

УДК 612.82

Соотношение влияния оптических и акустических каналов связи на собеседников

© 2020 г. **О. В. Жукова**, канд. психол. наук; **О. В. Щемелева**

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

E-mail: volgazhukova@gmail.com

Поступила в редакцию 21.06.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-10-38-49

Данное исследование посвящено поиску маркеров влияния оптических и акустических каналов связи на собеседников в процессе коммуникации «лицом к лицу» и «спина к спине». Анализировали паттерны ритмов в различных частотных диапазонах, в том числе, как отражение мимических мышц по данным электроэнцефалограммы и электромиограммы. Показано, что паттерны ритмов электроэнцефалограммы в разных режимах коммуникации имеют схожие и отличительные черты. При расположении собеседников «спина к спине» больше всего отличий между разными режимами коммуникации выявлены в дельта и гамма-ритмах головного мозга. При расположении «лицом к лицу» мощная невербальная компонента увеличивает мощность бета и гамма-ритмов и сглаживает отличия между разными режимами коммуникации. Наиболее информативными являются фронтальные (F7, F8) и затылочные (O1 и O2) отведения головного мозга, в которых при разном расположении собеседников относительно друг друга показаны значимые отличия между разными режимами коммуникации.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, невербальная и вербальная коммуникация, мимика, общение, ритмы головного мозга.

Коды OCIS: 100.4996, 170.6960, 330.5020.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе коммуникации происходит восприятие и передача большого объёма информации, большая часть которой транслируется по оптическим и акустическим каналам связи. Проблема заключается в том, что в отличие от акустического, по оптическому каналу передаётся большое количество информации разного типа: пространственная информация (межличностное пространство), взгляд, оптико-кинетические (мимика и жесты) и др. Особое место среди невербальных сигналов занимает мимика, как результат постоянных, выраженных и незаметных мышечных сокращений. Известно, что при осуществлении невербального общения задействуется около сорока действующих мышц только на одной

стороне лица. Для левой и правой стороны лица — это восемьдесят, причём левая и правая стороны не всегда работают симметрично, не всегда все мышцы работают одинаково [1]. При этом собеседники обмениваются не единичными последовательными сигналами, а целым пулом параллельных сигналов разной модальности, которые могут оказывать разное влияние на психоэмоциональное состояние человека. Таким образом, представляет интерес найти маркеры влияния оптических и акустических каналов связи на собеседника в процессе коммуникации.

В качестве основного показателя использованы спектры мощностей ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Известно, что ритмы мозга отражают процессы функциональной

модуляции активности крупномасштабных нейронных сетей головного мозга человека, и, вероятно, связаны со многими аспектами человеческой деятельности [2]. Большое количество исследований демонстрируют роль мозговых колебаний в различных частотных диапазонах при выполнении разнообразных когнитивных и эмоциональных задач [2–5]. Следовательно, ритмы связаны и с различными аспектами общения. Нейронные механизмы вербальной коммуникации изучены достаточно подробно [6]. Речь по своей сути организована ритмично. Например, временные шкалы фонем и слогов, а также формальные просодические аспекты, такие как интонация и ударение, попадают в отдельные полосы частот. В мощности ритмов отражаются процессы сегментации, кодирования и производства речи в разных временных масштабах [6]. Роль же ритмов в процессе невербальной коммуникации гораздо менее понятна.

Необходимо отметить, что, так как коммуникация — динамический процесс, который включает как минимум двух участников, широкое распространение в исследованиях социального взаимодействия получил метод гиперсканирования — одновременная запись ЭЭГ у двух и более людей одновременно [7]. Первая подобная запись ЭЭГ была проведена еще в 1965 г. [8]. Но только в последнее время этот метод получил активное развитие в связи с изучением социального взаимодействия. Внедрение электроэнцефалографического подхода гиперсканирования обеспечило экологические экспериментальные условия, благодаря которым люди могут взаимодействовать естественным образом. Однако исследования, проведенные данным методом, в основном изучают либо вербальную [9], либо невербальную коммуникацию по отдельности [10]. Значительно меньше исследований посвящено совместному анализу сигналов, передающихся по оптическим и акустическим каналам связи [11]. В данной работе акцент был сделан на исследовании роли мимики и визуального контакта в процессе коммуникации при разном расположении собеседников — «лицом к лицу» и «спина к спине». В то же время, представляет интерес выяснить, существуют ли характерные черты в спектре мощности ритмов ЭЭГ, которые позволяют отличить один режим коммуникации от другого?

Таким образом, цель работы заключалась в поиске маркеров влияния оптических и акустических каналов связи на собеседников в процессе коммуникации «лицом к лицу» и «спина к спине». Полученные результаты могут быть использованы при развитии методов машинного распознавания эмоциональных состояний людей по данным ЭЭГ.

МЕТОДИКА

Испытуемые

В исследовании принимали участие 18 добровольцев — 9 мужчин и 9 женщин (возрастной диапазон от 22 до 29 лет, средний возраст по группе $25,4 \pm 1,7$). Все люди были разбиты на пары. В основном выборку составили студенты и аспиранты Санкт-Петербургского государственного университета и Института физиологии им. И.П. Павлова РАН. 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 — гиперсканирование

Проведена одновременная регистрация биоэлектрической активности мозга — снята ЭЭГ во время общения двух собеседников. Всего приняло участие 9 пар. 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. Электроды располагали в соответствии с международной системой 10–20 в отведениях Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2. Референтные электроды располагали на мочках ушей. В работе использовали монтаж отведений ЭЭГ относительно объединенного ушного референта. Сопротивление электродов не превышало 5 кОм.

Было два расположения собеседников относительно друг друга: «лицом к лицу» и «спина

к спине». При расположении «спина к спине» собеседники смотрели на стену экранированной камеры. Расстояние между собеседниками составляло 1,5 м, что соответствовало комфортной дистанции при социальных контактах. Длительность каждого из анализируемых режимов взаимодействия составляла 4 мин. Громкость речи собеседников составляла 40–60 дБ на расстоянии 1 м с пиком в области 1,71–2,0 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.

