

СЕНСОМОТОРНЫЕ РИТМЫ ЭЭГ У ДЕТЕЙ С РАССТРОЙСТВАМИ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

А. И. Кайда [✉], Е. В. Эйсмонт, А. А. Михайлова, В. Б. Павленко

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

В настоящее время одной из причин нарушения социального взаимодействия у детей с расстройствами аутистического спектра (РАС) считают дисфункцию системы зеркальных нейронов (СЗН), ответственной за подражание, понимание намерений и эмоций других людей. Индикаторами активации СЗН принято считать десинхронизацию сенсомоторных ритмов. Целью работы было проанализировать особенности реактивности μ -ритма в индивидуально определенном частотном диапазоне и β -ритма ЭЭГ у детей с РАС, по сравнению с нормально развивающимися детьми, при осуществлении самостоятельных движений, наблюдении, имитации и слуховом восприятии аналогичных движений, выполняемых другим человеком. В исследовании приняли участие дети-правши 5–10 лет с РАС ($n = 10$) и нормально развивающиеся ($n = 10$). При наблюдении движений у детей с РАС десинхронизация β -ритма была более выражена, различия достигали уровня статистической значимости в локусе P4 ($p = 0,03$). В ситуации имитации движений значимые различия в индексах реактивности μ -ритма ЭЭГ выявлены в отведении C3 ($p = 0,03$). При слуховом восприятии движений значимые различия зарегистрированы в диапазоне как μ -ритма (локусы F3 и Fz ($p = 0,02$), F4 ($p = 0,04$), Cz ($p = 0,009$)), так и β -ритма (локусы Fz ($p = 0,01$), F4 ($p = 0,02$)). В данных ситуациях у детей с РАС происходила синхронизация сенсомоторных ритмов, в отличие от нормально развивающихся детей, демонстрировавших десинхронизацию. Предполагается, что обнаруженные особенности являются следствием нарушения функционирования СЗН и антизеркальной системы мозга. Полученные данные могут быть использованы при разработке протоколов тренировок биологической обратной связи по ЭЭГ для детей с РАС.

Ключевые слова: дети, аутизм, ЭЭГ, μ -ритм, β -ритм, система зеркальных нейронов

Финансирование: исследование выполнено в рамках поддерживаемого федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» гранта № ВГ08/2020.

Вклад авторов: А. И. Кайда — набор и обработка данных, написание статьи; Е. В. Эйсмонт — планирование исследования, набор данных, написание статьи; А. А. Михайлова — обработка данных, написание статьи; В. Б. Павленко — планирование исследования, написание статьи.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (протокол № 6 от 04 июня 2020 г.). Получено добровольное информированное согласие родителей на участие детей в эксперименте.

✉ **Для корреспонденции:** Анна Ивановна Кайда
ул. Ангарская, д. 38, г. Симферополь, 295001; kaydaanna@gmail.com

Статья получена: 19.08.2020 **Статья принята к печати:** 11.09.2020 **Опубликована онлайн:** 22.09.2020

DOI: 10.24075/vrgmu.2020.055

EEG SENSORIMOTOR RHYTHMS IN CHILDREN WITH AUTISM SPECTRUM DISORDERS

Kaida AI [✉], Eismont EV, Mikhailova AA, Pavlenko VB

Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

One of the currently assumed causes of impaired social interaction exhibited by children with autism spectrum disorders (ASD) is dysfunction of the mirror neuron system (MNS), which is responsible for imitation, understanding the intentions and emotions of other people. Desynchronization of sensorimotor rhythms is considered to be the indicator of MNS activation. This study aimed to analyze the specific patterns of reactivity of the μ -rhythm in an individually determined frequency range and β -rhythm on the EEG in children with ASD during independent movements, observation, imitation and auditory perception of similar movements performed by another person. The data collected were compared to those describing normally developing children. The study involved right-handed children with ASD aged 5–10 ($n = 10$) and normally developing children ($n = 10$). In the independent movements exercise, β -rhythm desynchronization was more pronounced in children with ASD, with difference becoming significant in the P4 locus ($p = 0.03$). In the movements imitation exercise, the groups showed significant differences in the EEG μ -rhythm in the locus C3 ($p = 0.03$). Auditory perception of movements revealed significant differences in the ranges of both μ -rhythm (loci F3 and Fz ($p = 0.02$), F4 ($p = 0.04$), Cz ($p = 0.009$)) and β -rhythm (loci Fz ($p = 0.01$), F4 ($p = 0.02$)). In these situations, children with ASD exhibited synchronization of sensorimotor rhythms, while normally developing children showed desynchronization. The assumption is that the specific patterns revealed are the consequences of disruption of functions of MNS and anti-mirror system. The data obtained can be used in development of EEG biofeedback training protocols for children with ASD.

Keywords: children, autism, EEG, μ -rhythm, beta-rhythm, mirror neuron system

Funding: the study received a grant #VG08/2020 supported by Vernadsky Crimean Federal University.

Author contribution: Kaida AI — data collection and processing, article authoring; Eismont EV — research planning, data collection, article authoring; Mikhailova AA — data processing, article authoring; Pavlenko VB — research planning, article authoring.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Vernadsky Crimean Federal University ethics committee (Minutes #6 of June 04, 2020). Parents of the children submitted the informed consent forms allowing their children to participate in the experiment.

✉ **Correspondence should be addressed:** Anna I. Kaida
Angarskaya, 38, Simferopol, 295001; kaydaanna@gmail.com

Received: 19.08.2020 **Accepted:** 11.09.2020 **Published online:** 22.09.2020

DOI: 10.24075/brsmu.2020.055

Расстройства аутистического спектра (РАС) представляют собой группу комплексных нарушений психического развития, проявляющих большую гетерогенность в отношении симптоматики и признаков. Нарушения характеризуются трудностями в социальном взаимодействии, освоении

речи, а также наличием ограниченного повторяющегося поведения. РАС проявляется в повышенной нервозности, смущении, избегании зрительного контакта [1]. Показатели распространенности аутизма в мире варьируют в зависимости от диагностических критериев, страны,

региона [2]. В среднем, по данным Всемирной организации здравоохранения, один ребенок из 160 детей в мире страдает РАС.

