

УДК 612.821

ДИНАМИКА КОГЕРЕНТНОСТИ РИТМОВ ЭЭГ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ПРО- И АНТИСОЦИАЛЬНЫМИ ДЕЙСТВИЯМИ У ДЕТЕЙ В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ

© 2023 г. Л. С. Орехова¹, А. М. Куличенко¹, С. А. Махин¹,
А. А. Михайлова¹, В. Б. Павленко¹, *

¹Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

*E-mail: vprav55@gmail.com

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

После доработки 31.05.2022 г.

Принята к публикации 24.06.2022 г.

У детей 17–43 мес. (средний возраст 31 мес.), которые по-разному оценивали про- и антисоциальные действия кукольных персонажей (группы с высоким и низким индексом моральных оценок – ИМО), выявили специфические, для каждой из групп, изменения когерентности в разных частотных диапазонах электроэнцефалограммы (ЭЭГ). У детей с высоким ИМО наблюдение за просоциальным действием сопровождается усилением внутрислоушарных взаимосвязей в α -диапазоне ЭЭГ, а в группе с низким ИМО – разнонаправленными изменениями когерентности α -активности. В группе с высоким ИМО принятие решения о распределении вознаграждения между персонажами, продемонстрировавшими про- или антисоциальное поведение, сопровождается ростом когерентности в α -диапазоне между лобными, центральными, теменными и затылочными регионами правого полушария, у детей с низким ИМО – снижением. Значимые модуляции когерентности ЭЭГ в θ -диапазоне не обнаружены, а для β -диапазона выявлены лишь у детей с низким ИМО. Полученные данные обсуждаются с учетом представлений об управляющих системах мозга и роли внутрислоушарных корковых связей в организации морального поведения. Выявленные особенности когерентности θ -, α - и β -диапазонов ЭЭГ важны для понимания центральных механизмов становления моральных суждений у детей раннего возраста.

Ключевые слова: дети раннего возраста, моральные оценки, когерентность ЭЭГ.

DOI: 10.31857/S0131164622700126, **EDN:** AONUWY

Одним из важнейших факторов регуляции социального взаимодействия является мораль. Мораль принято рассматривать как принятые в обществе представления о честности и справедливости по отношению к людям [1, 2]. Согласно *F. Warneken* и *M. Tomasello* у человека, как биологического вида, имеется определенная генетическая предрасположенность к просоциальным действиям, на основе которой при взаимодействии с социальной и культурной средой постепенно развивается зрелое моральное поведение [3]. Моральное поведение включает, в частности, моральные оценки – суждения, которые выносит человек при наблюдении за соблюдением моральных норм [4]. Способность к моральным суждениям начинает формироваться в раннем детстве [5]. Установлено, что при демонстрации позитивных и негативных социальных взаимодействий с участием кукол или персонажей мультфильмов младенцы уже с девяти месяцев способны различать про- и антисоциальные дей-

ствия (помощь и утешение/причинение боли и создание препятствий), предпочитая рассматривать тех персонажей, которые поступали просоциально [6]. Обнаружена взаимосвязь между предпочтением малышами в возрасте до двух лет просоциального персонажа с повышенной склонностью этих же детей в более старшем возрасте к эмпатии, а также к способности лучше понимать социальные ситуации [7]. Исходя из этого, всесторонние исследования факторов становления морального поведения у детей раннего возраста представляются исключительно важными.

Для изучения моральных оценок у детей часто применяются игровые методики, в которых ребенку необходимо распределить между собой и другими детьми, а также между “добрыми” и “злыми” персонажами ограниченное количество единиц вознаграждения (например, сладости, игрушки и т.д.). Результатом применения таких методик явилось выявление возрастных, межкультурных, гендер-

ных особенностей морального развития детей [5, 8, 9].

Однако мозговые механизмы формирования морального и просоциального поведения у детей раннего возраста изучались лишь в единичных работах. *M. Paulus et al.* [10] была выявлена взаимосвязь между особенностями электроэнцефалографии (ЭЭГ), зарегистрированной у детей в возрасте 14 мес. в состоянии активного бодрствования, со степенью проявления эмпатических реакций и способностью к оказанию помощи у этих же детей в возрасте 18 и 24 мес. Оказалось, что особенности выполнения разных действий, имеющих просоциальный характер, коррелируют с активностью разных областей неокортекса. Большая активация левой лобной коры по сравнению с правой была характерна для детей, склонных к выраженным эмпатическим реакциям (активное сопереживание боли другого человека, попытки утешить). Большая активация правой височной области была свойственна тем, кто чаще оказывал простейшую инструментальную помощь экспериментатору (подавал упавший предмет). *J.M. Cowell и J. Decety* [11] обнаружили большую амплитуду ряда компонентов, связанных с событиями ЭЭГ-потенциалов, а также повышенную десинхронизацию α -ритма ЭЭГ у детей 12–24 мес. при наблюдении за просоциальными действиями мультипликационных персонажей по сравнению с антисоциальными.

В нашей лаборатории анализировали мощность ЭЭГ детей раннего возраста непосредственно в период наблюдения за про- и антисоциальным действием кукольных персонажей и в период принятия решения об их вознаграждении [12, 13]. Было установлено, что у участников исследования с разной способностью к вынесению моральной оценки наблюдались разнонаправленные изменения мощности сенсомоторных μ - и β -ритмов. Выдвинуто предположение, что реактивность сенсомоторных ритмов ЭЭГ у ребенка в значительной степени связана с уровнем сформированности моральных оценок и возможностью отождествления себя с персонажем, совершающим социально значимые действия.

В процессе исследования психофизиологических механизмов формирования моральных оценок у детей особый интерес представляет анализ становления процессов взаимодействия и интеграции разных областей мозга в распределенную систему, обеспечивающую выполнение задач, решение которых требует активации произвольного внимания и памяти [5, 14, 15]. Согласно *M. Schneider et al.* для такой интеграции необходима пространственная синхронизация активности функционально связанных нейронов коры [16], которая, в свою очередь, проявляется в когерентности ритмов ЭЭГ [17]. Было показано, что показатели

когерентности ЭЭГ отражают особенности протекания когнитивных процессов в восходящем онтогенезе [18, 19] и специфику нарушений развития у детей [20]. Особо важную роль в интеграции относительно удаленных областей коры отводят когерентности осцилляций в частотной полосе α -ритма. Предполагают [21, 22], что, поскольку α -ритм и его разновидности проявляются повсеместно во всей коре головного мозга человека, именно когерентность данного ритма обеспечивает процессы крупномасштабной синхронизации регионов неокортекса. На значимость когерентности α -ритма для обеспечения сложной когнитивной деятельности указывают результаты следующих исследований. У детей дошкольного возраста [23] и взрослых [24] оптимальное решение задач, требующих активации рабочей памяти и интеграции новых фактов, сопровождалось повышенной синхронизацией в диапазоне α -, но не θ - и β -ритмов, регистрируемых в лобных, теменных и височных областях коры.

