



# ОСОБЕННОСТИ ЭЭГ-РЕАКЦИЙ У ТИПИЧНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕТЕЙ И ДЕТЕЙ С РАССТРОЙСТВОМ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ДВИЖЕНИЯМИ И ИХ ИМИТАЦИИ

## **ПОРТУГАЛЬСКАЯ А.А.**

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8240>, e-mail: [a.portugalskaya@gmail.com](mailto:a.portugalskaya@gmail.com)*

## **КАЙДА А.И.**

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0208-8638>, e-mail: [kaydaanna@gmail.com](mailto:kaydaanna@gmail.com)*

## **ОРЕХОВА Л.С.**

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-641X>, e-mail: [lili\\_psy@mail.ru](mailto:lili_psy@mail.ru)*

## **МИХАЙЛОВА А.А.**

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-9147>, e-mail: [anna.kulenkova@gmail.com](mailto:anna.kulenkova@gmail.com)*

## **ПАВЛЕНКО В.Б.**

*Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3311-3688>, e-mail: [vprav55@gmail.com](mailto:vprav55@gmail.com)*

У нормотипичных детей 4–7 лет и сверстников с расстройствами аутистического спектра (РАС) регистрировали электроэнцефалограмму (ЭЭГ) в ситуациях наблюдения за мнимым и реальным действиями экспериментатора, а также при повторении действия детьми. Актуальность исследования обусловлена предположением о нарушении у детей с РАС функционирования так называемой зеркальной системы мозга (ЗСМ). У обеих групп детей в указанных ситуациях выявлена десинхронизация мощности ЭЭГ в индивидуально определенных диапазонах мио-ритма в центральных, фронтальных и теменных отведениях, что указывает на активацию ЗСМ. При этом у детей с РАС во всех экспериментальных ситуациях наблюдалась бо́льшая по сравнению с нормотипичными детьми десинхронизация мио-ритма в областях нижних лобных извилин левого и правого полушарий (отведения F7 и F8). Однако в центральном локусе правого полушария (отведение С4) в условиях наблюдения реального действия у детей с РАС отмечается значимо меньшая десинхронизация мио-ритма по сравнению с группой нормы, что, вероятно, связано с меньшей активацией ЗСМ при восприятии целенаправленных действий другого человека. Полученные результаты важны для понимания нарушений социального поведения у детей с РАС и разработки новых методов коррекции этих нарушений.

**Ключевые слова:** зеркальная система мозга, расстройства аутистического спектра, восприятие движений, имитация движений.



**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-28-00720 «Нейрофизиологические механизмы помогающего поведения у детей: роль зеркальной системы мозга»: <https://rscf.ru/project/22-28-00720/>.

**Для цитаты:** Португальская А.А., Кайда А.И., Орехова Л.С., Михайлова А.А., Павленко В.Б. Особенности ЭЭГ-реакций у типично развивающихся детей и детей с расстройством аутистического спектра при наблюдении за движениями и их имитации // Экспериментальная психология. 2024. Том 17. № 3. С. 216–231. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170315>

## FEATURES OF EEG REACTIONS IN TYPICALLY DEVELOPING CHILDREN AND CHILDREN WITH AUTISM SPECTRUM DISORDER WHEN OBSERVING MOVEMENTS AND IMITATING THEM

### ARINA A. PORTUGALSKAYA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8240>, e-mail: [a.portugalskaya@gmail.com](mailto:a.portugalskaya@gmail.com)

### ANNA I. KAIDA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0208-8638>, e-mail: [kaydaanna@gmail.com](mailto:kaydaanna@gmail.com)

### LILIA S. OREKHOVA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-641X>, e-mail: [lili\\_psy@mail.ru](mailto:lili_psy@mail.ru)

### ANNA A. MIKHAILOVA

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-9147>, e-mail: [anna.kulenkova@gmail.com](mailto:anna.kulenkova@gmail.com)

### VLADIMIR B. PAVLENKO

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3311-3688>, e-mail: [vpav55@gmail.com](mailto:vpav55@gmail.com)

In normotypic children 4-7 years old and their peers with autism spectrum disorders (ASD), an electroencephalogram (EEG) was recorded in situations of observation of imaginary and real actions of the experimenter, as well as when the action was repeated by children. The relevance of the study is due to the assumption of a violation in children with ASD of the functioning of the so-called mirror neuron system (MNS). In both groups of children in these situations, desynchronization of EEG power was detected in individually defined mu-rhythm ranges in the central, frontal and parietal locus, which indicates the activation of MNS. At the same time, in children with ASD in all experimental situations, there was a greater desynchronization of the mu-rhythm in the areas of the lower frontal gyri of the left and right hemispheres (locus F7 and F8), compared with normotypic children. However, in the central locus of the right hemisphere (C4 locus), under the conditions of observation of a real action in children with ASD, there is significantly less desynchronization of the mu-rhythm compared to the norm group, which is probably due to less activation of MNS when perceiving the purposeful actions of another person. The results obtained are important for understanding social behavior disorders in children with ASD and developing methods for their correction.



**Keywords:** mirror neuron system, autism spectrum disorder, perception of movements, imitation of movements.

**Funding.** The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No. 22-28-00720 “Neurophysiological mechanisms of helping behavior in children: the role of the mirror system of the brain”: <https://rscf.ru/en/project/22-28-00720/>.

**For citation:** Portugalskaya A.A., Kaida A.I., Orekhova L.S., Mikhailova A.A., Pavlenko V.B. Features of EEG Reactions in Typically Developing Children and Children with Autism Spectrum Disorder When Observing Movements and Imitating Them. *Ekspierimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology (Russia)*, 2024. Vol. 17, no. 3, pp. 216–231. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170315> (In Russ.).

## Введение

Формирование и становление ребенка невозможно без взаимодействия с людьми и включения в культурную среду, однако существуют нарушения развития, в том числе расстройства аутистического спектра (РАС), при которых данные процессы нарушаются [4]. РАС проявляются уже в раннем детстве [12] и число детей с таким диагнозом постоянно растет [2]. Для РАС характерны затруднения с регуляцией возбуждения и переключением внимания [13], снижение внимания к диалогу других людей [23] и к подражанию их действиям [26], что приводит к выраженному и всестороннему дефициту социального взаимодействия [1; 3; 8]. Около двух десятилетий назад была сформулирована «гипотеза разбитого зеркала», согласно которой в основе по крайней мере части этих поведенческих особенностей лежат нарушения функционирования так называемых зеркальных нейронов или зеркальной системы мозга (ЗСМ) [31; 37]. Принято считать [14], что ядро ЗСМ человека состоит из областей неокортекса, расположенных билатерально в нижней теменной доле и вентральной премоторной коре, а в расширенную часть входят сенсомоторная сеть (включающая, помимо указанных областей, верхнюю часть верхней височной извилины, префронтальную, моторную и соматосенсорную кору), а также эмоциональная сеть (включает переднюю поясную кору, миндалевидное тело и островок). Результаты большого числа исследований приводят к выводу, что ЗСМ имеет важное значение для понимания действий и их имитации, формирования гипотетического конструкта «теории сознания» (“Theory of Mind”), способного объяснять и прогнозировать поведение Другого [6; 24], становления социального и просоциального поведения в процессе онтогенеза [10], т.е. тех сторон психической жизни, которые нарушены при РАС.