Процедура исследования и инструкция

Были разработаны несколько режимов коммуникации, которые отличались типом воспринимаемых ими сигналов (вербальных и невербальных) во время беседы (таблица). Для эксперимента также был предусмотрен этап контроля: фон — состояние покоя с закрытыми глазами.

В рамках дизайна эксперимента были разработаны инструкции для собеседников:

Первое — (далее по тексту «фон»). Собеседники выполняли инструкцию сидеть с закрытыми глазами и молчать.

Второе — испытуемые выполняли инструкцию сидеть с открытыми глазами, смотреть на лицо партнёра и молчать (далее по тексту «открытые глаза, молча»)

Третье — в рамках данного режима инструкция была смотреть на лицо партнёра и внимательно слушать своего собеседника, когда другой говорит (далее по тексту «прослушивание речи»).

Четвёртое — инструкция заключалась в том, чтобы смотреть на лицо партнёра и рассказывать о себе на заданную тему, когда другой слушает (далее по тексту «монолог»).

Пятое — инструкция в рамках данного режима была следующей: смотреть на лицо партнёра и вести беседу на заданную тему (далее по тексту «диалог»).

При расположении «спина к спине» собеседники выполняли те же инструкции, но смотрели на стену экранированной камеры (невербальная коммуникация отсутствовала).

При ведении разговора добровольцам предлагали беседовать на определённые 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.

Описание различных режимов коммуникации в зависимости от типа канала связи и расположения собеседников относительно друг друга

	Режим коммуникации	Субъекты	Лицом к лицу		Спина к спине	
			Акустический канал	Оптический канал	Акустический канал	Оптический канал
1	Закрытые глаза, молча (фон)	Оба	Нет	Нет	Нет	Нет
2	Открытые глаза, молча	Оба	Нет	Входящая и исходящая	Нет	Нет
3	Открытые глаза, только прослушивание	Один из пары	Входящая	Входящая и исходящая	Входящая	Нет
4	Открытые глаза, только монолог (производство речи)	Один из пары	Исходящая	Входящая и исходящая	Исходящая	Нет
5	Открытые глаза, диалог (свободная беседа)	Оба	Входящая и исходящая	Входящая и исходящая	Входящая и исходящая	Нет

Коррекция и удаление артефактов

Коррекцию артефактов морганий глаз провели с помощью метода независимых компонент [12–14]. Помимо этого из анализа исключали эпохи, содержащие артефакты, связанные с движением тела и головы, вызванные сильными эмоциональными реак-

циями при социальном взаимодействии. Эти пороговые значения были подобраны эмпирически, путём многократного выполнения обработки с различными параметрами и последующего визуального анализа результатов. В том числе для обнаружения артефактов проводили запись морганий и движений глаз.