Как уже отмечалось выше, существует ряд исследований, рассматривающих взаимосвязь между характеристиками ЭЭГ и выраженностью просоциального поведения у детей [10–13]. Однако, насколько нам известно, ранее не проводилось работ, оценивающих особенности когерентности ЭЭГ детей в процессе использования игровой методики в зависимости от уровня развития их способностей к моральным оценкам.

В нашем исследовании дети разделены на группы в зависимости от уровня их морального развития, а частотные диапазоны ритмов ЭЭГ определены индивидуально для каждого ребенка. Мы исходим из предположения, что анализ связей между передними, центральными и задними областями неокортекса на основе анализа когерентности ЭЭГ в θ -, α - и β -диапазонах даст возможность судить о развитии лобно-теменно-височных сетей, критически важных для адекватного становления целенаправленного, в том числе, просоциального поведения детей [5, 15, 25].

В связи с этим, целью настоящего исследования явилось установление динамики когерентности θ , α и β частотных диапазонов ЭЭГ в парах внутрислоушарных отведений в ситуациях наблюдения за про- и антисоциальным поведением и осуществления морального выбора у детей раннего возраста с разными значениями показателей моральной оценки действий игровых персонажей.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 70 детей с массой тела при рождении не менее 2.5 кг, без записей в медицинской карточке о генетических заболеваниях и заболеваниях ЦНС. Все испытуе-

мые были правшами (с очевидным преобладанием правой руки при манипуляциях с предметами и при рисовании). В итоговую группу не включены 18 детей по следующим причинам: они не были вовлечены в игровые ситуации во время записи ЭЭГ, отвлекались и отворачивались; записи ЭЭГ содержали большое количество артефактов из-за чрезмерной двигательной активности ребенка. Таким образом, для статистического анализа отобраны данные 52 детей (18 мальчиков и 34 девочки) в возрасте от 17 до 43 мес. (средний возраст 31 мес.).

Регистрацию ЭЭГ, а также аудио- и видеозапись проводили на протяжении ряда ситуаций, часть из которых основаны на методике определения выраженности моральных оценок с демонстрацией экспериментатором действий трех кукол “нейтральной”, “доброй” и “злой” (разработана В. Kenward и М. Dahl [8] и модифицирована в нашей лаборатории [12]).

Ситуация 1. “Устойчивое зрительное внимание” (УЗВ) — ребенку демонстрировали видеозапись вращающегося мяча с меняющимся геометрическим рисунком.

Ситуация 2. “Наблюдение за просоциальным действием” — ребенок наблюдает как “нейтральная” кукла, поднимаясь по лестнице, испытывает затруднения (экспериментатор произносит фразу: “Ой, я так устала. Кто бы мне помог подняться?”) и “добрая” кукла помогает ей подняться.

Ситуация 3. “Наблюдение за антисоциальным действием” — начинается аналогично, но затем “злая” кукла причиняет боль “нейтральной”, сталкивая ее с лестницы (“нейтральная” кукла “говорит”: “Ой, мне так больно стало”).

Ситуация 4. “Принятие решения о распределении вознаграждения” — ребенку демонстрируют “добрую” и “злую” куклы, поведение которых необходимо оценить раздачей пяти “печений”, сделанных из картона.

На основании распределения вознаграждения производили расчет индекса моральных оценок (ИМО), значения которого варьировали от 1 до 20 баллов. Например, ребенку присваивался 1 балл, если он дал все пять печений злой кукле и ничего не дал доброй; 20 баллов, если он дал пять печений доброй кукле и ничего — злой.

ЭЭГ записывали монополярно от 16 отведений по стандартной схеме 10–20% (референт — объединенные ушные электроды) в полосе пропускания сигнала 0.5–30.0 Гц при частоте дискретизации 250 Гц с помощью программно-аппаратного комплекса “Мицар-ЭЭГ-10/70-201” (“Мицар”, Россия). Продолжительность записи ЭЭГ в первых трех ситуациях составляла 20–30 с. Время записи в процессе распределения вознаграждения зависело от того насколько быстро ребенок принимал решение. В среднем оно составляло 28.8 ± 16.2 с при крайних значениях от 10 до 74 с.

Анализ ЭЭГ-данных проводили с помощью программ *WinEEG* и *EEG Studio* (“Мицар”, Россия). Двигательные и другие артефакты удаляли при визуальном просмотре, а также с помощью метода независимых компонент. Спектральные характеристики вычисляли с использованием быстрого преобразования Фурье. Показатели когерентности ЭЭГ рассчитывали в индивидуальных, для каждого испытуемого, частотных диапазонах. Традиционно индивидуальный диапазон α -ритма определяют исходя из параметров ЭЭГ при открытых и закрытых глазах [26] или при записи в затемненном помещении [27]. Однако добиться, чтобы дети в возрасте двух-трех лет закрыли глаза на несколько десятков секунд, как правило, не удается. По техническим причинам и соображениям этического характера мы отказались от затемнения помещения. В связи с этим на основе анализа различий спектров мощности ЭЭГ в отведении C_3 в состоянии двигательного покоя ребенка и при выполнении им движений (феномены синхронизации и десинхронизации ЭЭГ) находили границы индивидуального частотного диапазона варианта α -ритма — μ -ритма [28]. Среднее значение нижней границы μ -диапазона у исследуемых детей составило 6.7 ± 0.6 Гц (при крайних значениях 5.3 и 7.9 Гц), а верхней границы — 8.7 ± 0.8 Гц (при крайних значениях 7.0 и 10.0 Гц). Среднее значение пиковой частоты μ -активности составило 7.8 ± 0.8 Гц (при крайних значениях 5.8 и 9.3 Гц). Верхнюю границу θ -диапазона и нижнюю границу β -активности определяли исходя из индивидуального частотного диапазона μ . Исходя из данных литературы [27, 29], в качестве нижней границы θ -диапазона выбрали 3 Гц, верхняя граница β -диапазона составила 18 Гц.

