На правах рукописи



Липатов Владимир Алексеевич

Сенсомоторные ритмы у детей 3–10 лет: возрастные характеристики и связь с речевым развитием

5.12.2. Междисциплинарные исследования мозга

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

федеральная территория «Сириус»

2026

Работа выполнена в автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус».

Научный руководитель:

Ребрейкина Анна Борисовна

кандидат биологических наук

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус»

Защита состоится «14» декабря 2026 года в 12:00 на заседании диссертационного совета НТУ.5.12.2.31 на базе АНОО ВО «Университет «Сириус» по адресу: 354340, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., д.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АНОО ВО «Университет «Сириус»: https://siriusuniversity.ru/sveden/science/obyavleniya-o-zashchitakh/

Автореферат разослан «13» ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат психологических наук Карпова Н. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Сенсомоторные ритмы представляют собой биоэлектрическую активность головного мозга, как правило регистрируемую с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) или магнитоэнцефалографии (МЭГ) в проекции сенсомоторной коры в частотных диапазонах альфа (8–13 Гц) и бета (13–30 Гц) ритма. Они ассоциируются с работой сенсомоторной нейронной сети (Cheyne, 2013; Larionova et al., 2022; Saltuklaroglu et al., 2018), а их наиболее выраженная модуляция (преимущественно подавление) наблюдается в условиях, связанных с двигательной активностью (Larionova et al., 2022). Сенсомоторные ритмы рассматривают как потенциальные нейрофизиологические маркеры развития (Аликина и др., 2016; Cheyne, 2013), индикаторы формирования моторной нейронной сети (Marshall et al., 2011); их также исследуют при атипичном нейрокогнитивном развитии, например у людей с РАС (Bernier et al., 2007). Кроме того, современные данные свидетельствуют о том, что активность сенсомоторных ритмов отражает не только процессы, связанные с выполнением движений, но и механизмы сенсомоторной интеграции, вовлеченные в процессы восприятия и продукции речи. В частности, накапливается все больше доказательств того, что процесс восприятия речи опирается на обширную мультисенсорную сеть, включающую сенсомоторные области головного мозга (Franken et al., 2022; Stroganova et al., 2022).

Однако исследования сенсомоторных ритмов преимущественно проводились на взрослых, а немногочисленные исследования детей сосредоточены на младенческом и детском возрасте до 3 лет (Fox et al., 2016), работы же, включающие более старших детей, единичны. В то же время широко известно, что биоэлектрическая активность головного мозга продолжает активно формироваться и развиваться в раннем дошкольном и младшем школьном возрасте, когда ритмы головного мозга, в том числе сенсомоторные, характеризуются высокой индивидуальной вариабельностью и функциональной незрелостью биоэлектрической активности мозга (Аликина и др., 2016; Berchicci et al., 2011). Таким образом, сенсомоторные ритмы у детей в возрасте от 3 до 10 лет и их связь с языковыми процессами остаются малоизученными.

Степень разработанности темы исследования

На сегодняшний день известно, что у детей сенсомоторные ритмы наблюдаются уже в первые месяцы жизни. Считается, что общая закономерность возрастных изменений сенсомоторных ритмов в альфа-диапазоне заключается в увеличении частоты (Кайда и др., 2019; Mitiureva et al., 2023). Однако вопрос о возрастной динамике модуляции сенсомоторных ритмов остается дискуссионным: некоторые исследования показывают усиление модуляции с возрастом, тогда как другие такой динамики не обнаруживают (Eismont et al., 2017; Lepage & Théoret, 2006; Trevarrow et al., 2019). Другими недостаточно изученными вопросами являются возрастные особенности топографии и латерализации сенсомоторной активности. Было показано, что у детей 4–14 лет манипуляция правой рукой вызывает выраженное подавление мю-ритма в контралатеральном (левом) полушарии, тогда как подавление в ипсилатеральном (правом) полушарии незначимо (Eismont et al., 2017). Однако особенности латерализации при движении левой рукой и возрастная динамика асимметрии не изучались. Большая часть исследований детей рассматривала только альфа-диапазон сенсомоторных ритмов, и лишь немногие исследования рассматривали бета-диапазон; более того, ЭЭГ-исследования ранее анализировали только центральные каналы (C3, C4, Cz) (Галкин и др., 2016; Lipatov et al., 2026). В то же время ряд авторов в целом ставят под сомнение (Thorpe et al., 2016) само существование бета-диапазона