Следует отметить, что дефицит социальных навыков — один из основных признаков данного расстройства, сопровождающего человека на протяжении всей жизни. Многочисленные результаты свидетельствуют о том, что трудности при социальном взаимодействии у детей с аутизмом связаны с дисфункцией областей мозга, являющихся частью системы зеркальных нейронов (СЗН) [3]. Первоначально зеркальные нейроны считали вовлеченными в восприятие и понимание действий, однако они играют важную роль и в когнитивных процессах более высокого порядка, таких как имитация, эмпатия, освоение языка и речи. Функционирование данной системы лежит также в основе понимания чужого сознания (theory of mind), т. е. способности человека делать вывод о намерениях, желаниях и эмоциях, которые служат причиной действий другого индивидуума [4]. Установлено, что нарушение данной способности у детей с РАС приводит к трудностям при социальном взаимодействии [5].

При исследовании СЗН человека с помощью метода ЭЭГ используют такие параметры, как реактивность сенсомоторных μ - и β -ритмов [6]. Установлено, что амплитуда сенсомоторных ритмов (СМР) снижается при выполнении, наблюдении, имитации, представлении и слуховом восприятии движений [7].

Известно, что у детей с РАС подавление μ -ритма можно наблюдать во время самостоятельных движений, но оно отсутствует или слабо выражено при наблюдении за аналогичными действиями другого человека [8, 9]. У взрослых волонтеров с высокими показателями по шкале «Коэффициент аутизма» (Autism-Spectrum Quotient (AQ) scale) также обнаружена более слабая десинхронизация μ -ритма при наблюдении действий, в сравнении с людьми с низким уровнем по данной шкале [10]. В другом исследовании у взрослых с высокими показателями по шкале «Коэффициент аутизма» не выявлена десинхронизация ни в μ -, ни в β -диапазонах при наблюдении действий [11]. Таким образом, низкая активация СЗН, на которую указывает слабая десинхронизация сенсомоторных ритмов, может быть основной причиной наблюдаемого дефицита эмпатии и имитационного поведения у людей с РАС [8], что подтверждает исследование, продемонстрировавшее связь между поражением основных областей СЗН левого полушария и нарушением имитации [12]. Однако в ряде исследований не было найдено значимых различий в реактивности μ -ритма у детей и взрослых с РАС по сравнению со здоровыми сверстниками [13]. Результаты недавно проведенного исследования продемонстрировали, что, хотя подавление μ -ритма у детей с РАС отличалось от такового у детей контрольной группы при наблюдении определенных типов действий, в среднем различия не были значимыми. Тем не менее авторы отмечают, что у детей с аутизмом было замедлено время реакции при распознавании действий [14]. Таким образом, имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные об особенностях реактивности μ -ритма у детей с РАС неоднозначны, а исследования, касающиеся сенсомоторного β -ритма у детей с данным нарушением, единичны. Кроме того, реактивность СМР у детей с РАС исследуют преимущественно при выполнении и наблюдении движений. В связи с этим интерес представляет исследование данных ритмов не только при выполнении и наблюдении действий, но и в других

ситуациях, например, таких, как имитация и слуховое узнавание действий.

Модуляцию μ -ритма используют в качестве тренируемого параметра при проведении тренировок биологической обратной связи по характеристикам ЭЭГ (ЭЭГ-БОС) у детей с РАС [15]. После прохождения БОС-терапии у детей с аутизмом обнаруживали более выраженную десинхронизацию μ -ритма при выполнении и наблюдении действий. Было отмечено также значительное положительное влияние БОС на социальное поведение у таких детей: им удавалось лучше распознавать эмоции и действия других людей [16, 17].

Однако при исследовании параметров ЭЭГ и применении БОС-терапии у детей с РАС не учитывали индивидуальные диапазоны реактивности μ -ритма. Известно, что степень десинхронизации μ -ритма может быть неверно оценена из-за частичного наложения на него затылочного α -ритма, находящегося в близком частотном диапазоне [13]. В связи с этим рекомендуется определение индивидуальной полосы μ -ритма, обнаруживаемой при совершении ребенком самостоятельных движений.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы был анализ паттернов реактивности μ -ритма в индивидуально определенном частотном диапазоне и β -ритма ЭЭГ у детей с РАС и нормально развивающихся детей при осуществлении самостоятельных движений с помощью компьютерной мыши, наблюдении, имитации и слуховом восприятии аналогичных движений, выполняемых другим человеком.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика выборки

Исследование проводили на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского.

В исследовании приняли участие 20 детей-правшей в возрасте 5–10 лет (средний возраст составил $7,4 \pm 0,5$ года), из них 10 детей с РАС (9 мальчиков и 1 девочка) и 10 нормально развивающихся детей, соответствующих испытуемым по возрасту и полу (контрольная группа). Группу детей с РАС составили дети с диагнозом «детский аутизм» (F84.0 по МКБ-10) или «расстройства аутистического спектра с нарушением интеллектуального развития и с нарушениями функционального языка» (6A02.3 по МКБ-11). Критерии включения детей в контрольную группу: достаточный уровень когнитивного развития (IQ от 90 до 120 баллов по тесту Векслера в вариантах WPPSI и WISC); отсутствие хронических заболеваний нервной системы. Критерии включения для детей обеих групп: наличие нормального (или скорректированного до нормального) уровня зрения и слуха; предпочтение правой руки в работе с компьютерной мышью.

