

На правах рукописи



Кайда Анна Ивановна

**СЕНСОМОТОРНЫЕ РИТМЫ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ У
ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ: ОСОБЕННОСТИ РЕАКТИВНОСТИ И СВЯЗИ
С ПСИХОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность 03.03.01 Физиология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
биологических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в Таврической академии (структурное подразделение) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского».

Научный руководитель:

Кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных и биофизики факультета биологии и химии Таврической академии ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» Эйсмонт Евгения Владимировна

Официальные оппоненты:

Базанова Ольга Михайловна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник отдела клинической нейронауки, поведения и нейротехнологий ФГБНУ «Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины»

Курганский Андрей Васильевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии когнитивной деятельности ФГНУ «Институт возрастной физиологии» РАО

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Институт биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства, кафедра физиологии человека и животных.

Защита состоится 27 января 2021 года в 15.30 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.044.02 при Институте Высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН по адресу: 117485, Москва, ул. Бутлерова 5А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт Высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН», а также на сайте ИВНД: <https://ihna.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.б.н. Иерусалимский В.Н.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Электрические осцилляции, зарегистрированные в состоянии физического покоя над центральными регионами коры вблизи роландовой борозды, называют роландическими, или сенсомоторными ритмами (СМР) электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Первоначально был описан арковидный, или мю-ритм. В дальнейшем стало очевидным, что характерная арковидная форма этого ритма представляет собой результат наложения по крайней мере двух частотных компонентов со спектральными пиками в полосе альфа- (8–13 Гц) и бета-ритмов (14–30 Гц) (Кропотов, 2010). Как мю-, так и бета-ритм модулируется при выполнении движений, а также при обработке различного рода сенсомоторной информации (Pfurtscheller, Neuper, 1997; Лебедева и соавт., 2018; Filgueiras et al., 2018). В отношении мю-ритма было установлено, что на него может частично накладываться относительно мощный затылочный альфа-ритм, который модулируется зрительным вниманием. В связи с чем рекомендуется расчет индивидуального частотного диапазона мю-ритма проводить в соответствии с его главным функциональным свойством – десинхронизацией (т.е. снижением амплитуды) в ответ на совершение самостоятельного движения (Hobson, Bishop, 2016; Hobson, Bishop, 2017).

В последние годы особенности реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ привлекают внимание многих исследователей. Стимулом к этому стало появление гипотезы, согласно которой изменения мощности сенсомоторных ритмов при наблюдении за действиями других людей отражают динамику активности тех участков неокортекса, которые предположительно являются частью общей системы зеркальных нейронов (Pineda, 2005). Зеркальные нейроны – это клетки центральной нервной системы (ЦНС), активность которых возрастает как при выполнении человеком конкретных действий, так и при зрительном и слуховом восприятии аналогичных действий, выполняемых другим человеком. Исследование ЗСМ и реактивности мю-ритма вызывают особый интерес в свете разработки новых методов реабилитации пациентов с различными двигательными нарушениями с помощью интерфейсов мозг-компьютер (Фролов, Бобров, 2017).

В настоящей работе представлено комплексное исследование паттернов реактивности индивидуально определенного мю-ритма и бета-ритма в центральных, лобных и теменных отведениях ЭЭГ у детей дошкольного, школьного и подросткового возраста в условиях реализации самостоятельных движений с помощью компьютерной мыши, синхронной имитации, зрительно-слуховом и слуховом восприятии аналогичных движений, выполняемых другим человеком, а также связей реактивности сенсомоторных ритмов с уровнем когнитивного развития и состоянием эмоциональной сферы детей.

Цель и задачи исследования

Цель исследования: выявить особенности реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ у детей разного возраста и проанализировать связи реактивности с психологическими характеристиками.

Задачи исследования:

1. Исследовать амплитудно-частотные характеристики сенсомоторных ритмов ЭЭГ у детей 4-15 лет в состоянии двигательного покоя.

2. Исследовать особенности реактивности сенсомоторных ритмов у детей 4-6, 7-9, 10-12 и 13-15 лет в различных экспериментальных ситуациях: при выполнении, наблюдении и слуховом восприятии движений, а также при имитации движений биологического и небιологического объектов.

3. Выявить связи между реактивностью сенсомоторных ритмов и уровнем развития когнитивных функций и состоянием эмоциональной сферы у детей.

Научная новизна полученных результатов. Впервые выявлены особенности реактивности сенсомоторных мю- и бета-ритмов ЭЭГ у детей разного возраста в различных экспериментальных ситуациях. Впервые проведено исследование особенностей реактивности сенсомоторного мю-ритма ЭЭГ в индивидуально определенном частотном диапазоне у детей разного возраста (Патент РФ № 2702728 от 9 октября 2019 г.). Получены новые данные, касающиеся особенностей реактивности сенсомоторных ритмов у детей при имитации биологического и небιологического движений. Впервые исследованы особенности реактивности СМР ЭЭГ у детей с разным уровнем интеллектуального развития и различным индивидуальным частотным диапазоном мю-ритма. Выявлены связи между индексами реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ и показателями произвольного внимания и состояния эмоциональной сферы детей.

Теоретическая и научно-практическая значимость работы. Результаты работы позволят расширить имеющиеся в настоящее время знания об особенностях реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ и их частотных диапазонах в детском возрасте. Выявленные особенности реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ будут иметь высокую научно-практическую значимость, поскольку предполагается, что реактивность СМР лежит в основе нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих процессы обучения, а также отражает активацию отделов головного мозга, связанных с функционированием зеркальных нейронов (Arnstein et al., 2011; Moreno et al., 2013). Результаты исследования реактивности мю-ритма ЭЭГ у детей в условиях имитации биологического и небιологического движений указывают на целесообразность учета возрастных особенностей реактивности мю-ритма и характера предъявляемых зрительных стимулов при разработке программного

обеспечения интерфейсов мозг-компьютер, предназначенных для реабилитации пациентов с нарушениями двигательных функций. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы при разработке протоколов тренингов ЭЭГ-БОС с учетом индивидуальных частотных диапазонов ритмов ЭЭГ, например, с помощью способа, разработанного и примененного в настоящем исследовании.

Положения, выносимые на защиту

1. Реакция десинхронизации сенсомоторных ритмов при выполнении, наблюдении и слуховом восприятии движений у детей 4-15 лет усиливается по мере взросления и усвоения определенных двигательных навыков.

2. Имитация движений небиологических объектов у детей 4-15 лет сопровождается синхронизацией сенсомоторных ритмов, а имитация движений биологических объектов – десинхронизацией.

3. У детей 4-15 лет с высоким уровнем интеллектуального развития степень десинхронизации мю-ритма зависит от индивидуальной частоты данного ритма и основного канала восприятия информации.

4. Бóльшей десинхронизации сенсомоторных ритмов у детей 4-15 лет соответствуют более высокие показатели внимания, более низкие значения по шкалам «Враждебность», «Депрессивность» и «Недоверие к себе», определяемые с помощью проективной методики «Дом-Дерево-Человек», а также более высокие значения тревожности.

Апробация результатов исследования. Материалы были доложены на следующих конференциях: II Междисциплинарная научно-практическая конференция молодых ученых «Академик Вернадский», Симферополь, 26 октября 2016; III научная-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского», Симферополь, 1-3 ноября 2017; XXIII съезда Физиологического общества имени И.П. Павлова, Воронеж, 18-22 сентября 2017; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018», Москва, 9-13 апреля 2018; XIV Международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии», Судак, июнь 2018; IV научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского», Симферополь, 12-17 октября 2018; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», Москва, 8-12 апреля 2019; V научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского», Симферополь, 30 октября – 1 ноября 2019.

