

УДК 612.821

ЭЭГ-КОРРЕЛЯТЫ КОНКУРЕНТНЫХ И КООПЕРАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

© 2024 г. А. В. Бочаров^{1, 2, *}, А. Н. Савостьянов^{1, 2}, С. С. Таможников¹,
П. Д. Рудыч^{1, 2}, Е. А. Заварзин^{1, 2}, А. Е. Сапрыгин¹,
Е. А. Меркулова¹, Г. Г. Князев¹

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

²Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: bocharovav@neuronm.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 27.11.2023 г.

Принята к публикации 08.12.2023 г.

Целью данной работы — исследование особенностей и определение локализации источников тока α - и θ -ритмов, сопровождающих конкуренцию и кооперацию с другим игроком, а также индивидуальное построение фигуры в компьютерной игре. Выборка состояла из 42 добровольцев (24 женщины) в возрасте от 18 до 47 лет. Анализ различий плотности источников тока 127 канальной ЭЭГ в разных условиях игры был выполнен в программе *eLoreta*. Во время конкуренции спектральная плотность θ -ритма была больше, чем в условиях кооперации и этот эффект был наиболее выражен в передней поясной коре и медиальной префронтальной коре. Согласно литературным данным о функциональных коррелятах θ -ритма, можно предположить, что выявленное во время конкуренции увеличение медиального фронтального θ -ритма может быть связано со сфокусированным вниманием и процессами когнитивного контроля. Плотность источников α -ритма в теменных и зрительных областях коры во время совместной игры (кооперация и конкуренция) была меньше по сравнению с индивидуальным выполнением. Во время кооперации спектральная плотность α -ритма была меньше по сравнению с конкуренцией. Выявленное в исследовании наибольшее снижение спектральной плотности α -ритма в условиях кооперации, согласуется с представлениями о связи снижения α -ритма и процессов понимания намерений другого человека.

Ключевые слова: ЭЭГ, θ -ритм, α -ритм, конкуренция, кооперация, социальные взаимодействия.

DOI: 10.31857/S0131164624020038, **EDN:** VIODDM

Значительная часть нашей жизни проходит в социальных взаимодействиях. В повседневной жизни взаимодействие с другими людьми в зависимости от мотивационных целей может быть кооперативным или конкурентным. Сотрудничество и конкуренция — два основных способа межличностного взаимодействия, включающие наблюдение за чужими и своими действиями и выбор соответствующей стратегии поведения [1]. Сотрудничество и конкуренция включают различные социальные и когнитивные аспекты. Так, например, в зависимости от типа взаимодействия, люди могут способствовать, либо препятствовать достижению цели [2].

фМРТ-исследование процессов кооперации и конкуренции выявили различия в активности ряда структур головного мозга, среди которых были медиальная префронтальная и теменная области коры, задняя поясная извилина и инсула.

Согласно предположению авторов выявленные эффекты могут быть связаны с более высокой когнитивной нагрузкой и уровнем возбуждения [1].

Большинство исследований кооперативных и конкурентных взаимодействий были проведены с использованием метода гиперсканинга, позволяющего оценить синхронизацию мозговой деятельности во время взаимодействия людей. В большинстве таких исследований были обнаружены особенности синхронности осцилляций θ - и α -частотных диапазонов во время кооперативных и/или конкурентных взаимодействий [3–5].

В ЭЭГ-исследовании было показано, что во время кооперативного взаимодействия людей в задании, требующем повышенного внимания, наблюдалось увеличение θ -ритма в лобных областях и снижение α -ритма в теменных областях [6]. Результаты нейровизуализационных иссле-

дований методом гиперсканнинга не позволяют полностью понять природу социальных межличностных кооперативных и конкурентных взаимодействий. Дополняющую информацию об этих процессах можно получить, исследуя особенности и локализацию ритмов ЭЭГ, сопровождающих конкурентные и кооперативные взаимодействия, и сравнивая их между собой и с индивидуальным выполнением без взаимодействия.

В настоящем исследовании следует обратить внимание на изучение особенностей и определение локализации источников ритмов ЭЭГ, сопровождающих разные виды социального взаимодействия (кооперация и конкуренция) с другим человеком, а также при индивидуальном выполнении задания без взаимодействия.

Конкурентные и кооперативные взаимодействия между людьми довольно сложно смоделировать в лабораторных условиях. В качестве экспериментального задания была создана компьютерная игра на построение геометрических фигур в трех разных видах. В игре “кооперация” участникам исследования необходимо было построить совместную фигуру, ставя блок каждого игрока в одно и то же место, в этом случае блок оставался в строящейся фигуре, если участники ставили блок в разные места, то блок исчезал. В игре “конкуренция” игроки соревновались, кто быстрее поставит блок в строящуюся фигуру и только у игрока, который был первым — блок вставал в фигуру, у того, кто был медленнее — блок исчезал. Третий вид игры — “индивидуальный”, во время которого игроки строили фигуры без взаимодействия с другим игроком. Игра была создана на основе экспериментального задания, описанного в работе [1].

Кооперация обычно определяется как совместная работа людей для достижения общей цели, тогда как конкуренция предполагает попытку одного человека превзойти другого. Предполагается, что важным для кооперации является понимание поведения партнера, что способствует повышению эффективности в достижении общей цели, тогда как для конкуренции высокий уровень мотивации может положительно повлиять на результат, также конкуренция может сопровождаться негативными эмоциональными реакциями в случае проигрыша [7, 8]. Можно предположить, что ключевым для сотрудничества в контексте игры построения совместной фигуры будут процессы понимания намерений партнера по взаимодействию. Тогда для того чтобы быть первым в соревновании игроку необходимо превзойти соперника в скорости и точности построения фигуры, поэтому можно предположить, что для режима конкуренции будут ключевыми процессы сфокусированного внимания и когнитивного контроля.

