

УДК 612.821

СНИЖЕНИЕ АЛЬФА- И БЕТА-ОСЦИЛЛЯЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ВИРТУАЛЬНОГО СОЦИАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

© 2023 г. А. В. Бочаров^{1, 2, *}, А. Н. Савостьянов^{1, 2}, А. Е. Сапрыгин¹,
Е. А. Меркулова¹, С. С. Таможников¹, Е. А. Прошина¹, Г. Г. Князев¹

¹ФГБНУ Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины,
Новосибирск, Россия

²Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

*E-mail: bocharov@physiol.ru

Поступила в редакцию 19.01.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 13.07.2022 г.

В исследовании принимали участие 42 чел. (из них 25 женщин) в возрасте от 18 до 41 года. Целью исследования было изучение особенностей осцилляторной динамики, сопровождающей процессы взаимодействия с виртуальным персонажем и локализация выявленных эффектов. Во время записи электроэнцефалограммы (ЭЭГ) участникам исследования было необходимо вступить во взаимодействие с виртуальным персонажем выбирая один из трех вариантов (“предложить дружбу”, “атаковать” или “избежать контакта”). В качестве стимулов были использованы лица с 5 типами эмоциональных выражений (гневное, счастливое, испуганное, печальное и нейтральное). Анализ эквивалентных диполей выявил, что выборы активного взаимодействия (“атаковать” и “предложить дружбу”), по сравнению с избеганием взаимодействия, сопровождались большим снижением α - и β -ритмов, что, может быть, связано с процессами понимания намерений виртуального персонажа. Выбор дружбы, по сравнению с избеганием взаимодействия, сопровождался увеличением δ -ритма, что может указывать на наличие мотивационного компонента. Выявленные эффекты были обнаружены в кластерах эквивалентных диполей, локализация которых совпадает со структурами сети ментализации и сети зеркальных нейронов, участвующих в процессах оценки намерений людей.

Ключевые слова: ЭЭГ, социальные взаимодействия, α -ритм, β -ритм, μ -ритм.

DOI: 10.31857/S0131164622100034, **EDN:** APCERJ

Исследования мозговых процессов, сопровождающих социальное взаимодействие у людей, имеют ограничения в силу сложности постановки эксперимента в лаборатории. Одним из подходов для изучения таких процессов является применение компьютерного моделирования взаимодействия с виртуальным персонажем. Согласно данным обзоров исследований с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), затрагивающих тему “Теории разума” (*Theory of mind*) [1], было выявлено, что процессы социального взаимодействия сопровождаются изменениями активности/коннективности структур мозга, которые входят в состав так называемой “сети ментализации” [2].

Первоначально сеть ментализации была обнаружена в исследованиях, в которых экспериментальное задание предполагало определение собственного психического состояния (намерений и эмоций) или психического состояния другого человека [2]. Было установлено, что в состав сети

ментализации входят медиальная префронтальная кора, предклинье, задняя сингулярная кора, височно-теменное соединение и верхняя височная борозда [3]. Также было показано, что функциональные изменения в сети ментализации происходят как вовремя эксплицитного [4, 5], так и вовремя имплицитного распознавания намерений других людей [6].

Способность предугадывать действия других людей имеет большое значение для социального взаимодействия. Было показано, что эта способность связана с моторными областями мозга, которые активны не только во время выполнения какого-либо действия, но и во время наблюдения, воображения действия, и во время ожидания действия другого человека [7, 8]. Предполагается, что распознавание намерений в процессе взаимодействия может осуществляться с помощью отражения воспринимаемых двигательных реакций в сети зеркальных нейронов [9, 10]. Принято считать, что сеть зеркальных нейронов позволяет по-

нимать намерения других людей путем повторения в мозге процессов, отражающих поведение этих людей [11].

Было показано, что сеть зеркальных нейронов включает в себя области премоторной коры и переднюю внутрименную борозду [6]. Зеркальные нейроны были открыты во время проведения исследований на обезьянах, в которых было выявлено, что премоторные нейроны изменяют свою активность сходным образом как при выполнении движений, так и при наблюдении за движениями [12]. В современных исследованиях показано, что зеркальные нейроны у людей активируются в большей степени при наблюдении за социально значимыми движениями по сравнению с выполнением отдельных движений [9]. Также было установлено, что моторные области коры активировались сильнее, когда участники исследования предполагали, что партнер по взаимодействию выполнит определенное действие, по сравнению с тем, когда участники исследования ожидали, что тоже действие будет выполнено третьим лицом, с которым они не взаимодействовали [8].

В исследованиях электроэнцефалограммы (ЭЭГ) было показано снижение μ -ритма (компонент α -ритма с частотой 11 Гц) при выполнении, наблюдении и воображении движений и такое снижение μ -ритма наблюдалось в областях мозга, близких по локализации к структурам сети зеркальных нейронов [13, 14]. В сочетанном фМРТ-и ЭЭГ-исследовании, выполненном *D. Arnstein et al.*, была выявлена негативная корреляция μ -ритма с увеличением фМРТ-сигнала в нижней теменной доле, премоторной и первичной соматосенсорной коре как во время наблюдения, так и во время выполнения движений [15], что дало основание полагать, что снижение μ -ритма может являться показателем активности зеркальных нейронов [6].

В исследовании *L.M. Oberman, J.A. Pineda, V.S. Ramachandran* [16] было показано, что степень снижения μ -ритма, может быть, рассмотрена как показатель, отражающий степень включения в социальные взаимодействия. Так было показано, что степень снижения μ -ритма была меньше во время просмотра видеофрагментов без взаимодействия, больше для видео с взаимодействием людей и наибольшее снижение μ -ритма было при наблюдении интерактивных видеороликов.

Однако исследования осцилляторной динамики, сопровождающей социальные взаимодействия, и ее корковая локализация, остаются все еще мало представленными в литературных данных.

Цель настоящего исследования — изучение осцилляторной динамики, сопровождающей процессы взаимодействия с виртуальным персонажем в разработанной нами модели [17], позволяющей выбрать один из трех видов действий

(“предложить дружбу”, “атаковать” или “избежать контакта”), и локализация полученных эффектов методом эквивалентных диполей.