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 5 статей – в журналах, индексируемых базами данных SCOPUS и Web of Science, а также патент на изобретение и авторское свидетельство.

Личный вклад автора. Автор работы принимала непосредственное участие в организации исследования. Самостоятельно выполнила экспериментальную часть исследования и обработку данных, а также с большой долей самостоятельности провела анализ и обсуждение полученных результатов. Диссертационная работа написана полностью самостоятельно. Автор активно участвовала в подготовке научных публикаций и докладов на конференции.

Структура работы. Диссертационная работа изложена на 154 страницах машинописного текста и состоит из следующих частей: введение, обзор литературы, методы исследования, результаты и их обсуждение (4 главы), заключение, выводы, список литературы (290 источников, 258 из которых на английском языке). Материал проиллюстрирован 40 рисунками и 4 таблицами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 173 ребенка в возрасте от 4 до 15 лет, из которых 148 – дети-правши с нормальным уровнем физического и умственного развития, 10 – дети-левши с нормальным уровнем физического и умственного развития и 15 – дети-правши с задержками психоречевого развития. Нормальный уровень умственного развития подразумевал наличие не менее 80 баллов по тесту Векслера в вариантах WPPSI и WISC.

Нормально развивающиеся дети-правши были разделены на четыре возрастные группы: 4-6 лет (41 человек: 21 мальчик и 20 девочек), 7-9 лет (47 человек: 32 мальчика и 15 девочек), 10-12 лет (30 человек: 13 мальчиков и 17 девочек), 13-15 лет (30 человек: 9 мальчиков и 21 девочка).

Данное исследование одобрено этическим комитетом ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», протокол № 4, от 26.03.2020 г.

В исследовании применялись следующие методики:

Регистрация электроэнцефалограммы. Запись ЭЭГ осуществлялась по общепринятой методике с использованием электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр – 3» в рамках серии заданий, длительностью по 30 с: при выполнении движений компьютерной мышью по кругу (Дв.1, Дв.2, Дв.3), наблюдении аналогичных движений (НАБЛ), имитации движений (имитация небιологического движения, ИмНБ; имитация биологического движения, ИмБ) и слуховом восприятии, при закрытых глазах, связанных с данными

движениями звуков (СЛУХ). Для обработки данных использовалась компьютерная программа «WinEEG». Для коррекции артефактов использовался метод независимых компонент. ЭЭГ анализировали во фронтальных (F3, Fz, F4), центральных (C3, Cz, C4) и париетальных (P3, Pz, P4) локусах. Определяли средние значения амплитуд ЭЭГ в диапазоне бета- (15-25 Гц) и индивидуального мю-ритмов (на способ определения индивидуального частотного диапазона мю-ритма получен патент РФ № 2702728 от 9 октября 2019 г.). С целью нормализации распределения значения амплитуд подвергались log-трансформации (Smulders et al., 2018). Также рассчитывали индексы реактивности (ИР) в соответствии с формулой $[k = \ln (B/A)]$, где k – индекс реактивности сенсомоторных ритмов, B – амплитуда сенсомоторных ритмов в основной ситуации, A – амплитуда сенсомоторных ритмов в исходной ситуации (фон) (Raymaekers et al., 2009). Положительные значения ИР соответствовали реакции синхронизации сенсомоторных ритмов, а отрицательные – десинхронизации. При расчете ИР СМР для ситуаций Дв.1, Дв.2, Дв.3 и НАБЛ исходным условием сравнения служила предшествующая каждой из них ситуация фиксации взгляда на изображении компьютерной мыши (фон 1, фон 2, фон 3, фон 4, соответственно). Для ситуаций ИмНБ и ИмБ таким условием являлись ситуации Дв.1. и Дв.2, а для ситуации СЛУХ – условие закрытых глаз (ГЗ).

Известно, что степень десинхронизации мю-ритма может быть неверно оценена из-за частичного наложения на него альфа-ритма, находящегося в близком частотном диапазоне (Hobson, Bishop, 2017). В связи с этим, у детей необходимо проводить анализ изменений амплитуды альфа-ритма в затылочных локусах в индивидуальном частотном диапазоне (Базанова, Афтанас, 2006). Расчет индивидуального частотного диапазон альфа-ритма производился в соответствии с уровнем десинхронизации амплитуды спектра в затылочных отведениях (O1 и O2) в диапазоне 6-14 Гц в ответ на пробу открывания глаз.

Определение уровня когнитивного развития. Для оценки уровня интеллектуального развития детей 4-5 лет использовали тест Векслера (WPPSI), для детей 6-15 лет – тест Векслера (WISC) (Ильина, 2006). Для определения показателей внимания у детей 7-15 лет применяли корректурную пробу Бурдона–Анфимова (Рогов, 1995; Умрюхин и соавт., 2005). Методика «Таблицы Шульте» использовалась для определения устойчивости внимания и динамики работоспособности испытуемых 7-15 лет. Внимание также оценивалось с использованием go/no-go-теста.

Оценка состояния эмоциональной сферы. Эмоциональное состояние детей оценивали с помощью шкалы явной тревожности для детей,

адаптированной А.М. Прихожан, шкалы личностной тревожности Прихожан, методики Спилбергера и методики «Дом – Дерево – Человек» (ДДЧ).

Статистическая обработка полученных данных. Данные электрофизиологического исследования и показатели психологических тестов количественно обрабатывались с использованием пакета STATISTICA 12.0. В зависимости от вида распределения применяли параметрические (дисперсионный анализ ANOVA с повторными измерениями) и непараметрические критерии (коэффициент ранговой корреляции Спирмена и критерий Краскела-Уоллиса). При расчете корреляций проводилась коррекция на множественные измерения с помощью поправки Бонферрони на количество локусов ЭЭГ. Для описания распределений, отличных от нормального, применяли медиану и интерквартильный размах. В случаях нормального распределения данных использовали среднее и стандартную ошибку среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате исследования частотных показателей мю-ритма установлено, что значения медианы нижней границы индивидуального диапазона мю-ритма составили 9 Гц (квартили 8,5; 10), а значения медианы верхней границы – 11 Гц (квартили 10,5; 12). Различия по данному показателю между возрастными группами не достигали уровня статистической значимости.

Выявлено снижение амплитуды сенсомоторных ритмов с возрастом. Значимо более низкие показатели амплитуды мю- и бета-ритмов были обнаружены в группе детей 13-15 лет относительно детей других возрастных групп (мю-ритм: F3, Fz, F4, C3, Cz, C4: $p < 0,001$, Pz: $p = 0,02$; бета-ритм: F3, Fz, F4, C4, P3, P4: $p \leq 0,001$; C3, Cz, Pz: $p < 0,01$).

Были исследованы особенности реактивности сенсомоторных ритмов в различных экспериментальных ситуациях. Анализ изменений амплитуды мю-ритма в ситуации выполнения самостоятельных движений показал значимое влияние факторов ситуация (СИТ: основная ситуация по отношению к фоновой), возрастная группа (ВОЗР) и локус ЭЭГ (ЛОК: 9 отведений) ($p < 0,001$). Для оценки значимости эффектов угнетения мю-ритма в каждом из девяти локусов ЭЭГ рассчитывались априорные контрасты на основе F-статистики. Статистически значимая десинхронизация мю-ритма зарегистрирована в большинстве исследуемых областей у детей всех возрастных групп (рис. 1).