Для изучения активности ЗСМ у взрослых нормотипичных испытуемых и людей с РАС в последнее время эффективно применяют различные виды функциональной магнитно-резонансной томографии (ФМРТ) и магнитоэнцефалографию [17; 22]. Однако при изучении нейрофизиологических механизмов поведения детей дошкольного возраста до сих пор широко используют регистрацию электроэнцефалограммы (ЭЭГ), в частности потому, что данный метод почти не сковывает ребенка, не ограничивает его подвижность. В качестве показателя активации ЗСМ при этом рассматривают десинхронизацию или подавление амплитуды мю-ритма ЭЭГ в альфа-диапазоне частот, поскольку такой феномен выявлен у испытуемых в центральных отведениях при выполнении действия, наблюдении за ним или его мысленном представлении [5; 21].



Однако до настоящего времени результаты исследований в этой области остаются противоречивыми. Так, в ранних работах отмечена пониженная реактивность ЭЭГ в диапазоне мю-ритма у детей и взрослых с РАС при наблюдении за движениями рук, что расценили как нарушение у них функций ЗСМ [31]. Однако позже другие исследователи в подобных ситуациях не выявили различий в динамике мю-ритма у взрослых детей с РАС по сравнению с испытуемыми контрольной группы [19; 33]. Кроме того, в ряде работ, проведенных с применением магнитоэнцефалографии и ФМРТ, у детей и подростков с РАС при выполнении задач, включающих восприятие и имитацию движений, отмечена повышенная, по сравнению с нормотипичными испытуемыми, активация зон неокортекса, являющихся частью ЗСМ [15; 35].

Недавний метаанализ значительного числа исследований с применением ФМРТ в целом подтвердил аномальный характер активации ЗСМ у людей с РАС при наблюдении за действиями окружающих [17]. При этом отмечено, что проявления дисфункции ЗСМ определяются социально-эмоциональным контекстом ситуации. Так, наблюдение за действиями, лишенными эмоциональной окраски, сопровождается гиперактивацией областей ЗСМ в левом полушарии (нижняя теменная доля и дополнительная двигательная область), в то время как правая средняя затылочная извилина и левая постцентральная извилина были гипоактивированными по сравнению с активностью неокортекса у типично развивающихся людей. Что касается наблюдения за эмоциональными стимулами, то испытуемые с РАС отличались гиперактивацией правой нижней лобной извилины. Выявленную гиперактивацию у участков неокортекса расценивают как свидетельство того, что людям с РАС требуются дополнительные умственные усилия для наблюдения за стимулами и в обычных, и в эмоциональных ситуациях.

Учитывая эти данные, а также многочисленные факты зависимости реакций ЗСМ у нормотипичных людей от характера экспериментальной ситуации, степени вовлеченности в нее и даже от отношения к ее участникам [24], на смену модели «разбитого зеркала», отводящей основную роль в патогенезе аутизма нарушениям функций ядра ЗСМ, приходят другие модели. Согласно им, ядро ЗСМ играет важную роль в низкоуровневой обработке наблюдаемых действий (например, различение конкретных действий), но не в интерпретации действия. Зеркальные нейроны являются частью сложной системы управления. Изменения в поведении у людей с РАС может быть результатом нарушения контроля ядра ЗСМ сверху вниз, со стороны префронтальных и иных областей коры [22; 25; 38], входящих в так называемую расширенную ЗСМ. Как следует из этих моделей, активность ЗСМ отражает степень активации и особенности функционирования обширных нейронных сетей неокортекса, вовлеченных в восприятие действий других людей и их имитацию. В последние десятилетия достижения в области социальных наук показали, что имитация является одним из центральных механизмов возникновения уникальных социально-когнитивных способностей человека, и раскрытие онтогенеза имитации имеет важное значение для понимания человеческой культурной эволюции [18].

В связи с этим особый интерес представляют особенности динамики мю-ритма ЭЭГ детей с РАС в различных социальных или игровых ситуациях, включающих наблюдение за действиями окружающих и их имитацию. При этом нужно учитывать, что именно в ситуации личного социального взаимодействия активация ЗСМ у взрослых и особенно у детей происходит более выражено [7]. Недавними исследованиями установлено, что при наблюдении за мнимым и реальным действием взрослого экспериментатора, а также при выпол-



нении ребенком самостоятельного действия в игровой ситуации мю-ритм ЭЭГ у нормотипичных детей в возрасте от полутора до трех с половиной лет значительно снижается, причем это снижение было более выражено у детей с высоким развитием рецептивной речи [9]. Однако, насколько нам известно, анализ реактивности мю-ритма ЭЭГ, отражающего степень активации ЗСМ, а также анализ динамики других ритмов ЭЭГ в описанных трех ситуациях у детей дошкольного возраста с РАС ранее не проводился.

В связи с этим целью исследования является анализ динамики ритмов ЭЭГ у нормотипичных детей и детей с РАС при наблюдении за мнимым действием, реальным действием а также при повторении действия.

### Организация и методы исследования

Исследование было проведено на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Основную группу детей с диагнозом РАС в возрасте 4–7 лет составили 20 детей (из них 14 детей мужского и 6 – женского пола). Средний возраст детей с РАС –  $71,7 \pm 13,3$  месяцев. Группу сравнения составили 33 типично развивающихся сверстника (из них 18 мальчиков и 15 девочек). Средний возраст детей данной группы составил  $71,3 \pm 13,9$  месяцев.

Родители детей дали письменное информированное согласие на участие ребенка в экспериментах. Настоящее исследование соответствовало этическим принципам Хельсинкской декларации 1964 г. и было одобрено этическим комитетом Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского.

Критерии включения детей в группу сравнения: достаточный уровень когнитивного развития (IQ от 90 до 120 баллов по тесту Векслера в вариантах WISC и WPPSI); отсутствие хронических заболеваний нервной системы. Критерии включения для детей основной группы: наличие установленного детским психиатром диагноза РАС, подтвержденного методиками ADOS-2 (балл от 3 до 10) и CARS (баллы от 30 до 60). Критерии включения для детей обеих групп: предпочтение правой руки; наличие нормального уровня зрения и слуха.

Во время проведения эксперимента дети 4–7 лет сидели на стуле перед столом, на котором располагался стимульный материал. Исходная (фоновая) ЭЭГ была зарегистрирована при просмотре видеозаписи вращающегося мяча в состоянии устойчивого зрительного внимания (УЗВ) ребенка. При этом ребенку давали инструкцию: «Посиди спокойно, глядя на мячик».

Затем проводили регистрацию ЭЭГ в трех экспериментальных ситуациях по ранее предложенной методике [9; 30]:

1. «Наблюдение мнимого действия» — ребенок наблюдает, как экспериментатор проводит рукой по установленной на столе горке (3 повторения). Считается, что ребенок не видит в этом действии реальной цели [30].

2. «Наблюдение реального действия» — ребенок наблюдает, как экспериментатор сталкивает с горки игрушечную машинку (3 повторения).

3. «Выполнение действия» — экспериментатор ставит горку с машинкой перед ребенком, и ребенок сам ее сталкивает (3 повторения).

Перед ситуациями 1 и 2 давалась инструкция: «Смотри внимательно», — а перед ситуацией 3 — инструкция: «Сделай, как делал я». Понимание инструкций подтверждалось тем, что все дети выполняли соответствующее задание.