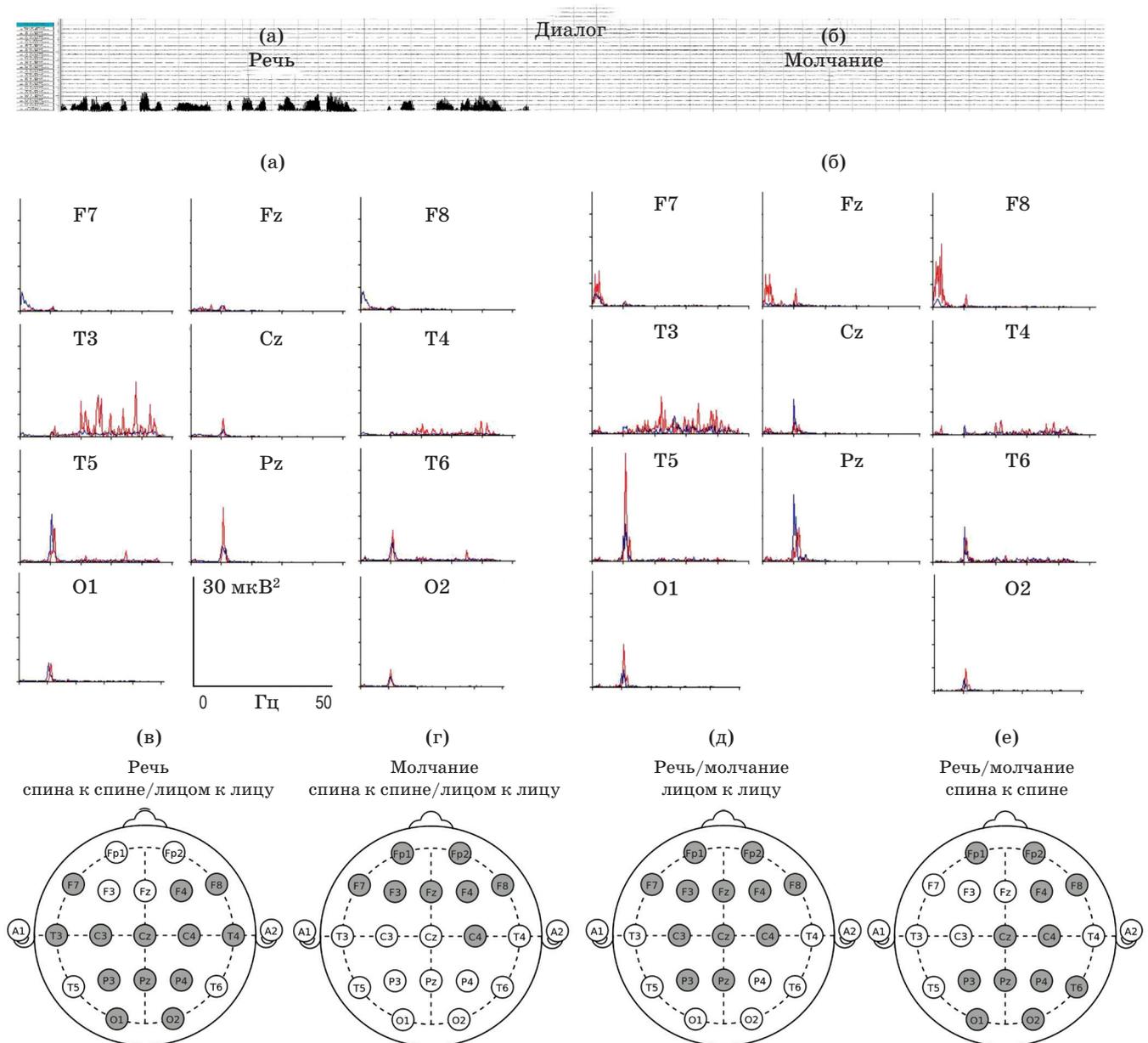


Рис. 1. Усреднённые спектры мощности ЭЭГ на примере некоторых электродов одного человека во время «диалога». Вверху приведён пример записи ЭЭГ (выделены фрагменты записи с речью и молчанием человека). Ниже представлены спектры мощности ЭЭГ отдельно во время разговора (а) и молчания (б). Кривые синего цвета — расположение собеседников «спина к спине», красного цвета — «лицом к лицу». Шкала частот от 0 до 50 Гц. Шкала мощности спектров от 0 до 30 $\mu\text{V}^2/\text{Гц}$. Сравнение речи и молчания при разном расположении собеседников на примере анализа мощности ритмов в дельта (Δ) (1,5–4 Гц) диапазоне частот представлены на схемах расположения электродов (параметрический t -критерий, $p < 0,05$).

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) [15], используя поверхностный Лапласиан. Оценку спектральной плотности провели с помощью дискретного преобразования Фурье. При расчёте спектральной плотности весь анализируемый интервал разбивали на эпохи длительностью 4 с, перекрывающиеся на 50%. Для сглаживания спектров использовали окно Ханна.

Статистическая обработка данных

Для оценки индивидуальных паттернов ритмов ЭЭГ экспортировали данные спектральной плотности в excel-таблицу, где колонки соответствовали электродам, а строки — гармоникам. Первая строка соответствовала первой гармонике с частотой, зависящей от длительности эпохи анализа, в данном случае — 0,25 Гц. В разделе результаты приведён пример анализа режима «диалог» у одного человека с разбивкой записи ЭЭГ на периоды речи и молчания в частотных 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) при расположении собеседников «спина к спине» и «лицом к лицу». Статистическую значимость эффектов, наблюдаемых в мощности при речи и молчании, а также при разном расположении собеседников оценивали с помощью t -критерия парных выборок ($p < 0,05$). На рис. 1 приведён пример попарного сравнения мощности дельта-ритма во время речи при расположении собеседников «спина к спине» и «лицом к лицу», сравнение мощности дельта-ритма во время молчания при расположении собеседников «спина к спине» и «лицом к лицу», сравнение мощности дельта-ритма речи и молчания при расположении собеседников «лицом к лицу», сравнение мощности дельта-ритма речи и молчания при расположении собеседников «спина к спине».

Для оценки усреднённых паттернов ритмов ЭЭГ экспортировали данные спектральной плотности в excel-таблицу, где колонки соот-

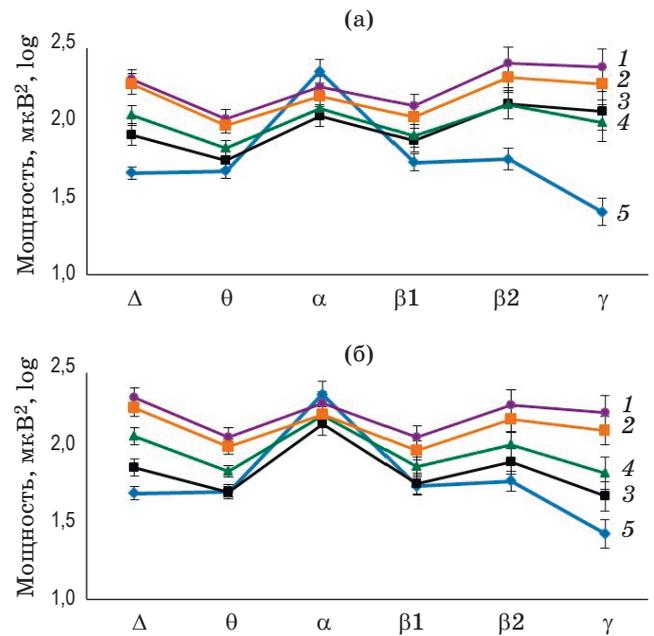


Рис. 2. Средняя мощность ЭЭГ-сигналов в различных режимах коммуникации в разных частотных диапазонах: Δ (1,5–4 Гц), θ (4–7,5 Гц), α (7,5–14 Гц), β_1 (14–20 Гц), β_2 (20–30 Гц), γ (30–40 Гц) при расположении собеседников «лицом к лицу» (а) и «спина к спине» (б). Данные усреднены на группе из 18 человек (приведены среднее значение и ошибка среднего значения в качестве меры разброса). Кривая 1 — «монолог», кривая 2 — «диалог», 3 — «открытые глаза, молча», 4 — «прослушивание речи собеседника», 5 — «закрытые глаза, фон». Данные усреднены по всем электродам.

ветствовали электродам, а строки — каждому человеку, принявшему участие в исследовании. Данные были сгруппированы по шести частотным диапазонам: 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). Полученные данные логарифмировались для нормализации их распределений. Далее на первом этапе (рис. 2) по каждому человеку провели усреднение мощности по всем электродам в каждом режиме коммуникации и в каждом из шести частотных диапазонов. Полученные средние значения в каждом режиме коммуникации и каждом частотном диапазоне сравнили параметрическим t -критерием парных выборок ($p < 0,05$). На втором этапе (рис. 3) применили однофакторный дисперсионный анализ для сравнения режимов коммуникации по каждому отведению головного мозга и расположению собеседников относительно друг друга. В качестве