Анализ изменений амплитуды альфа-ритма в затылочных локусах в данной ситуации показал значимое влияние факторов СИТ, ВОЗР и ЛОК ($p < 0,001$). Значимая десинхронизация альфа-ритма ЭЭГ была зарегистрирована у детей 4-6 лет (O1 и O2: $p < 0,01$), 10-12 лет (O1: $p < 0,001$; O2: $p = 0,01$) и подростков 13-15 лет (O1 и O2: $p < 0,001$).

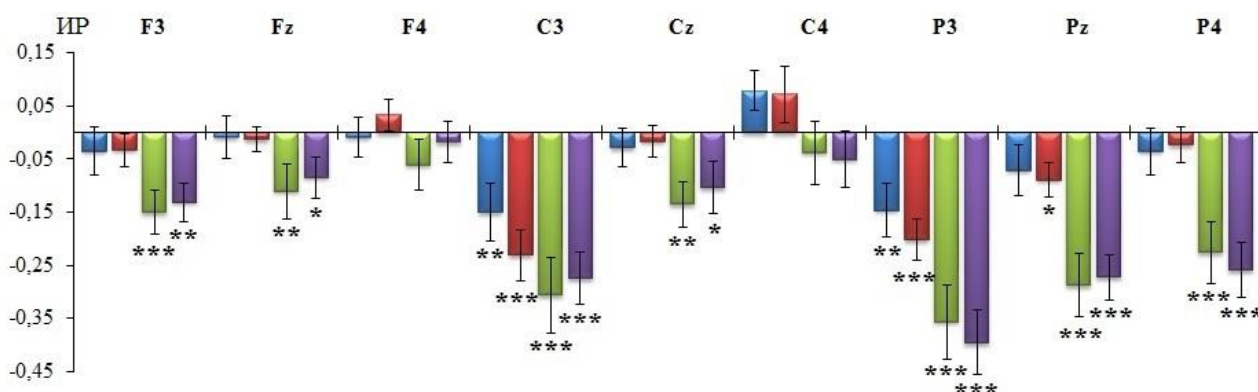


Рис. 1. Индексы реактивности (ИР) мю-ритма ЭЭГ в группах детей 4-6 лет (синие столбцы), 7-9 лет (красные столбцы), 10-12 лет (зеленые столбцы) и 13-15 лет (фиолетовые столбцы) при выполнении самостоятельных движений, относительно условия зрительной фиксации на изображении неподвижной компьютерной мыши. Статистически значимые модуляции в амплитуде мю-ритма обозначены символом «*»: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Анализ различий в амплитуде сенсомоторного бета-ритма при выполнении движений показал значимое влияние взаимодействия факторов СИТ×ЛОК и ЛОК×ВОЗР ($p < 0,001$). Значимый рост амплитуды бета-ритма ЭЭГ наблюдался у детей 4-6 лет и 7-9 лет (F4: $p < 0,01$). Также у детей 7-9 лет выявлена десинхронизация в отведении С3 ($p < 0,05$). Значимое снижение амплитуды бета-ритма наблюдалось в группах детей 10-12 лет (С3: $p < 0,01$; Р3: $p < 0,05$) и 13-15 лет (С3, Сz, Р3: $p < 0,01$; С4, Рz: $p < 0,05$).

В ситуации наблюдения движений анализ различий в амплитуде мю-ритма показал значимое влияние факторов СИТ, ВОЗР и ЛОК ($p < 0,001$). Значимая десинхронизация мю-ритма зарегистрирована преимущественно в теменных областях у детей всех возрастных групп (рис. 2).

Анализ изменений амплитуды индивидуального альфа-ритма в локусах О1 и О2 в данной ситуации показал значимое влияние факторов СИТ, ВОЗР ($p < 0,001$) и ЛОК ($p = 0,002$). У всех групп детей зарегистрирована значимая десинхронизация альфа-ритма ($p < 0,001$).

На различия в амплитуде бета-ритма при наблюдении значимо влияли факторы СИТ ($p = 0,01$), ВОЗР и ЛОК ($p < 0,001$). Выявлена синхронизация бета-ритма ЭЭГ в локусах F3 ($p < 0,01$) и F4 ($p = 0,02$) в группе детей 4-6 лет. Изменения амплитуды исследуемого ритма не достигали уровня статистической значимости в группе детей 7-9 лет. Также обнаружена значимая десинхронизация бета-ритма у детей 10-12 лет (С3, Р3 и Рz: $p < 0,05$) и 13-15 лет (Fz, F4, Сz, С4: $p < 0,05$; С3, Р3, Рz, Р4: $p = 0,001$).

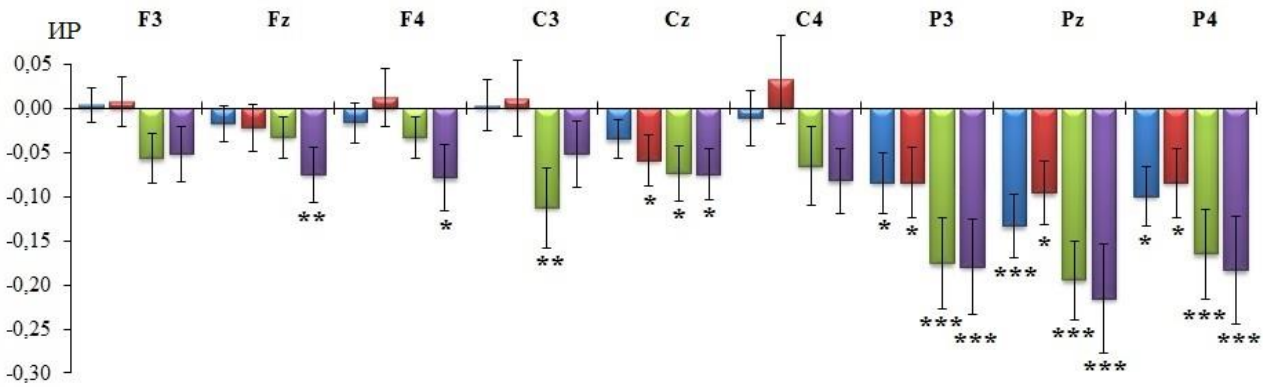


Рис. 2. Индексы реактивности (ИР) мю-ритма ЭЭГ в группах детей 4-6 лет (синие столбцы), 7-9 лет (красные столбцы), 10-12 лет (зеленые столбцы) и 13-15 лет (фиолетовые столбцы) при наблюдении движений, относительно условия зрительной фиксации на изображении неподвижной компьютерной мыши. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

В ситуации слухового восприятия движений, значимо влияли на изменения амплитуды мю-ритма только факторы СИТ ($p < 0,01$) и ЛОК ($p < 0,001$). Значимая десинхронизация мю-ритма зарегистрирована преимущественно во фронтальных локусах у детей 4-6, 10-12 и 13-15 лет (рис. 3). В данной ситуации анализ изменений амплитуды альфа-ритма в затылочных локусах не обнаружил влияния фактора СИТ.