ЭЭГ была зарегистрирована с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-3» («Нейрософт», Россия) монополярно в лобных, центральных, височных, теменных и затылочных отведениях в соответствии с международной системой «10-20». Полоса пропускания сигнала составила 0,5–30,0 Гц при частоте дискретизации 250 Гц. В рамках настоящего исследования проводили анализ ЭЭГ в следующих отведениях: F3, Fz, F4, F7, F8, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4. Указанные регионы выбраны как области интереса на основании данных литературы о целесообразности анализа мю-ритма у детей не только в центральных, но и во фронтальных и теменных областях [29; 36]. В качестве референтного использовался объединенный ушной электрод. Во время записи ЭЭГ велась синхронная видео- и аудиорегистрация. Фрагменты ЭЭГ с большим количеством артефактов, а также пробы, в которых видеозапись показала отсутствие внимания ребенка к ситуации, были исключены из анализа.

Для анализа исходной ЭЭГ использовался отрезок записи длительностью 20–30 с. Также анализировались отрезки ЭЭГ длительностью 20–30 с в трех описанных выше экспериментальных условиях. Начало фрагмента было положено за 1 с до момента первого прикосновения руки экспериментатора к горке или к машинке, а также прикосновения ребенка к машинке. Завершение отрезка — через 1 с после последнего прикосновения руки экспериментатора к горке или к машинке, а также прикосновения ребенка к машинке. Указанные фрагменты ЭЭГ подвергались быстрому преобразованию Фурье с эпохой анализа 2 с и взаимным перекрытием эпох 50%. Обработку данных ЭЭГ проводили с помощью программы WinEEG («Мицар», Россия).

Индивидуальный для каждого отдельного испытуемого диапазон мю-ритма определяли следующим образом. В условиях УЗВ на спектре ЭЭГ в отведении С3 выявляли пик мощности в диапазоне 6–14 Гц, который исчезал во время совершения ребенком движения рукой. На усредненный по последовательным эпохам спектр ЭЭГ, зарегистрированной в ситуациях УЗВ, накладывали усредненный по трем повторениям спектр ЭЭГ, зарегистрированной в ситуации «Выполнение действия». За границы анализируемого диапазона принимали точки пересечения спектров. Данную компоненту альфа-ритма, демонстрирующую супрессию мощности в ситуации двигательной активности, рассматривают как сенсомоторный или мю-ритм [34]. Для индивидуально определенной частотной полосы мю-ритма в программе WinEEG («Мицар»; Россия) была рассчитана амплитуда, которая затем была прологарифмирована для нормализации распределения ( $lg$  мкВ).

Для оценки реакций десинхронизации у детей исследованных групп рассчитывали индексы реактивности (ИР) мю-ритма в соответствии с формулой  $[k = \ln(B/A)]$ , где  $k$  — коэффициент реактивности мю-ритма,  $B$  — мощность мю-ритма в экспериментальной ситуации,  $A$  — мощность мю-ритма в фоновой ситуации, подобно тому, как это делали при анализе ЭЭГ-реакций, сопровождающих просоциальное поведение [11]. Для экспериментальных ситуаций «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия», «Выполнение действия» индексы реактивности обозначали как ИР-1, ИР-2, ИР-3 соответственно.

Значения  $ИР > 0$  свидетельствуют об увеличении мощности мю-ритма в экспериментальной ситуации по сравнению с фоновым уровнем (синхронизация), а  $ИР < 0$  — о снижении мощности мю-ритма (десинхронизация).

### Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных была произведена в программе STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc.; США). Результаты измерений были представлены как средние значения  $\pm$



стандартная ошибка среднего. Изменения амплитуды мю-ритма были проанализированы во всех экспериментальных ситуациях относительно друг друга и по отношению к УЗВ с помощью дисперсионного анализа ANOVA с повторными измерениями (*repeated measures*) с факторами СИТУАЦИЯ (2 уровня), ЛОКУС (уровни: 11 отведений) и СИТУАЦИЯ × ЛОКУС для каждой группы отдельно. С целью оценки эффектов изменений мощности мю-ритма в каждом из 11 локусов ЭЭГ был использован метод априорных контрастов (оценка *F*-распределения). Для оценки особенностей ИР у детей с РАС определяли влияние межсубъектного фактора ГРУППА (два уровня: дети с РАС и группа сравнения) и внутрисубъектного фактора ЛОКУС (11 отведений ЭЭГ) по схеме 2 × 11. Для расчета статистической значимости различий ИР в привязке к каждому из 11 отведений ЭЭГ использовали метод линейных контрастов. Статистически значимыми считали различия при  $p < 0,05$  и  $p < 0,01$ .

### Результаты исследования

Были определены показатели индивидуально определенного мю-ритма у детей исследуемых групп. Среднее значение пиковой частоты индивидуально определенного мю-ритма для нормотипичных детей составило  $9,3 \pm 0,2$ , а для детей с РАС —  $10,0 \pm 0,3$  Гц. Распределение показателей не отличалось от нормального (критерий Шапиро–Уилка). Применение Т-критерия Стьюдента значимых различий пиковой частоты мю-ритма у детей двух групп не выявило. Среднее значение пиковой частоты индивидуально определенного мю-ритма для всей совокупности испытуемых составило  $9,5 \pm 0,2$ , нижней границы частотного диапазона мю-ритма —  $8,1 \pm 0,2$ , верхней границы —  $11,1 \pm 0,2$  Гц.

Дисперсионный анализ *repeated measures* ANOVA позволил выявить влияние факторов СИТУАЦИЯ, ЛОКУС и их взаимодействия на показатели амплитуды мю-ритма ЭЭГ. В табл. 1 представлены результаты анализа изменений амплитуды ЭЭГ в частотном диапазоне мю-ритма в трех упомянутых выше ситуациях: «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия», «Выполнение действия» относительно ситуации УЗВ с учетом локуса отведения для группы нормотипичных детей. На амплитуду ЭЭГ в диапазоне мю-ритма значимо влияют факторы СИТУАЦИЯ и ЛОКУС, а также их взаимодействие. Как показано на рис. 1 у детей контрольной группы амплитуда ЭЭГ в диапазоне мю-ритма статистически значимо снижается в трех исследуемых экспериментальных ситуациях во всех отведениях, за исключением локусов F7 и F8 (метод априорных контрастов).

Таблица 1

**Результаты дисперсионного анализа изменений мощности ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в ситуациях «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия» и «Выполнение действия» относительно исходной записи в условиях устойчивого зрительного внимания (УЗВ) у типично развивающихся детей**

Сравниваемые ситуации	СИТУАЦИЯ		ЛОКУС		СИТУАЦИЯ × ЛОКУС	
	$F_{1.32}$	$p$	$F_{10.320}$	$p$	$F_{10.320}$	$P$
«Наблюдение мнимого действия» и УЗВ	10,77	0,003	18,72	< 0,001	6,05	< 0,001
«Наблюдение реального действия» и УЗВ	23,15	< 0,001	18,11	< 0,001	6,89	< 0,001
«Выполнение действия» и УЗВ	23,19	< 0,001	18,36	< 0,001	12,27	< 0,001



В табл. 2 представлены результаты анализа *repeated measures* ANOVA изменений амплитуды ЭЭГ в частотном диапазоне мю-ритма в трех описанных выше ситуациях для группы детей с РАС. Для всех экспериментальных ситуаций выявлено значимое влияние фактора СИТУАЦИЯ и ЛОКУС. Метод априорных контрастов показал, что у детей с РАС амплитуда ЭЭГ в диапазоне мю-ритма во всех экспериментальных ситуациях значительно снижается в большинстве локусов (рис. 2). Влияния взаимодействия факторов СИТУАЦИЯ ЛОКУС во всех сравниваемых ситуациях не имели значимого эффекта.