Мы предполагаем, что процессы взаимодействия с виртуальным персонажем будут сопровождаться снижением спектральной мощности в диапазоне α -ритма, в особенности, в его более узком частотном компоненте — μ -ритме с частотой в 11 Гц и такие изменения будут локализоваться в кластерах эквивалентных диполей, перекрывающихся с сетями ментализации и сети зеркальных нейронов.

Мы также предполагаем, что снижение мощности μ -ритма, которое может представлять собой показатель, отражающий степень включения в социальные взаимодействия [16], будет в наибольшей степени выражено при выборе активного взаимодействия (т.е. выбор “дружбы” или “атаки” виртуального персонажа), чем при избегании взаимодействия (выбор “избежать контакта”).

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 42 здоровых человека (из них 25 женщин) в возрасте от 18 до 41 года. Участники исследования были правшами с нормальным, или скорректированным до нормы зрением, не имели на момент обследования выраженных психиатрических или неврологических заболеваний и не употребляли психоактивных веществ.

Регистрация ЭЭГ. Регистрацию ЭЭГ проводили с использованием многоканального усилителя биопотенциалов *actiCHamp* (*Brain Products*, Германия) с шапочкой с 127 электродами, расположенными согласно международной системе 10–5%; один электрод применяли для записи вертикальной окулограммы. В качестве референта был выбран Cz-электрод. Сопротивление под электродом устанавливали ниже 5 кОм, полоса пропускания — от 0.1 до 100 Гц, частота дискретизации — 1000 Гц. Индивидуальные координаты каждого электрода для каждого участника были определены с помощью дигитайзера *FASTRAK* (*Polhemus*).

Экспериментальное задание. В исследовании в качестве стимулов были использованы 5 мужских и 5 женских фотографий лиц людей с пятью типами эмоциональных выражений (гневное, нейтральное, печальное, испуганное и счастливое). Фотографии лиц были отобраны из коллекции Каролинского университета [18, 19]. Перед выполнением задания давали следующую инструкцию: “После появления креста Вам будут предъявляться изображения человеческих лиц. Постарайтесь представить, что это живые люди, с которыми Вам нужно вступить в контакт. Вы можете “предложить дружбу”, “атаковать” или “уклониться от контакта””. Перед предъявлением каждого лица

появлялся красный крест, время предъявления креста варьировало от 1 до 2 с. Лица предъявляли в случайном порядке, после предъявления лицо оставалось на экране монитора до тех пор, пока не был выбран один из трех вариантов взаимодействия. Интервал между стимулами варьировал от 3 до 4 с. Всего было 200 предъявлений (каждое лицо предъявляли 4 раза).

Анализ ЭЭГ данных. ЭЭГ-данные были отфильтрованы в диапазоне от 0.5 до 45 Гц с помощью *FIR* фильтра в программе *EEGLAB (The new basic FIR filter (pop_eegfiltnew))*. Из записи ЭЭГ были удалены “шумящие” каналы и эпохи, содержащие крупные артефакты. Далее в программе *EEGLAB* был проведен анализ независимых компонент [20]. Компоненты, содержащие артефакты, были зрительно идентифицированы и удалены из записи ЭЭГ. Количество эпох, включенных в анализ, составило: при выборе “избегания” (минимальное = 10, максимальное = 184, среднее = 96), при “предложении дружбы” (минимальное = 4, максимальное = 172, среднее = 67) и при выборе “атаки” (минимальное = 4, максимальное = 45, среднее = 22).

Индивидуальные координаты электродов каждого участника исследования были соотнесены с моделью головы для определения локализации эквивалентных диполей. Для каждого участника и каждого экспериментального условия была построена модель локализации эквивалентных диполей ЭЭГ-компонент с использованием функции *DIPFIT* [20]. Были рассчитаны связанные с событием спектральные пертурбации (СССП) (*event-related spectral perturbations*). Разбиение индивидуальных диполей на кластеры было произведено с помощью метода *PCA (principal component analysis)*. Сравнение значений СССП, сопровождающих разные типы взаимодействия, было проведено в каждой точке временного интервала от 0 до 2000 мс и в каждой точке частотного диапазона от 1 до 40 Гц. Достоверность межгрупповых различий во временно-частотном плане была оценена с использованием непараметрического метода *permutation statistics* с учетом поправки на множественные сравнения (контроль ложных эффектов, *FDR correction*) на уровне $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дисперсионный анализ повторных измерений с внутри-индивидуальными факторами: тип выбора (“избежать контакта”, “атаковать” и “предложить дружбу”) и тип эмоционального выражения лица (гневное, нейтральное, печальное, испуганное и счастливое), выявил достоверный эффект выбора ($F = 46.1$, $df = 1.2$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.53$) и достоверное взаимодействие тип выбора $\times$ тип эмоционального выражения лица ($F = 42.6$, $df = 3.3$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.51$). Участники исследо-

Таблица 1. Среднее количество выборов разных типов взаимодействия по каждому типу эмоционального выражения лица

Лица	Атака	Дружба	Избегание
Гневное	19%	14%	65%
Испуганное	3%	26%	69%
Печальное	1.4%	25%	70%
Нейтральное	1.3%	54%	43%
Счастливое	1.4%	68%	28%

вания чаще всего избегали контакта (в 56% случаев), реже всего “атаковали” (в 6% случаев) и в 38% случаев “предлагали дружбу”. Участники исследования чаще “атаковали” персонажей с гневными лицами (19% случаев), чаще “предлагали дружбу” персонажам со счастливыми (68% случаев) и нейтральными лицами (54% случаев) и чаще “избегали” персонажей с печальными (70% случаев), испуганными (69% случаев) и гневными (65% случаев) лицами (табл. 1).

Были выявлены статистически значимые взаимодействия: тип выбора $\times$ пол выражения лица ($F = 8.4$, $df = 1.2$, $p = 0.004$, $\eta^2 = 0.14$) и тип выбора $\times$ тип эмоционального выражения лица $\times$ пол выражения лица ($F = 3.7$, $df = 4$, $p = 0.007$, $\eta^2 = 0.09$).

В целом, участники исследования чаще “предлагали дружбу” женским лицам и чаще “избегали” мужские лица. Взаимодействия с полом участника исследования не достигали статистической значимости.