Согласно данным литературы о том, что θ - и α -ритмы включены в процессы внимания и когнитивного контроля [9], а также, основываясь на данных об участии α -ритма в распознавании намерений других людей [10–12], можно предполагать, что в результате сравнения спектральной плотности ритмов ЭЭГ, сопровождающих разные виды игр, различия могут быть обнаружены в θ - и α -частотных диапазонах.

В исследованиях была многократно показана связь увеличения медиального фронтального θ -ритма при выполнении сложных заданий, требующих повышенного внимания и когнитивного контроля [13–15]. Возможно, что увеличение спектральной плотности θ -ритма будет наиболее выражено в режиме конкуренции. А также, что увеличение спектральной плотности θ -ритма может быть обнаружено в передней поясной коре, т.к. эта структура мозга считается основным генератором медиального фронтального θ -ритма, связанного с процессами внимания и когнитивного контроля [16].

Согласно данным исследований степень снижения α -ритма, может быть связана с активностью зеркальных нейронов, которые участвуют в процессах понимания действий и намерений других людей [10, 17, 18]. В исследовании *L.M. Oberman et al.* [11] было обнаружено, что α -ритм в наибольшей степени снижается в задании с взаимодействием во время просмотра интерактивных видеороликов, также α -ритм значительно снижался при просмотре видеофрагментов с взаимодействием людей, тогда как снижение α -ритма при просмотре видеороликов, не содержащих взаимодействия, было минимально выражено. Предполагается, что снижение α -ритма связано с процессами понимания намерений других людей и может быть рассмотрено в качестве показателя, отражающего степень включения в социальные взаимодействия [11]. Можно предполагать, что в текущем исследовании наибольшее снижение спектральной плотности α -ритма будет выявлено во время построения совместной фигуры, когда необходимо догадываться о намерении партнера о том куда он собирается поставить блок, тогда как наименьшее снижение спектральной плотности α -ритма будет выявлено при индивидуальном выполнении задания, в котором отсутствует взаимодействие с другим игроком.

МЕТОДИКА

Выборка состояла из 42 добровольцев (24 женщины) в возрасте от 18 до 47 лет (среднее = 24.1, стандартное отклонение = 7.7). 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. Большинство участников исследования были студентами ВУЗа и были знакомы друг с другом. Участники в парах были одного пола и приблизительно одного возраста. Исследование было проведено двумя способами. У 23-х участников из выборки парой был участник, который находился в другом здании, где у него регистрировали сочетанную запись фМРТ и ЭЭГ. Перед началом эксперимента участникам была дана возможность увидеть друг друга по видеосвязи в течение небольшого отрезка времени. У остальных 19 чел. из выборки парой был участник, который находился в том же помещении, и у него также производилась запись ЭЭГ. Участники были отделены ширмой и не видели друг друга во время выполнения задания. В настоящей статье для анализа были использованы только те записи ЭЭГ, которые были получены с использованием одного и того же ЭЭГ-оборудования. После исследования участники заполняли психологические опросники.

Экспериментальное задание. В качестве экспериментальной парадигмы мы использовали модификацию задания, описанного в статье [1]. Каждый участник исследования сыграл в 15 игр, по 5 игр каждого вида. Задачей испытуемого являлось построение изображения заданной фигуры на экране монитора. Игровое поле состояло из 100 клеток. Перед началом игры предъявляли инструкцию и изображение целевой фигуры из 20 клеток, форма которой варьировала и не повторялась в течение одного эксперимента. Каждая игра состояла из 20 ходов. В начале каждого хода в левой верхней части экрана появлялся блок, который нужно было передвинуть и “встроить” в нужное место на игровом поле. Для передвижения блока использовали два джойстика с двумя кнопками каждый.

Во время индивидуальной игры участнику исследования необходимо было составить из блоков изображение фигуры. Макет фигуры, которую нужно было воспроизвести, был показан в левой части экрана на протяжении всего задания.

Одна кнопка позволяла передвигать блок на одну позицию влево (левый джойстик), или вправо (правый джойстик), а вторая соответственно вверх или вниз. На передвижение блока в каждом эпизоде выделялось 5 с. Если за это время испытуемый не успевал довести блок до предполагаемого места, он фиксировался там, где в данный момент оказался.

Во время кооперации участникам исследования совместно с напарником необходимо было составить изображение фигуры. Предъявляли следующую инструкцию: “Ваша задача составить из блоков **СОВМЕСТНО С НАПАРНИКОМ** изо-

бражение одной из фигур. Макет фигуры, которую нужно воспроизвести, будет показан в левой части экрана на протяжении всего задания. При каждом ходе Вы и Ваш напарник должны поставить блоки в одну и ту же клетку. Совместные баллы будут начисляться за количество правильно поставленных блоков”.

Во время соперничества участники исследования соревновались друг с другом. Инструкция к этому виду игры была следующей: “У Вас и Вашего соперника одна и та же задача — составить из блоков изображение фигуры. В левой части экрана показан макет фигуры, которую нужно воспроизвести. При каждом ходе Вы **СОРЕВНУЕТЕСЬ** с соперником, кто быстрее сможет встроить блок в нужное место. Ваш блок имеет красный цвет, у Вашего соперника блок синего цвета. Если Вы **БЫСТРЕЕ** поставите блок в выбранное место, то через некоторое время он станет белым и Вам будет доступна конкуренция за новый блок. Тому, кто не успел поставить блок в нужное место, баллы не начисляются.”. Экспериментальное задание всегда начиналось с индивидуальной игры, т.е. с более простого задания, в котором участник исследования спокойно мог освоить особенности построения фигуры. Оставшиеся игры предъявлялись в случайном порядке.