Таблица 2

**Результаты дисперсионного анализа изменений мощности ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в ситуациях «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия» и «Выполнение действия» относительно исходной записи в условиях устойчивого зрительного внимания (УЗВ) для детей с РАС**

Сравниваемые ситуации	СИТУАЦИЯ		ЛОКУС		СИТУАЦИЯ × ЛОКУС	
	$F_{1,18}$	$p$	$F_{10,150}$	$p$	$F_{10,150}$	$P$
«Наблюдение мнимого действия» и УЗВ	9,72	0,006	24,2	< 0,001	0,41	0,94
«Наблюдение реального действия» и УЗВ	5,53	0,03	27,52	< 0,001	0,69	0,74
«Выполнение действия» и УЗВ	7	0,02	21,71	< 0,001	0,81	0,62

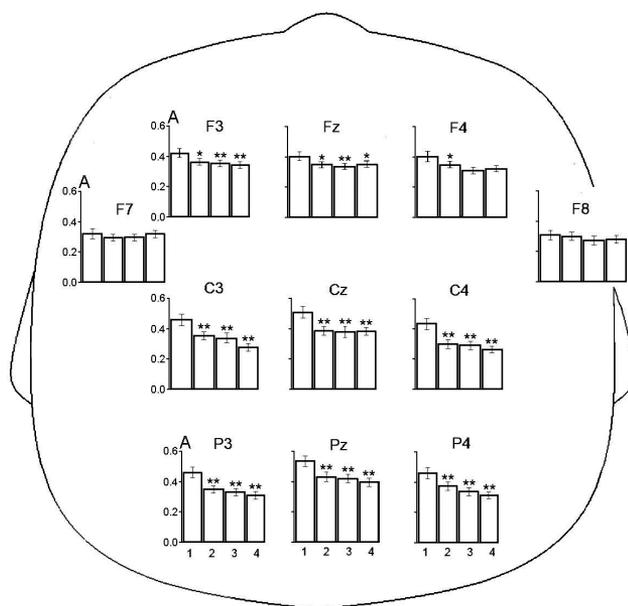


Рис. 1. Амплитуда ЭЭГ (A, lg мкВ) в диапазоне мю-ритма в ситуациях устойчивого зрительного внимания (1), наблюдения мнимого действия (2), наблюдения реального действия (3) и выполнения самостоятельного действия (4) у типично развивающихся детей.

Представлены средние значения ± стандартная ошибка среднего: звездочками отмечены случаи достоверных различий между исходной ситуацией (1) и ситуацией наблюдения и выполнения движений (2,3,4), выявленные методом априорных контрастов («\*» —  $p < 0.05$ , «\*\*» —  $p < 0.01$ )

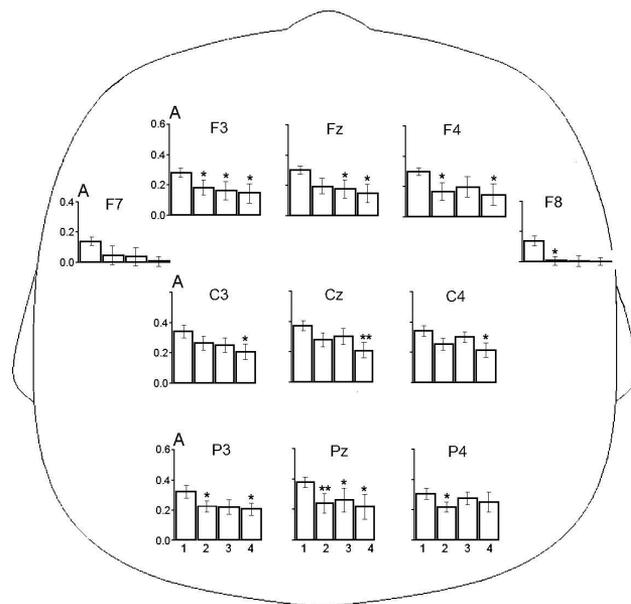


Рис. 2. Амплитуда ЭЭГ (A, lg мкВ) в диапазоне мю-ритма в ситуациях устойчивого зрительного внимания (1), наблюдения мнимого действия (2), наблюдения реального действия (3) и выполнения самостоятельного действия (4) у детей с РАС. Остальные обозначения как на рис. 1

Для сравнения изменений мю-ритма ЭЭГ у исследуемых группа детей в ситуациях «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия» и «Выполнение действия» был проведен дисперсионный анализ ИР с учетом факторов ГРУППА (нормотипичные дети и дети с РАС), ЛОКУС и их взаимодействия (табл. 3). Выявлено значимое влияние взаимодействия факторов ГРУППА × ЛОКУС на ИР-2 и ИР-3, а также значимое влияние фактора ЛОКУС на ИР-3.

На рис. 3 представлены диаграммы ИР ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в ситуациях «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия», «Выполнение действия» относительно УЗВ у детей исследуемых групп. Дальнейший анализ методом линейных контрастов выявил значимые различия в показателях ИР-2 в отведении С4. Как видно из рис. 3, в данном локусе у детей с РАС обнаружена меньшая степень десинхронизации мю-ритма по сравнению с группой сравнения в ситуации «Наблюдение реального действия».

Таблица 3

**Результаты дисперсионного анализа индексов реактивности ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в зависимости от факторов ГРУППА (нормотипичные дети и дети с РАС) и ЛОКУС (11 отведений ЭЭГ)**

Индексы реактивности	ГРУППА		ЛОКУС		ГРУППА ЛОКУС	
	$F_{1,49}$	$p$	$F_{10,480}$	$P$	$F_{10,480}$	$P$
ИР-1	0,004	0,95	1,17	0,31	2,19	0,02
ИР-2	0,07	0,79	1,08	0,37	3,42	<0,001
ИР-3	0,25	0,62	3,04	<0,001	3,85	<0,001

Примечание: ИР-1, ИР-2, ИР-3 — индексы реактивности для ситуаций «Наблюдение мнимого действия», «Наблюдение реального действия», «Выполнение действия» соответственно.

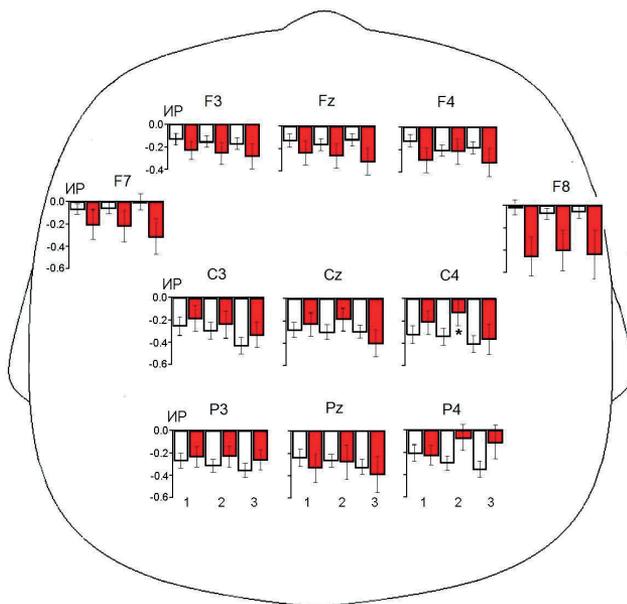


Рис. 3. Индексы реактивности ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в группах нормотипичных детей (белые столбцы) и детей с РАС (красные столбцы) в условиях наблюдения мнимого действия (1), наблюдения реального действия (2) и собственного выполнения действия (3) относительно ситуации устойчивого зрительного внимания. Остальные обозначения как на рис. 1