Регистрация ЭЭГ

Регистрацию ЭЭГ осуществляли с помощью 19-канального электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-3» («Нейрософт»; Россия). ЭЭГ-потенциалы отводили монополярно по системе 10–20. Областью интересов в данном исследовании были фронтальные, центральные и парietальные регионы неокортекса (локусы F3, F4, Fz, C3, C4, Cz, P3, P4, Pz). Референтным электродом

служили объединенные контакты, закрепленные на мочках ушей. Частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли соответственно 1,5 и 35 Гц, частота оцифровки ЭЭГ-сигналов — 250 Гц.

Запись ЭЭГ производили во время выполнения испытуемыми серии заданий длительностью по 30 с каждое. Все дети, принимавшие участие в исследовании, понимали инструкцию и правильно выполняли задания. Последовательность заданий была следующая:

1) фиксация взгляда на видеоизображении компьютерной мыши, расположенной на столе перед экспериментатором (ФОН 1);

2) выполнение самостоятельных движений компьютерной мышью с произвольной скоростью (ДВ.1);

3) фиксация взгляда на видеоизображении компьютерной мыши, расположенной на столе перед экспериментатором (ФОН 2);

4) наблюдение за движениями руки экспериментатора с компьютерной мышью (НАБЛ);

5) фиксация взгляда на видеоизображении компьютерной мыши, расположенной на столе перед экспериментатором (ФОН 3);

6) выполнение самостоятельных движений компьютерной мышью с произвольной скоростью (ДВ.2);

7) имитация детьми движений, выполняемых экспериментатором с компьютерной мышью (ИМИТ);

8) испытуемый сидит неподвижно с закрытыми глазами (ГЗ);

9) испытуемый слышит (без предварительной инструкции) характерные звуки трения о поверхность стола во время движений мышью, которые совершает экспериментатор (СЛУХ).

Для обработки данных использовали компьютерную программу WinEEG («Мицар»; Россия). Артефакты удаляли с помощью встроенного в приложение метода независимых компонент с дополнительным визуальным контролем качества записи. Отрезки ЭЭГ подвергали быстрому преобразованию Фурье с эпохами анализа по 4 с и перекрытием эпох 50%.

Для каждого этапа рассчитывали среднее значение амплитуды ЭЭГ в диапазоне μ - и β -ритмов (15–25 Гц). Диапазон μ -ритма для каждого испытуемого определяли индивидуально в отведении СЗ при совершении самостоятельных движений правой рукой. Полный частотный диапазон μ -ритма (6–13 Гц) разбивали на отрезки по 1 Гц. Два прилегающих друг к другу отрезка с максимальной десинхронизацией относительно фона далее рассматривали в качестве индивидуального частотного диапазона [18]. Диапазон β -ритма был нами выбран в пределах 15–25 Гц в связи с тем, что в данном частотном диапазоне происходит подавление амплитуды в сенсомоторных областях при выполнении действий [19]. С целью нормализации распределения значения амплитуд логарифмировали.

Индексы реактивности (ИР) сенсомоторных ритмов рассчитывали по общепринятой схеме [20], в соответствии с формулой $ИР = \ln (B/A)$, где B — амплитуда сенсомоторного ритма в основной ситуации, A — амплитуда сенсомоторного ритма в исходной ситуации сравнения. В ситуациях выполнения самостоятельных движений (ДВ.1) и наблюдения движений (НАБЛ) расчет ИР сенсомоторных ритмов производили относительно ситуации фиксации взгляда на изображении неподвижной компьютерной мыши (ФОН 1 и ФОН 2 соответственно). В ситуации имитации движений (ИМИТ) ИР рассчитывали относительно

предшествующей ситуации выполнения самостоятельных движений (ДВ.2), а в ситуации СЛУХ — относительно ситуации спокойного бодрствования с закрытыми глазами (ГЗ). Положительные значения индекса реактивности соответствовали синхронизации сенсомоторного ритма, а отрицательные — десинхронизации.

Статистическая обработка данных

Статистический анализ полученных данных проводили с применением программы STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc.; США). Различия в частоте индивидуально определенного μ -ритма между группами оценивали с помощью U -критерия Манна–Уитни. Различия в амплитуде и индексах реактивности сенсомоторных ритмов оценивали с использованием дисперсионного анализа с повторными измерениями (repeated measures ANOVA). Оценивали влияние межсубъектного фактора — ГРУППА (два уровня: дети с РАС и контрольная группа) и внутрисубъектного фактора — ЛОКУС (девять отведений ЭЭГ) по схеме 2×9 . Для расчета статистической значимости различий в анализируемых параметрах сенсомоторных ритмов в привязке к каждому из девяти отведений ЭЭГ использовали метод априорных контрастов (оценка F -распределения). Для описания распределений, отличных от нормального (значения границ индивидуального диапазона μ -ритма), применяли медиану и интерквартильный размах. В случаях нормального распределения данных (логарифмированные значения амплитуд и индексов реактивности) использовали среднее и стандартную ошибку среднего. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$, но в связи с небольшим объемом выборки учитывали и тенденции к наличию различий ($p < 0,10$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Амплитудно-частотные показатели сенсомоторных ритмов

В группе нормально развивающихся детей значения медианы нижней границы индивидуального диапазона μ -ритма составили 9,3 Гц (8,5; 10). В группе детей с РАС значения медианы нижней границы индивидуального диапазона μ -ритма составили 8,6 Гц (7; 9,5). Несмотря на то что медианы нижней и верхней границ индивидуального μ -ритма у детей с РАС снижены, различия по данным показателям между группами, оцененные с помощью U -критерия Манна–Уитни, не достигали уровня статистической значимости ($p = 0,57$).

