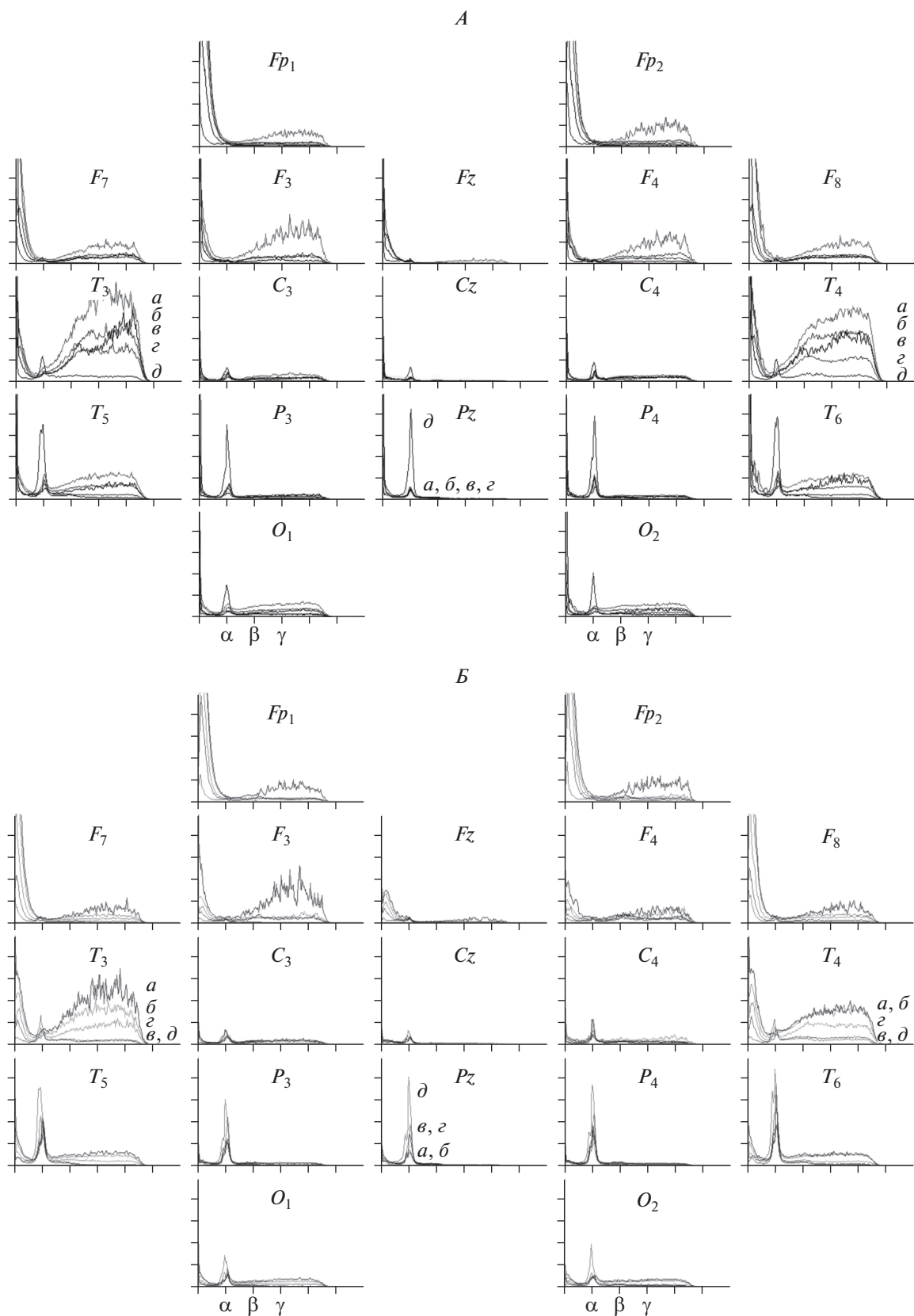


Рис. 3. Спектры мощности ЭЭГ в различных отведениях головного мозга, усредненные по группе испытуемых (18 чел.) при расположении собеседников “лицом к лицу” (А) и “спина к спине” (Б). а – “монолог”, б – “диалог”, в – “открытые глаза, молча”, з – “прослушивание речи”, д – “фон”. По оси абсцисс – частота в Гц, по оси ординат – мощность сигнала в мкВ².