Сравнение времени, затраченного на выбор вариантов взаимодействия, выявило статистически значимые различия. Так, время, затраченное на выбор “атаки” (Медиана = 2377 мс [1252; 8900]), было статистически больше, чем время, затраченное на выбор “избегания контакта” (Медиана = 1962 мс [1100; 7789]) (Критерий Уилкоксона $p = 0.008$). Время, затраченное на выбор “избегания взаимодействия” (Медиана = 1962 мс [1100; 7789]), было статистически меньше времени, затраченного на выбор “дружбы” (Медиана = 2239 мс [1158; 7123]) (Критерий Уилкоксона $p = 0.028$). Сравнение времени выбора активных типов взаимодействия (“предложить дружбу” по сравнению с “атакой” персонажа не выявило статистически значимых различий) (Критерий Уилкоксона $p = 0.381$).

Большая часть из 42 участников исследования не выбрала совсем или редко выбирала тип взаимодействия “атаковать”. Только 18 участников сделали больше 3 выборов “атаковать” и вошли в выборку для сравнения “атаки” с другими типами

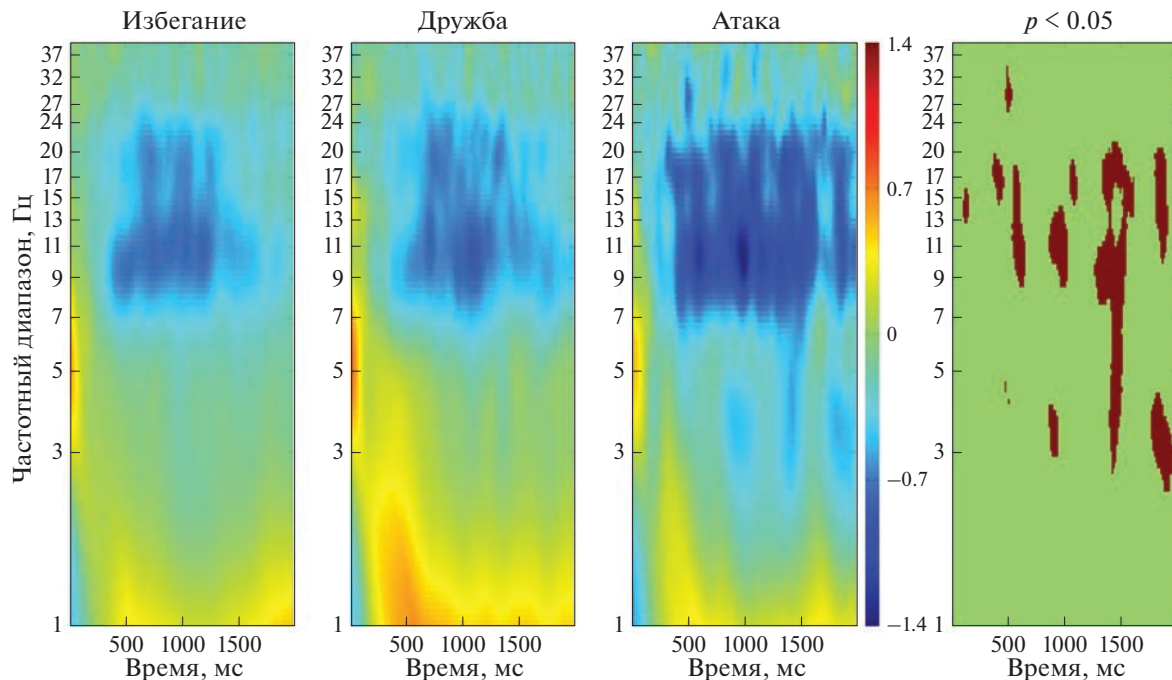


Рис. 1. Связанные с событием спектральные пертурбации (СССП) в кластере эквивалентных диполей трех типов взаимодействия (“избегать контакта”, “предложить дружбу” и “атаковать”), крайняя справа фигура показывает результаты статистических сравнений между тремя типами взаимодействий ($n = 18$).

взаимодействия. При сравнении типов взаимодействия “избегать” и “предложить дружбу” выборка включала данные 42 участников.

Как видно из рис. 1, выбор разных типов взаимодействия (“избегать контакта”, “предложить дружбу” и “атаковать”) сопровождался изменениями осцилляторной динамики θ -, α - и β -ритмов в кластерах эквивалентных диполей, локализованных в зрительной, теменной, левой и правой височной коре ($n = 18$).

Далее были проведены статистические сравнения в парах разных типов взаимодействия. Выбор “атаковать” по сравнению с “избеганием контакта” сопровождался наибольшим снижением α - и β -ритмов ($n = 18$) (рис. 2) в кластерах, локализованных в зрительной, левой и правой теменной и височной коре (рис. 3).

При сравнении осцилляторной динамики, сопровождающей выборы “избегания” и “предложения дружбы” на протяжении временного интервала от 0 до 2000 мс, не было обнаружено достоверных различий.

При анализе в меньшем временном интервале от 0 до 1000 мс и в частотном диапазоне от 1 до 40 Гц было обнаружено, что выбор “дружбы” по сравнению с “избеганием взаимодействия” сопровождается большим увеличением δ -ритма от 2

до 4 Гц во временном интервале от 400 до 700 мс в правой височной коре ($n = 42$) (рис. 4).

При анализе в более узком временном интервале от 0 до 700 мс и в частотном от 1 до 30 Гц, в дополнение к предыдущему результату, было обнаружено, что выбор “дружбы” сопровождался большим снижением мощности α - и β -ритмов в левой париетальной коре ($n = 42$).

Также, в более узком временном интервале от 0 до 700 мс и в частотном от 1 до 30 Гц выбор “атаки”, по сравнению с выбором “дружбы”, сопровождался большим снижением мощности β -ритма в кластере эквивалентных диполей, охватывающий область медиальной префронтальной коры, центральный диполь расположен в передней поясной коре ($n = 18$) (рис. 5).

Дополнительно был проведен анализ сравнения осцилляторной динамики, сопровождающей предъявление разных типов эмоциональных выражений, в зависимости от выбора (“избегать контакта” или “предложить дружбу”). При выборе “атаки” из-за небольшого количества эпох разных типов эмоциональных выражений такой анализ не был проведен.