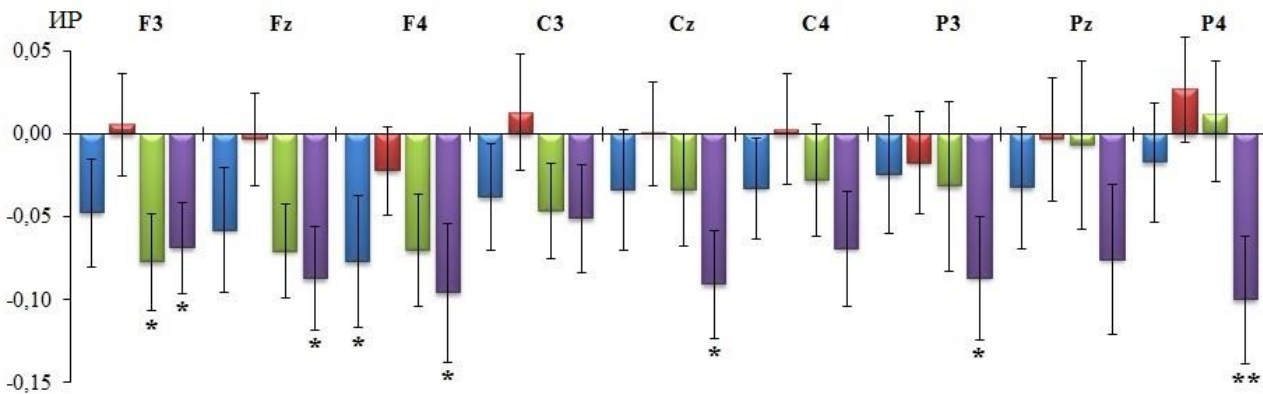


Рис. 3. Индексы реактивности (ИР) мю-ритма ЭЭГ в группах детей 4-6 лет (синие столбцы), 7-9 лет (красные столбцы), 10-12 лет (зеленые столбцы) и 13-15 лет (фиолетовые столбцы) при условии слухового восприятия движений, относительно состояния расслабленного бодрствования с закрытыми глазами. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

Анализ различий в амплитуде бета-ритма в данной ситуации обнаружил значимое влияние факторов СИТ и ЛОК ($p < 0,001$). Значимая десинхронизация бета-ритма зарегистрирована в группах детей 4-6 лет (F4: $p < 0,01$; P4: $p = 0,02$),

10-12 лет (F3, Cz, C4: $p < 0,05$; C3, P3: $p \leq 0,01$) и 13-15 лет (F3, Fz, F4, Cz: $p \leq 0,001$; C3, C4, Pz, P4: $p \leq 0,01$; P3: $p = 0,04$).

Дисперсионный анализ продемонстрировал различия в амплитуде СМР при выполнении движений и имитации действий биологического и небιологического объектов. Так, во всех исследуемых ситуациях обнаружено значимое влияние факторов СИТ, ВОЗР и ЛОК ($p < 0,001$).

У детей 4-6 лет при осуществлении концентрических перемещений цветного круга (Дв.1 относительно фон 1) наблюдалась значимая десинхронизация мю-ритма ЭЭГ в большинстве исследуемых областей. При имитации движений цветного круга (ИмНБ относительно Дв.1) изменения амплитуды мю-ритма не достигали уровня статистической значимости. При выполнении самостоятельных движений компьютерной мышью (Дв.3, относительно фон 4) был зарегистрирован значимый рост амплитуды мю-ритма в локусах Fz, Cz и C4. При имитации движений экспериментатора (ИмБ относительно Дв.3) была обнаружена десинхронизация мю-ритма в центральных и парietальных локусах (рис. 4).

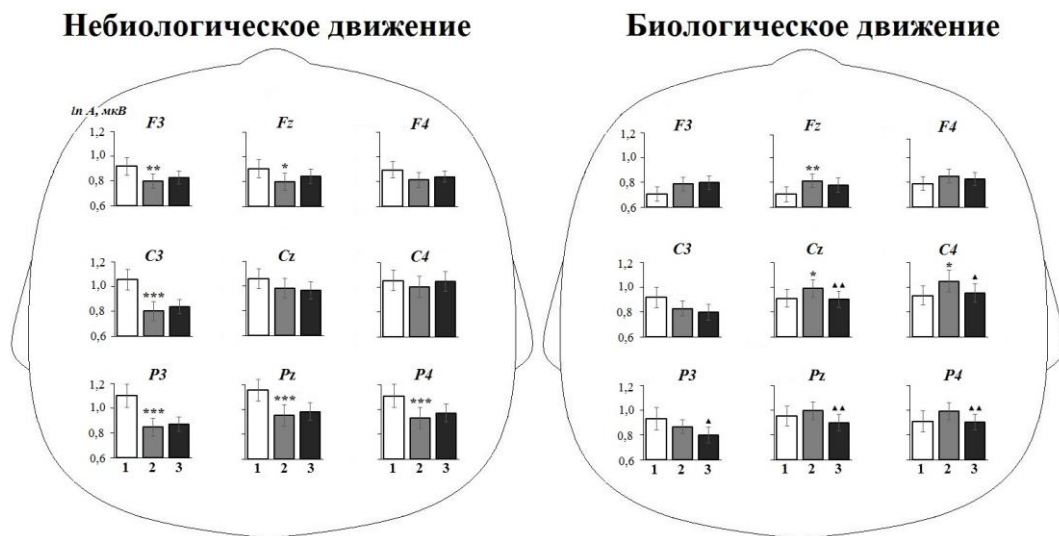


Рис. 4. Амплитуда (ln A, мкВ) мю-ритма ЭЭГ у детей 4-6 лет при имитации небιологического и биологического движений. 1 – фиксация взгляда, 2 – выполнение самостоятельных движений с произвольной скоростью, 3 – имитация движений. Различия амплитуд при фиксации взгляда и при выполнении самостоятельных движений: * – $p < 0,05$, ** – $p \leq 0,01$, *** – $p \leq 0,001$; при выполнении самостоятельных движений и имитации: ▲ – $p < 0,05$, ▲▲ – $p \leq 0,01$.

В группе детей 7-9 лет значимая десинхронизация мю-ритма в ситуации Дв.1 была обнаружена в большинстве исследуемых областей. При ИмНБ изменения амплитуды мю-ритма были незначимыми. В ситуации Дв.3 значимая

десинхронизация сенсомоторного ритма была обнаружена в центральных и всех теменных локусах (Cz, C3, P3, Pz, P4). При ИмБ не выявлено значимых изменений амплитуды мю-ритма (рис. 5).

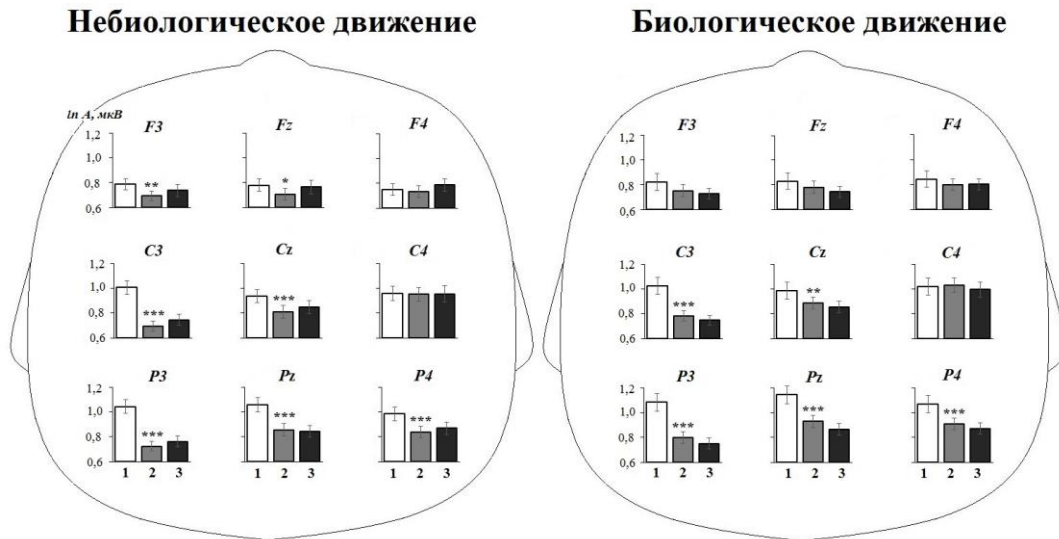


Рис. 5. Амплитуда ($\ln A$, мкВ) мю-ритма ЭЭГ в группе детей 7-9 лет при имитации небиологического и биологического движений. Остальные обозначения те же, что на рис. 4.