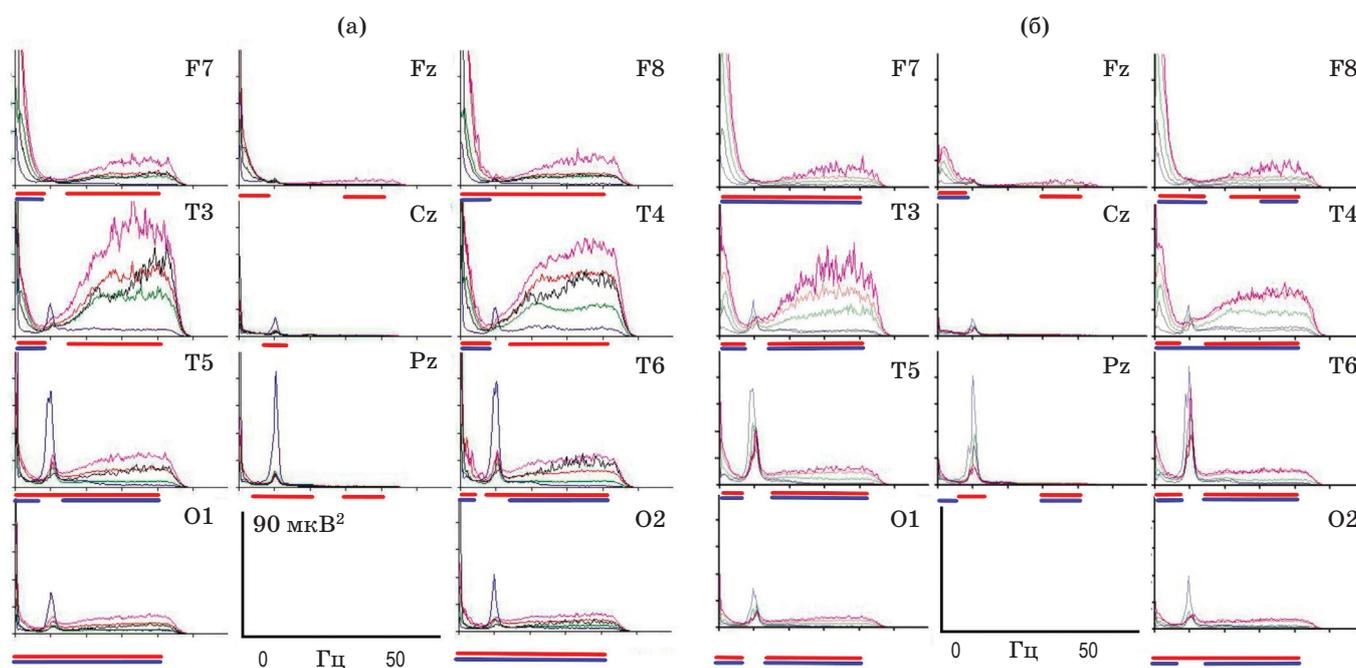


Рис. 3. Усреднённые спектры мощности ритмов на группе испытуемых (N18) на примере некоторых электродов при разных режимах коммуникации: «открытые глаза, молча» (чёрный цвет), «прослушивание» (зелёный цвет), «диалог» (оранжевый цвет) и «монолог» (сиреневый цвет), а также для «закрытые глаза, фон» (синий цвет) при расположении собеседников «лицом к лицу» (а) и «спина к спине» (б). Результаты однофакторного дисперсионного анализа, где в качестве фактора выступили режимы коммуникации, приведены под графиками в виде полосок разного цвета. Синие полоски — достоверные отличия средних значений мощности ритмов без учёта «закрытые глаза, фон». Красные полоски — при включении в анализ «закрытые глаза, фон» ($p < 0,05$). Шкала частот от 0 до 50 Гц. Шкала мощности спектров от 0 до 90 $\mu\text{V}^2/\text{Гц}$.

фактора выступили режимы коммуникации. Следует отметить, что результаты дисперсионного анализа показывают наличие различий между средними значениями мощности ритмов в различных режимах коммуникации, но не указывают, какие из режимов различаются между собой. Для обнаружения различий в мощности ритмов в изучаемых режимах коммуникации («открытые глаза, молча», «диалог», «монолог», прослушивание» речи) без учёта фонового режима («закрытые глаза, молча») (рис. 4) проведены множественные апостериорные сравнения с учётом поправки Бонферрони ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Индивидуальные паттерны ритмов ЭЭГ во время диалога собеседников

Были проанализированы индивидуальные спектры мощности ритмов ЭЭГ в различных режимах коммуникации. На рис. 1 представ-

лен пример — усреднённые спектры мощности ЭЭГ одного человека во время режима «диалог» с собеседником при расположении партнёров «лицом к лицу» (кривые красного цвета) и «спина к спине» (кривые синего цвета). Две записи ЭЭГ при расположении собеседников «лицом к лицу» и «спина к спине» были разделены на участки с речью (согласно данным записи микрофона) и молчания с последующим их усреднением и построением спектров мощности ритмов. Представленный паттерн отражает специфику экспериментальной парадигмы. Так, и при речи и при молчании наблюдается синхронизация ритма в диапазоне альфа-частот 7,5–14 Гц в различных отведениях с латентностью пика $10,5 \pm 0,24$ Гц. Мощность альфа-ритма по отведениям распределена неравномерно. Максимальные значения наблюдаются в теменных отведениях и далее уменьшаются к фронтальным и затылочным отведениям головного мозга. Мощность данного ритма значимо выше при молчании в сравнении с речью и при расположении собеседников