При выборе “избегания взаимодействия” анализ сравнения осцилляторной динамики, сопровождающей восприятие гневных, нейтральных, печальных, испуганных и счастливых лиц, вы-

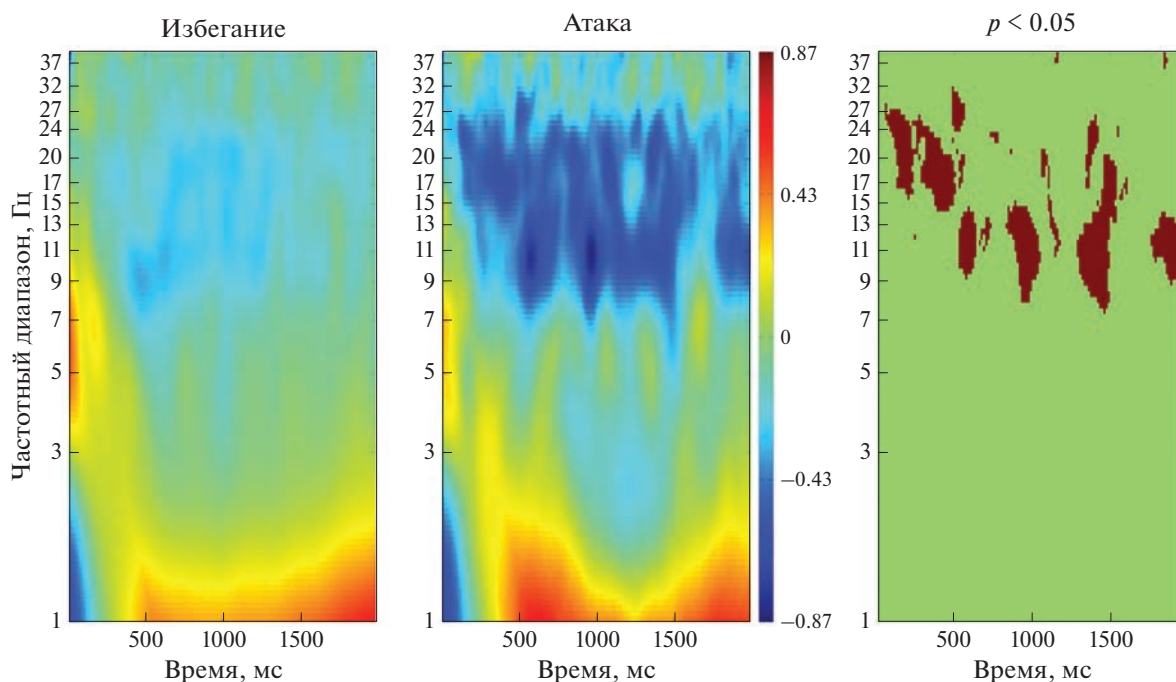


Рис. 2. Связанные с событием спектральные пертурбации (СССП) в кластере эквивалентных диполей (центральный диполь локализован в правой париетальной и височной областях коры, рис. 3, *В*) сравнений выбора “избежать контакта” с выбором “атаки” ($n = 18$).

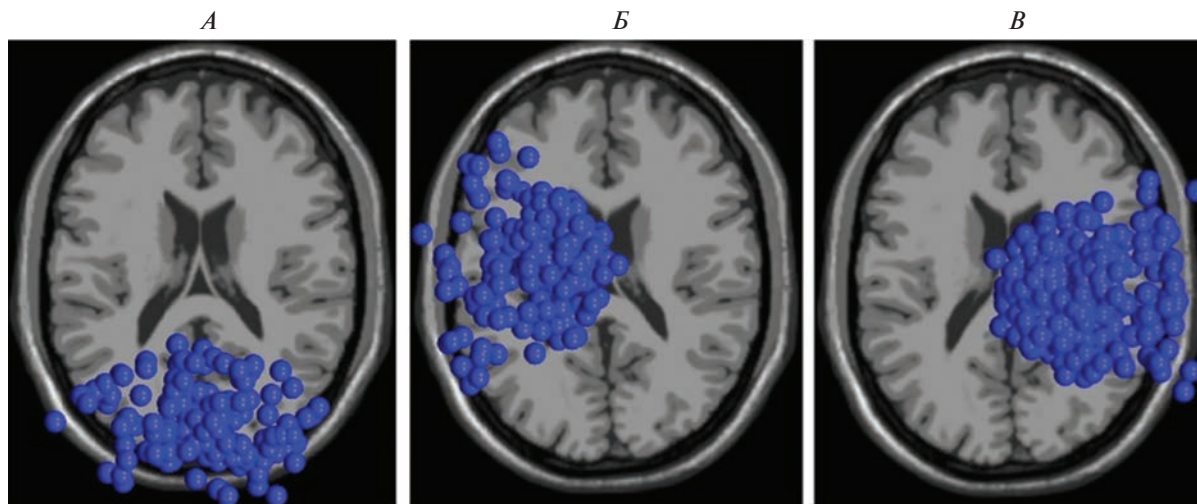


Рис. 3. Кластеры эквивалентных диполей, в которых были получены достоверные различия сравнений “избежать контакта” и “атаковать”.

явил большее увеличение спектральной мощности в частотном диапазоне от 4 до 5 Гц и во временном интервале от 350 до 1600 мс после предъявления счастливых лиц в кластере эквивалентных диполей, охватывающем область левой фронтальной коры ($n = 24$).

При выборе “предложения дружбы” анализ сравнения осцилляторной динамики, сопровождающей восприятие нейтральных, печальных, испуганных и счастливых лиц, выявил большее увеличение спектральной мощности в частотном диапазоне от 3 до 4 Гц и во временном интервале