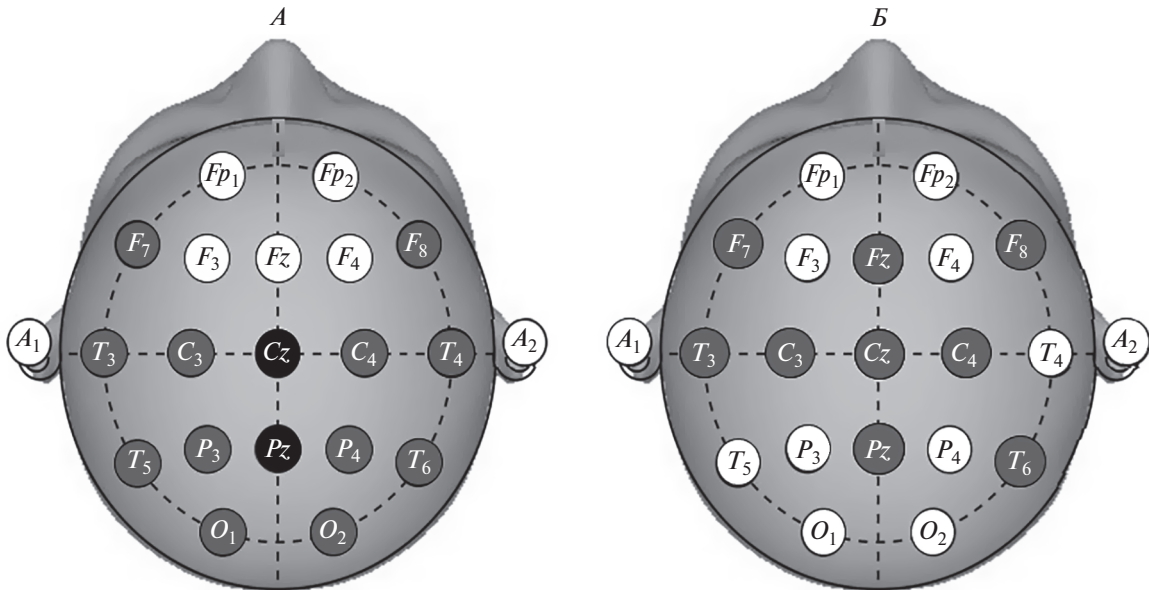


Рис. 4. Сравнение мощности ЭЭГ-сигналов в различных отведениях головного мозга в условиях: “открытые глаза, молча” (А) и “монолог” (Б). Данные усреднены на группе 18 чел. Серый цвет электродов – значимое увеличение мощности сигнала при расположении людей “лицом к лицу” в γ -диапазоне, черный цвет – при расположении “спина к спине” в α -диапазоне.

обнаружили электрофизиологические маркеры разных видов коммуникации, но не их источники.

Сравнение показателей ЭЭГ-активности мозга по отдельным отведениям в зависимости от типа расположения собеседников: “лицом к лицу” и “спина к спине”. Показано, что наибольшей мощностью суммарной ЭЭГ отличается положение “лицом к лицу” по сравнению с “спина к спине”. Что подчеркивает тот факт, что суммарная мощность ЭЭГ собеседников зависит от сочетания взаимодействия вербальных и невербальных компонентов.