У детей 10-12 лет при Дв.1 значимое падение амплитуды мю-ритма было зарегистрировано в большинстве анализируемых локусов. При ИмНБ была обнаружена значимая синхронизация сенсомоторного ритма в отведении Fz. В ситуации Дв.3 значимое падение амплитуды мю-ритма наблюдалось в локусах Cz, C3, P3, Pz, P4. При ИмБ изменения амплитуды сенсомоторного ритма были незначимыми (рис. 6).

В группе детей 13-15 лет снижение амплитуды мю-ритма при Дв.1 достигало уровня статистической значимости во всех исследуемых областях. При ИмНБ была зарегистрирована значимая синхронизация сенсомоторного ритма в большинстве исследуемых областей. При Дв.3 значимая десинхронизация мю-ритма была обнаружена во всех исследуемых областях. В ситуации ИмБ наблюдалась дополнительная к уже имеющейся значимая десинхронизация мю-ритма во всех отведениях (рис. 7).

При анализе изменений амплитуды альфа-ритма в затылочных локусах в ситуации ИмНБ не обнаружено значимого влияния фактора СИТ. При ИмБ анализ изменений амплитуды альфа-ритма в локусах O1 и O2 показал значимое влияние факторов СИТ, ВОЗР и ЛОК ($p < 0,001$). В ситуации имитации движений биологического объекта значимая десинхронизация альфа-ритма выявлена в группе детей 4-6 лет (O2: $p = 0,02$) и 13-15 лет (O1 и O2 ($p < 0,001$)).

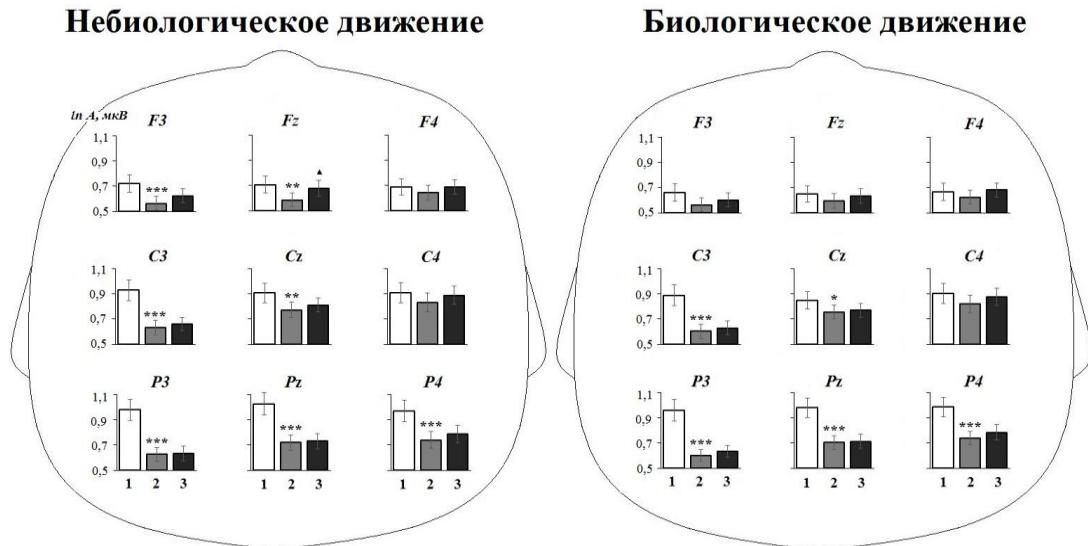


Рис. 6. Амплитуда ($\ln A$, $\mu\text{В}$) мю-ритма ЭЭГ в группе детей 10-12 лет при имитации небиологического и биологического движений. Остальные обозначения те же, что на рис. 4.

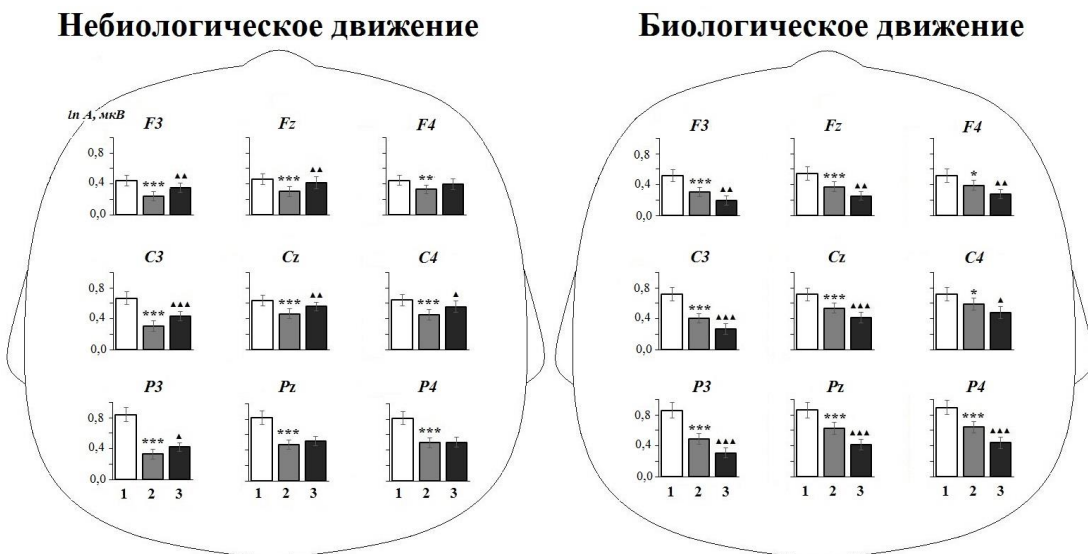


Рис. 7. Амплитуда ($\ln A$, $\mu\text{В}$) мю-ритма ЭЭГ в группе детей 13-15 лет при имитации небиологического и биологического движений. Различия амплитуд при выполнении самостоятельных движений и имитации: ▲▲▲ – $p \leq 0,001$. Остальные обозначения те же, что на рис. 4.

Дисперсионный анализ продемонстрировал различия в индексах реактивности мю-ритма при имитации движений биологического и небиологического объектов у детей 4-6 лет (Pz и $P4$: $p = 0,03$), 7-9 лет (Fz : $p = 0,04$) и 13-15 лет ($F3$, Fz , $F4$, $C3$, Cz , $C4$, $P3$, Pz , $P4$: $p \leq 0,001$). Также были обнаружены достоверные различия в ИР бета-ритма в группе детей 13-15 лет ($F3$, $F4$, $C3$, Cz , $C4$, $P3$: $p < 0,05$; Fz : $p = 0,003$). При имитации биологического

движения происходила десинхронизация исследуемого ритма, а при имитации небιологического движения – синхронизация.

Было исследовано влияние факторов ИНТЕЛЛЕКТ и ЧАСТОТА мю-ритма (низкая и высокая) на его реактивность, а также фактора ВОЗР. Фактор ВОЗР не оказывал влияния на изменения амплитуды мю-ритма у детей с разным уровнем общего интеллекта (УОИ). Анализ ситуации наблюдения движений выявил значимое влияние на величину десинхронизации мю-ритма ЭЭГ взаимодействия факторов ЛОК×ЧАСТОТА×УОИ ($p = 0,01$). Статистически значимые отличия были найдены только в группе детей с высоким уровнем общего интеллекта в локусах P3, Pz и P4 (рис. 8). При наблюдении движений дети всех возрастных групп с низкой индивидуальной частотой мю-ритма демонстрировали более выраженную десинхронизацию мю-ритма, чем дети с высокой частотой.