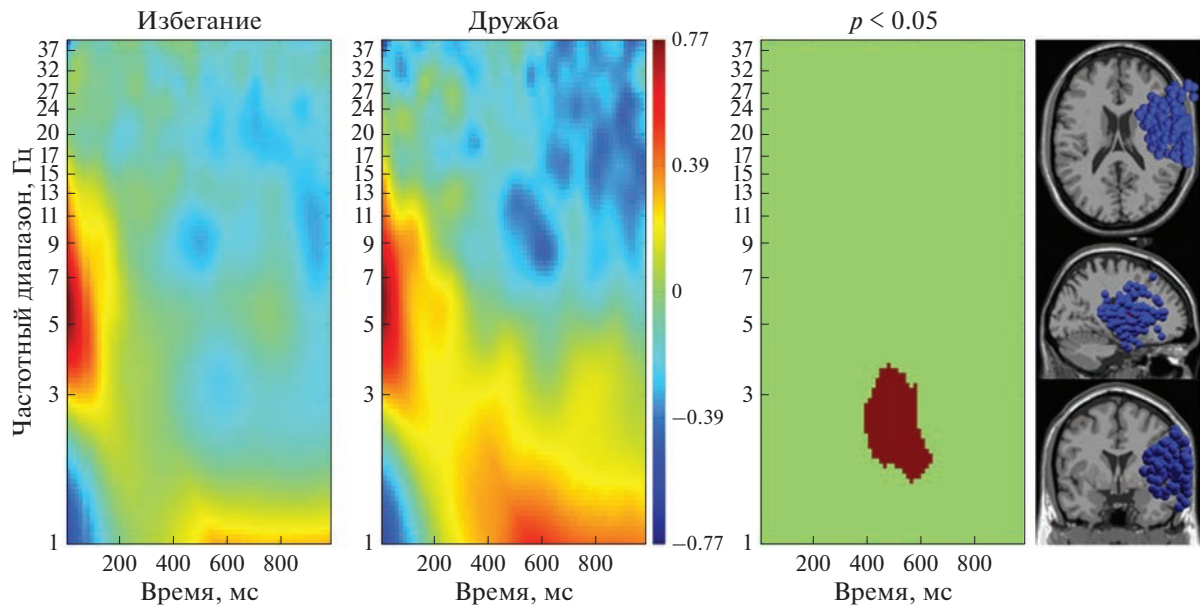


Рис. 4. Связанные с событием спектральные пертурбации (СССП) и результаты статистических сравнений выборов “избегать контакта” по сравнению с выбором “предложить дружбу”, крайняя справа фигура показывает локализацию кластера эквивалентных диполей ($n = 42$).

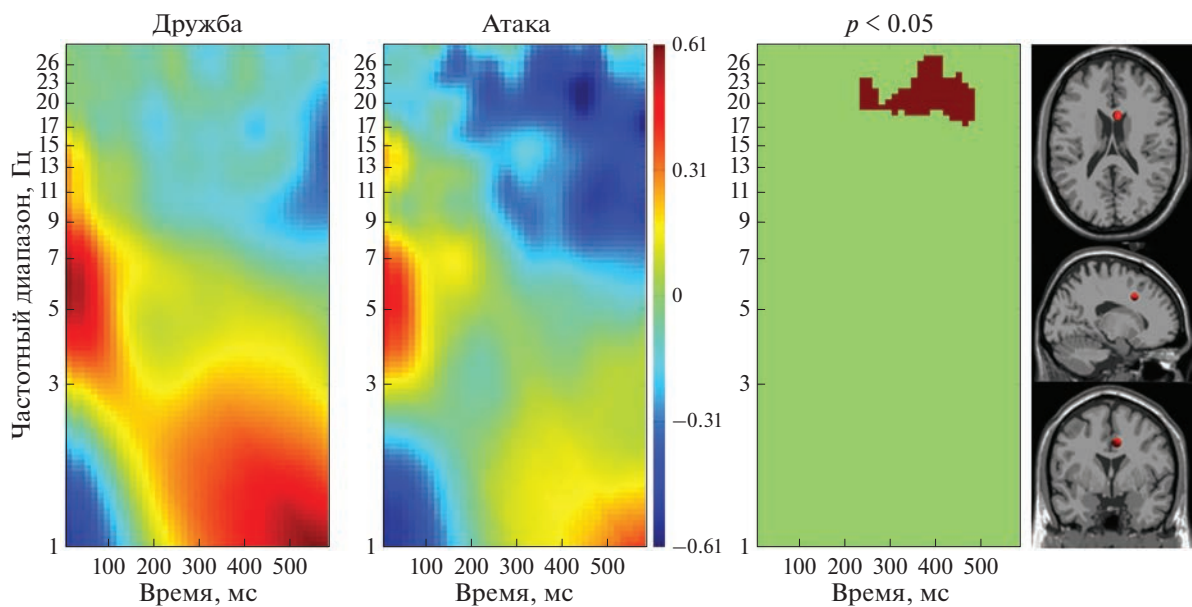


Рис. 5. Связанные с событием спектральные пертурбации (СССП) и результаты статистических сравнений выборов “предложить дружбу” по сравнению с выбором “атаковать”, крайняя справа фигура показывает локализацию центрального диполя в передней поясной коре ($n = 18$).

от 950 до 1500 мс после предъявления печальных лиц в кластере эквивалентных диполей, охватывающем правую височную кору ($n = 21$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Лицевые эмоции выполняют коммуникативные и социальные функции, передавая информа-

цию о мыслях и намерениях людей и, таким образом, координируя социальные взаимодействия. Восприятие положительных эмоций, как правило, вызывает благоприятные реакции, в то время как восприятие негативных эмоций часто отталкивает людей от взаимодействия [21]. В соответствии с выявленными нами поведенческими результатами тип эмоционального выражения лица

влиял на выбор соответствующего поведения. Так, было выявлено, что участники исследования чаще “атаковали” персонажей с гневными лицами, чаще “предлагали дружбу” персонажам со счастливыми и нейтральными лицами и чаще “избегали” персонажей с печальными, испуганными и гневными лицами. Также участники исследования чаще “предлагали дружбу” женским лицам и чаще “избегали” мужские лица, что соответствует данным о том, что женские лица воспринимаются как более дружелюбные по сравнению с мужскими лицами [22]. Согласно выявленным поведенческим результатам, применяемая нами модель взаимодействия с виртуальными персонажами, в какой-то мере, близка к особенностям взаимодействия с реальными людьми.