Анализ ЭЭГ-данных. ЭЭГ во время компьютерной игры на построение фигуры была записана с помощью установки *Brain Products* (Германия) с использованием стандартной шапочки с 127 активными электродами, расположенными по системе 10–5, при частоте оцифровки 1000 Гц. Сопротивление под электродом устанавливали ниже 5 Ком, полоса пропускания — от 0.1 до 100 Гц. В качестве референта был использован Cz электрод. Индивидуальная позиция каждого электрода была определена с помощью дигитайзера *FASTRACK (Polhemus, США)*. Артефакты были удалены с помощью анализа независимых компонент в программе *EEGlab* [19], и данные были приведены к усредненному референту. Анализ сравнений спектральной плотности между разными видами игр (“кооперация”, “конкуренция” и “индивидуальная игра”) на уровне источников был выполнен в программе *eLoreta*.

Отрезок записи ЭЭГ с частотой дискретизации 1000 Гц длительностью 3000 мс после появления блока был использован для расчета спектральной плотности источников в программе *eLoreta* [20].

Статистическая значимость результатов сравнения игр разных видов была оценена с использованием *t*-статистики для связанных измерений (*paired groups*), с применением метода рандомизации статистического непараметрического картирования (*statistical nonparametric mapping, SnPM*), который включает в себя поправку на множе-

Таблица 1. Результаты статистических сравнений

Сравнение	Частотный диапазон	Размер кластера	T-критерий	Статическая значимость
Конкуренция > Кооперация	θ (4–7 Гц)	295	4.32	$p < 0.01$
	α (8–12 Гц)	18	3.86	$p < 0.05$
Конкуренция > Индивидуальный	θ (4–7 Гц)	—	2.75	<i>n.s.</i>
Конкуренция < Индивидуальный	α (8–12 Гц)	81	–4.14	$p < 0.05$
	θ (4–7 Гц)	86	–4.19	$p < 0.05$
Кооперация < Индивидуальный	α (8–12 Гц)	71	–4.10	$p < 0.05$

ственные сравнения. Метод рандомизации *SnPM* в *eLoreta* основан на подходе бутстреппинга и производится путем множественных непараметрических пермутационных сравнений. Для коррекции множественных сравнений использовали 5000 рандомизаций. Дополнительную поправку на множественные сравнения (3 типа сравнений $\times$ 2 ритма) не проводили.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В каждой игре рассчитывался показатель завершенности фигуры (отношение количества “правильно” поставленных блоков к общему числу блоков). Для индивидуального режима среднее показателя завершенности фигуры было равно 0.87, стандартное отклонение (CO) = 0.11, для кооперации среднее составило 0.65, CO = 0.16, для конкуренции среднее — 0.48, CO = 0.16.

Сравнение зависимых наблюдений (“конкуренция” vs “кооперация”; “кооперация” vs “индивидуальное выполнение”; “конкуренция” vs “индивидуальное выполнение”) с использованием 5000 рандомизаций в программе *eLoreta* выявило следующие статистически значимые результаты. Результаты статистических сравнений плотности источников тока θ (4–7 Гц)- и α (8–12

Гц)-частотных диапазонов в разных видах игры, даны в табл. 1.

Так, во время конкуренции спектральная плотность θ -ритма была выше, чем в условиях кооперации и этот эффект был наиболее выражен в передней поясной коре (область Бродмана 32) и медиальной префронтальной коре (область Бродмана 9) (рис. 1).

Большая плотность источников тока была обнаружена в условии конкуренции по сравнению с кооперацией.

Во время кооперации спектральная плотность ЭЭГ θ -диапазоне была меньше, чем при индивидуальном выполнении задания и этот эффект был наиболее выражен в медиальной префронтальной коре (область Бродмана 9) и передней поясной коре (область Бродмана 32) (рис. 2).

Сравнение θ -спектральной плотности во время конкуренции и при индивидуальном выполнении не выявило статистически значимых различий.

Во время конкуренции спектральная плотность α -частотного диапазона была меньше по сравнению с индивидуальным выполнением в теменных и затылочных областях коры (максимальный эффект был обнаружен в предклинье, область Бродмана 7) (рис. 3).

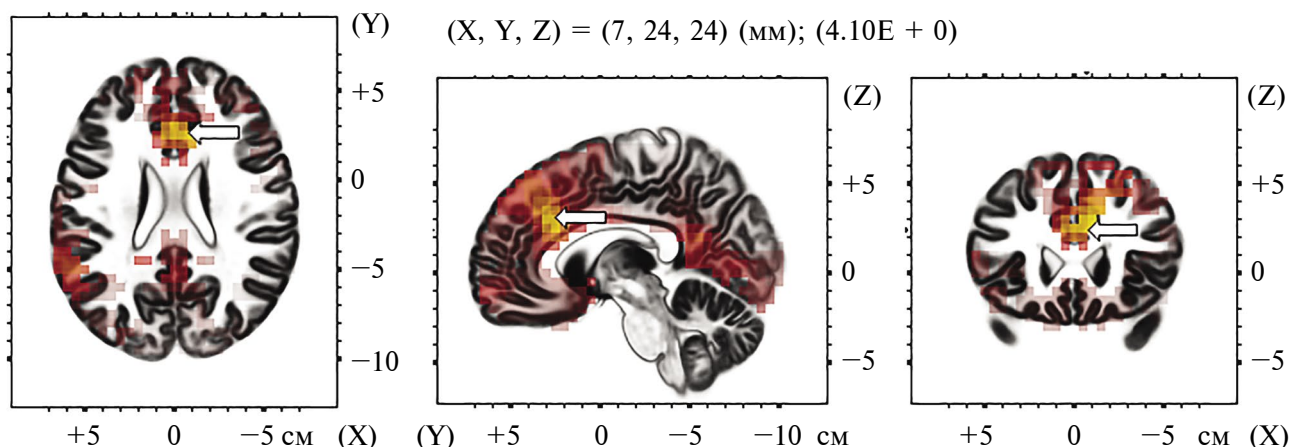


Рис. 1. Сравнение источников θ -ритма условий конкуренции и кооперации.