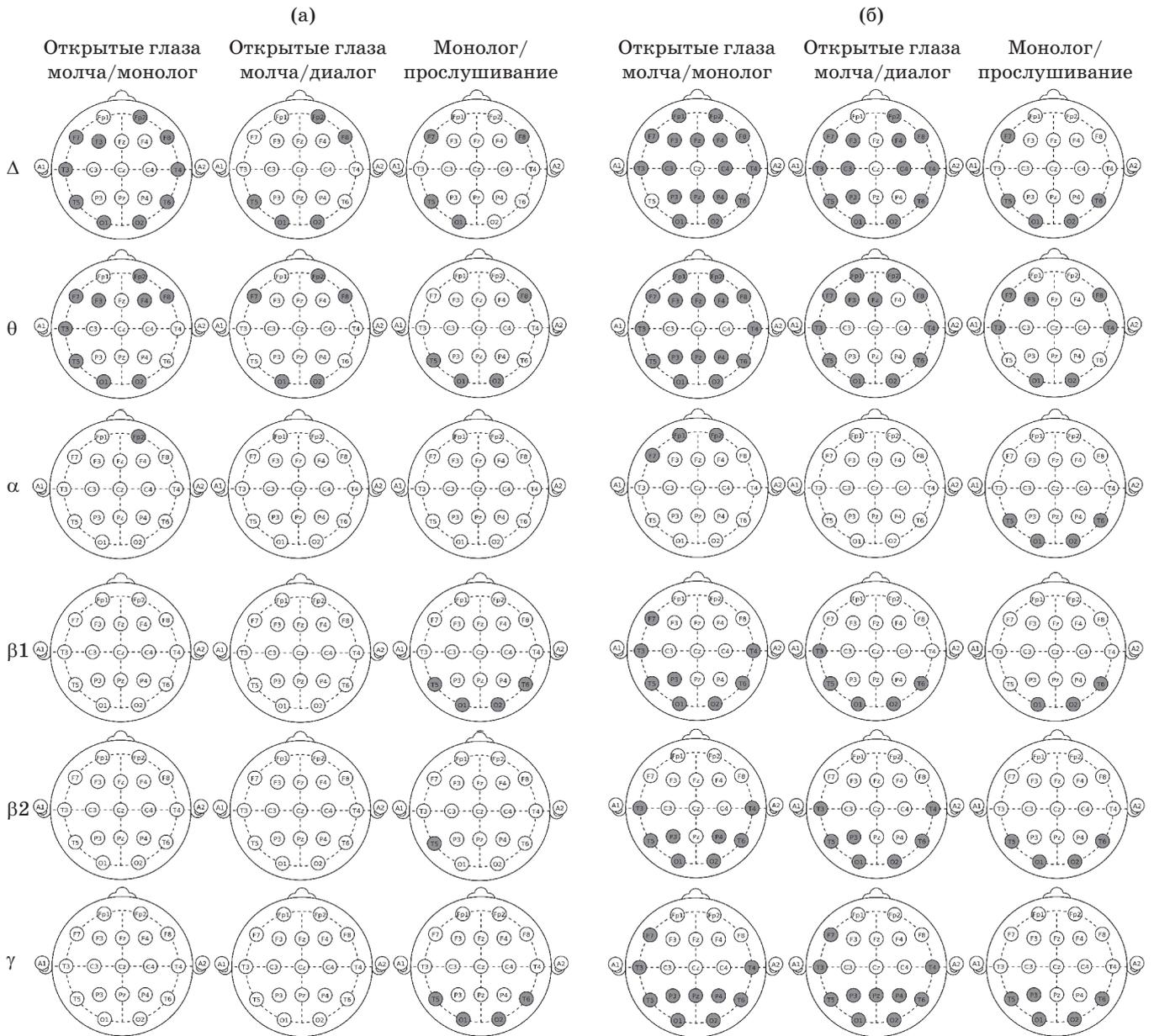


Рис. 4. Значимые отличия мощности ритмов на примере сравнения некоторых режимов коммуникации в различных отведениях головного мозга в разных частотных диапазонах: Δ (1,5–4 Гц), θ (4–7,5 Гц), α (7,5–14 Гц), β_1 (14–20 Гц), β_2 (20–30 Гц), γ (30–40 Гц) при расположении собеседников «лицом к лицу» (а) и «спина к спине» (б). Множественные апостериорные сравнения выполнены с учётом поправки Бонферрони ($p < 0,05$).

«лицом к лицу» — отведения РЗ (параметрический t -критерий, $p < 0,05$), и при расположении собеседников «спина к спине» — отведения СЗ, Рз ($p < 0,05$). При сравнении речи и молчания относительно расположения собеседников показано, что мощность альфа-ритмов выше при расположении собеседников «спина к спине» в сравнении с «лицом к лицу» (отведение СЗ, $p < 0,05$).

При расположении собеседников «лицом к лицу» увеличена мощность при молчании в сравнении с речью в дельта- и тета-диапазонах частот. Отличия в мощности показаны во фронтальных, центральных и теменных отведениях головного мозга ($p < 0,05$) (рис. 1г, 1д). При расположении «спина к спине», наоборот, увеличена активность дельта- и тета-ритмов при наличии речи ($p < 0,05$) (рис. 1в, 1е).

При речи и молчании увеличена активность бета- и гамма-ритмов в височных отведениях головного мозга (рис. 1а, 1б). Так как собеседники разговаривали между собой, это, вероятно, приводило к большой активности лицевых мышц. Мощность данных ритмов, вероятно, связана с электромиографией (ЭМГ). Однако мощность бета- и гамма-волн при молчании и речи в условиях расположения собеседников «спина к спине» значительно меньше в сравнении с расположением собеседников «лицом к лицу» в отведениях Т3 и Т4 ($p < 0,05$).

Соответственно, можно предположить, что в мощности бета- и гамма-ритмов отражаются процессы как вербальной (речь), так и невербальной (мимика, взгляд «глаза в глаза») коммуникации.

Усреднённые паттерны ритмов ЭЭГ во время разных режимов коммуникации

На рис. 2 представлены усреднённые данные по мощности режимов коммуникации собеседников в разных частотных диапазонах.

Видно, что наибольшая мощность во всех частотных диапазонах наблюдается в таких режимах коммуникации, как «диалог» и «монолог». Далее идут «открытые глаза, молча» и «прослушивание» речи собеседника. Особое место занимает режим «закрытые глаза, фон», мощность ЭЭГ-сигналов которого доминирует над всеми другими режимами в альфа-диапазоне. Режимы значимо отличаются во всех частотных диапазонах (параметрический t -критерий, $p < 0,05$) кроме альфа-ритмов ($p > 0,05$). Это говорит о том, что сочетание вербальных и невербальных сигналов оказывает значительное влияние на мощности сигналов ЭЭГ. Общая картина распределения мощности ритмов в различных диапазонах в условиях «лицом к лицу» и «спина к спине» похожа. Главное отличие заключается в режиме «открытые глаза, молча», где при расположении собеседников «лицом к лицу» показано существенное увеличение мощности в бета- и гамма-частотных диапазонах.