Внутриполушарную когерентность биопотенциалов рассчитывали между парами отведений префронтальных, фронтальных, центральных, височных, теменных и затылочных областей левого (Fp_1-F_3 , Fp_1-C_3 , Fp_1-P_3 , F_3-P_3 , F_3-O_1 , C_3-O_1 , F_7-T_3 , T_3-T_5 , P_3-O_1) и правого (Fp_2-F_4 , Fp_2-C_4 , Fp_2-P_4 , F_4-P_4 , F_4-O_2 , C_4-O_2 , F_8-T_4 , T_4-T_6 , P_4-O_2) полушарий. Поскольку ряд отведений находится в корковых областях, где отсутствуют генераторы сенсомоторного μ -ритма (расположенные, главным образом, в центральном регионе неокортекса), в дальнейшем, описывая когерентность ЭЭГ-осцилляций в соответствующем частотном диапазоне, мы будем употреблять термин “когерентность α -активности”. Значения коэффициентов когерентности для каждой из описанных выше четырех ситуаций в θ , α , и β частотных диапазонах ЭЭГ преобразовали с применением функции натурального логарифма. Значения показателей когерентности, выходящие за пределы 3σ , отбрасывали. В результате показатели когерентности имели распределения, близкие к нормальным, что позволило анализировать их средствами параметрической статистики. След-

ствии удаления фрагментов записи, содержащих артефакты, а также коэффициентов когерентности, которые выходили за пределы 3σ , при дальнейшем анализе для каждой ситуации, частотного диапазона ЭЭГ и пары отведений, получено разное число наблюдений и, соответственно, степеней свободы.

Статистический анализ данных проводили с использованием программы *STATISTICA* v.10. Различия в уровне ИМО мальчиков и девочек, а также различия в возрасте у детей с низким и высоким ИМО оценивали *t*-критерием Стьюдента. Значения когерентности ЭЭГ в θ -, α - и β -диапазонах подвергали дисперсионному анализу *ANOVA* с повторными измерениями (*repeated measures*) с внутрисубъектными факторами СИТУАЦИЯ (ситуации 1 и 2, 1 и 3, 1 и 4), ПАРЫ (18 пар отведений) и межсубъектным фактором ГРУППА (низкий и высокий ИМО), а также при их взаимодействии. Содержательно анализировали влияние непосредственно фактора СИТУАЦИЯ, а также эффекты его взаимодействия с факторами ГРУППА и ПАРЫ. Для оценки изменений когерентности в каждой из пар отведений использовали метод линейных контрастов. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа уровня моральных оценок. Распределение вознаграждения детьми между игровыми персонажами и соответствующие значения ИМО представлены в табл. 1. Средняя величина ИМО составила 12.8 ± 4.9 баллов (здесь и далее приведены средние значения и стандартное отклонение). У мальчиков средние значения ИМО составляют 11.9 ± 6.1 , у девочек — 13.3 ± 4.2 балла. Значимых различий между мальчиками и девочками по данному показателю выявлено не было ($t = 0.95$, $p = 0.34$). Для установления особенностей когерентности в частотных диапазонах ЭЭГ у детей с разными значениями ИМО вся выборка детей была разделена на две группы в зависимости от того, как они распределили вознаграждение между игровыми персонажами. В группу с низким ИМО (1–12 баллов, среднее значение — 7.8 ± 2.9) были включены 22 ребенка, которые не дали большее вознаграждение “доброму” персонажу или оставили все “печенья” себе. В группу детей с высоким ИМО вошли 30 детей, которые выше оценили “доброе” персонажа (ИМО 13–20 баллов, среднее значение — 16.5 ± 2.0). Средний возраст детей с низким ИМО составил 31.7 ± 6.2 мес., с высоким — 30.4 ± 6.3 мес. Статистически значимых различий в возрасте между детьми исследуемых групп выявлено не было ($t = 0.74$, $p = 0.45$).

Когерентность ритмов ЭЭГ, зарегистрированной во время наблюдения за про- и антисоциальным

действиями по сравнению с исходной ситуацией УЗВ у детей с разным уровнем ИМО анализировали с учетом влияния фактора СИТУАЦИЯ и взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ, ГРУППА, ПАРЫ (табл. 2).

В ситуации наблюдения за просоциальным действием по сравнению с ситуацией УЗВ для когерентности ЭЭГ θ -диапазона статистически значимого влияния исследуемых факторов выявлено не было.

Для когерентности ЭЭГ α -диапазона в ситуации наблюдения за просоциальным действием выявлено статистически значимое влияние фактора СИТУАЦИЯ и взаимодействия СИТУАЦИЯ \times ПАРЫ. У всей выборки детей наблюдался рост когерентности α -активности во время наблюдения за действиями “доброего персонажа” по сравнению с ситуацией УЗВ. Так же выявлено влияние взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ \times ПАРЫ \times ГРУППА на уровне тенденции ($p = 0.07$). Для оценки эффектов изменения когерентности в α -диапазоне в каждой исследуемой паре отведений проведен *post-hoc* анализ методом контрастов для групп детей с низким и высоким ИМО. У детей с высоким ИМО выявлено значимое увеличение когерентности в α -диапазоне для двух пар отведений правого и левого полушария ($F_{p_1-C_3}$; $p = 0.02$; C_4-O_2 ; $p = 0.01$), а у детей с низким ИМО — рост когерентности α -активности в паре $F_{p_2-C_4}$ ($p = 0.01$) правого полушария и снижение — в паре $F_{p_1-C_3}$ ($p = 0.03$) слева (рис. 1, А, Б).

Анализ когерентности ЭЭГ в частотном диапазоне β в ситуации наблюдения за просоциальным действием показал значимое влияние взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ \times ПАРЫ \times ГРУППА. Метод контрастов выявил значимые изменения когерентности ЭЭГ в β -диапазоне только у детей с низким ИМО (рис. 1, В, Г). В данной группе детей выявлено увеличение когерентности β -активности в парах $F_{p_1-F_3}$ ($p = 0.01$) слева и C_4-O_2 ($p = 0.03$) справа, а также снижение когерентности β -активности в парах $F_{p_2-P_4}$ ($p = 0.04$) и F_4-P_4 ($p = 0.01$) правого полушария.

В ситуации наблюдения за антисоциальным действием анализ когерентности ЭЭГ в θ -, α - и β -диапазонах по сравнению с ситуацией УЗВ не выявил значимого влияния исследуемых факторов.

Когерентность ритмов ЭЭГ, в ситуации принятия ребенком решения о распределении вознаграждения по сравнению с исходной ситуацией УЗВ у детей с разным уровнем ИМО анализировали также с учетом влияния фактора СИТУАЦИЯ и взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ, ГРУППА, ПАРЫ (табл. 2).

В частотном диапазоне θ значимого влияния исследуемых факторов на когерентность ЭЭГ выявлено не было.