### Обсуждение результатов исследования

У типично развивающихся детей дошкольного возраста и у их сверстников с РАС в ситуациях наблюдения за мнимым и реальным действием, а также при выполнении ребенком самостоятельного действия было выявлено значимое падение амплитуды мю-ритма ЭЭГ относительно базового уровня, определенного в ситуации УЗВ. Выявленная десинхронизация мю-ритма при выполнении действия и наблюдения за действием у нормотипичных детей соответствует результатам работ других авторов [16; 20; 29; 32]. Обнаруженное снижение амплитуды мю-ритма в указанных ситуациях у детей с РАС также согласуется с наблюдениями ряда исследователей [19; 33]. Поскольку десинхронизацию мю-ритма рассматривают как отражение активации ЗСМ [5; 21], можно заключить, что в наших экспериментальных ситуациях, которые включали игровой компонент и, предположительно, сопровождались эмоциональным вовлечением испытуемых, ЗСМ не только нормотипичных детей, но и детей с РАС оказалась способна к активации. Однако паттерн ЭЭГ-реакций двух групп детей существенно различался.

Прежде всего надо отметить у детей с РАС большее снижение амплитуды ЭЭГ в частотном диапазоне мю-ритма в отведении F7 и, особенно, F8 во всех анализируемых ситуациях по сравнению с детьми группы сравнения (см. рис. 1 и 2). Такая десинхронизация данного ритма указывает на повышенную активацию нейронных сетей. Отведения F7 и F8 расположены над нижними лобными извилинами левого и правого полушарий [27]. Как уже отмечалось, применение ФМРТ ранее выявило у испытуемых с РАС гиперактивацию правой нижней лобной извилины при наблюдении за эмоциональными стимулами. Вслед за другими авторами [17], выявленную гиперактивацию участков лобной коры можно рас-



ценить как свидетельство того, что детям с РАС требуется вовлечение дополнительных нервных ресурсов для восприятия стимулов в эмоциональных ситуациях.

В то же время в условиях наблюдения за реальным действием у нормотипичных детей по сравнению с группой РАС отмечается значимо большая десинхронизация ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в центральных отведениях. Различия достигают статистически значимого уровня в отведении С4 правого полушария (см. рис 3). Данное отведение расположено над постцентральной извилиной [27]. В этой области неокортекса, как предполагают [14], находится часть нейронных сетей ЗСМ, отвечающих за представление собственных и чужих действий. Большая реактивность мю-ритма у детей группы сравнения при наблюдении за реальным действием отражает, вероятно, большую активацию ЗСМ, которая позволяет им в реальных жизненных условиях лучше распознавать намерения окружающих. Меньшая десинхронизация мю-ритма в центральных отведениях неокортекса у группы РАС в указанной экспериментальной ситуации может свидетельствовать о менее выраженной реакции ЗСМ на целенаправленные действия других людей.

Нельзя также исключить и другого объяснения меньшего подавления мю-ритма у детей с РАС при наблюдении за реальным действием. Недавно была выдвинута гипотеза о том, что мю-ритм отражает работу воротного механизма передачи информации в развивающейся нервной системе ребенка [28]. Эта гипотеза предполагает, что если снижение мощности мю-ритма указывает на облегчение двигательных процессов (например, при выполнении действия), то увеличение мощности мю-ритма свидетельствует, что двигательные процессы заторможены (например, для предотвращения имитации наблюдаемого действия). Таким образом, динамика амплитуды мю-ритма отражает баланс активации и торможения процессов, лежащих в основе запуска или остановки физических действий. Можно предположить, что детям с РАС, которые наблюдали за действиями взрослого в первых двух экспериментальных ситуациях, было сложнее удерживаться, чем нормотипичным детям, от того, чтобы только наблюдать, а не столкнуть машинку самостоятельно.

Выявленные особенности реактивности ЭЭГ у детей с РАС важны для понимания нарушений социального поведения у детей с данными расстройствами развития, а также могут быть использованы в коррекционной работе, в том числе при проведении сеансов биологической обратной связи по ЭЭГ.

## Выводы

1. У нормотипичных детей дошкольного возраста и детей с РАС выявлена десинхронизация мощности ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в центральных, фронтальных и теменных отведениях в условиях наблюдения мнимого действия, реального действия и при выполнении ребенком самостоятельного действия. Это указывает на активацию ЗСМ при наблюдении за действиями окружающих, как у группы нормы, так и у детей с РАС. При этом паттерн ЭЭГ-реакций двух групп детей существенно различался.

2. У детей с РАС в трех экспериментальных ситуациях наблюдалась бо́льшая, по сравнению с нормотипичными детьми, десинхронизация мю-ритма в областях нижних лобных извилин левого и правого полушарий. Выявленная гиперактивация участков лобной коры указывает на необходимость вовлечения дополнительных нервных ресурсов при восприятии стимулов в эмоциональных ситуациях.

3. В условиях наблюдения реального действия у детей с РАС в правом центральном отведении отмечается значимо меньшая десинхронизация мю-ритма по сравнению с группой типично развивающихся детей.