Различия в ритмическом наполнении ЭЭГ при разных режимах коммуникации хорошо видны на усреднённых спектрах мощности (рис. 3). Методом однофакторного дисперсионного анализа проведено сравнение режимов коммуникации по каждому отведению головного мозга и расположению собеседников от-

носительно друг друга. В качестве фактора выступили режимы коммуникации. Результаты однофакторного дисперсионного анализа представлены в виде полосок под каждым отведением, где синие полоски — достоверные отличия всех кривых без учёта «закрытые глаза, фон», красные — при включении в анализ «закрытые глаза, фон». Видно, что больше всего отличий между режимами во всем диапазоне частот приходятся на затылочные (O1, O1), височные (Т3, Т4, Т5, Т6) и фронтальные (F7, F8) отведения головного мозга ($p < 0,05$). Следует напомнить, что результаты дисперсионного анализа подтверждают наличие различий между средними значениями мощности ритмов в различных режимах коммуникации, но не показывают, какие из режимов различаются между собой.

Режим «закрытые глаза» — фоновое условие, при котором отсутствовала как вербальная, так и невербальная коммуникация. На рис. 3 кривые обозначены синим цветом. Видно, что в условиях фона значительно в сравнении с другими режимами коммуникации увеличена мощность альфа/мю-ритма в теменных, височных, затылочных и центральных отведениях головного мозга. После начала беседы происходит выраженная десинхронизация альфа/мю-ритма. Значимое уменьшение мощности мю-ритма в сравнении с другими режимами коммуникации показано в центральных и теменных отведениях при расположении собеседников «лицом к лицу» и в теменных отведениях при расположении собеседников «спина к спине».

Выполнено сравнение мощности ритмов режимов коммуникации для обнаружения различий между ними (рис. 4). В связи с тем, что мощность альфа-ритма в режиме «закрытые глаза, фон» была больше, а в остальных диапазонах частот — меньше в сравнении с другими режимами коммуникации, при дальнейшем попарном сравнении данные записи ЭЭГ фона не учитывались.

Данные сравнения играют важную роль в данном исследовании, так как позволяют показать вклад сигналов, передающихся по оптическим и акустическим каналам связи на распределение мощности ритмов ЭЭГ. При расположении собеседников «спина к спине» больше всего отличий выявлено при сравнении режима «открытые глаза, молча»

с режимами вербальной коммуникации «диалогом» и «монологом». Напомним, что «открытые глаза, молча» — это режим, при котором коммуникация отсутствовала, так как собеседники смотрели на стену экранированной камеры. Можно предположить, что спектры мощности ЭЭГ данного режима, вероятно, стали похожи на спектры фонового условия, что привело к появлению большого количества значимых отличий в сравнении с другими режимами. Также выявлены отличия мощности при сравнении режимов коммуникации «монолог» (исходящая компонента общения) и «прослушивание» (входящая компонента общения) во всем частотном диапазоне ритмов ЭЭГ. При сравнении условий «диалог» (входящая и исходящая компонента общения) и «прослушивание» (входящая компонента) показаны отличия только в височном (Т5) и затылочных (О1, О2) отведениях головного мозга. Разницы между режимами вербальной коммуникации — «диалогом» и «монологом» не обнаружено. При расположении собеседников «лицом к лицу» значимых отличий становится меньше. Наличие невербальной коммуникации вызывает увеличение мощности ритмов, особенно в височных отведениях, что в свою очередь, сглаживает отличия между различными режимами взаимодействия собеседников. Разницы между режимами вербальной коммуникации «диалогом» и «монологом», а также между «открытые глаза, молча» и «прослушивание» не обнаружено. Таким образом, можно сказать, что при расположении собеседников «спина к спине» и «лицом к лицу» большинство режимов коммуникации значимо отличаются друг от друга. Больше всего отличий выявлено в дельта- и тета-ритмах головного мозга.

ОБСУЖДЕНИЕ

Цель данной работы заключалась в поиске маркеров влияния оптических и акустических каналов связи на собеседников в процессе коммуникации «лицом к лицу» и «спина к спине». Представляло интерес выяснить, существуют ли характерные черты в спектрах мощности ЭЭГ, которые позволят отличить режимы коммуникации друг от друга. Исследование проводили в парадигме гиперсканирования — одновременной записи ЭЭГ у двух

людей во время их реального общения. Были проанализированы как индивидуальные, так и усреднённые спектры мощности ритмов ЭЭГ в разных режимах коммуникации.

Фоновый режим («закрытые глаза») вызвал мощную активность колебаний электрического потенциала с частотой 8–13 Гц, которые принято называть альфа-ритмом. Однако в многочисленных исследованиях было показано, что данные колебания могут быть разделены по функциональным свойствам и источникам их генерации [2, 3, 16, 17]. Вероятно, самым известным является затылочный альфа-ритм, большинство эквивалентных дипольных источников которого наблюдается в относительно локальной области в районе шпорной борозды на границе 17 и 18 полей по Бродману. Согласно опубликованным данным он лучше выражен при закрытых глазах в расслабленном состоянии и блокируется при концентрации внимания [2]. Амплитуда затылочного альфа-ритма существенно зависит от функционального и эмоционального состояния человека, концентрации внимания, мыслительной деятельности и ряда других факторов. Согласно Niedermeyer, частота затылочного альфа-ритма значительно варьирует от человека к человеку и коррелирует с такими факторами как возраст, пол и интеллект [16].

В наших условиях, помимо затылочного альфа-ритма, мы наблюдаем колебания электрического потенциала с той же частотой — 8–13 Гц, но регистрируемые вблизи сенсомоторных областей — центральных и особенно теменных отведениях головного мозга. Данный тип колебаний получил название мю-ритм, роландический или сенсомоторный ритм. Особенностью данного ритма является то, что он слабо реагирует на открытие глаз, но десинхронизация его волн происходит, когда субъект выполняет движение, наблюдает за движением другого или воображает выполнение действия [18]. Причём блокада ритма может наступить за несколько сотен миллисекунд до самого движения. В связи с этим, предполагается, что подавление мю-ритма может считаться вероятностным индексом активности зеркальных нейронов.