Согласно результатам статистического анализа с использованием парного критерия Стьюдента, больше всего статистически значимых отличий между расположением собеседников “лицом к лицу” и “спина к спине” показаны при условиях “открытые глаза, молча” и “монолог”. То, что наибольшая статистическая значимость между разными положениями собеседников, выявленная именно в этих двух режимах коммуникации позволяет увидеть, что при отсутствии входящего вербального сигнала, невербальная составляющая коммуникации оказывает значимое влияние на ЭЭГ.

На рис. 4 показаны отведения головного мозга по международной системе 10-20, в которых найдены статистически значимые отличия в мощности сигнала ЭЭГ при расположении добровольцев “лицом к лицу” и “спина к спине” (глаза открыты).

Так, в условии “открытые глаза, молча” зафиксировано увеличение мощности сигнала в β_1 -, β_2 - и γ -диапазонах ЭЭГ при расположении собеседников “лицом к лицу” в височных (T_3 ($t(17) = -4$, $p < 0.05$), T_4 ($t(17) = -3.43$, $p < 0.05$), T_5 ($t(17) = -4.24$, $p < 0.05$), T_6 ($t(17) = -3.35$, $p < 0.05$), фронтальных (F_7 ($t(17) = -2.67$, $p < 0.05$), F_8 ($t(17) = -2.28$, $p < 0.05$), центральных (C_3 ($t(17) = -2.45$, $p < 0.05$), C_4 ($t(17) = -2.98$, $p < 0.05$), теменных (P_3 ($t(17) = -3.56$, $p < 0.05$), P_4 ($t(17) = -3.12$, $p < 0.05$), Pz ($t(17) = -2.90$, $p < 0.05$) и затылочных (O_1 ($t(17) = -3.88$, $p < 0.05$), O_2 ($t(17) = -2.90$, $p < 0.05$)) отведениях головного мозга. В качестве примера приведена величина “ t -отношения” и значение “ p ” в γ -диапазоне частот. Т.е., при поступлении обратного невербального сигнала мощность в указанных областях увеличивалась в β_1 -, β_2 - и γ -ритмах.

В α -диапазоне, наоборот, наблюдается увеличение мощности ЭЭГ-сигнала в отведениях Cz ($t(17) = 2.80$, $p < 0.05$) и Pz ($t(17) = 2.83$, $p < 0.05$) при расположении собеседников “спина к спине”. Т.е., данные при режиме коммуникации “открытые глаза, молча” и сопоставлении расположения собеседников “лицом к лицу” и “спина к спине” показывают разницу в μ -ритме (частота α -ритма 8–13 Гц у взрослых, отведения Cz и Pz). Что соответствует данным мета-анализа [9], посвященного оценке активности зеркальной системы человека, о подавлении μ -ритма (десинхронизации) при восприятии, наблюдении

(в данном случае: расположение собеседников “лицом к лицу”).

В режиме “монолог” у испытуемых зафиксировано увеличение мощности сигнала в β_1 -, β_2 - и γ -диапазонах при расположении собеседников “лицом к лицу” во фронтальных (F_7 ($t(17) = -3.24$, $p < 0.05$), F_8 ($t(17) = -2.59$, $p < 0.05$), F_z ($t(17) = -2.42$, $p < 0.05$), височных (T_3 ($t(17) = -2.24$, $p < 0.05$), T_6 ($t(17) = -2.54$, $p < 0.05$), центральных (C_3 ($t(17) = -2.22$, $p < 0.05$), C_z ($t(17) = -2.27$, $p < 0.05$), C_4 ($t(17) = -2.66$, $p < 0.05$), теменных (P_z ($t(17) = -2.41$, $p < 0.05$) отведениях головного мозга. Можно отметить асимметричность увеличения в некоторых отведениях: из задних лобных и височных отведений увеличение обнаружено в левом заднем лобном и височном отведении, из затылочных — в правом затылочном отведении. В качестве примера приведена величина “ t -отношения” и значения “ p ” в γ -диапазоне частот.