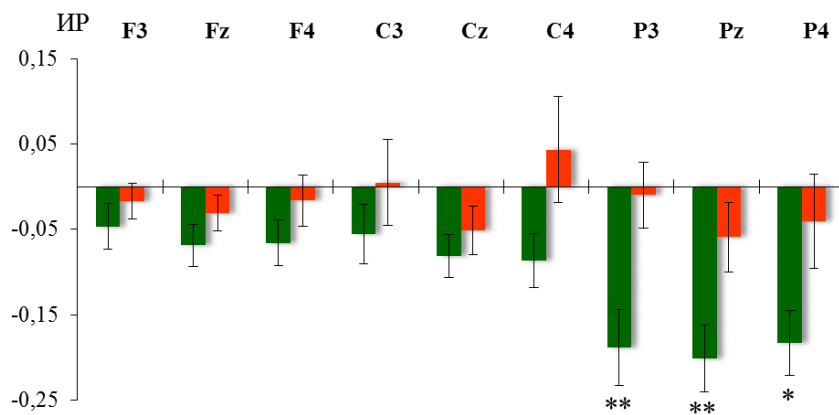


Рис. 8. Индексы реактивности (ИР) мю-ритма ЭЭГ у детей с высоким уровнем общего интеллекта и низкой (зеленые столбцы) и высокой (оранжевые столбцы) индивидуальной частотой мю-ритма в ситуации наблюдения движений. Статистически значимые различия в индексах реактивности мю-ритма: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

В ситуации слухового восприятия движений было обнаружено значимое влияние на величину десинхронизации мю-ритма ЭЭГ взаимодействия факторов ЧАСТОТА×УОИ ($p = 0,03$). Статистически значимые отличия были найдены только в группе детей с высоким уровнем общего интеллекта в локусах Cz, C4, Pz и P4 (рис. 9). Так, при слуховом восприятии движений дети всех возрастных групп с высокой индивидуальной частотой мю-ритма демонстрировали более выраженную десинхронизацию мю-ритма, чем дети с низкой частотой.

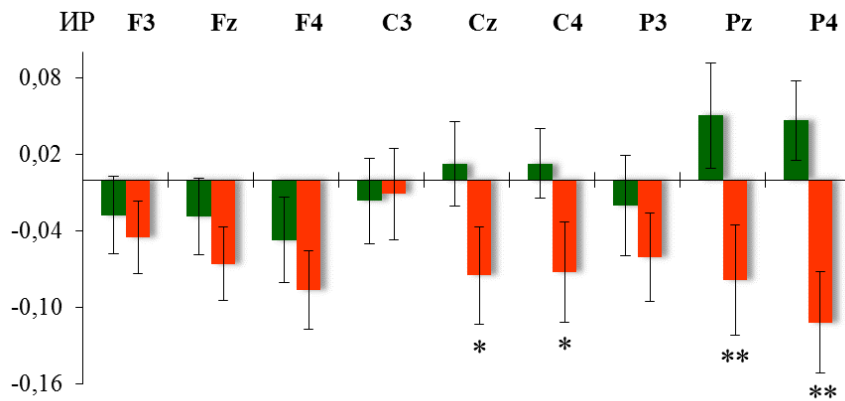


Рис. 9. Индексы реактивности (ИР) мю-ритма ЭЭГ у детей с высоким уровнем общего интеллекта и низкой (зеленые столбцы) и высокой (оранжевые столбцы) индивидуальной частотой мю-ритма в ситуации слухового восприятия движений. Остальные обозначения те же, что на рис. 8.

В результате корреляционного анализа были выявлены статистически значимые связи между индексами реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ в 9 отведениях и показателями психологических тестов. Так, у детей 4-6 лет большему снижению амплитуды мю-ритма ЭЭГ при наблюдении движений экспериментатора соответствовало меньшее число ошибочных нажатий в тесте go/no-go (F4: $r = 0,53$; $p = 0,04$) и более низкие показатели по шкале «Враждебность» теста ДДЧ (P3: $r = 0,45$; $p = 0,04$; Pz: $r = 0,48$; $p = 0,02$).

У детей 7-9 лет большему снижению амплитуды мю-ритма при выполнении самостоятельных движений соответствовали более низкие показатели среднего времени реакции в тесте go/no-go (P4: $r = 0,41$; $p = 0,04$). В ситуации наблюдения большему снижению амплитуды мю-ритма соответствовали более низкие показатели по шкале «Враждебность» (P4: $r = 0,45$; $p = 0,02$).

В группе детей 10-12 лет дети с большей десинхронизацией бета-ритма при наблюдении движений характеризовались более высокой явной тревожностью по шкале явной тревожности в методике Прихожан (C4: $r = -0,57$; $p = 0,03$). При слуховом восприятии испытуемыми движений экспериментатора большему снижению амплитуды мю-ритма ЭЭГ соответствовали более низкие показатели по шкале «Депрессивность» теста ДДЧ (C4: $r = 0,61$; $p = 0,01$).

Для подростков 13-15 лет с большей десинхронизацией мю-ритма ЭЭГ в центральном локусе левого полушария (C3) при выполнении самостоятельных движений были характерны более высокие показатели личностной тревожности по методике Спилбергера ($r = -0,59$; $p = 0,007$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ продемонстрировал значимо более низкие показатели амплитуды СМР в группе детей 13-15 лет относительно детей других возрастных групп, что свидетельствует о процессах утолщения костей черепа и увеличения сопротивления тканей по мере взросления детей (Segalowitz et al., 2010).

В результате анализа частотных границ индивидуального диапазона мю-ритма установлено, что у детей 4-15 лет они широко варьируют, а средние величины диапазонов значимо не отличаются у разных возрастных групп, что также было обнаружено в работе других авторов (Lepage, Théoret, 2006).

Анализ особенностей реактивности мю-ритма ЭЭГ при самостоятельном выполнении, наблюдении и слуховом восприятии движений у детей четырёх возрастных групп выявил десинхронизацию мю-ритма, которая становилась более выраженной по мере взросления детей. Обнаружено большее подавление мю-ритма в левом полушарии у детей-правшей, что, по мнению некоторых авторов (Stroganova et al., 2007; Orekhova et al., 2006) может быть связано с повышением нисходящего контроля сенсомоторных зон левого полушария, участвующих в координации движений доминирующей правой руки. Также выявлено более генерализованное снижение амплитуды мю-ритма (включая фронтальные локусы) у детей старшего возраста, которое может быть связано с созреванием областей неокортекса, ответственных за планирование и осуществление инструментальных движений. Существенная десинхронизация в теменных отведениях по сравнению с центральными подтверждает наблюдения других авторов (Thorpe et al., 2016) и может указывать на активность процессов реafferентации от кинестетических рецепторов, характерную для условия реализации относительно медленных движений (Stancok, Pfurtcheller, 1996). В результате анализа обнаружен сходный паттерн реактивности альфа-ритма в индивидуальной полосе в затылочных областях и мю-ритма в париетальных локусах у детей 10-12 и 13-15 лет. Известно, что для мю-ритма характерна большая частота по сравнению с частотой альфа-ритма, зарегистрированного у того же человека (Storm van Leeuwen et al., 1976), а высокочастотный поддиапазон мю-ритма (10–13 Гц) более чувствителен к выполнению действия (Frenkel-Toledo et al., 2013). Также установлено, что частота альфа-ритма увеличивается по мере взросления (Clarke et al., 2001; Gmehlin et al., 2011). Возможно, у детей старшего возраста происходит большее перекрытие частотных диапазонов мю- и альфа-ритмов и, как следствие, «смещение» их реактивности.