При дисперсионном анализе амплитуды сенсомоторных ритмов в ситуации выполнения самостоятельных движений не выявлено значимых влияний исследуемых факторов: μ -ритм — ГРУППА ($F_{1,18} = 0,15$; $p = 0,7$) и ЛОКУС \times ГРУППА ($F_{8,144} = 0,75$; $p = 0,7$), β -ритм \times ГРУППА ($F_{1,18} = 0,35$; $p = 0,6$) и ЛОКУС \times ГРУППА ($F_{8,144} = 0,72$; $p = 0,7$). В данной экспериментальной ситуации выявлено значимое влияние лишь фактора ЛОКУС для μ -ритмов ($F_{8,144} = 6,11$; $p < 0,001$) и β -ритмов ($F_{8,144} = 14,09$; $p < 0,001$). Таким образом, амплитуда сенсомоторных ритмов при выполнении самостоятельных движений значимо не различалась у детей двух групп.

Особенности реактивности μ -ритма ЭЭГ

Результаты дисперсионного анализа различий в реактивности μ -ритма у детей с РАС и нормально

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа различий в реактивности μ -ритма у детей, развивающихся нормально и имеющих РАС

Индексы реактивности	ГРУППА		ЛОКУС		ГРУППА \times ЛОКУС	
	$F_{1,18}$	p	$F_{8,144}$	p	$F_{8,144}$	p
ИР ДВ.1	0,04	0,84	4,64	< 0,001	1,85	0,07
ИР НАБЛ	0,1	0,75	0,28	0,97	0,59	0,79
ИР ИМИТ	3,37	0,08	1,1	0,37	0,58	0,80
ИР СЛУХ	5,35	0,03	1,48	0,17	0,74	0,66

развивающихся детей представлены в табл. 1. В ситуации выполнения самостоятельных движений выявлена тенденция влияния взаимодействия факторов ЛОКУС \times ГРУППА. При дальнейшем анализе методом априорных контрастов значимых различий найдено не было. Не выявлено значимых различий в ИР μ -ритма и в ситуации наблюдения движений.

В ситуации имитации движений экспериментатора обнаружено влияние фактора ГРУППА на уровне тенденции. При анализе методом априорных контрастов различия в индексах реактивности μ -ритма ЭЭГ у двух групп детей достигали уровня статистической значимости в центральном локусе левого полушария (C3: $p = 0,03$; среднее значение и стандартная ошибка среднего для контрольной группы: $-0,08 \pm 0,06$; для группы РАС: $0,18 \pm 0,1$) (рис. 1). Представленные диаграммы демонстрируют, что при подражании движениям экспериментатора у детей с РАС можно наблюдать синхронизацию μ -ритма во всех отведениях, в отличие от нормально развивающихся сверстников, демонстрирующих исключительно десинхронизацию μ -ритма.

Значимое влияние фактора ГРУППА обнаружено при слуховом восприятии детьми знакомых движений с компьютерной мышью. Различия в ИР μ -ритма ЭЭГ у двух групп детей достигали уровня статистической значимости во фронтальных локусах и центральном срединном отведении (локусы F3 ($p = 0,02$; контрольная группа: $-0,06 \pm 0,06$; РАС: $0,19 \pm 0,08$) и Fz ($p = 0,02$; контрольная группа: $-0,1 \pm 0,06$; РАС: $0,16 \pm 0,08$), F4 ($p = 0,04$; контрольная группа: $-0,11 \pm 0,04$; РАС: $0,16 \pm 0,11$), Cz ($p = 0,009$; контрольная группа: $-0,02 \pm 0,05$; РАС: $0,23 \pm 0,06$)) (рис. 2). У детей с РАС в данной экспериментальной ситуации зарегистрирован рост амплитуды μ -ритма во всех отведениях, а у детей контрольной группы — преимущественно снижение амплитуды.

Особенности реактивности β -ритма ЭЭГ

Результаты дисперсионного анализа различий в реактивности β -ритма у детей двух групп представлены в табл. 2. При выполнении самостоятельных движений влияние взаимодействия факторов ЛОКУС \times ГРУППА находилось на уровне тенденции. В данной экспериментальной ситуации ИР сенсомоторного β -ритма у детей с РАС и нормально развивающихся детей значимо не различались.

При наблюдении движений компьютерной мышью, совершаемых экспериментатором, обнаружено значимое влияние взаимодействия факторов ГРУППА \times ЛОКУС. В данной экспериментальной ситуации различия в реактивности β -ритма у двух групп детей достигали уровня статистической значимости в теменном локусе правого полушария (P4: $p = 0,03$; контрольная группа: $0,03 \pm 0,03$; РАС: $-0,16 \pm 0,08$) (рис. 3). У детей с РАС была выявлена десинхронизация β -ритма, а у нормально развивающихся детей — преимущественно синхронизация, за исключением фронтальных областей, в которых зарегистрировано снижение амплитуды исследуемого ритма.

В ситуации имитации движений экспериментатора не выявлено значимых различий в ИР β -ритма у детей исследуемых групп.

При слуховом восприятии звуков, сопровождающих движения компьютерной мышью, обнаружено влияние фактора ГРУППА на уровне тенденции. Уровень статистической значимости различия в индексах реактивности β -ритма ЭЭГ у двух групп детей достигали в срединном фронтальном отведении и во фронтальном локусе правого полушария (локусы Fz ($p = 0,01$; контрольная группа: $-0,05 \pm 0,03$; РАС: $0,08 \pm 0,04$), F4 ($p = 0,02$; контрольная группа: $-0,09 \pm 0,03$; РАС: $0,08 \pm 0,06$)) (рис. 4). В ситуации слухового восприятия у детей с РАС