Эти данные позволяют выявить влияние невербальной компоненты (которая появляется при расположении лицом к лицу) при продуцировании вербальной коммуникации.

При сравнении мощности мозговой активности собеседников при расположении “лицом к лицу” и мощности мозговой активности при расположении собеседников “спина к спине” статистическая разница отсутствует в лобных отведениях как при режиме “молча”, так и при режиме “монолог”.

Сравнение показателей ЭЭГ активности мозга в зависимости от типов коммуникации. Проведены апостериорные сравнения условий исследования с поправкой Бонферрони (табл. 1). Данные сравнения играют важную роль в данном исследовании, так как позволяют показать вклад вербальных и невербальных составляющих путем сравнения двух условий, которые отличались по каким-либо признакам.

Следует обратить внимание на наиболее интересные сравнения. Так, при сравнении контрольного условия (“фон” — отсутствие коммуникации) и условия “открытые глаза, молча” (спонтанная невербальная коммуникация) найдены статистически значимые отличия показателей мощности сигнала только при расположении собеседников “лицом к лицу” в α ($p < 0.05$)-, β_2 ($p < 0.05$)- и γ ($p < 0.001$)-диапазонах ЭЭГ.

При появлении вербального и невербального сигнала со стороны партнера — условие: внимательно слушать своего партнера (“прослушивание речи”) в сравнении с контрольным условием (“фон”), отличия наблюдаются как при расположении “лицом к лицу” в β_2 ($p < 0.05$)- и γ ($p < 0.001$)-диапазонах, так и при расположении “спина к спине” в тех же диапазонах, но при уровне ($p < 0.05$).

При сравнении условий, “открытые глаза, молча” (где присутствовало двустороннее невербальное взаимодействие) и условия “диалог” статистически значимые отличия показаны только при расположении собеседников “спина к спине” в θ ($p < 0.001$), β_1 ($p < 0.05$), β_2 ($p < 0.05$) и γ ($p < 0.05$) частотных диапазонах (когда осуществлялось двустороннее — только вербальное взаимодействие.) Статистическая значимость различия этих условий позволяет выделить влияние двусторонней вербальной (очищенной от невербальной) коммуникации. При наличии невербального спонтанного взаимодействия при разном расположении собеседников по отношению друг к другу происходит сглаживание существующих отличий.

При выполнении инструкции непрерывного “монолога” по сравнению с режимом “открытые глаза, молча” — статистически значимые отличия были найдены как при расположении “лицом к лицу” в θ ($p < 0.001$)-, α ($p < 0.05$)-диапазонах, так и при расположении “спина к спине” в θ ($p < 0.001$)-, β_1 ($p < 0.001$)-, β_2 ($p < 0.05$)- и γ ($p < 0.001$)-диапазонах ЭЭГ. При втором типе расположения (при отсутствии входящего невербального сигнала) можно выделить чистое влияние исходящего вербального сигнала.

Необходимо отметить, что в ситуации, когда менялось направление коммуникации, т.е., при наличии исходящего вида вербальной коммуникации по сравнению с входящим видом вербальной коммуникации (в условиях исключения невербальной коммуникации: расположение “спина к спине”), показаны статистически значимые отличия в θ -ритмах, что показывает значимость этих видов волн для различения двух видов деятельности: производство и восприятие речи (во фронтальных отведениях (F_7 , F_3) головного мозга).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данного исследования было изучить особенности взаимодействия сигналов при вербальной и невербальной коммуникации двух собеседников.

Особый интерес представляет изучение взаимодействия вербальных и невербальных сигналов в более естественной обстановке исследования — в реальных условиях общения двух людей.