Таким образом, в связи со спецификой экспериментальной парадигмы, а именно в связи с наличием как оптических, так и акустических сигналов, вероятно, мы наблюдаем все

указанные выше ритмы в пределах 8–13 Гц. Причём, важно подчеркнуть, что в нашем исследовании более выражен мю-ритм.

Активное взаимодействие собеседников во время различных режимов коммуникации вызвало блокирование мю- и альфа-ритмов в соответствующих отведениях головного мозга. Важно подчеркнуть, что согласно статистическому анализу не выявлено значимых отличий в данных диапазонах частот (7,5–14 Гц) при расположении собеседников «лицом к лицу» и «спина к спине», что, вероятно, отражает значимость как вербальной, так и невербальной коммуникации собеседников. Одновременно с десинхронизацией ритмов выявлено статистически значимое увеличение дельта-, тета-, бета- и гамма-активности в различных отведениях головного мозга.

Изменения медленной ритмики многие авторы связывают с оценкой эмоциональной и мотивационной значимости стимулов [6]. Так, при невербальной и вербальной коммуникации в ряде работ показано усиление синхронизации дельта-волн при восприятии изображений лиц [19] и речи на слух [20, 21]. Причём, при невербальной коммуникации мощность дельта-ритмов выше при восприятии эмоциональных в сравнении с нейтральными лицами в теменных и затылочных отведениях головного мозга. Усиление синхронизации дельта-волн в центральных отведениях выявлено и при эмоциональной вовлечённости в коммуникацию [22]. В нашей работе наблюдается значимое увеличение мощности дельта-ритмов практически во всех отведениях головного мозга, причём более выражен ритм во фронтальных отведениях головного мозга, который, согласно опубликованным данным, обнаруживается при решении широкого спектра когнитивных задач [22]. Увеличение мощности в тета-диапазоне частот, также было вполне ожидаемо, так как ранее было показано усиление синхронизации данных ритмов при решении задач на рабочую память при направлении внимания на стимулы, при восприятии эмоциональных и речевых стимулов [23].

Представляет интерес анализ бета- и гамма-ритмов в различных режимах коммуникации собеседников. Взаимосвязь бета- и гамма-ритмов и сокращения мышц в моторной и премоторной коре показана достаточно давно [24], причём увеличение мощности совпадает

с моментом начала движения и продолжается в течение всего моторного ответа [25]. В данном исследовании собеседники разговаривали между собой, что ожидаемо приводило к большой активности лицевых мышц. Поэтому, вполне вероятно, что зарегистрированная активность в бета1-, бета2- и гамма-диапазонах частот, особенно в височных отведениях, связана с ЭМГ. В пользу данного предположения служит тот факт, что активность гамма-ритмов имеет очень низкую амплитуду (5–7 мкВ) и её очень трудно отделить от артефактов ЭМГ [26]. Помимо височных и центральных отведений бета- и гамма-активность хорошо видна во фронтальных отведениях, что также вероятно связано с выполнением движения. Однако мощность бета- и гамма-волн при молчании и речи в условиях расположения собеседников «спина к спине» значимо меньше в сравнении с расположением собеседников «лицом к лицу» в височных отведениях головного мозга. Соответственно, можно предположить, что в мощности бета- и гамма-ритмов отражаются процессы как вербальной (речь), так и невербальной (мимика, взгляд «глаза в глаза») коммуникации.

Важно подчеркнуть, что согласно результатам спектрального анализа, мощность бета- и гамма-ритмов увеличена не только в височных и фронтальных отведениях, но и в затылочных отведениях головного мозга (O1, O2 на рис. 3). Согласно опубликованным данным при восприятии согласованных значимых зрительных объектов в ЭЭГ человека наблюдаются всплески гамма-активности в интервале 200–300 мс после начала предъявления стимула, являющейся синхронной именно в области затылочных электродов [27]. Это, во-первых, позволило предположить, что при выполнении зрительных задач именно там находятся её источники, а, во-вторых, подобного рода исследования вызвали целую волну дискуссий о возможной роли гамма-ритма в интеграции сенсорной информации при восприятии сложных объектов, обеспечивая взаимодействие различных областей коры [24].

В нашем исследовании мы видим нарастание гамма-компонентов при включении оптического канала связи. Таким образом, можно сделать вывод, что распознавание мимики — это не просто эмоциональная реакция, а сложный когнитивный процесс, вероятно, самый

сложный зрительный когнитивный процесс [28]. Эти выводы остаются справедливыми даже при условии, что мощность бета- и гамма-ритмов — одновременное отражение ЭЭГ и ЭМГ активности лицевых мышц, возникающей во время общения.

Важно подчеркнуть, режимы хорошо различаются между собой по мощности ритмов ЭЭГ. В нашем исследовании больше всего значимых отличий между различными режимами коммуникации выявлено в медленноволновых диапазонах частот. На втором месте — активность электрических колебаний с частотой от 14 Гц и выше (бета- и гамма-ритмы) преимущественно в височных отведениях головного мозга. Причём при расположении собеседников «спина к спине» — данных отличий между режимами значительно больше в сравнении с расположением собеседников «лицом к лицу». Мимика играет важнейшую роль в социальном взаимодействии. Наличие данной невербальной компоненты, вероятно, приводило к значительному увеличению мощности бета- и гамма-ритмов и к сглаживанию отличий между разными режимами коммуникации. Наиболее информативными являются фронтальные (F7, F8) и затылочные (O1 и O2) отведения головного мозга, в которых при разном расположении собеседников относительно друг друга показаны значимые отличия между разными режимами коммуникации. На основе полученных данных можно утверждать, что полученная