Таблица 1. Распределение вознаграждения между игровыми персонажами и значения индекса моральных оценок (ИМО)

Дал “доброй” кукле	Дал “злой” кукле	Оставил себе	Баллы	Количество детей, получивших балл
0	5	0	1	2
0	4	1	2	0
0	3	2	3	0
0	2	3	4	1
0	1	4	5	0
1	4	0	6	4
1	3	1	7	0
1	2	3	8	0
2	3	0	9	12
2	2	1	10	0
1	1	3	11	2
0	0	5	12	1
1	0	4	13	0
2	0	3	14	0
3	2	0	15	18
3	1	1	16	0
3	0	2	17	0
4	1	0	18	7
4	0	1	19	0
5	0	0	20	5

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа когерентности ЭЭГ в трех экспериментальных ситуациях с фоновой ситуацией устойчивого зрительного внимания (фактор СИТУАЦИЯ) у детей с разным уровнем индекса моральных оценок (ИМО) (фактор ГРУППА)

Частотный диапазон	СИТУАЦИЯ	СИТУАЦИЯ × × ГРУППА	СИТУАЦИЯ × × ПАРЫ	СИТУАЦИЯ × × ПАРЫ × ГРУППА
“Наблюдение за просоциальным действием” по сравнению с фоном				
θ	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
α	$F_{1,34} = 6.77;$ $p = 0.01$	<i>NS</i>	$F_{17,578} = 1.68;$ $p = 0.04$	$F_{17,578} = 1.53;$ $p = 0.07$
β	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	$F_{17,476} = 2.22;$ $p = 0.003$
“Наблюдение за антисоциальным действием” по сравнению с фоном				
θ, α, β	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
“Принятие решения о распределении вознаграждения” по сравнению с фоном				
θ	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
α	<i>NS</i>	$F_{1,34} = 4.89;$ $p = 0.03$	<i>NS</i>	<i>NS</i>
β	$F_{1,20} = 5.48;$ $p = 0.03$	<i>NS</i>	$F_{17,340} = 1.76;$ $p = 0.03$	<i>NS</i>

Примечание: фактор ПАРЫ – 18 пар ЭЭГ; *NS* – отсутствуют значимый эффект или тенденция.

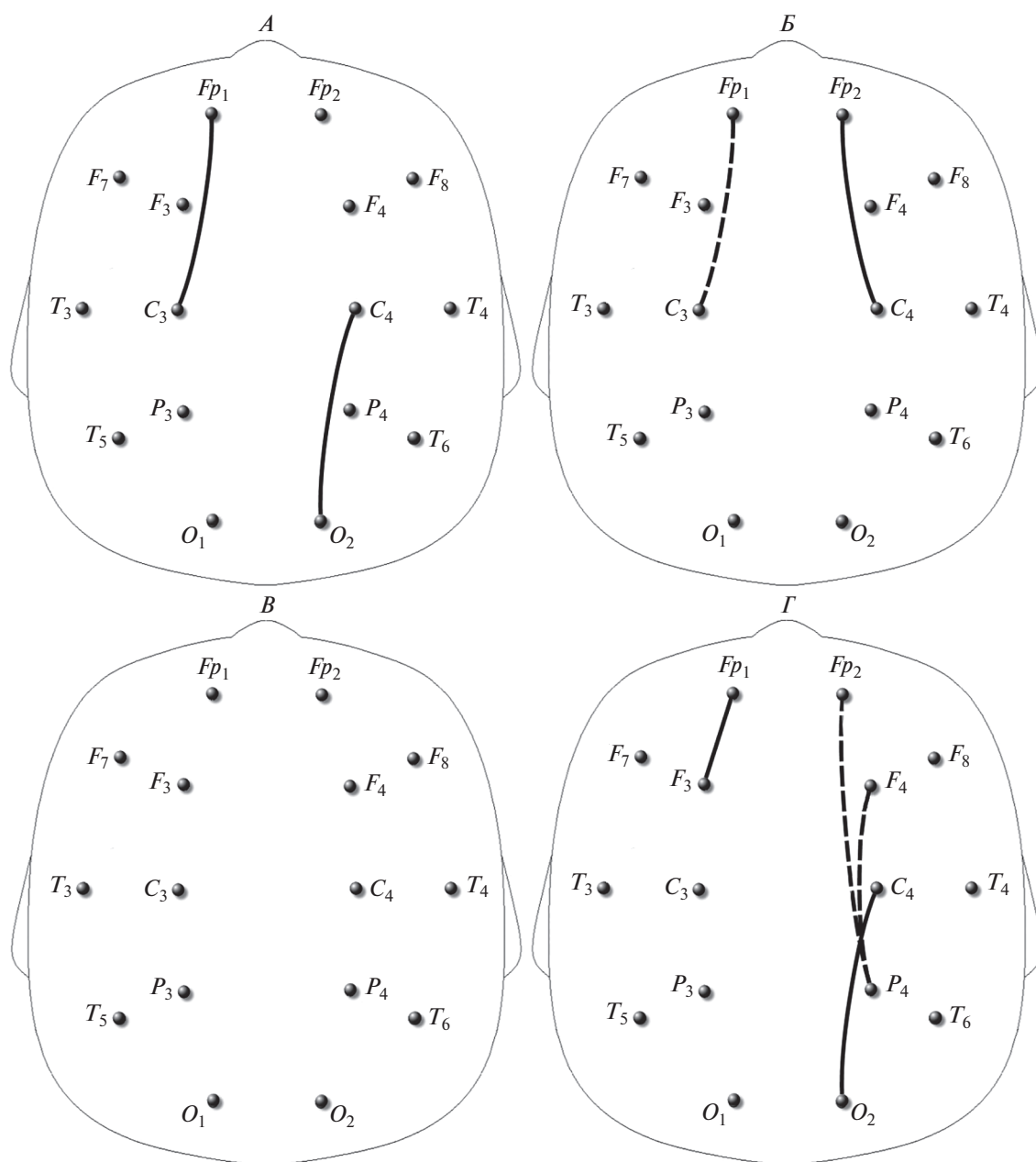


Рис. 1. Карты различий когерентности в α - и β -диапазонах ЭЭГ при сравнении периода наблюдения за просоциальным действием с исходным состоянием.

Сплошная линия соответствует изменениям в сторону повышения показателей когерентности, пунктирная линия – снижению. Карты различий слева (A, B) соответствуют результатам сравнения группы с высокими значениями индекса моральных оценок (ИМО). Карты различий справа (B, Г) – результатам сравнения группы с низкими значениями ИМО. Карты различий вверху (A, B) отражают изменения когерентности в α -диапазоне ЭЭГ, карты различий внизу (B, Г) – в β -диапазоне ЭЭГ. Отражены только те различия показателей когерентности, которые были статистически значимы ($p \leq 0.01$).