В исследованиях социального взаимодействия испытуемых важно и суммарное значение мощности ЭЭГ, и изменение соотношения основных ритмов: θ , α , β и γ . Трудность в ЭЭГ-исследованиях собеседников заключается в том, что в естественных условиях поведения присутствует влияние напряжения мимических, речевых и глазодвигательных мышц. Применение стандартных

Таблица 1. Результаты апостериорных сравнений мощности сигнала в различных условиях исследования в выделенных частотных диапазонах ЭЭГ

Сравнение режимов между собой	Лицом к лицу	Спина к спине
“Фон”–“диалог”	θ ($p < 0.05$), β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.001$)	θ ($p < 0.05$), β_1 ($p < 0.05$), β_2 ($p < 0.001$), γ ($p < 0.001$)
“Фон”–“монолог”	θ ($p < 0.05$), β_1 ($p < 0.001$), β_2 ($p < 0.001$), γ ($p < 0.001$)	θ ($p < 0.05$), β_1 ($p < 0.001$), β_2 ($p < 0.001$), γ ($p < 0.001$)
“Фон”–“открытые глаза, молча”	α ($p < 0.05$): β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.001$)	–
“Фон”–“прослушивание речи”	β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.001$)	β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.05$)
“Диалог”–“прослушивание речи”	–	θ ($p < 0.001$)
“Диалог”–“открытые глаза, молча”	–	θ ($p < 0.001$), β_1 ($p < 0.05$), β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.05$)
“Монолог”–“прослушивание речи”	θ ($p < 0.05$), β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.05$)	θ ($p < 0.001$)
“Монолог”–“открытые глаза, молча”	θ ($p < 0.001$), α ($p < 0.05$)	θ ($p < 0.001$), β_1 ($p < 0.001$), β_2 ($p < 0.05$), γ ($p < 0.001$)
“Прослушивание речи”–“открытые глаза, молча”	–	θ ($p < 0.05$)

методов программы *WinEEG* по удалению артефактов, в том числе исключение удаление участков ЭЭГ при наличии мышечной активности век и движений глаз, оказались эффективными, т.к. мощность спектра ЭЭГ говорящего и молчащего собеседника имеют одинаковый порядок и могут быть использованы в качестве маркеров состояний мозга при разных видах коммуникаций.

Более подробно роль миограммы лицевых мышц как тонкого индикатора состояния мозга, в процессе осознаваемого и неосознаваемого зрительного восприятия рассмотрены нами ранее [10].

Были проведены множественные парные сравнения между всеми условиями исследований в рамках одного расположения добровольцев относительно друг друга.

Также было проведено сравнение одного и того же условия исследования при разном расположении собеседников относительно друг друга: “лицом к лицу” и “спина к спине”. При таком сравнении условий коммуникаций между собой было получено наибольшее число статистически значимых отличий при условии “открытые глаза, молча” и условии “монолог”. Невербальная составляющая играет важную роль в социальном

взаимодействии при отсутствии обратной вербальной связи.

Данные при режиме коммуникации “открытые глаза, в молчании” и сопоставлении расположения собеседников лицом к лицу и спина к спине показывают разницу в μ -ритме (частота α -ритма 8–13 Гц у взрослых, отведения Cz и Pz). Эти данные сопоставимы с данными о подавлении μ -ритма (десинхронизации) при восприятии, наблюдении (расположение собеседников “лицом к лицу”) [9].

Увеличение β_2 - и γ -активности как в режиме “молчание”, так и в режиме “монолог” происходит при расположении “лицом к лицу”, по сравнению с расположением “спина к спине”, что может говорить о зависимости β_2 - и γ -ритма от наличия невербального сигнала.

При режиме “молчание” в условии “глаза в глаза” увеличение мощности β_2 - и γ -ритмов происходит симметрично по всем отведениям, кроме Fp_1 и Fp_2 , F_3 , Fz и F_4 .

Сравнение разных типов коммуникации подтверждает выводы о влиянии невербальной компоненты на β_2 - и γ -ритмы. Так, показана статистически значимая разница между режимом “фон” и “лицом к лицу”.