В нашем исследовании было выявлено, что участники исследования, в целом, предпочитали “избегать взаимодействия” и в меньшей степени — “атаковать”. Высокая частота “избегания взаимодействия”, вероятно, связана с тем, что большинство персонажей выражали негативные эмоции (гнев, печаль, испуг). Тогда как снижение выборов “атаки”, вероятно, связано с принятыми установками в обществе, о том, что проявление физической агрессии является крайне нежелательным и наказуемым. Также было выявлено, что время, затраченное на активные выборы взаимодействия, было больше по сравнению со временем, затраченным на выбор “избегания взаимодействия”. Можно предположить, что выбор “избегания взаимодействия” является наиболее простым и наименее ресурсно-затратным, т.к. при таком выборе, возможно, не всегда нужно точно распознавать эмоциональное состояние и намерения партнера взаимодействия, а также нет необходимости предполагать о последствиях взаимодействия по сравнению с активными выборами. Вероятно, что участникам исследования было проще и быстрее избежать взаимодействия, чем выбирать из двух противоположных вариантов — “атаковать” или “предложить дружбу”.

В целом, выявленные в исследовании особенности осцилляторной динамики подтверждают нашу гипотезу, высказанную ранее, согласно которой процессы взаимодействия с виртуальным персонажем сопровождаются снижением спектральной мощности μ -ритма. Выявленные эффекты локализовались в кластерах диполей, расположенных в затылочной, левой и правой височной, теменной и моторной областях коры.

Кроме того, было выявлено, что помимо μ -ритма, который является отдельным компонентом α -ритма, процессы социальных взаимодействий сопровождались снижением осцилляций в более широком диапазоне α - и β -ритмов.

Предполагается, что сеть зеркальных нейронов участвует в имитации и/или моделировании действий других людей и, может быть, краеугольным камнем социальных процессов более высокого порядка, таких как понимание действий и намерений, восприятие и понимание эмоциональных выражений лиц, и процессы эмпатии [9, 10, 23]. Можно предположить, что в процессе взаимодействия распознавание намерений других людей может осуществляться с помощью сети зеркальных нейронов путем повторения в мозге процессов, отражающих поведение этих людей [11].

Считается, что сеть зеркальных нейронов представляет собой моторную систему мозга, которая эволюционировала и использует те же нервные цепи, которые участвуют в управлении движениями [9, 11, 23]. Было показано, что зеркальные нейроны изменяют свою активность сходным образом, как при выполнении движений, так и при наблюдении за движениями [12]. Так, в ЭЭГ-исследовании *C. Babiloni et al.* [24], было выявлено снижение α - и β -осцилляций не только во время выполнения движения, но и во время наблюдения за движением, и такое снижение было локализовано в моторной, первичной соматосенсорной и префронтальных областях коры. *H. Yuan et al.* [25] показали, что выполнение и воображение движений были связаны с уменьшением мощности ЭЭГ в α - и β -частотных диапазонах. Такое контралатеральное снижение α - и β -ритмов ЭЭГ сочеталось с увеличением фМРТ-сигнала в первичной сенсомоторной коре, которая является ключевым компонентом сети зеркальных нейронов [23, 25]. В исследовании *A. Perry, N.F. Trojeb, S. Bentin* [26] было выявлено большее снижение α - и β -ритмов при определении намерений, чем в условиях определения эмоций или пола в двигающемся изображении, состоящем из точек, причем не было выявлено достоверных различий при сравнении условия определения эмоций и условия определения пола. Согласно перечисленным выше данным литературы можно предположить, что снижение в более широком частотном диапазоне α - и β -ритмов, может быть, связано с активностью сети зеркальных нейронов. В целом, локализация выявленных в исследовании эффектов пересекается с локализацией сети зеркальных нейронов и сети ментализации. Согласно современным представлениям сеть ментализации и сеть зеркальных нейронов могут лежать в основе понимания намерений других людей [6]. Можно предположить, что снижение α - и β -ритмов в выявленных кластерах эквивалентных диполей, пересекающихся с локализацией структур сети зеркальных нейронов и сети ментализации, связано с процессами социального познания, в частности, с процессами понимания намерений и причин поведения людей.

Было выявлено, что выбор “атаки” по сравнению с “избеганием взаимодействия” сопровождался большими изменениями осцилляторной динамики α - и β -ритмов в кластерах диполей, локализованных в левой и правой, теменных, моторных и височных областях коры. Кроме того, выявленные эффекты были обнаружены в затылочной области коры. Обнаруженное большее снижение спектральной мощности α - и β -ритмов в затылочной области коры мозга согласуется с исследованием *A. Perry, N.F. Trojeb, S. Bentin* [26], в котором было выявлено большее снижение α - и β -ритмов в затылочной коре при выполнении задания на определение намерений и эмоций, что дало основание авторам полагать, что области затылочной коры играют важное значение в процессе обработки социально-значимой информации.

В ряде исследований ранее было показано, что снижение α - и β -ритмов коррелирует со сложностью задания и может отражать количество ресурсов (внимания, бдительности, памяти), необходимых для выполнения задачи [27–29]. Согласно исследованию *R.J. Barry et al.* [30], снижение α -ритма также может указывать на повышение уровня возбуждения [30, 31]. Можно предположить, что выявленное нами сильное снижение спектральной мощности α - и β -ритмов при выборе агрессивного типа взаимодействия также может отражать включение более выраженного компонента внимания и повышение уровня “возбуждения” (*arousal*).

В нашем исследовании выбор “дружбы” по сравнению с “избеганием” сопровождался большим увеличением мощности δ -ритма в кластере, локализованном в правой височной коре. Согласно данным о связи δ -ритма с мотивационными процессами [30], можно предположить, что для того, чтобы вступить во взаимодействие с предложением “дружбы”, может быть, необходимо наличие мотивационного компонента.

Выбор “атаки” по сравнению с выбором “дружбы” сопровождался большим снижением мощности β -ритма в передней сингулярной коре. Согласно *E. Redcay* и *L. Schilbach* передняя сингулярная кора входит в состав аффективной сети и, может быть, задействована в процессе социальных взаимодействий [3]. Также известно, что передняя сингулярная кора участвует в процессах обнаружения и оценки значимых стимулов [33]. Так как участники исследования чаще всего “атаковали” гневные лица можно предположить, что большее снижение β -ритма в интервале от 250 до 500 мс во время выбора “атаковать”, может быть, связано с обнаружением угрожающего стимула.