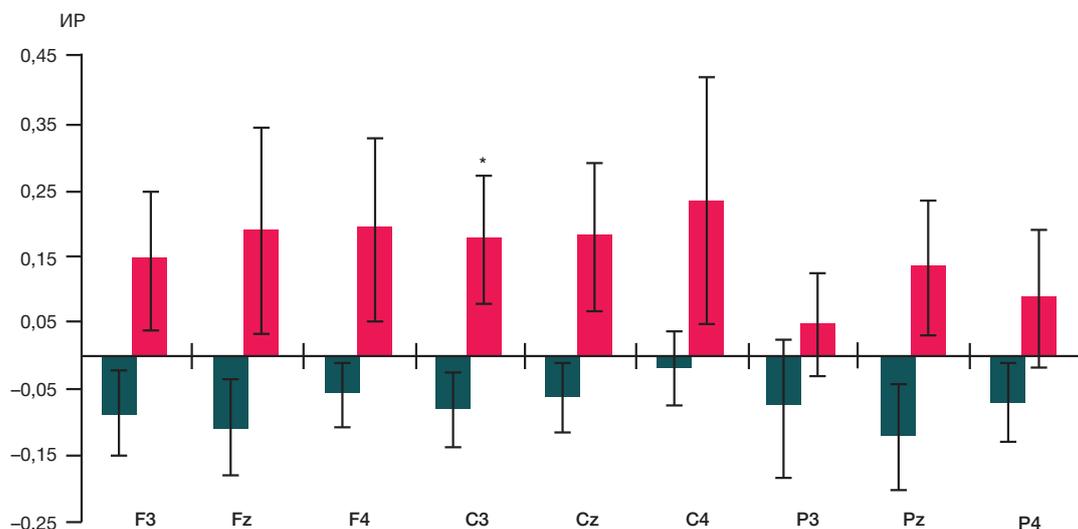


Рис. 1. Индексы реактивности (ИР) μ -ритма ЭЭГ у детей с РАС (красные столбцы) и нормально развивающихся детей (зеленые столбцы) в ситуации имитации движений экспериментатора. * — $p < 0,05$ (статистически значимые различия в индексах реактивности μ -ритма)

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа различий в реактивности β -ритма у детей, развивающихся нормально и имеющих РАС

Индексы реактивности	ГРУППА		ЛОКУС		ГРУППА \times ЛОКУС	
	$F_{1,18}$	p	$F_{8,144}$	p	$F_{8,144}$	p
ИР ДВ.1	0,39	0,54	1,79	0,08	1,92	0,06
ИР НАБЛ	1,81	0,2	0,68	0,71	2,73	0,01
ИР ИМИТ	2,93	0,1	1,01	0,43	0,4	0,92
ИР СЛУХ	4,09	0,06	0,77	0,63	0,73	0,66

обнаружена синхронизация β -ритма во всех отведениях, а у нормально развивающихся детей — десинхронизация исследуемого ритма.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о том, что частота μ -ритма в индивидуально определенном диапазоне значимо не отличается у детей с РАС по сравнению с детьми контрольной группы. Ранее на выборке здоровых испытуемых 4–15 лет нами было показано, что индивидуально определенная частота μ -ритма не зависела от возраста детей [21]. Однако, как в предыдущем, так и в настоящем исследовании, нами выявлена широкая вариативность нижней и верхней границ индивидуального частотного диапазона μ -ритма. В связи с этим мы рекомендуем при исследовании особенностей реактивности μ -ритма у детей предварительно определять его индивидуальный частотный диапазон.

При выполнении самостоятельных движений значения амплитуды сенсомоторных μ - и β -ритмов у детей с РАС не отличаются от таковых у детей, развивающихся нормально. Анализ реактивности СМР при выполнении движений относительно ситуации двигательного покоя также не показал значимых различий у детей исследуемых групп. Полученные данные подтверждают результаты других авторов, выявивших нормальную реакцию десинхронизации μ -ритма у детей с РАС при совершении самостоятельных движений [8]. Таким образом, можно говорить о том, что у детей с данным нарушением соматосенсорные области коры, обеспечивающие выполнение собственных движений, функционируют нормально.

При сравнении реактивности СМР у детей с РАС и контрольной группы выявлены различия в ситуациях наблюдения, имитации и слухового восприятия

движений. В ситуации имитации движений у детей с аутизмом происходила синхронизация μ -ритма, в отличие от нормально развивающихся сверстников, у которых зарегистрирована десинхронизация. Ранее было установлено, что у людей с аутизмом нарушены имитационные способности [22]. Найдена также связь между поражением областей СЗН левого полушария и нарушением способности человека имитировать действия [12]. Таким образом, отсутствие десинхронизации μ -ритма у детей с РАС при подражании движениям другого человека может быть связано с нарушением СЗН. Восприятие на слух при закрытых глазах знакомых движений компьютерной мышью также не сопровождалось десинхронизацией сенсомоторных μ - и β -ритмов у детей с РАС. Как известно, СЗН активируется (что сопровождается снижением амплитуды СМР) при восприятии на слух звуков, сопровождающих знакомые действия [23]. Полученные результаты еще раз подтверждают, что у детей с РАС нарушено функционирование СЗН.

В ситуации наблюдения движений у детей с РАС происходила большая десинхронизация β -ритма в теменных отведениях ЭЭГ, чем у детей контрольной группы. В исследованиях было показано, что у людей с аутизмом не происходит десинхронизация именно при наблюдении действий [8, 9]. Однако в указанных работах рассматривали μ -ритм. Обнаруженное в настоящем исследовании большее снижение амплитуды β -ритма в при наблюдении движений может быть обусловлено нарушением функционирования антизеркальной системы мозга. Установлено, что антизеркальные нейроны, обнаруженные при микроэлектродном исследовании мозга больных эпилепсией, активируются при выполнении движений и тормозятся при наблюдении за движениями других людей [24]. Известно, что торможение нейронов коры отражается в ЭЭГ в виде синхронизации β -ритма