При анализе когерентности ЭЭГ в частотном диапазоне α в ситуации принятия ребенком решения о распределении вознаграждения по сравнению с ситуацией УЗВ выявлено статистически значимое влияние взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ \times ГРУППА. У детей с высоким

ИМО обнаружено увеличение когерентности α -диапазона в парах Fp_2-C_4 ($p = 0.05$), F_4-P_4 ($p = 0.02$), F_4-O_2 ($p = 0.01$) правого полушария, а у детей с низким ИМО – снижение в парах F_8-T_4 ($p = 0.01$) и T_4-T_6 ($p = 0.01$) правого полушария (рис. 2, A, B).

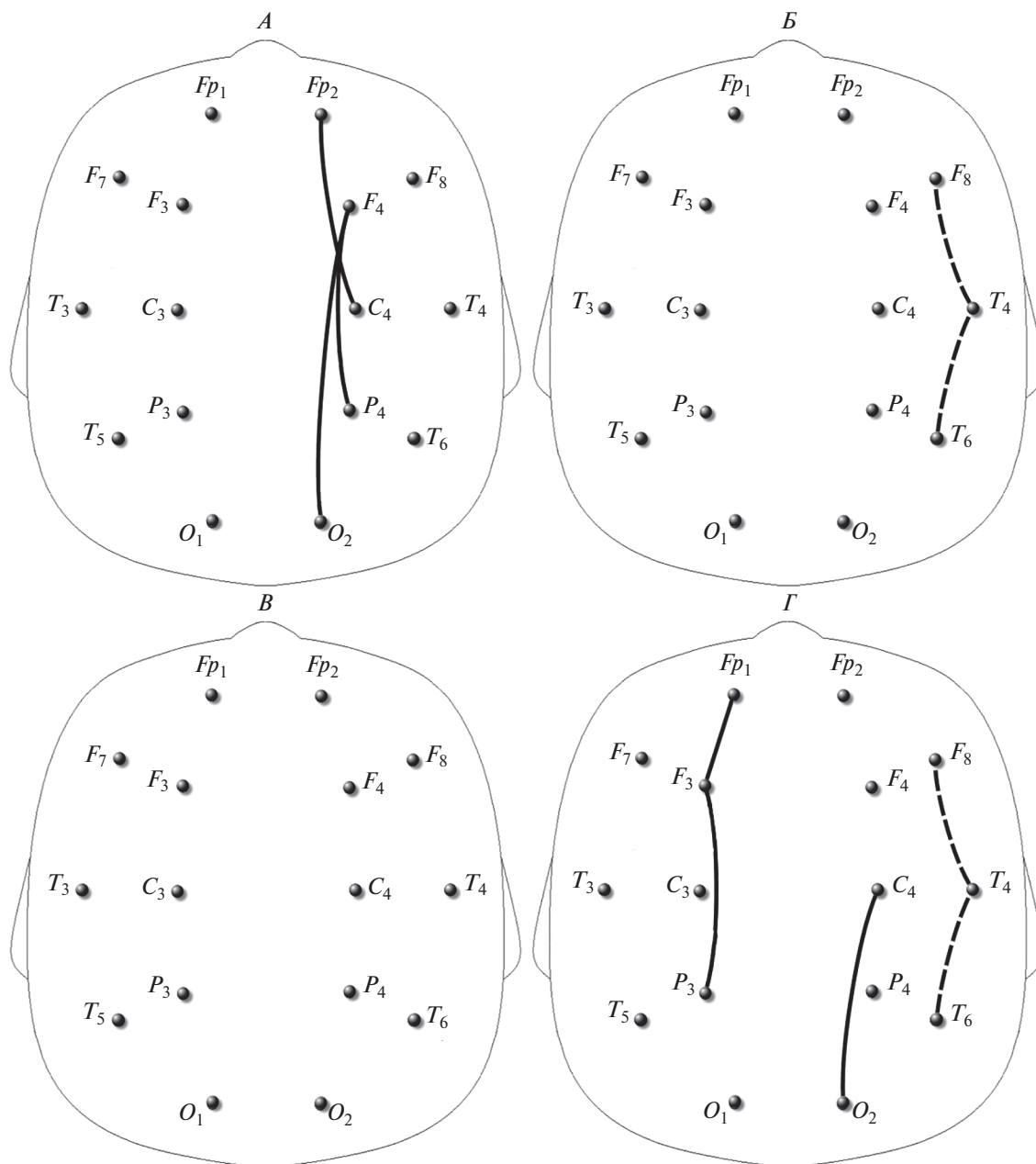


Рис. 2. Карты различий когерентности в α - и β -диапазонах ЭЭГ при сравнении периода распределения вознаграждения детьми между игровыми персонажами с исходным состоянием. Остальные обозначения см. рис. 1.

Анализ когерентности ЭЭГ в частотном диапазоне β в ситуации принятия ребенком решения о распределении вознаграждения выявил значимое влияние фактора СИТУАЦИЯ и взаимодействие факторов СИТУАЦИЯ \times ПАРЫ. Метод контрастов выявил значимые изменения когерентности β -активности только у детей с низким ИМО (рис. 2, B, Г). В данной группе детей в ситуации принятия решения о распределении вознаграждения выявлено увеличение когерентности

β -диапазона ЭЭГ в парах правого и левого полушарий (Fp_1-F_3 ; $p = 0.04$; F_3-P_3 ; $p = 0.03$; C_4-O_2 ; $p = 0.01$), а также снижение когерентности β -активности в парах F_8-T_4 ($p = 0.01$) и T_4-T_6 ($p = 0.01$) правого полушария.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали результаты настоящего исследования большинство (30 из 52) детей, принявших

участие в экспериментах, выше оценили действия “доброе” персонажа, отдав ему больше “печенья”, чем персонажу, продемонстрировавшему антисоциальное поведение. Они оказались способны оценить поступки с точки зрения морали и принять в соответствии с этим определенное решение (группа детей с высоким ИМО). Однако часть детей не смогла оценить действия персонажей с точки зрения принятых в обществе моральных норм (группа с низким ИМО). При наблюдении за про- и антисоциальным действием, принятии решения о распределении вознаграждения у испытуемых наблюдались специфические для каждой из указанных групп изменения когерентности ритмов ЭЭГ, что отражало особенности динамики корково-коркового функционального взаимодействия.

Для понимания полученных нами результатов важное значение имеет концепция так называемых управляющих систем мозга и формирующихся на их основе управляющих функций, которые как отмечают Р.И. Мачинская и А.В. Курганский [15, 25], обеспечивают целесообразное поведение и мыслительную деятельность человека. По мере развития ребенка возрастает роль работающих по принципу “сверху вниз” систем, в которых ключевую роль играет префронтальная кора и ее связи с другими корковыми и подкорковыми структурами [5, 15]. От степени созревания нейронных структур префронтальной коры и фронтно-париетальных связей зависит развитие когнитивных компонентов эмпатии, становление модели психического (*theory of mind*), а также способность контролировать внимание и подавлять нежелательное поведение [30].