Во время кооперации в α -диапазоне была меньше спектральная плотность по сравнению с индивидуальным выполнением в теменных и затылочных областях коры (максимальный эффект был обнаружен в предклинье, область Бродмана 19) (рис. 4).

Меньшая плотность источников тока была обнаружена в условии кооперации по сравнению с индивидуальным выполнением.

Во время конкуренции в α -диапазоне была больше спектральная плотность по сравнению с кооперацией в затылочных областях коры (максимальный эффект был обнаружен в левой зрительной коре, области Бродмана 18) (рис. 5).

Таким образом, как видно из рис. 3–5 спектральная плотность в α -частотном диапазоне была наибольшей для индивидуального выполнения и наименьшей для кооперации, локализация

таких эффектов охватывала зрительные области коры головного мозга.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наша гипотеза, высказанная ранее, подтвердилась — различия в спектральной плотности между разными видами игры были обнаружены в θ - и α -диапазонах.

Ранее в исследованиях был обнаружен эффект увеличения α -ритма при снижении когнитивной нагрузки и существовала точка зрения об α -ритме как о ритме холостого хода. В дальнейших исследованиях было обнаружено, что увеличение α -спектральной мощности может отражать процессы тормозного контроля (*top-down* регуляцию), тогда как снижение α -спектральной мощности может отражать сложность задачи и увеличение

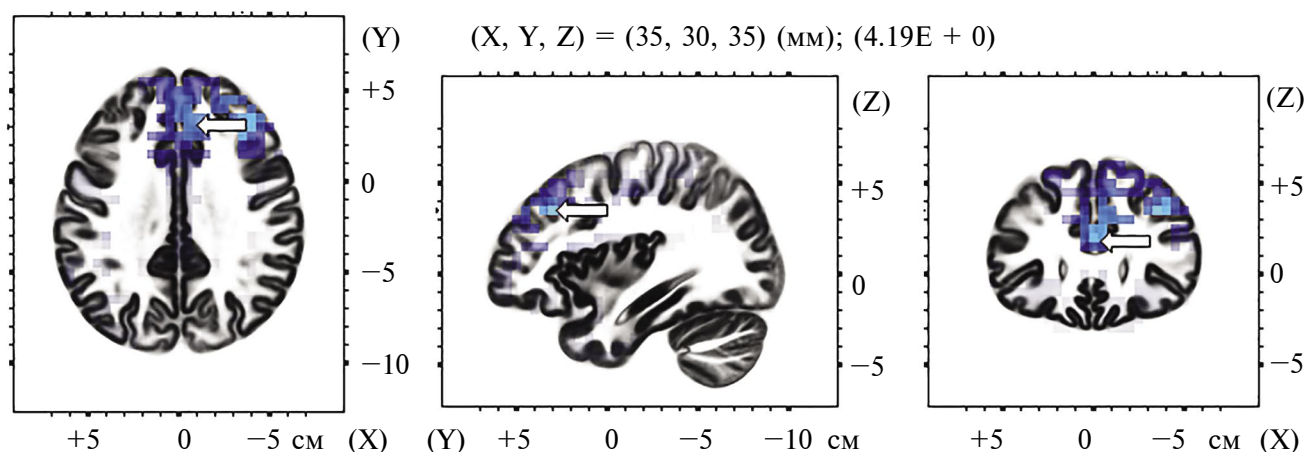


Рис. 2. Результат сравнения источников θ -ритма в условиях кооперации и индивидуального выполнения.

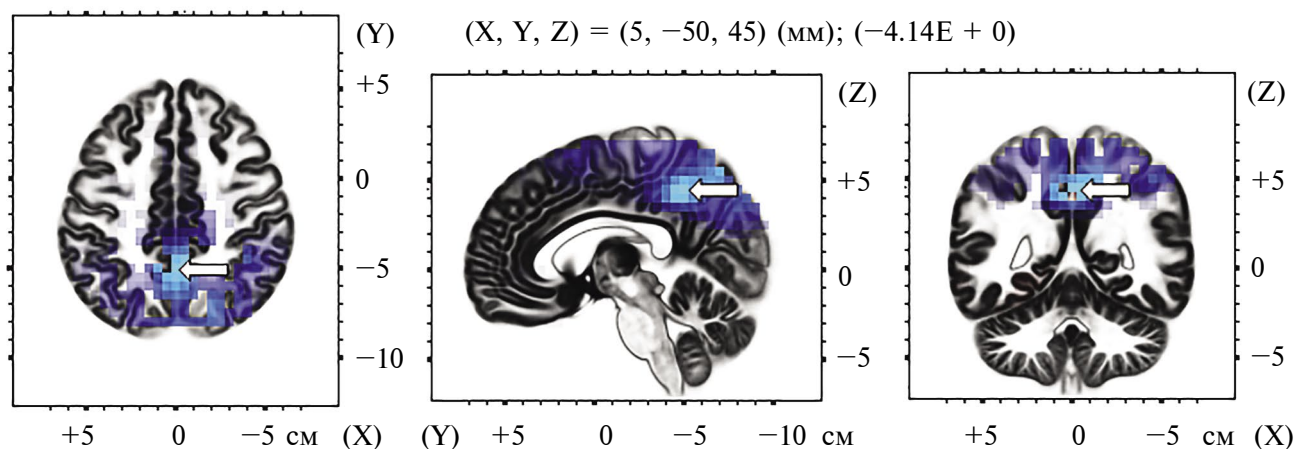


Рис. 3. Сравнение источников α -ритма во время конкуренции по сравнению с индивидуальным выполнением. Меньшая плотность источников тока была обнаружена в условии конкуренции по сравнению с индивидуальным выполнением.