Интересен тот факт, что влияние вербальной компоненты на β_2 - и γ -ритмы можно выявить только при отсутствии невербальной компоненты. Обнаружена статистически достоверная значимость разницы при β_2 - и γ -ритмах между мощностью режима “диалог” по сравнению с режимом “открытые глаза, молча”, а также режима “монолог” и “открытые глаза, молча” только при условии расположения собеседников “спина к спине”. При расположении собеседников “лицом к лицу” такой разницы не обнаружено.

Сравнивая отклики мозга двух расположений собеседников при режиме “монолог”, видно снижение мощности при расположении “спина к спине”. Рассматривая мощность по отведениям видно, что мощность снижается асимметрично (сравнивая левое и правое полушария мозга). Не показана статистическая разница мощности при двух расположениях собеседников во фронтальных лобных отведениях.

Данный факт позволяет предположить, что увеличение мощности ЭЭГ при расположении собеседников “лицом к лицу” по сравнению с расположением “спина к спине” (т.е. при появлении невербального сигнала от слушающего), в меньшей степени связано с мышечной активностью лица. Для более детального изучения взаимодействия источников ЭМГ и ЭЭГ на результирующий сигнал в данных условиях исследования целесообразно подробнее изучить величину и мощность ЭМГ, как результат мелких мышечных

движений в условиях невербальной коммуникации, как это мы делали в других исследованиях [10].

При сравнении условий исследования, которые были выровнены между собой и отличались только по направлению вербальной коммуникации (входящий и исходящий сигнал или входящий сигнал и его отсутствие) показано, что существуют статистически значимые отличия в θ -ритмах во фронтальных отведениях (F_7 , F_3) головного мозга. То есть, θ -ритм значительно отличается при продуцировании и восприятии речи. Найденные отличия в θ -диапазоне можно соотнести с исследованиями, в которых авторы использовали для изучения коммуникации метод гиперсканирования с помощью функциональной спектроскопии в ближней инфракрасной области (ФНИРС) [11]. Результаты исследования [11] продемонстрировали наибольшую корреляцию между неидентичными структурами мозга говорящего и слушающего: между префронтальной областью говорящего и теменной областью слушающего в условиях речевой коммуникации.

ВЫВОДЫ

1. Установили, что суммарная мощность ЭЭГ-собеседников зависит от соотношения вербальных и невербальных компонентов в ходе коммуникации, а также с ролью собеседника говорящего и слушателя.

2. Наибольшей суммарной мощностью ЭЭГ, принятой как маркер вида коммуникации, отличается положение “лицом к лицу” по сравнению с положением “спина к спине”, что подчеркивает важность невербальных компонентов при речевой коммуникации.

3. Наибольшая суммарная мощность ЭЭГ показана в режиме “монолог” — в условии “лицом к лицу”. Когда обратная невербальная связь отсутствует в условии “спина к спине”, мощность уменьшается. Эти выводы остаются справедливыми даже при условии, если допустить, что в ЭЭГ замешены сигналы от лицевых мышц, т.к. авторов данной статьи интересовали маркеры различных состояний, в которых находятся собеседники.

4. Установлено уменьшение μ -ритма в мозгу собеседников в условии “лицом к лицу” по сравнению с условием “спина к спине”, что, вероятно подтверждает гипотезу о связи этих ритмов с деятельностью нейронной сети зеркальных нейронов. Выделить разницу μ -ритма в срединных центральном и теменном отведении (в областях, где вклад мимических мышц минимален) при разном расположении собеседников удалось в режиме “открытые глаза, молчание”, который исключает действие речевых мышц.

5. Установлено увеличение β_2 - и γ -ритмов в мозгу собеседников в условии “лицом к лицу” по сравнению с условием “спина к спине”, что, вероятно подтверждает гипотезу о связи этих ритмов с обработкой зрительной информации. Увеличение β_2 - и γ -ритмов в режиме “монолог” по сравнению с режимом “открытые глаза, молча” обнаружено только при расположении собеседников спина к спине, что говорит о связи вербальных и невербальных компонентов коммуникации с этими ритмами.