Результаты настоящего исследования выявили особенности динамики межрегиональных внутриполушарных связей у детей с различным ИМО. В ситуации наблюдения за действиями “доброе” персонажа, по сравнению с ситуацией УЗВ, у детей наблюдались статистически значимые изменения когерентности ЭЭГ в частотном диапазоне α . У детей с высоким ИМО выявлено значимое увеличение когерентности в двух парах отведений правого и левого полушария. В группе детей с низким ИМО наблюдалось как увеличение, так и снижение когерентности α -активности. При наблюдении за действиями “злой” персонажа статистически значимых изменений когерентности ЭЭГ не выявлено. На основании большей десинхронизации α -ритма у детей второго года жизни при наблюдении за просоциальными действиями [11], было высказано предположение, что именно они, в отличие от антисоциальных актов, привлекают повышенное внимание малышей [31]. Мы полагаем, что этим может быть объяснено отсутствие статистически значимых изменений в показателях когерентности при наблюдении детьми ситуации с антисоциальным поведением персонажа. Вероятно, данный тип поведения яв-

ляется менее доступным для восприятия детей в первые годы жизни в силу его минимальной представленности в опыте ребенка в типичных условиях воспитания и развития. В то же время, наблюдение за помогающим поведением персонажа более вероятно актуализирует следы памяти, связанные с аналогичным поведением со стороны взрослых по отношению к ребенку, тем самым привлекая его интерес и внимание.

Нам не удалось выявить статистически значимых изменений когерентности в частотном диапазоне θ в ситуациях наблюдения за персонажами и при последующем распределении вознаграждения по сравнению с исходной ситуацией. Возможной причиной может быть то, что само состояние УЗВ, при котором регистрировали исходную ЭЭГ, сопровождается у детей раннего возраста синхронизацией осцилляций в диапазоне θ [32], сохраняющейся в последующих экспериментальных ситуациях.

В ситуации принятия ребенком решения о распределении вознаграждения у детей с высоким ИМО обнаружено значимое увеличение когерентности α -активности в парах отведений правого полушария, а у детей с низким ИМО — снижение. Таким образом, при успешном осуществлении ребенком сложной когнитивной эмоционально-опосредованной деятельности, включающейся в припоминание эмоционально-окрашенной информации, вынесении адекватной моральной оценки и принятии решения о соответствующем распределении вознаграждения, происходит повышение когерентности α -активности. Какова функция такого усиления внутриполушарных взаимосвязей на частоте α -ритма?

Очевидно, что принятие решения о распределении вознаграждения требует воспроизведения и интеграции информации о действиях персонажей, содержащейся в памяти ребенка. Моделируя нейрофизиологические механизмы влияния когерентности ритмов ЭЭГ на протекание обработки информации в мозгу *S. Palva* и *J.M. Palva* пришли к выводу, что когерентность колебаний α -диапазона играет центральную роль в координации активности человеческого мозга [21]. Фазовые взаимодействия в этом частотном диапазоне, выявляемые во фронтальных, центральных и париетальных областях, лежат в основе нисходящей модуляции амплитуд локальных колебаний в сенсорных областях, что может поддерживать функции внимания, памяти и принятия решений.

В работе, где изучалась когерентность ЭЭГ в процессе восприятия и запоминания набора вербальных и зрительно-пространственных стимулов [18], было высказано предположение, что у взрослых эффективные взаимосвязи в диапазоне α -ритма участвуют в формировании лобно-теменной сети селективного эндогенного внимания, которая в случае реализации рабочей памяти избирательно поддерживает активное состояние

внутренних репрезентаций. У детей 7–8 лет корково-корковое взаимодействие в диапазоне α -ритма было выражено в значительно меньшей степени, что, по мнению авторов указанной работы, может свидетельствовать об относительной незрелости лобно-теменной системы селективного эндогенного внимания и связанной с этим слабости “управляющего” компонента рабочей памяти у детей этого возраста.

В нашем исследовании у детей с высоким ИМО при принятии решения о распределении вознаграждения между персонажами обнаружено усиление когерентности в частотном диапазоне α между фронтальными, центральными, теменными и затылочными регионами правого полушария. По нашему мнению, в ситуации моральной оценки, по крайней мере, у части детей раннего возраста (группа с высоким ИМО) развивающиеся элементы лобно-теменной системы уже способны участвовать в принятии простейших решений на основании понимания: “что такое хорошо и что такое плохо”. Рост когерентности α -активности у данной группы именно в правом полушарии нуждается в дальнейшем изучении. Можно предположить, что адекватное распределение вознаграждения требует от детей извлечения из памяти эмоционально окрашенной информации разной валентности. Другими исследователями [33] при восприятии испытуемыми изображений лиц, выражающих различные, в том числе, противоположные эмоции, также обнаружено усиление синхронизации α -ритма в распределенных корковых сетях, включающих участки лобной, теменной, височной и затылочной областей, в основном, правого полушария, что расценивается авторами указанной работы как свидетельство в пользу правополушарного доминирования в регуляции эмоционального процессинга.

Анализ когерентности ЭЭГ в β -диапазоне выявил значимые изменения только у детей с низким ИМО. Известно, что динамика мощности β -ритма, прежде всего, связана с процессами реализации движений и сенсомоторной интеграцией, а также со зрительно-моторным вниманием [34]. Установлено, что когерентность данного ритма растет у взрослых испытуемых в условиях, требующих тонкого зрительного контроля [35, 36]. Учитывая данные этих и других исследований, мы предполагаем, что у детей с низким ИМО при наблюдении за сценками, принятии решения и распределении вознаграждения внимание было направлено, прежде всего, на восприятие моторных компонентов действий и контроль собственных движений. Такая направленность внимания не позволила им адекватно оценить характер просоциальных и антисоциальных действий с точки зрения морали. У взрослых испытуемых повышенная активность в β -диапазоне ЭЭГ проявляется также при переживании эмоций разной валентности [37] и, особенно, негативных [38], пси-

хосоциальном стрессе [39], а также в состоянии относительного покоя у лиц с высокой тревожностью [40]. Поскольку экспериментальная задача предполагала вовлечение эмоциональных процессов, нельзя исключить, что разнонаправленные изменения когерентности в β -диапазоне у детей с низким ИМО при наблюдении за действиями кукольных персонажей и в ситуации распределения вознаграждения могли быть связаны с переживанием состояния тревоги, которую они менее способны контролировать, чем дети с высоким ИМО. Состояние тревоги и спектр эмоций, который ему сопутствует, могли затруднять принятие адекватных решений детьми с низким ИМО.