когнитивной нагрузки, т.е. количество когнитивных ресурсов, задействованных при выполнении задачи [9].

В нашем исследовании было обнаружено, что во время конкуренции спектральная плотность α -ритма была ниже по сравнению с индивидуальным выполнением. Снижение спектральной плотности α -частотного диапазона было наиболее выражено во время сотрудничества по сравнению с другими видами игры.

В исследованиях было показано, что снижение α -ритма может быть связано с процессами понимания намерений других людей [10, 17, 21, 22]. Так, результаты нашего исследования согласуются с исследованием *L.M. Oberman et al.* [11], согласно которому степень снижения α -осцилляций может быть использована в качестве индикатора,

показывающего степень включения в социальные взаимодействия.

Выявленное в исследовании наибольшее снижение спектральной плотности α -ритма во время кооперации с партнером, охватывало области зрительной коры мозга, что согласуется с исследованием *A. Perry, N.F. Trojeb и S. Bentin* [12], в котором большее снижение α -ритма в затылочной коре было обнаружено при выполнении задания на определение намерений и эмоций.

Можно предположить, что согласно данным о связи степени снижения α -ритма и количества когнитивных ресурсов, задействованных для выполнения экспериментального задания [23, 24], выявленное в исследовании более выраженное снижение спектральной плотности α -ритма в зрительных областях коры во время сотрудничества, может быть связано с тем, что участникам

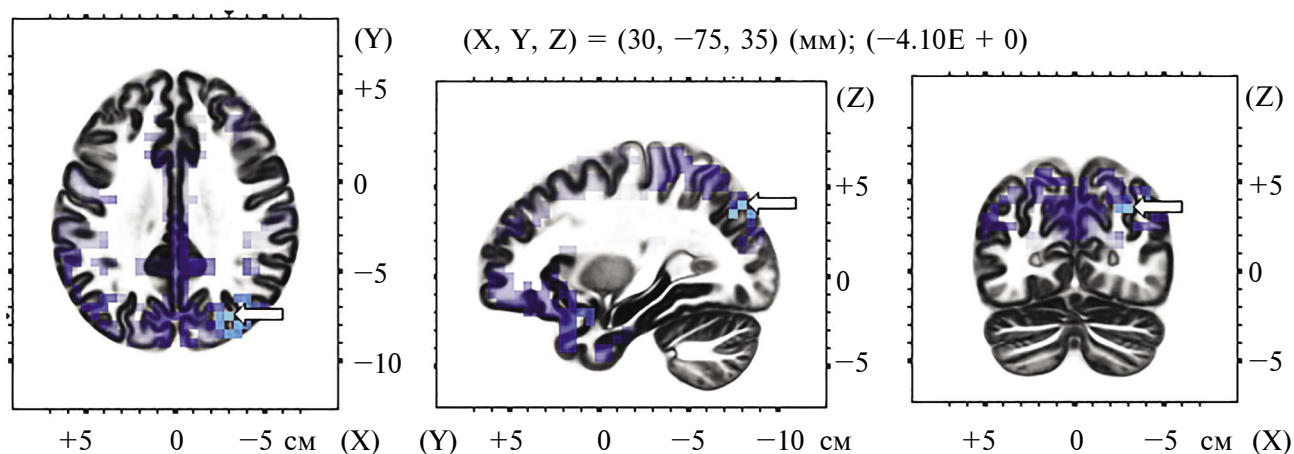


Рис. 4. Сравнение источников α -ритма во время кооперации по сравнению с индивидуальным выполнением.

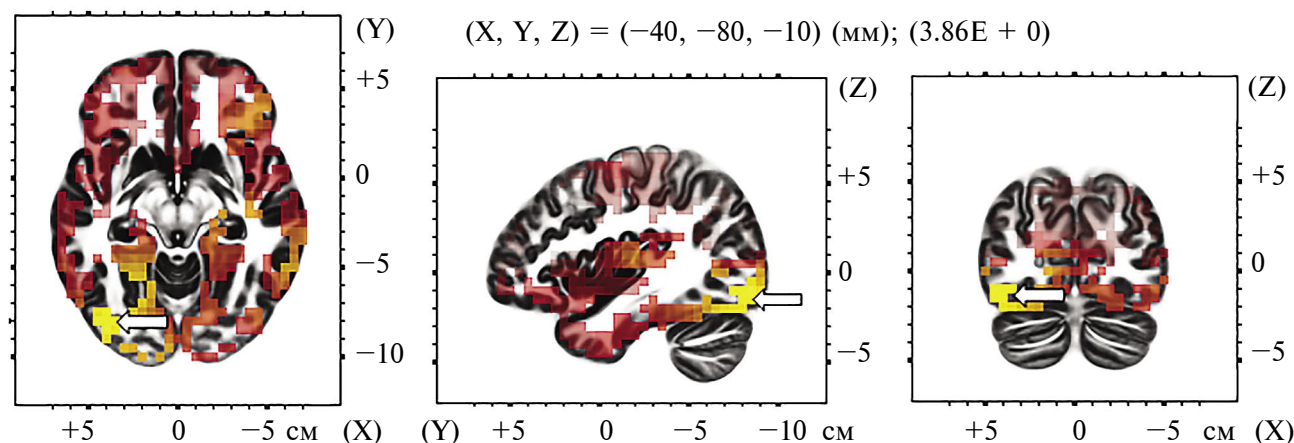


Рис. 5. Сравнение источников α -ритма в условиях конкуренции и кооперации. Большая плотность источников тока была обнаружена в условии конкуренции по сравнению с кооперацией.