## Литература

1. Божкова Е.Д., Баландина О.В., Коновалов А.А. Расстройства аутистического спектра: современное состояние проблемы (обзор) // Современные технологии в медицине. 2020. Том 12. № 2. С. 111–120. DOI:10.17691/stm2020.12.2.14
2. Бронников В.А., Григорьева М.И., Вайтулевицис Н.Г., Серебрякова В.Ю. Ранняя помощь в системе комплексного сопровождения детей с РАС и их семей в Пермском крае // Аутизм и нарушения развития 2022. Том 20. № 1. С. 20–28. DOI:10.17759/autdd.2022200103
3. Духанина О.С. Применение метода видеомоделирования при формировании социальных навыков у ребенка с РАС // Аутизм и нарушения развития. 2023. Том 21. № 3. С. 54–61.
4. Кубасова Т.С. Программы сопровождения детей с РАС и нарушениями развития, реализуемые в Государственном Дарвиновском музее // Аутизм и нарушения развития. 2022. Том 20. № 2. С. 13–19. DOI:10.17759/autdd.2022200202
5. Ларионова Е.В. Гарах Ж.В., Зайцева Ю.С. Мю-ритм в современных исследованиях: теоретические и методологические аспекты // Журн. высш. нервн. деят. 2022. Том 72. № 1. С. 11–35.
6. Лебедева Н.Н., Зуфман А.И., Мальцев В.Ю. Система зеркальных нейронов мозга: ключ к обучению, формированию личности и пониманию чужого сознания // Успехи физиологических наук. 2017. Том 48. № 4. С. 16–28.
7. Лебедева Н.Н., Буркитбаев С.Е., Каримова Е.Д. Активация зеркальной системы мозга зависит от способа предъявления стимулов: непосредственно экспериментатором или как видеоролик // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2020. Том 70. № 4. С. 460–472.
8. Морозов С.А., Морозова С.С., Тарасова Н.В., Чигрина С.Г. Исследование отношений внутри семьи, имеющей ребенка с аутизмом, и ее отношений с социальным окружением // Аутизм и нарушения развития. 2023. Том 21. № 1. С. 86–93. DOI:10.17759/autdd.2023210110
9. Михайлова А.А., Орехова Л.С., Дягилева Ю.О., Мухтаримова Т.И., Павленко В.Б. 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. Том 70. № 3. С. 423–433.
10. Павленко В.Б., Орехова Л.С., Португальская А.А., Михайлова А.А. Становление просоциального поведения в раннем детстве и его нейрофизиологические механизмы // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2023. Том 73. № 2. С. 193–213.
11. Павленко В.Б., Кайда А.И., Клишков В.Н., Михайлова А.А., Орехова Л.С., Португальская А.А. Особенности реактивности  $\mu$ -ритма ЭЭГ у детей с расстройствами аутистического спектра в ситуациях помогающего поведения // Вестник РГМУ. 2023. Том 2. С. 26–32.
12. Пахтусова Н.А., Акмаев В.А., Некрасова О.С. Комплексный подход в сопровождении ребенка с расстройством аутистического спектра на примере клинического случая // Аутизм и нарушения развития 2023. Том 21. № 2. С. 42–49. DOI:10.17759/autdd.2023210206
13. Строганова Т.А., Орехова Е.В., Галюта И.А. Нейронные механизмы нарушений ориентировки внимания у детей с расстройством аутистического спектра // Экспериментальная психология. 2015. Том 8. № 3. С. 7–23. DOI:10.17759/exppsy.2015080302
14. Bonini L., Rotunno C., Arcuri E., Gallese V. Mirror neurons 30 years later: implications and applications // Trends Cogn Sci. 2022. Vol. 26. № 9. P. 767–781.
15. Buard I., Kronberg E., Steinmetz S., Hepburn S., Rojas D.C. Neuromagnetic Beta-Band Oscillations during Motor Imitation in Youth with Autism // Autism Research and Treatment. 2018. Vol. 2018. Article 9035793. DOI:10.1155/2018/9035793
16. Cannon E.N., Simpson E.A., Fox N.A., Vanderwert R.E., Woodward A.L., Ferrari P.F. Relations between infants' emerging reach-grasp competence and event-related desynchronization in EEG // Dev. Sci. 2016. Vol. 19. № 1. P. 50–62.
17. Chan M.M.Y., Han Y.M.Y. Differential mirror neuron system (MNS) activation during action observation with and without social-emotional components in autism: a meta-analysis of neuroimaging studies // Mol Autism. 2020. Vol. 11. №1. Article 72. DOI:10.1186/s13229-020-00374-x
18. Essler S., Becher T., Pletti C., Gniewosz B., Paulus M. Longitudinal evidence that infants develop their imitation abilities by being imitated // Current biology. 2023. Vol. 33. № 21. P. 4674–4678.
19. Fan Y.T., Decety J., Yang C.Y., Liu J.L., Cheng Y. Unbroken mirror neurons in autism spectrum disorders // J Child Psychol Psychiatry. 2010. Vol. 51. № 9. P. 981–988. DOI:10.1111/j.1469-7610.2010.02269.x



20. Filippi C., Cannon E.N., Fox N., Thorpe S., Ferrari P.F., Woodward A. Motor system activation predicts goal imitation in 7-month-old infants // *Psychol Sci.* 2016. Vol. 27. № 5. P. 675–684.
21. Fox N.A., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H., Bowman L.C., Cannon E.N., Vanderwert R.E., Ferrari P.F., Ijzendoorn M.H. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis // *Psychol Bull.* 2016. Vol. 142. № 3. P. 291–313.
22. Heyes C., Catmur C. What Happened to Mirror Neurons? // *Perspect Psychol Sci.* 2022. Vol. 17. № 1. P. 153–168. DOI:10.1177/1745691621990638
23. Hofsten C., Uhlig H., Adell M., Kochukhova O. How children with autism look at events // *Research in Autism Spectrum Disorders.* 2022. Vol. 3. № 2009. P. 556–569.
24. Kemmerer D. What modulates the Mirror Neuron System during action observation?: Multiple factors involving the action, the actor, the observer, the relationship between actor and observer, and the context // *Progr Neurobiol.* 2021. Vol. 205. Article 102128. DOI:10.1016/j.pneurobio.2021.102128
25. Khalil R., Richard T., Thomas B., Ahmed A.M., Ahmed A.K. Social decision making in autism: On the impact of mirror neurons, motor control, and imitative behaviors *CNS* // *Neurosci Ther.* 2018. Vol. 24. P. 669–676. DOI:10.1111/cns.13001
26. Kilroy E., Ring P., Hossain A., Nalbach A., Butera C., Harrison L., Jayashankar A., Vigen C., Aziz-Zadeh L., Cermak S.A. Motor performance, praxis, and social skills in autism spectrum disorder and developmental coordination disorder // *Autism Res.* 2022. Vol. 15. № 9. P. 1649–1664. DOI:10.1002/aur.2774
27. Koessler L., Maillard L., Benhadid A., Vignal J.P., Felblinger J., Vespignani H., Braun M. Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10-10 system // *Neuroimage.* 2009. Vol. 46. № 1. P. 64–72. DOI:10.1016/j.neuroimage.2009.02.006
28. Köster M., Meyer M. Down and up! Does the mu rhythm index a gating mechanism in the developing motor system? // *Dev Cogn Neurosci.* 2023. Vol. 60. Article 101239. DOI:10.1016/j.dcn.2023.101239
29. Marshall P.J., Meltzoff A.N. Neural mirroring systems: Exploring the EEG mu rhythm in human infancy // *Dev Cogn Neurosci.* 2011. Vol. 1. P. 110–123.
30. Nyström P., Ljunghammar T., Rosander K., Hofsten C. Using mu rhythm desynchronization to measure mirror neuron activity in infants // *Developmental Science.* 2011. Vol. 14. P. 327–335.
31. Oberman L.M., Hubbard E.M., McCleery J.P., Altschuler E.L., Ramachandran V.S., Pineda J.A. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders // *Cognitive Brain Research.* 2005. Vol. 24. № 2. P. 190–198.
32. Saby J.N., Meltzoff A.N., Marshall P.J. Infants' somatotopic neural responses to seeing human actions: I've got you under my skin // *PLoS One.* 2013. Vol. 8. № 10. Article e77905. DOI:10.1371/journal.pone.0077905
33. Sotoodeh M.S., Taheri-Torbati H., Sohrabi M., Ghoshuni M. Perception of biological motions is preserved in people with autism spectrum disorder: electrophysiological and behavioural evidences // *J Intellect Disabil Res.* 2019. Vol. 63. № 1. P. 72–84. DOI:10.1111/jir.12565
34. Thorpe S.G., Cannon E.N., Fox N.A. Spectral and source structural development of mu and alpha rhythms from infancy through adulthood // *Clin. Neurophysiol.* 2016. Vol. 127. № 1. P. 254–269.
35. Wadsworth H.M., Maximo J.O., Donnelly R.J., Kana R.K. Action simulation and mirroring in children with autism spectrum disorders // *Behav Brain Res.* 2018. Vol. 2. № 341. P. 1–8. DOI:10.1016/j.bbr.2017.12.012
36. Warreyn P., Ruyschaert L., Wiersema R., Handl A., Pattyn G., Roeyers H. Infants' mu suppression during the observation of real and mimicked goal-directed actions // *Developmental Science.* 2013. Vol. 16. № 2. P. 173–185.
37. Williams J.H.G., Whiten A., Suddendorf T., Perrett D.I. Imitation, mirror neurons and autism // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2001. Vol. 25. P. 287–295.
38. Yates L., Hobson H. Continuing to look in the mirror: A review of neuroscientific evidence for the broken mirror hypothesis, EP-M model and STORM model of autism spectrum conditions // *Autism.* 2020. Vol. 24. № 8. P. 1945–1959. DOI:10.1177/1362361320936945

## References

1. Bozhkova E.D., Balandina O.V., Kononov A.A. Rasstroistva autisticheskogo spektra: sovremennoe sostoyanie problemy (obzor) [Autism spectrum disorders: the current state of the problem (review)]. *Sovremennye tekhnologii v meditsine [Modern technologies in medicine]*, 2020. Vol. 12, no. 2, pp. 111–120. DOI:10.17691/stm2020.12.2.14 (In Russ.).