ВЫВОДЫ

1. Ситуация наблюдения за просоциальным поведением сопровождается усилением внутриполушарных взаимосвязей в α -диапазоне ЭЭГ у детей с высоким уровнем сформированности моральных оценок (группа с высоким ИМО). В группе детей с низким ИМО наблюдались разнонаправленные изменения когерентности α -активности. Ситуация наблюдения за антисоциальным поведением не вызывает значимых изменений когерентности ЭЭГ. Предположительно рост когерентности в α -диапазоне может характеризовать большую степень внимания к просоциальным действиям у детей раннего возраста, особенно в группе с высоким ИМО.

2. Ситуация принятия решения о распределении вознаграждения между персонажами, ранее продемонстрировавшими про- или антисоциальное поведение, сопровождалась ростом когерентности в α -диапазоне между лобными, центральными, теменными и затылочными регионами правого полушария в группе детей с высоким ИМО. У детей с низким уровнем ИМО когерентность α -активности, наоборот, снижалась. Тем самым, одним из маркеров готовности детей раннего возраста к осуществлению моральной оценки чужого поведения может являться сопровождающий данную ситуацию рост когерентности ЭЭГ α -активности в правом полушарии.

3. Особенностью детей раннего возраста с низким уровнем сформированности моральных оценок были значимые модуляции когерентности ЭЭГ в β -диапазоне. Можно полагать, что данный факт может указывать на преобладание у детей с низким ИМО менее интегративных, по сравнению с детьми с высоким уровнем данного показателя, процессов когнитивной обработки социально значимых стимулов, с преобладанием внимания к моторным компонентам действий или с переживанием эмоций, которые они хуже контролируют, чем дети с высоким ИМО.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицин-

ской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным комитетом по биоэтике Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (Симферополь). Протокол заседания комитета № 12 от 14 июня 2016 г.

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

Финансирование работы. Работа выполнена за счет РНФ (грант № 22-28-00720, <https://rscf.ru/project/22-28-00720/>) с использованием оборудования ЦКП научным оборудованием “Экспериментальная физиология и биофизика” и НКЦ “Технологии здоровья и реабилитации”.

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

Вклад авторов в публикацию. Л.С. Орехова – набор и обработка данных, написание статьи. А.М. Куличенко – обработка данных, написание статьи. С.А. Махин – обработка данных, написание статьи. А.А. Михайлова – набор и обработка данных, написание статьи. В.Б. Павленко – планирование исследования, написание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Turiel E.* Moral development. In *Handbook of Child Psychology and Developmental Science*. NY.: John Wiley & Sons, 2015. P. 484.
2. *Dahl A., Killen M.* Moral reasoning enables developmental and societal change // *Perspect. Psychol. Sci.* 2021. V. 16. № 6. P. 1209.
3. *Warneken F., Tomasello M.* The roots of human altruism // *Br. J. Psychol.* 2009. V. 100. P. 455.
4. *Malle B.F.* Moral Judgments // *Annu. Rev. Psychol.* 2021. V. 72. № 1. P. 293.
5. *Decety J., Steinbeis N., Cowell J.M.* The neurodevelopment of social preferences in early childhood // *Curr. Opin. Neurobiol.* 2021. V. 68. P. 23.
6. *Ting F., Buyukoyer D.M., Stavans M., Baillargeon R.* Principles and concepts in early moral cognition / *The Social Brain: A Developmental Perspective*. Cambridge: MIT Press, 2020. P. 41.
7. *Tan E., Mikami A.Y., Hamlin J.K.* Do infant sociomoral evaluation and action studies predict preschool social and behavioral adjustment? // *J. Exp. Child Psychol.* 2018. V. 176. P. 39.
8. *Kenward B., Dahl M.* Preschoolers distribute scarce resources according to the moral valence of recipients' previous actions // *Dev. Psychol.* 2011. V. 47. № 4. P. 1054.
9. *Li J., Hou W., Zhu L., Tomasello M.* The development of intent-based moral judgment and moral behavior in the context of indirect reciprocity: A cross-cultural study // *Int. J. Behav. Dev.* 2020. V. 44. № 6. P. 525.
10. *Paulus M., Kühn-Popp N., Licata M. et al.* Neural correlates of prosocial behavior in infancy: different neurophysiological mechanisms support the emergence of helping and comforting // *Neuroimage*. 2013. V. 66. P. 522.
11. *Cowell J.M., Decety J.* Precursors to morality in development as a complex interplay between neural, socio-environmental, and behavioral facets // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2015. V. 112. № 41. P. 12657.
12. *Orekhova L.S., Makhin S.A., Mikhailova A.A., Pavlenko V.B.* EEG Patterns in Early Childhood Differ Between Children Prone To Reward “Bad” or “Good” Actors // *Psychol. Russ.* 2020. V. 13. № 2. P. 84.
13. *Михайлова А.А., Орехова Л.С., Махин С.А., Павленко В.Б.* Реактивность сенсомоторных ритмов ЭЭГ при наблюдении за про- и антисоциальными действиями у детей в раннем возрасте // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2022. Т. 72. № 2. С. 217.
14. *Perone S., Palanisamy J., Carlson S.M.* Age-related change in brain rhythms from early to middle childhood: Links to executive function // *Dev. Sci.* 2018. V. 21. № 6. P. e12691.
15. *Курганский А.В.* Оценка управляющих функций у детей 3–6 лет: состояние, проблемы и перспективы // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2021. Т. 71. № 4. С. 468.
Kurgansky A.V. Assessment of executive functions in children 3–6 years old: current state, problems and future directions // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2021. V. 71. № 4. P. 468.
16. *Schneider M., Broggin A.C., Dann B. et al.* A mechanism for inter-areal coherence through communication based on connectivity and oscillatory power // *Neuron*. 2021. V. 109. № 24. P. 4050.
17. *Bowyer S.M.* Coherence a measure of the brain networks: past and present // *Neuropsychiatr. Electrophysiol.* 2016. V. 2. P. e1.
18. *Мачинская Р.И., Курганский А.В.* Сравнительное электрофизиологическое исследование регуляторных компонентов рабочей памяти у взрослых и детей 7–8 лет. Анализ когерентности ритмов ЭЭГ // *Физиология человека*. 2012. Т. 38. № 1. С. 5.
Machinskaya R.I., Kurgansky A.V. [A comparative electrophysiological study of regulatory components of working memory in adults and children of 7–8 years old. An analysis of coherence of EEG rhythms] // *Fiziologiya Cheloveka*. 2012. V. 38. № 1. P. 5.
19. *Мачинская Р.И., Курганский А.В., Ломакин Д.И.* Возрастные изменения функциональной организации корковых звеньев регуляторных систем мозга у подростков. Анализ нейронных сетей покоя в пространстве источников ЭЭГ // *Физиология человека*. 2019. Т. 45. № 5. С. 5.
Machinskaya R.I., Kurgansky A.V., Lomakin D.I. Age-related trends in functional organization of cortical parts of regulatory brain systems in adolescents: an analysis of resting-state networks in the EEG source space // *Human Physiology*. 2019. V. 45. № 5. P. 461.
20. *Лушекина Е.А., Лушекин В.С., Стрелец В.Б.* Исследование когерентности ЭЭГ у детей с расстройствами аутистического спектра: неоднородность группы // *Физиология человека*. 2021. Т. 47. № 5. С. 17.
Lushchekina E.A., Lushchekin V.S., Strelets V.B. EEG Spectral Power in Children with Autistic Spectrum Disorders: Heterogeneity of the Group // *Human Physiology*. 2019. V. 45. № 3. P. 242.