При наблюдении движений, выполняемых экспериментатором, значимое подавление мю-ритма проявлялось преимущественно в теменных

отведениях ЭЭГ у детей всех возрастных групп. В целом, картина модуляции сенсомоторного ритма при выполнении и наблюдении движений сходна, что свидетельствует о развитых механизмах сопряжения наблюдения и выполнения действия. Подобное сопряжение, как считают, является характерной функцией ЗСМ головного мозга (Rizzolatti et al., 2001; Pineda, 2005). В ситуации наблюдения движений также обнаружена десинхронизация затылочного альфа-ритма у детей всех возрастных групп. В связи с перекрытием частотных диапазонов мю- и альфа-ритмов, они могут проявлять совместную активность, обеспечивая связь между областями коры (Pineda, 2005) и отражать тесную координацию между активностью зеркальных нейронов и вниманием (Debnath et al., 2019).

В ситуации слухового восприятия звуков, сопровождающих выполнение движений с помощью компьютерной мыши, не предполагалась никакая зрительная стимуляция, поэтому условие закрытых глаз являлось предпочтительным (в соответствии с рекомендацией Barry et al., 2007). Данная экспериментальная ситуация продемонстрировала градиент десинхронизации, обратно направленный относительно уже рассмотренных ситуаций: вместо парието-фронтального (с преобладанием десинхронизации в задних отделах неокортекса) – фронто-париетальный (с преобладанием в передних отделах). Отсутствие изменений амплитуды альфа-ритма в данной ситуации при закрытых глазах, в отличие от реакции десинхронизации в мю-диапазоне, свидетельствует в пользу методики определения индивидуальной частоты мю-ритма в качестве способа контроля наложения затылочной альфа-активности.

Особый интерес представляет также реактивность сенсомоторного бета-ритма, который, как предполагают, отражает изменение активации зеркальных нейронов моторной зоны коры (Babiloni et al., 2016). В ситуациях самостоятельного выполнения и наблюдения движений у детей 4-6 и 7-9 лет сенсомоторный бета-ритм продемонстрировал рост амплитуды во фронтальных локусах F3 и F4. У детей 10-12 и 13-15 лет наблюдалось снижение амплитуды бета-ритма преимущественно в центральных и теменных областях. Ранее на меньшей выборке детей нами были найдены значимые корреляции между возрастом детей и индексом реактивности сенсомоторного бета-ритма в данных ситуациях, указывающие на переход от синхронизации указанного ритма к десинхронизации в возрастном периоде 8–11 лет (Галкин и соавт., 2016). При восприятии движений на слух у детей 4-6 лет значимая десинхронизация бета-ритма наблюдалась лишь в двух отведениях. У детей 10-12 лет значимая десинхронизация бета-ритма выявлена в пяти из девяти локусов, а у детей 13-15 лет во всех отведениях. Логично предположить, что возрастная динамика

реактивности бета-ритма отражает развитие моторной области коры, а также ЗСМ (Pineda, 2008; Avanzini et al., 2012).

Можно заключить, что выявленные у детей старшей возрастной группы особенности (десинхронизация СМР в большинстве или даже всех локусах) могут быть связаны с тем, что дети старшего возраста быстрее овладевали навыком манипуляций компьютерной мышью в предложенном задании, из-за чего в регуляцию движений вовлекались большие области коры.

Ситуации имитации биологического и небιологического движений почти не сопровождалась дополнительной модуляцией мю-ритма относительно выполнения самостоятельных произвольных движений у детей 7-9 и 10-12 лет. Выявленный факт может свидетельствовать о том, что у детей данного возраста в условиях подражания дополнительные ресурсы неокортекса, требуемые для переработки разномодальной информации, вовлекаются недостаточно, чтобы успешно имитировать движения. В группе подростков 13-15 лет при имитации небιологического движения наблюдалось меньшее падение амплитуды сенсомоторного ритма, чем при выполнении произвольных движений. Можно предположить, что необходимость подражать движениям другого объекта (цветного круга) привела к большей автоматизации движений по заданному паттерну и, как следствие, к ослаблению произвольного контроля собственных движений. У детей данного возраста при имитации биологического движения наблюдалось дополнительное снижение мю-ритма, по сравнению с наблюдаемым при выполнении самостоятельных движений, что может быть вызвано наличием социального контекста, к которому чувствительна ЗСМ (Filippi et al., 2016; Yin et al., 2017). В данной ситуации (ИмБ) выявлен сходный паттерн реактивности альфа-ритма в затылочных отведениях и мю-ритма в теменных локусах преимущественно у детей 10-12 и 13-15 лет, что может быть обусловлено бóльшим совпадением частотных диапазонов мю- и альфа-ритмов у детей старшего возраста.

Было выявлено, что подражание биологическим движениям сопровождается у детей бóльшей десинхронизацией, в сравнении с ситуацией подражания небιологическим движениям. Можно предположить, что существуют разные нейронные механизмы обработки информации при восприятии небιологических и биологических движений, в пользу чего свидетельствуют и результаты других исследований (Ulloa, Pineda, 2007; Perry et al., 2010; Frenkel-Toledo et al., 2013).

Было исследовано влияние факторов интеллекта и частоты мю-ритма на его реактивность. Фактор возраста не оказывал влияния на изменения амплитуды мю-ритма у детей с разным уровнем интеллекта. Статистически значимые отличия были найдены только в группе детей с высоким уровнем

общего интеллекта в ситуациях наблюдения и слухового восприятия движений. При наблюдении движений максимальная десинхронизация сенсомоторного ритма выявлена в теменных отведениях и была свойственна детям с низкой индивидуальной частотой мю-ритма. Ранее было обнаружено, что десинхронизация низкочастотного альфа-ритма во фронтальных, центральных и теменных отведениях была максимальной в группе людей с высоким уровнем интеллекта и минимальной – с низким (Аликина и соавт., 2018). В ситуации слухового восприятия звуков у детей с высокой специфичностью (т.е. самостоятельное выполнение движений сопровождалось десинхронизацией преимущественно высокочастотного мю-ритма) происходила отчетливая десинхронизация мю-ритма, свидетельствующая о высокой активации сенсомоторных областей, тогда как у детей с низкой специфичностью мю-ритм десинхронизировался слабо. Следовательно, можно сделать вывод о том, что у детей с высоким уровнем когнитивного развития активация сенсомоторных областей при слуховом узнавании действий других людей зависит в большей степени от уровня развития конкретного моторного навыка.

В результате корреляционного анализа были выявлены статистически значимые связи между индексами реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ и показателями психологических тестов. Так, у детей 4-6, 7-9 и 10-12 лет большей десинхронизации мю- и бета-ритмов ЭЭГ соответствовали более высокие показатели внимания. Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что дети с большей активностью ЗСМ характеризуются более высокими показателями произвольного внимания, и как следствие могут лучше понимать действия окружающих и лучше обучаться путем подражания.