информация о характере невербального и вербального взаимодействия собеседников может быть использована для повышения жизнеобеспечения биотехнических комплексов в критических ситуациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании было показано, что существуют значимые отличия между различными режимами коммуникации в определённых диапазонах частот ЭЭГ. Показано, что паттерны ритмов ЭЭГ в разных режимах коммуникации имеют схожие и отличительные черты. При расположении собеседников «спина к спине» больше всего отличий между разными режимами коммуникации выявлены в дельта- и гамма-ритмах головного мозга. При расположении «лицом к лицу» мощная невербальная компонента увеличивает мощность бета- и гамма-ритмов и сглаживает отличия между разными режимами коммуникации. Наиболее информативными являются фронтальные (F7, F8) и затылочные (O1 и O2) отведения головного мозга, в которых при разном расположении собеседников относительно друг друга показаны значимые отличия между разными режимами коммуникации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (ГП-14, раздел 63), Институт физиологии им И.П. Павлова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелепин Ю.Е. Введение в нейроиконику: Монография. СПб.: Троицкий мост, 2017. 352 с.
2. *Buzsaki G.* Rhythms of the brain. Oxford, New York: Oxford University Press, 2006. 448 p.
3. Кропотов Ю.Д. Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк: Издатель Заславский Ю.А., 2010. 506 с.
4. Костандов Э.А., Черемушкин Е.А. Изменения низко- и высокочастотных колебаний альфа-диапазона ЭЭГ в интервалах между значимыми зрительными стимулами // Физиол. человека. 2013. Т. 39. № 4. С. 5–12.
5. Пономарев В.А., Пронина М.В., Кропотов Ю.Д. Динамика спектральной плотности электроэнцефалограммы в тета-, альфа- и бета-диапазонах в зрительном go/nogo тесте // Физиология человека. 2017. Т. 43. № 4. С. 13–24.
6. *Rimmele J., Gross J., Molholm S., Keitel A.* Brain oscillations in human communication. Lausanne: Frontiers Media. 2018. P. 1–4. doi: 10.3389/978-2-88945-458-7.
7. *Montague P.R., Berns G.S., Cohen J.D., McClure S.M., Pagnoni G., Dhamala M.* Hyper-scanning: simultaneous fMRI during linked social interactions // Neuroimage. 2002. V. 16 (4). P. 1159–1164.
8. *Duane T.D., Behrendt T.* Extrasensory electroencephalographic induction between identical twins // Science. 1965. V. 150. P. 367.

9. Pérez A., Dumas G., Karadagg M., Duñabeitiach J.A. Differential brain-to-brain entrainment while speaking and listening in native and foreign languages // *Cortex*. 2019. V. 111. P. 303–315.
10. Kinoshita T., Tanaka H., Yoshino K., Nakamura S. Measuring affective sharing between two people by EEG hyperscanning // *ICMI '19: Adjunct: Adjunct of the 2019 International Conference on Multimodal Interaction*. Suzhou, China. 2019. P. 1–6.
11. Zhukova, O.V., Shelepin Yu.E., Shchemeleva O.V., Vasil'ev P.P., Moiseenko G.A. Influence of verbal and non-verbal signals on an interlocutor's electroencephalogram // *Journal of Optical Technology*. 2018. V. 85. Iss. 8. P. 13–21.
12. Vigarío R.N. Extraction of ocular artifacts from EEG using independent component analysis // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1997. V. 103. P. 395.
13. Jung T.P., Makeig S., Westerfield M. et al. Removal of eye artifacts from visual event-related potentials in normal and clinical subjects // *Clinical Neurophysiology*. 2000. V. 111. P. 1745.
14. 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. 124–131.
15. Perrin F., Pernier J., Bertrand O., Echallier J.F. Spherical splines for scalp potential and current density mapping // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1989. V. 72. P. 184–187.
16. Niedermeyer E. The normal EEG of the waking Adult // *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields* / Ed. by Niedermeyer E., Lopes da Silva F., Lippincott W., Wilkins. 2005. P. 167–192.
17. Lopes da Silva F. EEG: origin and measurement // *EEG–fMRI, Physiological Basis, Technique and Applications* / Ed. by Mulert C., Lemieux L. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2010. P. 19–38.
18. Muthukumaraswamy S.D. Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp // *Cognitive Brain Research* / Ed. by Muthukumaraswamy S.D., Johnson B.W., McNair N.A. 2004. V. 19. P. 195–201.
19. Güntekin B., Başar E. Facial affect manifested by multiple oscillations // *Int J Psychophysiol.* 2009. V. 71 (1). P. 31–36. doi: 10.1016 / j.ijpsycho.2008.07.019. 31.
20. Giraud A.L., Poeppel D. Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations // *Nat. Neurosci.* 2012. V. 15. P. 511–517.
21. Ding N., Melloni L., Zhang H., Tian X., Poeppel D. Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech // *Nat. Neurosci.* 2016. V. 19. P. 158–164.
22. Knyazev G.G., Slobodskoj-Plusnin J.Y., Bocharov A.V. Event-related delta and theta synchronization during explicit and implicit emotion processing // *Neuroscience*. 2009. Dec 29. V. 164(4). P. 1588–600. doi: 10.1016/j.neuroscience.2009.09.057. Epub 2009 Sep 29
23. Костандов Э.А., Черемушкин Е.А. Вызванная реакция синхронизации/десинхронизации корковой электрической активности тета- и альфа-диапазонов на изображение лиц при увеличении нагрузки на рабочую память // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2011. Т. 61. № 1. С. 35–46.
24. Van Wijk B.C.M., Beek P.J., Daffertshofer A. Neural synchrony within the motor system: what have we learned so far? // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2012. V. 6. P. 1 15.
25. Crone N.E., Miglioretti D.L., Gordon B., Lesser R.P. Functional mapping of human sensorimotor cortex with electrocorticographic spectral analysis. II. Event-related synchronization in the gamma band // *Brain*. 1998. V. 121. P. 2301–2315.
26. Пономарев В.А. Скрытые источники электроэнцефалограммы и связанных с событиями потенциалов и их значение // Автореферат докт. дис. СПб: Институт мозга человека им Н.П. Бехтеревой, 2016. 676 с.
27. Lutzenberger W., Pulvermüller F., Elbert T., Birbaumer N. Visual stimulation alters local 40 Hz responses in humans: An EEG study // *Neurosci. Lett.* 1995. V. 183. P. 39–42.
28. Кемпбелл Ф.В., Шелепин Ю.Е. Возможности фовеолы в различении объектов // *Сенсорные системы*. 1990. Т. 4. № 2. С. 181–185.