Кроме того, в исследованиях других авторов было показано, что повреждение передней сингулярной коры приводит к нарушению социального поведения [34]. А также было выявлено, что

передняя сингулярная кора участвует в мониторинге поведения другого человека в процессе взаимодействия [35]. Согласно *M.A. Apps* и *J. Sallet*, нейроны передней сингулярной коры кодируют информацию о последствиях действий других людей в большей степени, чем информацию о последствиях собственных действий или решений [36]. Можно предположить, что выявленное в нашем исследовании более выраженное снижение мощности β -ритма, сопровождающего выбор агрессивного типа взаимодействия также, может быть, связано с пониманием намерений и последствий взаимодействия с персонажем с угрожающим выражением лица.

В исследованиях была показана связь низкочастотных ритмов ЭЭГ с процессами эмпатии и эмоциональными процессами, причем активность левых фронтальных областей коры была связана с восприятием положительных стимулов, а правых — с восприятием отрицательных стимулов [37]. Можно предположить, что увеличение δ -ритма в правых височных областях коры при выборе “дружбы” с персонажем с печальным эмоциональным выражением лица также, может быть, связано с процессами эмпатии. Тогда как увеличение θ -ритма в левых фронтальных областях коры в ответ на предъявление персонажей с счастливыми эмоциональными выражениями при выборе избегания контакта, может быть, связано с восприятием эмоционального стимула положительной валентности. Распознавание эмоции лица позволяет определять эмоциональное состояние и намерения другого человека и дает нам основание, как отреагировать во время взаимодействия, а также, возможно, предугадать последствия взаимодействия. Выбор типа взаимодействия в определенной степени зависит от эмоции выражения лица. В тоже время на тенденцию к предпочтению определенного типа социального взаимодействия могут влиять личностные особенности, определяющие поведение в долгосрочной перспективе, и текущее состояние индивида [21], что представляет интерес для дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

1. Выбор активного взаимодействия (“атаковать” и “предложить дружбу”) с виртуальным персонажем по сравнению с избеганием взаимодействия сопровождался большим снижением спектральной мощности α - и β -ритмов, и локализация выявленных эффектов пересекалась с локализацией сети ментализации и сети зеркальных нейронов.

2. Выбор “атаки” по сравнению с выбором “избегания контакта” сопровождался большим снижением мощности α - и β -ритмов в кластерах диполей, локализованных в затылочной, левой и правой височной, теменной и моторной областях

коры. Выбор “дружбы” по сравнению с “избеганием взаимодействия” сопровождался большим снижением мощности α - и β -ритмов в левой части теменной коры. Снижение α - и β -ритмов, может быть, связано с процессами понимания намерений виртуального персонажа.

3. Увеличение мощности δ -ритма при выборе “дружбы” по сравнению с “избеганием взаимодействия” может отражать наличие мотивационного компонента при выборе такого вида взаимодействия.

4. Выбор “атаки” по сравнению с “предложением дружбы” сопровождался большим снижением мощности β -ритма в интервале от 250 до 500 мс в передней сингулярной коре, что, может быть, связано с процессами обнаружения угрожающего стимула.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях и одобрены локальным этическим комитетом Научно-исследовательского института нейронаук и медицины (Новосибирск).

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

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-013-00404, проведение исследования) и за счет средств федерального бюджета на проведение фундаментальных научных исследований (№ 122042700001-9, разработка методов анализа данных).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Н.В. Дмитриенко за помощь в сборе данных исследования.

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

Вклад авторов в публикацию. Концепция и методология были разработаны Г.Г. Князевым; разработка программного обеспечения была произведена А.Е. Сапрыгиным и А.В. Бочаровым. Проведение исследования — А.Н. Савостьянов, С.С. Таможников, Е.А. Прошина; анализ данных — А.В. Бочаров, А.Е. Сапрыгин, Е.А. Меркулова, А.Н. Савостьянов, С.С. Таможников, Е.А. Прошина; написание и редактирование статьи — А.В. Бочаров, А.Н. Савостьянов, Г.Г. Князев. Все авторы прочитали и согласились с поданной версией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Premack D., Woodruff G. Does the chimpanzee have a theory of mind? // *Behav. Brain Sci.* 1978. V. 1. P. 515.
2. Schurz M., Radua J., Aichhorn M. et al. Fractionating theory of mind: a meta-analysis of functional brain imaging studies // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. V. 42. P. 9.
3. Redcay E., Schilbach L. Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction // *Nat. Rev. Neurosci.* 2019. V. 20. № 8. P. 495.
4. Centelles L., Assaiante C., Nazarian B. et al. Recruitment of both the mirror and the mentalizing networks when observing social interactions depicted by point-lights: a neuroimaging study // *Plos One*. 2011. V. 6. № 1. P. 15749.
5. Liew S., Han S., Aziz-Zadeh L. Familiarity modulates mirror neuron and mentalizing regions during intention understanding // *Hum. Brain Mapp.* 2010. V. 32. № 11. P. 1986.
6. Ciaramidaro A., Becchio C., Colle L. et al. Do you mean me? Communicative intentions recruit the mirror and the mentalizing system // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2014. V. 9. № 7. P. 909.
7. Столбков Ю.К., Герасименко Ю.П. Когнитивная двигательная реабилитация: воображение и наблюдение моторных действий // *Физиология человека*. 2021. 47. № 1. С. 123.
Stolbkov Y.K., Gerasimenko Y.P. Cognitive motor rehabilitation: imagination and observation of motor actions // *Human Physiology*. 2021. V. 47. № 1. P. 104.
8. Kourtis D., Sebanz N., Knoblich G. Favouritism in the motor system: social interaction modulates action simulation // *Biol. Lett.* 2010. V. 6. № 6. P. 758.
9. Becchio C., Cavallo A., Begliomini C. et al. Social grasping: from mirroring to mentalizing // *Neuroimage*. 2012. V. 61. № 1. P. 240.
10. Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system // *Ann. Rev. Neurosci.* 2004. V. 27. P. 169.
11. Gallese V., Goldman A. Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading // *Trends Cogn. Sci.* 1998. V. 2. № 12. P. 493.
12. Di Pellegrino G., Fadiga L., Fogassi L. et al. Understanding motor events: a neurophysiological study // *Exp. Brain Res.* 1992. V. 91. № 1. P. 176.
13. Махин С.А. Система “зеркальных нейронов”: Актуальные достижения и перспективы ЭЭГ-исследований // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2012. Т. 25. № 1. С. 142.
Makhin S.A. “Mirror neurons” system: current achievements and research trends in use of the EEG based methods // *Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. Biology. Chemistry*. 2012. V. 25. № 1. P. 142.
14. Pfurtscheller G., Brunner C., Schlögl A., Da Silva F.L. Mu rhythm (de) synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks // *NeuroImage*. 2006. V. 31. № 1. P. 153.
15. Arnstein D., Cui F., Keyers C. et al. μ -Suppression during action observation and execution correlates with BOLD in dorsal premotor, inferior parietal, and SI cortices // *J. Neurosci.* 2011. V. 31. № 40. P. 14243.
16. Oberman L.M., Pineda J.A., Ramachandran V.S. The human mirror neuron system: a link between action observation and social skills // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2007. V. 2. № 1. P. 62.
17. Knyazev G., Merkulova E., Savostyanov A. et al. Personality and EEG correlates of reactive social behavior // *Neuropsychologia*. 2019. V. 124. P. 98.