2. Bronnikov V.A., Grigorieva M.I., Vaitulevichius N.G., Serebryakova V.Yu. Early assistance in the system of comprehensive support for children with ASD and their families in the Perm region. *Autism and developmental disorders*, 2022. Vol. 20, no. 1, pp. 20–28. DOI:10.17759/autdd.2022200103 (In Russ.).
3. Dukhanina O.S. Application of the video modeling method in the formation of social skills in a child with ASD. *Autism and developmental disorders*. 2023. Vol. 21, no. 3, pp. 54–61. (In Russ.).
4. Kubasova T.S. Programs for supporting children with ASD and developmental disorders, implemented at the State Darwin Museum. *Autism and Developmental Disorders*, 2022. Vol. 20, no. 2, pp. 13–19. DOI:10.17759/autdd.2022200202 (In Russ.).
5. Larionova E.V. Garakh Zh.V., Zaitseva Yu.S. Myu-ritm v sovremennykh issledovaniyakh: teoreticheskie i metodologicheskie aspekty [Mu-rhythm in modern research: theoretical and methodological aspects]. *Zhurn. vyssh. nervn. deyat. [Journal of higher nervous activity]*, 2022. Vol. 72, no. 1, pp. 11–35. (In Russ.).
6. Lebedeva N.N., Zufman A.I., Mal'tsev V.Yu. Sistema zerkal'nykh neironov mozga: klyuch k obucheniyu, formirovaniyu lichnosti i ponimaniyu chuzhogo soznaniya [System of mirror neurons of the brain: the key to learning, personality formation and understanding of someone else's consciousness]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk [Successes of physiological Sciences]*, 2017. Vol. 48, no. 4, pp. 16–28. (In Russ.).
7. Lebedeva N.N., Burkitbaev S.E., Karimova E.D. Aktivatsiya zerkal'noi sistemy mozga zavisit ot sposoba pred'yavleniya stimulov: neposredstvenno eksperimentatorom ili kak videorolik [Activation of the mirror system of the brain depends on the method of presentation of stimuli: directly by the experimenter or as a video]. *Zhurn. vyssh. nervn. deyat. im. I.P. Pavlova [Journal. higher. nervous. act. named after I.P. Pavlov]*, 2020. Vol. 70, no. 4, pp. 460–472. (In Russ.).
8. Morozov S.A., Morozova S.S., Tarasova N.V., Chigrina S.G. Study of relationships within a family with a child with autism and its relationships with the social environment. *Autism and Developmental Disorders*, 2023. Vol. 21, no. 1, pp. 86–93. DOI:10.17759/autdd.2023210110 (In Russ.).
9. Mikhailova A.A., Orekhova L.S., Dyagileva Yu.O., Mukhtarimova T.I., Pavlenko V.B. Reaktivnost' myu-ritma EEG pri nablyudenii i vypolnenii deistvii u detei rannego vozrasta, imeyushchikh raznyi uroven' razvitiya retseptivnoi rechi [Reactivity of the EEG mu-rhythm during observation and performance of actions in young children with different levels of receptive speech development]. *Zhurn. vyssh. nerv. deyat. im. I.P. Pavlova [Journal. higher. nervous. act. named after I.P. Pavlov]*, 2020. Vol. 70, no. 3, pp. 423–433. (In Russ.).
10. Pavlenko V.B., Orekhova L.S., Portugal'skaya A.A., Mikhailova A.A. Stanovlenie prosotsial'nogo povedeniya v rannem detstve i ego neurofiziologicheskie mekhanizmy. *Zhurn. vyssh. nerv. deyat. im. I.P. Pavlova [Journal. higher. nervous. act. named after I.P. Pavlov]*, 2023. Vol. 73, no. 2, pp. 193–213. (In Russ.).
11. Pavlenko V.B., Kaida A.I., Klinkov V.N., Mikhailova A.A., Orekhova L.S., Portugal'skaya A.A. Osobennosti reaktivnosti  $\mu$ -ritma EEG u detei s rasstroistvami autisticheskogo spektra v situatsiyakh pomogayushchego povedeniya [Features of the reactivity of the  $\mu$ -rhythm of the EEG in children with autism spectrum disorders in situations of helping behavior]. *Vestnik RGMU [Bulletin of RSMU]*, 2023. Vol. 2, pp. 26–32. (In Russ.).
12. Pakhtusova N.A., Akmaev V.A., Nekrasova O.S. An integrated approach to accompanying a child with autism spectrum disorder using the example of a clinical case. *Autism and Developmental Disorders*, 2023. Vol. 21, no. 2, pp. 42–49. DOI:10.17759/autdd.2023210206 (In Russ.).
13. Stroganova T.A., Orekhova E.V., Galyuta I.A. Neironnye mekhanizmy narusheniya orientirovki vnimaniya u detei s rasstroistvom autisticheskogo spektra [Neural mechanisms of attention orientation disorders in children with autism spectrum disorder]. *Eksperimental'naya psikhologiya [Experimental psychology]*, 2015. Vol. 8, no. 3, pp. 7–23. DOI:10.17759/exppsy.2015080302 (In Russ.).
14. Bonini L., Rotunno C., Arcuri E., Gallese V. Mirror neurons 30 years later: implications and applications. *Trends Cogn Sci*, 2022. Vol. 26, no. 9, pp. 767–781.
15. Buard I., Kronberg E., Steinmetz S., Hepburn S., Rojas D.C. Neuromagnetic Beta-Band Oscillations during Motor Imitation in Youth with Autism. *Autism Research and Treatment*, 2018. Vol. 2018, Article 9035793. DOI:10.1155/2018/9035793
16. Cannon E.N., Simpson E.A., Fox N.A., Vanderwert R.E., Woodward A.L., Ferrari P.F. Relations between infants' emerging reach-grasp competence and event-related desynchronization in EEG. *Dev. Sci.*, 2016. Vol. 19, no. 1, pp. 50–62.