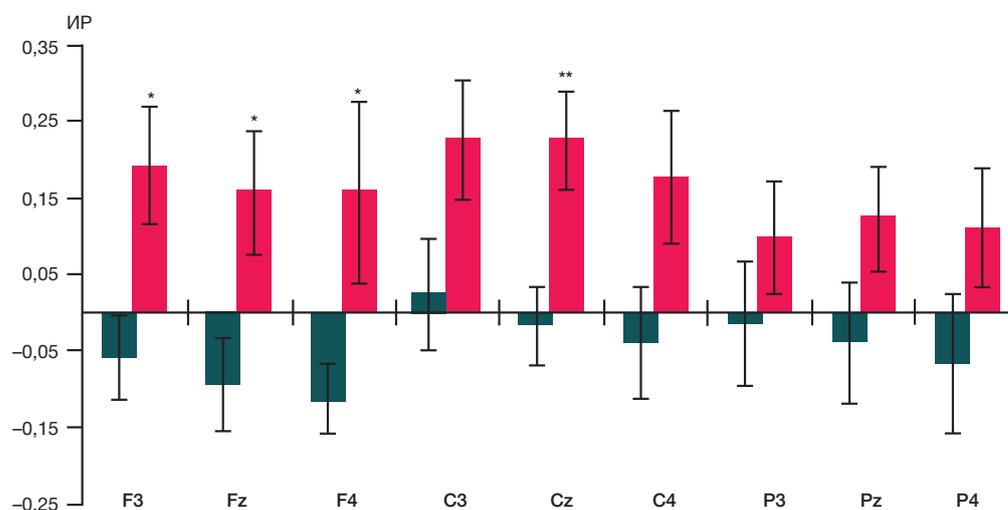


Рис. 2. Индексы реактивности (ИР) μ -ритма ЭЭГ у детей с РАС (красные столбцы) и нормально развивающихся детей (зеленые столбцы) в ситуации слухового восприятия движений. * — $p < 0,05$; ** — $p \leq 0,01$ (статистически значимые различия в индексах реактивности μ -ритма)

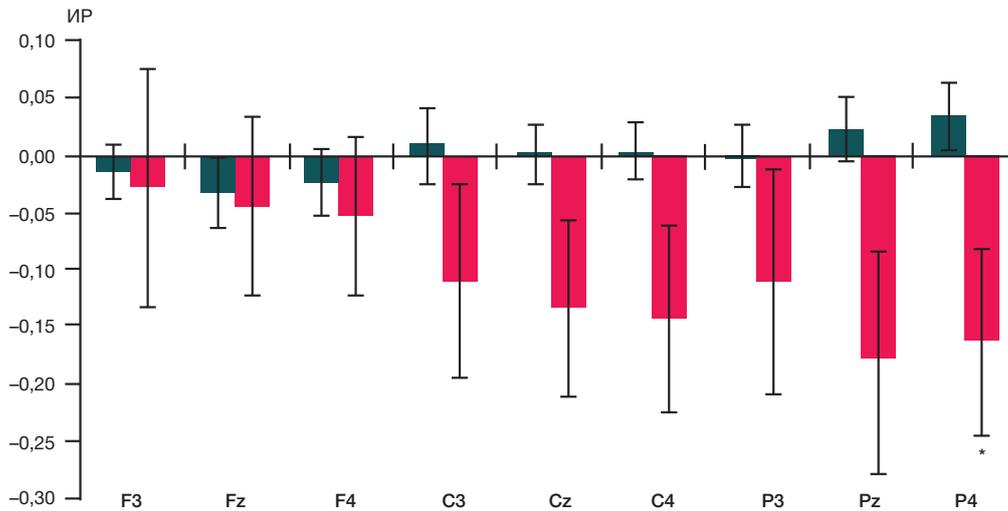


Рис. 3. Индексы реактивности (ИР) β -ритма ЭЭГ у детей с РАС (красные столбцы) и нормально развивающихся детей (зеленые столбцы) в ситуации наблюдения движений. Остальные обозначения те же, что на рис. 1

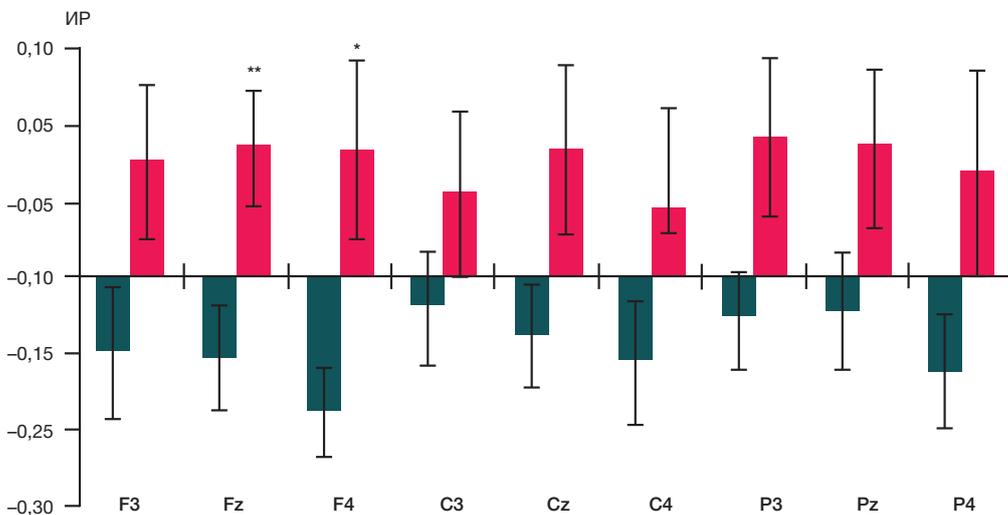


Рис. 4. Индексы реактивности (ИР) β -ритма ЭЭГ у детей с РАС (красные столбцы) и нормально развивающихся детей (зеленые столбцы) в ситуации слухового восприятия движений. Остальные обозначения те же, что на рис. 2