21. *Palva S., Palva J.M.* Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks // *Front. Psychol.* 2011. V. 2. P. e204.
22. *Chapeton J.I., Haque R., Wittig J.H. et al.* Large-Scale Communication in the Human Brain Is Rhythmically Modulated through Alpha Coherence // *Curr. Biol.* 2019. V. 29. № 17. P. 2801.
23. *Sato J., Mossad S.I., Wong S.M. et al.* Alpha keeps it together: Alpha oscillatory synchrony underlies working memory maintenance in young children // *Dev. Cogn. Neurosci.* 2018. V. 34. P. 114.
24. *Varga N.L., Manns J.R.* Delta-modulated cortical alpha oscillations support new knowledge generation through memory integration // *Neuroimage.* 2021. V. 244. P. e118600.
25. *Мачинская Р.И.* Управляющие системы мозга // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2015. Т. 65. № 1. С. 33.
Machinskaya R.I. The Brain Executive Systems // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2015. V. 65. № 1. P. 33.
26. *Bazanov O.M., Vernon D.* Interpreting EEG alpha activity // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. V. 44. P. 94.
27. *Stroganova T.A., Orekhova E.V., Posikera I.N.* EEG alpha rhythm in infants // *Clin. Neurophysiol.* 1999. V. 110. № 6. P. 997.
28. *Михайлова А.А., Орехова Л.С., Дягилева Ю.О. и др.* Реактивность мю-ритма ЭЭГ при наблюдении и выполнении действий у детей раннего возраста, имеющих разный уровень развития рецептивной речи // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2020. Т. 70. № 3. С. 422.
Mikhailova A.A., Orekhova L.S., Dyagileva Yu.O. et al. EEG mu rhythm reactivity in children at an early age with different level of receptive speech development under conditions of action observation and execution // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2020. V. 70. № 3. P. 422.
29. *Marshall P.J., Bar-Haim Y., Fox N.A.* Development of the EEG from 5 months to 4 years of age // *Clin. Neurophysiol.* 2002. V. 113. № 8. P. 1199.
30. *Decety J., Holvoet C.* The emergence of empathy: A developmental neuroscience perspective // *Dev. Rev.* 2021. V. 62. P. e100999.
31. *Cowell J.M., Calma-Birling D., Decety J.* Domain-general neural computations underlying prosociality during infancy and early childhood // *Curr. Opin. Psychol.* 2018. V. 20. P. 66.
32. *Orekhova E.V., Stroganova T.A., Posikera I.N., Elam M.* EEG theta rhythm in infants and preschool children // *Clin. Neurophysiol.* 2006. V. 117. № 5. P. 1047.
33. *Wyczesany M., Capotosto P., Zappasodi F., Prete G.* Hemispheric asymmetries and emotions: Evidence from effective connectivity // *Neuropsychologia.* 2018. V. 121. P. 98.
34. *Kilavik B.E., Zaepffel M., Brovelli A. et al.* The ups and downs of β oscillations in sensorimotor cortex // *Exp. Neurol.* 2013. V. 245. P. 15.
35. *Chung J.W., Ofori E., Misra G. et al.* Beta-band activity and connectivity in sensorimotor and parietal cortex are important for accurate motor performance // *Neuroimage.* 2017. V. 144. P. 164.
36. *Aprigio D., Tanaka G.K., Bittencourt J. et al.* Dopaminergic drugs alter beta coherence during motor imagery and motor execution in healthy adults // *Arq. Neuropsiquiatr.* 2020. V. 78. № 4. P. 199.
37. *Woodruff C.C., Barbera D., Von Oepen R.* Task-related dissociation of EEG β enhancement and suppression // *Int. J. Psychophysiology.* 2016. V. 99. P. 18.
38. *Güntekin B., Tülay E.* Event related beta and gamma oscillatory responses during perception of affective pictures // *Brain Res.* 2014. V. 1577. P. 45.
39. *Palacios-García I., Silva J., Villena-González M. et al.* Increase in beta power reflects attentional top-down modulation after psychosocial stress induction // *Front. Hum. Neurosci.* 2021. V. 15. P. e630813.
40. *Pavlenko V.B., Chernyi S.V., Goubkina D.G.* EEG Correlates of anxiety and emotional stability in adult healthy subjects // *Neurophysiology.* 2009. V. 41. № 5. P. 337.

Coherence Dynamics in the EEG Rhythms during the Observation of Pro- and Antisocial Behavior in Children at an Early Age

L. S. Orekhova^a, A. M. Kulichenko^a, S. A. Makhin^a, A. A. Mikhailova^a, V. B. Pavlenko^a, *

^a*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

**E-mail: vpav55@gmail.com*

In children aged 17–43 months (mean age 31 months), who differently evaluated pro- and antisocial actions performed by puppet characters (groups with high and low indices of moral evaluation – IME), there have been revealed the group-specific changes in the coherence of EEG activity in each group. In high IME children, the observation of a prosocial action facilitated intrahemispheric interactions in the α -frequency range. In the low IME group, changes in α -rhythm coherence were multidirectional. In the high IME group, the situation of decision making on how to distribute the reward between the two characters who demonstrated either pro- or antisocial behavior evoked an increase in α -activity coherence between the frontal, central, parietal and occipital regions in the right hemisphere. In the low IME children, on the contrary, it decreased. No significant modulations of the EEG coherence in θ -frequency range have been revealed. For β -activity, significant modulations were found only in children with low IME. The obtained findings are discussed in the context of the functionality of the brain control systems and the role of intrahemispheric cortical interconnections in moral behavior organization.

Keywords: early childhood, moral evaluation, EEG coherence.