17. Chan M.M.Y., Han Y.M.Y. Differential mirror neuron system (MNS) activation during action observation with and without social-emotional components in autism: a meta-analysis of neuroimaging studies. *Mol Autism*, 2020. Vol. 11, no.1, pp. 72. DOI:10.1186/s13229-020-00374-x
18. Essler S., Becher T., Pletti C., Gniewosz B. Paulus M. Longitudinal evidence that infants develop their imitation abilities by being imitated. *Current biology*, 2023. Vol. 33, no. 21, pp. 4674–4678.
19. Fan Y.T., Decety J., Yang C.Y., Liu J.L., Cheng Y. Unbroken mirror neurons in autism spectrum disorders. *J Child Psychol Psychiatry*, 2010. Vol. 51, no. 9, pp. 981–988. DOI:10.1111/j.1469-7610.2010.02269.x
20. Filippi C., Cannon E.N., Fox N., Thorpe S., Ferrari P.F., Woodward A. Motor system activation predicts goal imitation in 7-month-old infants. *Psychol Sci*, 2016. Vol. 27, no. 5, pp. 675–684.
21. Fox N.A., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H., Bowman L.C., Cannon E.N., Vanderwert R.E., Ferrari P.F., IJzendoorn M.H. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychol Bull*, 2016. Vol. 142, no. 3, pp. 291–313.
22. Heyes C., Catmur C. What Happened to Mirror Neurons? *Perspect Psychol Sci*, 2022. Vol. 17, no. 1, pp. 153–168. DOI:10.1177/1745691621990638
23. Hofsten C., Uhlig H., Adell M., Kochukhova O. How children with autism look at events. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 2022. Vol. 3, no. 2009, pp. 556–569.
24. Kemmerer D. What modulates the Mirror Neuron System during action observation?: Multiple factors involving the action, the actor, the observer, the relationship between actor and observer, and the context. *Progr Neurobiol*, 2021. Vol. 205, Article 102128. DOI:10.1016/j.pneurobio.2021.102128
25. Khalil R., Richard T., Thomas B., Ahmed A.M., Ahmed A.K. Social decision making in autism: On the impact of mirror neurons, motor control, and imitative behaviors CNS. *Neurosci Ther*, 2018. Vol. 24, pp. 669–676. DOI:10.1111/cns.13001
26. Kilroy E., Ring P., Hossain A., Nalbach A., Butera C., Harrison L., Jayashankar A., Vigen C., Aziz-Zadeh L., Cermak S.A. Motor performance, praxis, and social skills in autism spectrum disorder and developmental coordination disorder. *Autism Res*, 2022. Vol. 15, no. 9, pp. 1649–1664. DOI:10.1002/aur.2774
27. Koessler L., Maillard L., Benhadid A., Vignal J.P., Felblinger J., Vespignani H., Braun M. Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10–10 system. *Neuroimage*, 2009. Vol. 46, no. 1, pp. 64–72. DOI:10.1016/j.neuroimage.2009.02.006
28. Köster M., Meyer M. Down and up! Does the mu rhythm index a gating mechanism in the developing motor system? *Dev Cogn Neurosci*, 2023. Vol. 60, Article 101239. DOI:10.1016/j.dcn.2023.101239
29. Marshall P.J., Meltzoff A.N. Neural mirroring systems: Exploring the EEG mu rhythm in human infancy. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2011. Vol. 1, pp. 110–123.
30. Nyström P., Ljunghammar T., Rosander K., Hofsten C. Using mu rhythm desynchronization to measure mirror neuron activity in infants. *Developmental Science*, 2011. Vol. 14, pp. 327–335.
31. Oberman L.M., Hubbard E.M., McCleery J.P., Altschuler E.L., Ramachandran V.S., Pineda J.A. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*, 2005. Vol. 24, no. 2, pp. 190–198.
32. Saby J.N., Meltzoff A.N., Marshall P.J. Infants' somatotopic neural responses to seeing human actions: I've got you under my skin. *PLoS One*, 2013. Vol. 8, no. 10, pp. e77905. DOI:10.1371/journal.pone.0077905
33. Sotoodeh M.S., Taheri-Torbati H., Sohrabi M., Ghoshuni M. Perception of biological motions is preserved in people with autism spectrum disorder: electrophysiological and behavioural evidences. *J Intellect Disabil Res*, 2019. Vol. 63, no. 1, pp. 72–84. DOI:10.1111/jir.12565
34. Thorpe S.G., Cannon E.N., Fox N.A. Spectral and source structural development of mu and alpha rhythms from infancy through adulthood. *Clin. Neurophysiol.*, 2016. Vol. 127, no. 1, pp. 254–269.
35. Wadsworth H.M., Maximo J.O., Donnelly R.J., Kana R.K. Action simulation and mirroring in children with autism spectrum disorders. *Behav Brain Res*, 2018. Vol. 2, no. 341, pp. 1–8. DOI:10.1016/j.bbr.2017.12.012
36. Warreyn P., Ruyschaert L., Wiersema R., Handl A., Pattyn G., Roeyers H. Infants' mu suppression during the observation of real and mimicked goal-directed actions. *Developmental Science*, 2013. Vol. 16, no. 2, pp. 173–185.
37. Williams J.H.G., Whiten A., Suddendorf T., Perrett D.I. Imitation, mirror neurons and autism. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 2001. Vol. 25, pp. 287–295.



38. Yates L., Hobson H. Continuing to look in the mirror: A review of neuroscientific evidence for the broken mirror hypothesis, EP-M model and STORM model of autism spectrum conditions. *Autism*, 2020. Vol. 24, no. 8, pp. 1945–1959. DOI:10.1177/1362361320936945

### **Информация об авторах**

*Португальская Арина Андреевна*, младший научный сотрудник кафедры физиологии человека и животных и биофизики, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8240>, e-mail: [a.portugalskaya@gmail.com](mailto:a.portugalskaya@gmail.com)

*Кайда Анна Ивановна*, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник кафедры общей психологии и психофизиологии, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0208-8638>, e-mail: [kaydaanna@gmail.com](mailto:kaydaanna@gmail.com)

*Орехова Лилия Сергеевна*, ведущий специалист Научно-клинического центра «Технологии здоровья и реабилитации», Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-641X>, e-mail: [lili\\_psy@mail.ru](mailto:lili_psy@mail.ru)

*Михайлова Анна Андреевна*, кандидат биологических наук, научный сотрудник кафедры физиологии человека и животных и биофизики, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-9147>, e-mail: [anna.kulenkova@gmail.com](mailto:anna.kulenkova@gmail.com)

*Павленко Владимир Борисович*, доктор биологических наук, заведующий кафедрой общей психологии и психофизиологии, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»), г. Симферополь, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3311-3688>, e-mail: [vpav55@gmail.com](mailto:vpav55@gmail.com)

### **Information about the authors**

*Arina A. Portugalskaya*, Junior Researcher, Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8240>, e-mail: [a.portugalskaya@gmail.com](mailto:a.portugalskaya@gmail.com)

*Anna I. Kaida*, Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher, Department of General Psychology and Psychophysiology, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0208-8638>, e-mail: [kaydaanna@gmail.com](mailto:kaydaanna@gmail.com)

*Lilia S. Orekhova*, Leading Specialist, Scientific and Clinical Center “Health and Rehabilitation Technologies”, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-641X>, e-mail: [lili\\_psy@mail.ru](mailto:lili_psy@mail.ru)

*Anna A. Mikhailova*, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Department of Human and Animal Physiology and Biophysics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-9147>, e-mail: [anna.kulenkova@gmail.com](mailto:anna.kulenkova@gmail.com)

*Vladimir B. Pavlenko*, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of the Department of General Psychology and Psychophysiology, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3311-3688>, e-mail: [vpav55@gmail.com](mailto:vpav55@gmail.com)

Получена 14.07.2023

Received 14.07.2023

Принята в печать 01.09.2024

Accepted 01.09.2024