кооперации для построения совместной фигуры требуется большее включение зрительно-пространственного внимания во время наблюдения за действиями, анализ которых необходим для предугадывания действий и понимания намерений партнера. Также, во время конкуренции участники могут отслеживать выполнение задания «соперником», например, для коррекции или выбора более выигрышной стратегии и, вероятно, это отражается в большем снижении спектральной плотности α -ритма в теменных и затылочных областях коры в режиме конкуренции по сравнению с индивидуальным выполнением.

В результате исследования была обнаружена бо́льшая спектральная плотность θ -ритма в условиях соперничества, чем в условиях кооперации, и этот эффект был локализован в передней поясной коре. Согласно *M. Balconi, D. Crivelli* и *M.E. Vanutelli* [2], во время конкуренции поведение другого участника взаимодействия более непредсказуемо, чем во время кооперации и может сопровождаться более высокой когнитивной нагрузкой. Как известно, увеличение θ -спектральной мощности, в особенности, медиального фронтального θ -ритма связано со сфокусированным вниманием и когнитивными усилиями [13–15]. В режиме конкуренции необходимы сфокусированное внимание и концентрация на появлении «блока», а также высокая скорость действий, для того чтобы первым построить «блок» в запланированное место. Можно предположить, что бо́льшее увеличение медиального θ -ритма в процессе конкуренции, по сравнению с другими видами игры, связано с тем, что участникам исследования необходимо привлечь больше ресурсов сфокусированного внимания и когнитивного контроля для того чтобы выиграть соревнование.

Выявленный результат увеличенной спектральной плотности θ -частотного диапазона в передней поясной коре (ППК) сочетается с известными фактами участия ППК в процессах внимания, мотивации [25], социальных [26] и основанных на награде процессах [27]. Так, в процессе игры в карты активность ППК была связана с мониторингом действий, сделанных другим игроком [27]. Согласно *M.A. Apps* и *J. Sallet* [28], нейроны ППК в большей степени участвуют в кодировании информации о последствиях действий других людей, чем о последствиях собственных действий или решений. Также, результаты нашего исследования согласуются с результатами фМРТ-исследования процессов конкуренции и кооперации, выполненного *J. Decety et al.*, в котором было обнаружено увеличение активности передней поясной коры в процессе конкуренции [1].

Интересно, что спектральная плотность θ -ритма в условиях конкуренции по сравнению с индивидуальным выполнением была бо́льшая, но не до-

стигала уровня статистически значимых различий. Можно предположить, что помимо процессов внимания вклад в различия, выявленные в θ -диапазоне, могут вносить и другие факторы. Статистически значимые различия в θ -частотном диапазоне, помимо выявленных различий при сравнении условий кооперации и конкуренции, также были обнаружены при сравнении кооперации с индивидуальным выполнением. В нашем исследовании была обнаружена наименьшая спектральная плотность θ -ритма во время сотрудничества в структурах мозга, охватывающих медиальную префронтальную кору, по сравнению с другими видами игры. Известно, что медиальная префронтальная кора является передним узлом дефолт системы мозга (ДСМ) и эта система участвует в процессах социальных взаимодействий и процессах, связанных с самосознанием [29, 30]. Согласно исследованию *R. Scheeringa et al.* [31], θ -ритм в медиальных фронтальных отделах мозга отрицательно коррелировал с уровнем потребления кислорода согласно показателю фМРТ-сигнала в структурах DSM. Можно предположить, что значимый вклад в снижение спектральной плотности θ -ритма может вносить активность DSM, которая, вероятно, будет в бо́льшей степени включена во время сотрудничества с партнером по сравнению с другими видами игры. Таким образом, выявленная в нашем исследовании сниженная плотность источников θ -ритма в медиальной префронтальной коре во время кооперации, по сравнению с индивидуальным выполнением и конкуренцией, может быть связана с активностью DSM в процессе взаимодействия с партнером при построении совместной фигуры.

Ограничения исследования. Определенный вклад в выявленные результаты исследования могут вносить различия в структуре видов экспериментального задания. Во время кооперации и конкуренции наличие второго игрока обеспечивает контекст социальных взаимодействий, и оба вида игры дают возможность отслеживать действия другого игрока и корректировать собственные действия. В тоже время кооперация и конкуренция различаются не только типом взаимодействия, но и сутью, сложностью задания. Так, в отличие от других видов игры для успешной кооперации участникам необходимо было отслеживать передвижения блока, сделанные партнером по взаимодействию и догадаться о намерении партнера, куда он собирается поставить блок. Такие процессы могут вызвать бо́льшее включение зрительного внимания и внести вклад в последующее, более выраженное снижение α -ритма в затылочных областях коры. Во время конкуренции участникам необходимо было быстрее поставить блок в «выгодное» место и, вероятно, наблюдение за действиями соперника и определение его намерений не будут играть в этом виде

взаимодействия ключевую роль, а на первый план выйдут процессы, связанные со сфокусированным вниманием и когнитивным контролем, что проявилось в большей спектральной плотности источников θ -ритма. Можно предположить, что дополнительный вклад в снижение спектральной плотности θ -ритма во время сотрудничества может вносить активность ДСМ, которая, возможно, в большей степени вовлечена во время кооперативного взаимодействия по сравнению с конкурентным взаимодействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленное в кооперативной игре наиболее выраженное снижение плотности α -ритма в зрительных областях коры может быть связано с процессами понимания действий и намерений партнера во время построения совместной фигуры. Наиболее выраженное во время конкуренции увеличение спектральной плотности θ -ритма во фронтально-центральных областях коры может быть связано с фокусировкой внимания и когнитивным контролем участника, которые необходимы для победы в соревновании.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-15-00142).