6. Показано отличие ЭЭГ у собеседника говорящего по сравнению со слушающим (речевое продуцирование или восприятие).

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках финансирования Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013 – 2020 гг. (ГП-14, раздел 63), Институт физиологии им. И.П. Павлова (Санкт-Петербург).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu D., Liu S., Liu X. et al. Interactive Brain Activity: Review and Progress on EEG-Based Hyperscanning in Social Interactions // *Frontiers in Psychology*. 2018. V. 9. P. 1.
2. Montague P.R., Berns G.S., Cohen J.D. et al. Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions // *Neuroimage*. 2002. V. 16. P. 1159.
3. Sanger J., Muller V., Lindenberger U. Intra- and inter-brain synchronization and network properties when playing guitar in duets // *Front. Human Neurosci*. 2012. V. 6. P. 1.
4. Жукова О.В., Шелепин Ю.Е., Моисеенко Г.А. и др. Изучение нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих социальное взаимодействие в процессе деятельности человека / Технологическая перспектива в рамках Евразийского пространства: новые рынки и точки экономического роста. Материалы 3-ей Международной научной конференции. СПб., 2017. С. 317.
5. Муртазина Е.П., Журавлев Б.В., Трифонова Н.Ю. Разработка психофизиологических моделей и методов исследования конкурентных и кооперативных взаимодействий двух испытуемых // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*. 2017. № 8. С. 20.
6. Hall E.T. *The hidden Dimension*. Originally published: Garden City, N.Y.: Doubleday, 1966. P. 1.
7. Терещенко Е.П., Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д., Мюллер А. Сравнение эффективности различных методов удаления артефактов морганий при анализе количественной электроэнцефалограммы и вызванных потенциалов // *Физиология человека*. 2009. Т. 35. № 2. С. 124.
8. Perrin F., Pernier J., Bertrand O. et al. Spherical splines for scalp potential and current density mapping // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1989. V. 72. P. 184.
9. Fox N.A., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H. et al. Assessing Human Mirror Activity With EEG Mu Rhythm: A Meta-Analysis // *Psychological Bulletin*. 2016. V. 142. № 3. P. 291.
10. Шелепин Ю.Е. Введение в нейроиконику. СПб.: Троицкий мост, 2017. 350 с.
11. Liu Y., Piazza E.A., Simony E. et al. Measuring speaker–listener neural coupling with functional near infrared spectroscopy // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. Article 43293.

Electrophysiological Indicators of Brain Activity in the Process of Verbal and Non-Verbal Communication during the Dialogue

O. V. Shchemeleva^a, O. V. Zhukova^{a, b, *}, Yu. E. Shelepin^{a, b, **}, G. A. Moiseenko^a, P. P. Vasilyev^a

^a*Pavlov institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^b*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: volgazhukova@gmail.com

**E-mail: yshelepin@yandex.ru

We compared several types of EEG parameters of two interlocutors during verbal and non-verbal communication. A hardware-software complex and associated method were developed for EEG hyperscanning, i.e. simultaneous EEG recording in two subjects with different location (face to face and back to back) during a dialogue, a monologue. We observed a connection between the total EEG power and the combination of a verbal and non-verbal component of communication. In the comparison of different types of communica-

tion, a statistically significant difference in the EEG power was found when the interlocutors were placed “face to face” and “back to back”. The highest total EEG power capacity of brain activity was observed for the interlocutor location “face to face” compared to “back to back”, which emphasizes the importance of non-verbal contacts. Another most important indicator of EEG – spectral composition, also varies depending on the communication process of the interlocutors. There is a redistribution of EEG rhythms in different channels. It was found that the EEG parameters can serve as the markers of different modes of communication.

Keywords: verbal and non-verbal communication, speech, EEG, spectral analysis, EEG-hyperscanning, speech production and perception.