Большей десинхронизации СМР у детей разного возраста соответствуют меньшие значения по таким шкалам проективной методики ДДЧ, как «Враждебность», «Депрессивность» и «Недоверие к себе», а большей десинхронизации СМР у детей 10-15 лет и подростков 13-15 лет соответствуют большие значения тревожности, определяемые с помощью опросников. Известно, что ЗСМ играет важную роль в реализации сложных форм социального взаимодействия (Filippi et al., 2016) и связана с распознаванием эмоций (Moore, Franz, 2017). Можно предположить, что обнаруженное снижение амплитуды мю- и бета-ритмов отражает благоприятное состояние эмоциональной сферы детей. Но такие дети обладают повышенной социальной чувствительностью и, как следствие, тревожностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить ряд новых фактов об особенностях реактивности сенсомоторных ритмов у детей 4-15 лет. Выявлена

десинхронизация СМР при выполнении, наблюдении и слуховом восприятии движений, которая становилась более выраженной по мере взросления детей, что указывает на то, что реакция десинхронизации сенсомоторных ритмов у детей усиливается по мере развития ЦНС и усвоения определенных двигательных навыков. При имитации движений небиологического объекта наблюдалась преимущественно синхронизация сенсомоторных ритмов. При подражании движениям биологического объекта выявлена десинхронизация СМР, что может указывать на активацию ЗСМ, ответственной за понимание действий, выполняемых другими индивидами.

Полученные в настоящей работе данные указывают на перспективность проведения дальнейших исследований реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ у детей и открывают возможности разработки новых методов оценки когнитивного развития и коррекции психоречевых и двигательных нарушений у детей с использованием современных нейро- и психофизиологических технологий.

ВЫВОДЫ

1. В результате исследования выявлены статистически значимые изменения амплитуды сенсомоторных ритмов (СМР) ЭЭГ в различных экспериментальных ситуациях, а также статистически значимые связи между параметрами СМР и психологическими показателями у детей в возрасте 4-15 лет.

2. В группе детей 13-15 лет зарегистрированы значимо более низкие амплитуды СМР относительно детей более младших возрастных групп (4-6, 7-9 и 10-12 лет). Частотные границы индивидуально определенного мю-ритма у детей 4-15 лет широко варьируют, и средние величины частоты мю-ритма значимо не отличаются у разных возрастных групп.

3. При выполнении, наблюдении и слуховом восприятии движений обнаружена десинхронизация мю-ритма, которая становится более выраженной по мере взросления детей. Бета-ритм демонстрирует снижение амплитуды в ситуациях выполнения и наблюдения движений у детей старшего возраста (10-12 и 13-15 лет), а при слуховом восприятии движений десинхронизация происходит у детей 4-6, 10-12 и 13-15 лет.

4. В ситуации имитации движений небиологического объекта (цветной круг) наблюдается синхронизация сенсомоторных мю- и бета-ритмов ЭЭГ, а при имитации движений биологического объекта (рука экспериментатора) – десинхронизация только мю-ритма.

5. На реактивность мю-ритма сопряженное влияние оказывают факторы частоты мю-ритма и интеллекта. В ситуации наблюдения движений дети всех

возрастных групп с высоким уровнем интеллекта и низкой индивидуальной частотой мю-ритма демонстрируют более выраженную десинхронизацию сенсомоторного ритма, чем дети с высокой частотой мю-ритма. При слуховом восприятии движений более выраженная десинхронизация сенсомоторного ритма характерна для детей с высоким уровнем интеллекта и высокой индивидуальной частотой мю-ритма.

6. Десинхронизация бета-ритма в ситуациях самостоятельного выполнения и имитации движений другого человека наблюдается у детей 4-6 и 7-9 лет со средним уровнем интеллекта, а в группах детей 10-12 и 13-15 лет – у детей с высоким интеллектом.

7. Больше десинхронизации СМР у детей разного возраста соответствуют более высокие показатели внимания, меньшие значения по шкалам теста «Дом – Дерево – Человек», но и большие значения тревожности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Эйсмонт Е.В., Махин С.А., Бакунова А.В., Кайда А.И., Павленко В. Б. Особенности μ -ритма ЭЭГ и его реактивности в задачах на выполнение, наблюдение, имитацию и слуховое восприятие движений у детей 4–14 лет // Физиология человека. – 2017. – Т. 43, № 3. – С. 43-50.

2. Куличенко А.М., Махин С.А., Аликина М.А., Кайда А.И., Черненко Е.В., Павленко В.Б., Куличенко Е.А. Анализ выполнения синхронных движений в паре экспериментатор-испытуемый // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2017. – Т. 3 (69), №4. – С. 138-148.

3. Кайда А.И., Эйсмонт Е.В., Муминова Л.Л., Махин С.А. Реактивность сенсомоторного ритма ЭЭГ у детей 6-9 лет в условиях имитации биологического и небологического движения // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2018. – Т. 4 (70), №3. – С. 69-78.

4. Кайда А.И., Эйсмонт Е.В., Рахманова С.А., Павленко В.Б. Связь характеристик ЭЭГ и уровня когнитивного развития у детей 4-6 лет // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2018. Т. 4 (70), №3. – С. 79-91.

5. Кайда А.И., Эйсмонт Е.В. Связь реактивности сенсомоторного ритма ЭЭГ психологическими показателями у детей 6-9 лет // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2018. – Т. 4 (70), №4. – С. 60-70.

6. Свидетельство 2018617271. Программа регистрации концентрических движений компьютерным манипулятором типа «мышь», осуществляемых в

паре, и анализа синхронности их выполнения: программа для ЭВМ / Е.А. Куличенко, В.Б. Павленко, А.М. Куличенко, С.А. Махин, А.И. Кайда, Е.В. Эйсмонт, М.А. Аликина, Е.В. Черненко (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». № 2018614343; заявл. 28.04.2018; опубл. 21.06.2018, Бюл. № 7. 53,3 Кб.

7. Кайда А.И., Махин С.А., Эйсмонт Е.В., Павленко В.Б. Возрастная динамика и топография реактивности индивидуального мю-ритма ЭЭГ у детей 4-14 лет // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. – 2019. – № 45. – С. 106-127.

8. Кайда А.И., Махин С.А., Эйсмонт Е.В., Павленко В.Б. Взаимосвязь между параметрами реактивности мю-ритма ЭЭГ и уровнем интеллекта у детей 4-14 лет // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2019. – Т. 5 (71), №1. – С. 40-49.

9. Кайда А.И., Михайлова А.А., Эйсмонт Е.В., Орехова Л.С., Шепитько Л.С. Особенности ЭЭГ у детей с задержками речевого развития // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2019. – Т. 5 (71), №3. – С. 12-21.

10. Пат. 2702728 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/0476. Способ определения индивидуального частотного диапазона мю-ритма ЭЭГ / С.А. Махин, А.И. Кайда, Е.В. Эйсмонт, А.А. Михайлова, В.Б. Павленко; правообладатель ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». № 2018130909; заявл. 27.08.2018; опубл. 09.10.2019, Бюл. № 28. 9 с.

11. Кайда А.И., Михайлова А.А., Эйсмонт Е.В., Джаппарова Л.Л., Павленко В.Б. Реактивность μ -ритма ЭЭГ у детей при имитации движений визуальных образов биологического и небиологического происхождения // Вестник Российского государственного медицинского университета. – 2020. – № 2. – С. 67–75.

12. Махин С.А., Кайда А.И., Эйсмонт Е.В., Павленко В.Б. Реактивность зеркальной системы мозга и уровень интеллекта у детей школьного возраста // Журнал высшей нервной деятельности. – 2020. – Т. 70, № 5. – С. 635–649.

13. Кайда А.И., Эйсмонт Е.В., Михайлова А.А., Павленко В.Б. Сенсомоторные ритмы ЭЭГ у детей с расстройствами аутистического спектра. [Опубликовано online 2020.09.22]. Вестник Российского государственного медицинского университета. 2020. doi: 10.24075/vrgmu.2020.055