Соблюдение этических стандартов. Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Локальным этическим комитетом Научно-исследовательского института нейронаук и медицины (Новосибирск), протокол № 3-О от 18.03.2021 г.

Информированное согласие. Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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

Вклад авторов в публикацию. Концепция и методология — Г.Г. Князев; разработка программного обеспечения — П.Д. Рудыч, Е.А. Заварзин, А.Е. Сапрыгин; проведение исследования — А.Н. Савостьянов, С.С. Таможников, А.В. Бочаров; анализ данных — А.В. Бочаров, А.Е. Сапрыгин, А.Н. Савостьянов, С.С. Таможников, Е.А. Меркулова; 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. Decety J., Jackson P.L., Sommerville J.A. et al. The neural bases of cooperation and competition: an fMRI investigation // *Neuroimage*. 2004. V. 23. № 2. P. 744.
2. Balconi M., Crivelli D., Vanutelli M.E. Why to cooperate is better than to compete: brain and personality components // *BMC Neurosci*. 2017. V. 18. № 1. P. 68.
3. Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В. Нейрофизиологические характеристики соревнования в навыках и кооперации при выполнении творческих задач — обзор исследований с использованием технологии гиперсканнинга // *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 1. С. 104.
4. Balconi M., Vanutelli M.E. Cooperation and competition with hyperscanning methods: review and future application to emotion domain // *Front. Comput. Neurosci*. 2017. V. 11. P. 86.
5. Liu D., Liu S., Liu X. et al. Interactive brain activity: review and progress on EEG-based hyperscanning in social interactions // *Front. Psychol*. 2018. V. 9. P. 1862.
6. Astolfi L., Toppi J., Borghini G. et al. Study of the functional hyperconnectivity between couples of pilots during flight simulation: an EEG hyperscanning study // *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc*. 2011. V. 2011. P. 2338.
7. Ring C., Kavussanu M., Cooke A. Effects of cooperation and competition on performance, emotion, and effort: goal and means interdependence // *J. Sport Exerc. Psychol*. 2022. V. 44. № 2. P. 86.
8. Tauer J.M., Harackiewicz J.M. The effects of cooperation and competition on intrinsic motivation and performance // *J. Pers. Soc. Psychol*. 2004. V. 86. № 6. P. 849.
9. Knyazev G.G. Motivation emotion and their inhibitory control mirrored in brain oscillations // *Neurosci. Biobehav. Rev*. 2007. V. 31. № 3. P. 377.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Cavanagh J.F., Frank M.J. Frontal theta as a mechanism for cognitive control // *Trends Cogn. Sci*. 2014. V. 18. № 8. P. 414.
14. Cohen M.X. A neural microcircuit for cognitive conflict detection and signaling // *Trends Neurosci*. 2014. V. 37. № 9. P. 480.

15. Wascher E., Rasch B., Sanger J. et al. Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue // *Biol. Psychol.* 2014. V. 96. P. 57.
16. Magosso E., Ricci G., Ursino M. Alpha and theta mechanisms operating in internal-external attention competition // *J. Integr. Neurosci.* 2021. V. 20. № 1. P. 1.
17. Махин С.А. Система “зеркальных нейронов”: Актуальные достижения и перспективы ЭЭГ-исследований // *Ученые записки Таврического федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия “Биология, химия”.* 2012. Т. 25. № 1. С. 142.
18. Столбков Ю.К., Герасименко Ю.П. Когнитивная двигательная реабилитация: воображение и наблюдение моторных действий // *Физиология человека.* 2021. Т. 47. № 1. С. 123.
19. 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.
20. Pascual-Margui R.D. Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA). Technical details // *Methods Find. Exp. Clin. Pharmacol.* 2002. V. 24. Suppl D. P. 5.
21. Бочаров А.В., Савостьянов А.Н., Сапрыгин А.Е., Меркулова Е.А., Таможников С.С., Прошина Е.А., Князев Г.Г. Снижение альфа- и бета-осцилляций в процессе виртуального социального взаимодействия // *Физиология человека.* 2023. Т. 49. № 1. С. 42.
22. Каримова Е.Д., Смольская Д.В., Нараткина А.А. Активность зеркальной системы мозга у людей с депрессивным симптомокомплексом // *Ж. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2023. Т. 73. № 2. С. 230.
23. 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.
24. Pfurtscheller G., Lopes da Silva F.H. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles // *Clin. Neurophysiol.* 1999. V. 110. № 11. P. 1842.
25. Tang W., Jabadi S., Zhu Z. et al. A connectional hub in the rostral anterior cingulate cortex links areas of emotion and cognitive control // *Elife.* 2019. V. 8. P. e43761.
26. Redcay E., Schilbach L. Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction // *Nat. Rev. Neurosci.* 2019. V. 20. № 8. P. 495.
27. 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.
28. Apps M.A., Sallet J. Social learning in the medial prefrontal cortex // *Trends Cogn. Sci.* 2017. V. 21. № 3. P. 151.
29. Goldberg I.I., Harel M., Malach R. When the brain loses its self: prefrontal inactivation during sensorimotor processing // *Neuron.* 2006. V. 50. № 2. P. 329.
30. Gusnard D.A., Akbudak E., Shulman G.L., Raichle M.E. Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2001. V. 98. № 7. P. 4259.
31. Scheeringa R., Bastiaansen M.C., Petersson K.M. et al. Frontal theta EEG activity correlates negatively with the default mode network in resting state // *Int. J. Psychophysiol.* 2008. V. 67. № 3. P. 242.