18. Lundqvist D., Flykt A., Ohman A. The Karolinska directed emotional faces (KDEF). CD ROM from Department of Clinical Neuroscience // Psychology section, Karolinska Institutet. 1998. V. 91. № 630. P. 2.
19. Ohman A., Flykt A., Lundqvist D. Evolutionary perspectives, psychophysiological data, and neuropsychological mechanisms / Cognitive neuroscience of emotion. Oxford University Press, 2002. 430 p.
20. Delorme A., Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single- trial EEG dynamics including independent component analysis // J. Neurosci. Methods. 2004. V. 134. № 1. P. 9.
21. Lopes P., Salovey P., Cote S. et al. Emotion regulation abilities and the quality of social interaction // Emotion. 2005. V. 5. № 1. P. 113.
22. Knyazev G., Bocharov A., Slobodskaya H., Ryabichenko T. Personality-linked biases in perception of emotional facial expressions // Pers. Individ. Differ. 2008. V. 44. № 5. P. 1093.
23. Pineda J. Sensorimotor cortex as a critical component of an “extended” mirror neuron system: Does it solve the development, correspondence, and control problems in mirroring? // Behav. Brain Funct. 2008. V. 4. P. 47.
24. Babiloni C., Del Percio C., Vecchio F. et al. Alpha, beta and gamma electrocorticographic rhythms in somatosensory, motor, premotor and prefrontal cortical areas differ in movement execution and observation in humans // Clin. Neurophysiol. 2016. V. 127. № 1. P. 641.
25. Yuan H., Liu T., Szarkowski R. et al. Negative covariation between task-related responses in alpha/beta-band activity and BOLD in human sensorimotor cortex: an EEG and fMRI study of motor imagery and movements // Neuroimage. 2010. V. 49. № 3. P. 2596.
26. Perry A., Trojeb N.F., Bentin S. Exploring motor system contributions to the perception of social information: evidence from EEG activity in the mu/alpha frequency range // Soc. Neurosci. 2010. V. 5. № 3. P. 272.
27. Gevins A., Smith M.E., McEvoy L., Yu D. High-resolution EEG mapping of cortical activation related to working memory: effects of task difficulty, type of processing, and practice // Cereb. Cortex. 1997. V. 7. № 4. P. 374.
28. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // Brain Res. Rev. 1999. V. 29. № 2–3. P. 169.
29. Pfurtscheller G., Da Silva F.L. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles // Clin. Neurophysiol. 1999. V. 110. № 11. P. 1842.
30. Barry R.J., Clarke A.R., Johnstone S.J. et al. EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions // Clin. Neurophysiol. 2007. V. 118. № 12. P. 2765.
31. Pfurtscheller G., Neuper C. Motor imagery activates primary sensorimotor area in humans // Neurosci. Lett. 1997. V. 239. № 2–3. P. 65.
32. Knyazev G.G. Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations // Neurosci. Biobehav. Rev. 2007. V. 31. № 3. P. 377.
33. Shackman A.J., Salomons T.V., Slagter H.A. et al. The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex // Nat. Rev. Neurosci. 2011. V. 12. № 3. P. 154.
34. Apps M.A., Rushworth M.F., Chang S.W. The anterior cingulate gyrus and social cognition: tracking the motivation of others // Neuron. 2016. V. 90. № 4. P. 692.
35. Hill M.R., Boorman E.D., Fried I. Observational learning computations in neurons of the human anterior cingulate cortex // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 12722.
36. Apps M.A., Sallet J. Social learning in the medial prefrontal cortex // Trends Cogn. Sci. 2017. V. 21. № 3. P. 151.
37. Balconi M., Vanutelli M.E. Empathy in negative and positive interpersonal interactions. What is the relationship between central (EEG, fNIRS) and peripheral (autonomic) neurophysiological responses? // Adv. Cogn. Psychol. 2017. V. 13. № 1. P. 105.

Suppression of Alpha- and Beta-Oscillations during Virtual Social Interactions

A. V. Bocharov^{a, b, *}, A. N. Savostyanov^{a, b}, A. E. Saprygin^a, E. A. Merkulova^a, S. S. Tamozhnikov^a, E. A. Proshina^a, G. G. Knyazev^a

^aScientific Research Institute of Neurosciences and Medicine, Novosibirsk, Russia

^bNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

*E-mail: bocharov@physiol.ru

The aim was to study the oscillatory dynamics accompanying the processes of interaction with the virtual character and the localization of the revealed effects. 42 subjects (of which 25 are women) aged 18 to 41 years took part in the study. During the EEG recording, the subjects had to interact with the virtual character by choosing one of three options (“offer friendship”, “attack” or “avoid contact”). Faces with 5 types of emotional expressions (angry, happy, frightened, sad and neutral) were used. An analysis of equivalent dipoles revealed that the choice of active interaction (to attack or offer friendship), compared with the avoidance of interaction, was accompanied by a large decrease in α - and β -rhythms, which may be associated with the processes of understanding the virtual character’s intentions. The choice of friendship versus avoidance of interaction was accompanied by an increase in δ -rhythm, which may indicate the presence of a motivational component. The revealed effects were found in clusters of equivalent dipoles, the localization of which coincides with the structures of the mentalization network and the network of mirror neurons involved in the processes of people’s intent assessment.

Keywords: EEG, social interactions, α -rhythm, β -rhythm, μ -rhythm.