[25]. В исследовании с участием взрослых волонтеров обнаружена синхронизация β -ритма при наблюдении эмоционально нейтральных движений в группе людей с низким уровнем по шкале «Коэффициент аутизма», что авторы связывают с подавлением автоматического копирования действий [10]. Выдвинуто предположение, что антизеркальная система мозга играет важную роль в разграничении своих и чужих действий, а также в предотвращении непроизвольного подражания [26]. Данные функции мозга у детей с РАС нарушены, что отражалось в нашем исследовании в десинхронизации β -ритма при наблюдении действий. Также можно предположить, что дети с РАС затрачивали больше когнитивных ресурсов для обработки поступающей информации, что сопровождалось большим снижением амплитуды в β -диапазоне.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о том, что у детей с РАС не возникает десинхронизация СМР при имитации и слуховом узнавании действий, а также отсутствует большее снижение амплитуды β -ритма при наблюдении движений. Выявленные особенности могут свидетельствовать о нарушении функционирования нервной системы, в частности СЗН и антизеркальной

системы мозга. Результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности тренировок ЭЭГ-БОС с детьми, имеющими РАС.

Выводы

В результате исследования выявлены особенности реактивности СМР у детей с РАС. При имитации и слуховом узнавании движений у детей с РАС по сравнению с детьми контрольной группы выявлена синхронизация μ - и β -ритмов ЭЭГ, что может свидетельствовать о нарушении функционирования СЗН, обеспечивающей процессы подражания и нормального социального взаимодействия. При наблюдении движений у детей с РАС зарегистрировано большее снижение амплитуды сенсомоторного β -ритма, что может быть связано с нарушением активности антизеркальной системы мозга. Полученные результаты указывают на необходимость исследования реактивности как сенсомоторного μ -ритма, так и β -ритма у детей с РАС. Выявленные закономерности могут быть использованы в коррекционной работе с детьми, имеющими РАС, например с применением тренировок БОС по характеристикам сенсомоторных ритмов ЭЭГ.

Литература

- Lai MC, Lombardo MV, Baron-Cohen S. Autism. *Lancet*. 2014; 383 (9920): 896–910.
- Макушкин Е. В., Макаров И. В., Пашковский В. Э. Распространенность аутизма: подлинная и мнимая. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. 2019; 119 (2): 80–86.
- Saffin JM, Tohid H. Walk like me, talk like me. The connection between mirror neurons and autism spectrum disorder. *Neurosciences (Riyadh)*. 2016; 21 (2): 108–19.
- 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; 48 (4): 16–28.
- Andreou M, Skrimpa V. Theory of mind deficits and neurophysiological operations in autism spectrum disorders: A review. *Brain Sci*. 2020; 10 (6): 393.
- Fox NA, Bakermans-Kranenburg MJ, Yoo KH, Bowman LC, Cannon EN, Vanderwert RE, et al. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychol Bull*. 2016; 142 (3): 291–313.
- Ferrari PF, Rizzolatti G. *New frontiers in mirror neurons research*. NY: Oxford University Press, 2015; 408 p.
- Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP, Altschuler EL, Ramachandran VS, Pineda JA. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*. 2005; 24 (2): 190–98.
- Martineau J, Cochin S, Magne R, Barthelemy C. Impaired cortical activation in autistic children: Is the mirror neuron system involved? *International Journal of Psychophysiology*. 2008; 68 (1): 35–40.
- Siqi-Liu A, Harris AM, Atkinson AP, Reed CL. Dissociable processing of emotional and neutral body movements revealed by μ -alpha and beta rhythms. *Soc Cogn Affect Neurosci*. 2018; 13 (12): 1269–79.
- de Vega M, Padron I, Moreno IZ, García-Marco E, Domínguez A, Marrero H, et al. Both the mirror and the affordance systems might be impaired in adults with high autistic traits. Evidence from EEG mu and beta rhythms. *Autism Res*. 2019; 12: 1032–42.
- Binder E, Dovern A, Hesse MD, Ebke M, Karbe H, Saliger J, et al. Lesion evidence for a human mirror neuron system. *Cortex*. 2017; 90: 125–37.
- Hobson HM, Bishop DVM. The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *Review R Soc Open Sci*. 2017; 4 (3): 160662.
- Sotoodeh MS, 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; 63 (1): 72–84.
- Pineda JA, Carrasco K, Datko M, Pillen S, Schalles M. Neurofeedback training produces normalization in behavioural and electrophysiological measures of high-functioning autism. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2014; 369 (1644): 20130183.
- Friedrich EVC, Sivanathan A, Lim T, Suttie N, Louchart S, Pillen S, et al. An effective neurofeedback intervention to improve social interactions in children with autism spectrum disorder. *J Autism Dev Disord*. 2015; 45: 4084–100.
- Datko M, Pineda JA, Muller RA. Positive effects of neurofeedback on autism symptoms correlate with brain activation during imitation and observation. *Eur J Neurosci*. 2018; 47 (6): 579–91.
- Махин С. А., Кайда А. И., Эйсмонт Е. В., Михайлова А. А., Павленко В. Б.; ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», патентообладатель. Способ определения индивидуального частотного диапазона мю-ритма ЭЭГ. Патент РФ № 2702728. 09.10.2019.
- Simon S, Mukamel R. Power modulation of electroencephalogram mu and beta frequency depends on perceived level of observed actions. *Brain Behav*. 2016; 6 (8): e00494.
- Raymaekers R, Wiersema JR, Roeyers H. EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism. *Brain research*. 2009; 1304: 113–21.
- Kaida AI, Mikhailova AA, Eismont EV, Dzhapparova LL, Pavlenko VB. EEG μ -rhythm reactivity in children during imitation of biological and non-biological motion. [published online ahead of print, 2020.04.16]. *Bulletin of RSMU*. 2020. DOI: 10.24075/brsmu.2020.019.
- Bernier R, Dawson G, Webb S, Murias M. EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder. *Brain and Cognition*. 2007; 64 (3): 228–37.
- Pineda JA, Grichanik M, Williams V, Trieu M, Chang H, Keyzers C. EEG sensorimotor correlates of translating sounds into actions. *Front Neurosci*. 2013; 7: 203.
- Mukamel R, Ekstrom AD, Kaplan J, Iacoboni M, Fried I. Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology*. 2010; 20 (8): 750–56.
- Кропотов Ю. Д. Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк: Издатель Заславский Ю. А., 2010; 506 с.
- Rizzolatti G, Sinigaglia C. *Mirrors in the brain: how our minds share actions and emotions*. Oxford University Press, 2008; 242 p.