REFERENCES

1. Decety J., Jackson P.L., Sommerville J.A. et al. The neural bases of cooperation and competition: an fMRI investigation // *Neuroimage.* 2004. V. 23. № 2. P. 744.
2. Balconi M., Crivelli D., Vanutelli M. E. Why to cooperate is better than to compete: brain and personality components // *BMC Neurosci.* 2017. V. 18. № 1. P. 68.
3. Shemyakina N.V., Nagornova Z.V. Neurophysiological Characteristics of Competition in Skills and Cooperation in Creativity Task Performance: A Review of Hyperscanning Research // *Human Physiology.* 2021. V. 47. № 1. P. 87.
4. Balconi M., Vanutelli M.E. Cooperation and competition with hyperscanning methods: review and future application to emotion domain // *Front. Comput. Neurosci.* 2017. V. 11. P. 86.
5. Liu D., Liu S., Liu X. et al. Interactive brain activity: review and progress on EEG-based hyperscanning in social interactions // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. P. 1862.
6. Astolfi L., Toppi J., Borghini G. et al. Study of the functional hyperconnectivity between couples of pilots during flight simulation: an EEG hyperscanning study // *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2011. V. 2011. P. 2338.
7. Ring C., Kavussanu M., Cooke A. Effects of cooperation and competition on performance, emotion, and effort: goal and means interdependence // *J. Sport Exerc. Psychol.* 2022. V. 44. № 2. P. 86.
8. Tauer J.M., Harackiewicz J.M. The effects of cooperation and competition on intrinsic motivation and performance // *J. Pers. Soc. Psychol.* 2004. V. 86. № 6. P. 849.
9. Knyazev G.G. Motivation emotion and their inhibitory control mirrored in brain oscillations // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2007. V. 31. № 3. P. 377.
10. 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.
11. 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.
12. *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.
 13. *Cavanagh J.F., Frank M.J.* Frontal theta as a mechanism for cognitive control // Trends Cogn. Sci. 2014. V. 18. № 8. P. 414.
 14. *Cohen M.X.* A neural microcircuit for cognitive conflict detection and signaling // Trends Neurosci. 2014. V. 37. № 9. P. 480.
 15. *Wascher E., Rasch B., Sanger J. et al.* Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue // Biol. Psychol. 2014. V. 96. P. 57.
 16. *Magosso E., Ricci G., Ursino M.* Alpha and theta mechanisms operating in internal-external attention competition // J. Integr. Neurosci. 2021. V. 20. № 1. P. 1.
 17. *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. Series: Biology, chemistry. 2012. V. 25. № 1. P. 142.
 18. *Stolbkov Y.K., Gerasimenko Y.P.* Cognitive motor rehabilitation: imagination and observation of motor actions // Human Physiology. 2021. V. 47. № 1. P. 104.
 19. *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.
 20. *Pascual-Margui R.D.* Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA). Technical details // Methods Find. Exp. Clin. Pharmacol. 2002. V. 24. Suppl D. P. 5.
 21. *Bocharov A.V., Savostyanov A.N., Saprygin A.E. et al.* Suppression of alpha and beta oscillations in the course of virtual social interactions // Human Physiology. 2023. V. 49. № 1. P. 35.
 22. *Karimova E.D., Smolskaya D.V., Naratkina A.A.* Activity of the Mirror Neuron System in People with Depressive Symptomatology // Neurosci. Behav. Physiol. 2023. V. 53. № 7. P. 1202.
 23. *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.
 24. *Pfurtscheller G., Lopes da Silva F.H.* Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles // Clin. Neurophysiol. 1999. V. 110. № 11. P. 1842.
 25. *Tang W., Jbabdi S., Zhu Z. et al.* A connective hub in the rostral anterior cingulate cortex links areas of emotion and cognitive control // Elife. 2019. V. 8. P. e43761.
 26. *Redcay E., Schilbach L.* Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction // Nat. Rev. Neurosci. 2019. V. 20. № 8. P. 495.
 27. *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.
 28. *Apps M.A., Sallet J.* Social learning in the medial prefrontal cortex // Trends Cogn. Sci. 2017. V. 21. № 3. P. 151.
 29. *Goldberg I.I., Harel M., Malach R.* When the brain loses its self: prefrontal inactivation during sensorimotor processing // Neuron. 2006. V. 50. № 2. P. 329.
 30. *Gusnard D.A., Akbudak E., Shulman G.L., Raichle M.E.* Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2001. V. 98. № 7. P. 4259.
 31. *Scheeringa R., Bastiaansen M.C., Petersson K.M. et al.* Frontal theta EEG activity correlates negatively with the default mode network in resting state // Int. J. Psychophysiol. 2008. V. 67. № 3. P. 242.

EEG-Correlates of Competition and Cooperation

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

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

^bNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

*E-mail: bocharovav@neuronm.ru

The aim was to investigate the peculiarities and localization of the current source density of α - and θ -frequency bands accompanying competition and cooperation with another player, as well as individual figure building in a computer game. The sample included forty-two volunteers (24 females) between the ages of 18 and 47. Analysis of differences in the current source density of 127 channel EEG under different game conditions was performed in the eLoreta program. During competition, the θ -current source density in the

anterior cingulate cortex and medial prefrontal cortex was greater than during cooperation. According to the literature on functional correlates of θ -rhythm, it can be suggested that the greater increase in medial frontal θ -rhythm detected during competition may be related to focused attention and cognitive control processes. The alpha current source density in the parietal and visual cortex areas during interactive game modes (cooperation and competition) was lower compared to the individual mode. During cooperation the α -current source density was lower compared to the competition mode. The greatest decrease of the α -current source density in the cooperation mode is consistent with idea of a relation between α -rhythm decrease and the processes of understanding the other person's intentions.

Keywords: EEG, θ -rhythm, α -rhythm, competition, cooperation, social interactions.