References

- Lai MC, Lombardo MV, Baron-Cohen S. Autism. *Lancet*. 2014; 383 (9920): 896–910.
- Makushkin EV, Makarov IV, Pashkovskiy VE. The prevalence of autism: genuine and imaginary. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2019; 119 (2): 80–86. Russian.
- Saffin JM, Tohid H. Walk like me, talk like me. The connection between mirror neurons and autism spectrum disorder. *Neurosciences (Riyadh)*. 2016; 21 (2): 108–19.
- Lebedeva NN, Zufman AI, Malcev VYu. Mirror neuron system as a key to learning, personality formation and understanding of another's mind. *Uspеhi fiziologicheskikh nauk*. 2017; 48 (4): 16–28. Russian.
- Andreou M, Skrimpa V. Theory of mind deficits and neurophysiological operations in autism spectrum disorders: A review. *Brain Sci*. 2020; 10 (6): 393.
- Fox NA, Bakermans-Kranenburg MJ, Yoo KH, Bowman LC, Cannon EN, Vanderwert RE, et al. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychol Bull*. 2016; 142 (3): 291–313.
- Ferrari PF, Rizzolatti G. *New frontiers in mirror neurons research*. NY: Oxford University Press, 2015; 408 p.
- Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP, Altschuler EL, Ramachandran VS, Pineda JA. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*. 2005; 24 (2): 190–98.
- Martineau J, Cochin S, Magne R, Barthelemy C. Impaired cortical activation in autistic children: Is the mirror neuron system involved? *International Journal of Psychophysiology*. 2008; 68 (1): 35–40.
- Siqi-Liu A, Harris AM, Atkinson AP, Reed CL. Dissociable processing of emotional and neutral body movements revealed by μ -alpha and beta rhythms. *Soc Cogn Affect Neurosci*. 2018; 13 (12): 1269–79.
- de Vega M, Padron I, Moreno IZ, García-Marco E, Domínguez A, Marrero H, et al. Both the mirror and the affordance systems might be impaired in adults with high autistic traits. Evidence from EEG mu and beta rhythms. *Autism Res*. 2019; 12: 1032–42.
- Binder E, Dovern A, Hesse MD, Ebke M, Karbe H, Saliger J, et al. Lesion evidence for a human mirror neuron system. *Cortex*. 2017; 90: 125–37.
- Hobson HM, Bishop DVM. The interpretation of mu suppression as an index of mirror neuron activity: past, present and future. *Review R Soc Open Sci*. 2017; 4 (3): 160662.
- Sotoodeh MS, 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; 63 (1): 72–84.
15. Pineda JA, Carrasco K, Datko M, Pillen S, Schalles M. Neurofeedback training produces normalization in behavioural and electrophysiological measures of high-functioning autism. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2014; 369 (1644): 20130183.
 16. Friedrich EVC, Sivanathan A, Lim T, Suttie N, Louchart S, Pillen S, et al. An effective neurofeedback intervention to improve social interactions in children with autism spectrum disorder. *J Autism Dev Disord.* 2015; 45: 4084–100.
 17. Datko M, Pineda JA, Muller RA. Positive effects of neurofeedback on autism symptoms correlate with brain activation during imitation and observation. *Eur J Neurosci.* 2018; 47 (6): 579–91.
 18. Mahin SA, Kaida AI, Eismont EV, Mikhailova AA, Pavlenko VB; FGAOU VO "Krymskij federal'nyj universitet imeni V.I. Vernadskogo", patentoobladatel'. Sposob opredelenija individual'nogo chastotnogo diapazona mju-ritma JeJeG. Patent RF # 2702728. 09.10.2019. Russian.
 19. Simon S, Mukamel R. Power modulation of electroencephalogram mu and beta frequency depends on perceived level of observed actions. *Brain Behav.* 2016; 6 (8): e00494.
 20. Raymaekers R, Wiersma JR, Roeyers H. EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism. *Brain research.* 2009; 1304: 113–21.
 21. Kaida AI, Mikhailova AA, Eismont EV, Dzhapparova LL, Pavlenko VB. EEG μ -rhythm reactivity in children during imitation of biological and non-biological motion. [published online ahead of print, 2020.04.16]. *Bulletin of RSMU.* 2020. DOI: 10.24075/brsmu.2020.019.
 22. Bernier R, Dawson G, Webb S, Murias M. EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder. *Brain and Cognition.* 2007; 64 (3): 228–37.
 23. Pineda JA, Grichanik M, Williams V, Trieu M, Chang H, Keyzers C. EEG sensorimotor correlates of translating sounds into actions. *Front Neurosci.* 2013; 7: 203.
 24. Mukamel R, Ekstrom AD, Kaplan J, Iacoboni M, Fried I. Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology.* 2010; 20 (8): 750–56.
 25. Kropotov YuD. Kolichestvennaja JeJeG, kognitivnye vyzvannye potencialy mozga cheloveka i nejroterapija. Doneck: Izdatel' Zaslavkij Ju.A., 2010; 506 s. Russian.
 26. Rizzolatti G, Sinigaglia C. *Mirrors in the brain: how our minds share actions and emotions.* Oxford University Press, 2008; 242 p.