сенсомоторных ритмов у младенцев и детей раннего возраста. В исследовании С. Торпа и его коллег значимый уровень связанной с событием десинхронизации в бета-диапазоне (15–25 Гц) наблюдался только в группе взрослых и отсутствовал у младенцев и у 4-летних детей. В целом, несмотря на обширный массив исследований сенсомоторной активности, вопрос о динамике развития десинхронизации сенсомоторных ритмов в обоих частотных диапазонах остаётся предметом дискуссий. Кроме того, экспериментальные условия для активации сенсомоторных ритмов на данный момент крайне разнородны и сильно различаются в зависимости от экспериментальной задачи и целевой аудитории исследования (Cuevas et al., 2014). Актуальным остается вопрос поиска наиболее универсальных экспериментальных условий, подходящих как для использования в широком возрастном диапазоне – от младенчества до старости, так и у людей с ограниченными возможностями и с нарушением развития. Представляются перспективными такие дизайны исследований, как наблюдение видеозаписей с движением (Cuevas et al., 2014) или пассивное сгибание и разгибание кисти участника (Mitiureva et al., 2023), поскольку они не требуют от участника исследования произвольного моторного контроля и активных действий. Тем не менее использование данных дизайнов требует дальнейших исследований, так как данные о модуляции сенсомоторных ритмов при просмотре видео с движением противоречивы, а второй подход пока был использован на небольшой выборке детей.

Исследования взрослых, направленные на изучение связи сенсомоторных ритмов и механизмов восприятия речи (Michaelis et al., 2021; Mkrtychian et al., 2021), показали вовлеченность сенсомоторной системы в восприятие слов, связанных с действием, а также в восприятие речи в условиях шума, то есть в условиях, при которых речь труднее различить (Michaelis et al., 2021; Saltuklaroglu et al., 2018). В то же время у детей в исследовании К. Патцвальд и ее с коллег (Patzwald et al., 2020) обнаружили, что более выраженная десинхронизация мю-ритма наблюдалась у детей с большим рецептивным словарным запасом глаголов, а А.А. Михайлова с коллегами (Mikhailova et al., 2021) показали, что дети с более высоким уровнем понимания речи демонстрировали более выраженную десинхронизацию мю-ритма по сравнению с детьми со средним уровнем понимания речи. Однако ограниченный пул существующих исследований, изучающих связь между сенсомоторными ритмами и речью у детей, в основном сосредоточен на младенчестве и раннем детстве (первые три года жизни) и преимущественно рассматривает только альфа-диапазон (Lipatov et al., 2025; Mikhailova et al., 2021).

Цель и задачи исследования

Исследование возрастных особенностей сенсомоторных ритмов у детей 3–10 лет при пассивном движении кистью руки (ПСР) и при просмотре видеозаписи с движением рук (НВР), а также связи сенсомоторных ритмов с речевым развитием.

Задачи исследования

1. Изучение модуляции сенсомоторных ритмов и их топографических особенностей у детей в условии пассивного сгибания и разгибания кисти и при просмотре видеозаписи с движением рук:
    - в продольном лонгитюдном исследовании с повторным тестированием через 1 год;
    - в поперечном лонгитюдном исследовании в возрастных группах 3–4, 5–6 и 7–8 лет.
2. Изучение межполушарной латерализации сенсомоторных ритмов при пассивном сгибании и разгибании правой и левой кистей рук.
3. Изучение связи сенсомоторных ритмов и речевого развития у детей.

Объект исследования

Сенсомоторные ритмы

Предмет исследования

Параметры сенсомоторных ритмов в различных экспериментальных условиях, их возрастная динамика и связь с речевым развитием.

Гипотезы исследования

1. Модуляция сенсомоторных ритмов увеличивается с возрастом у детей 3–10 лет.
2. С возрастом происходит усиление межполушарной латерализации сенсомоторной активности при манипуляциях с правой или левой рукой.
3. Модуляция сенсомоторных ритмов связана с речевым развитием у детей 3–10 лет.

Научная новизна

Впервые проведено смешанное лонгитюдное исследование альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов у детей возрастом 3–10 лет.

Впервые выявлена синхронизация сенсомоторных ритмов в ответ на наблюдение движения рук на видео у дошкольников и младших школьников.

Впервые выявлена связь сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне с речевым развитием (преимущественно с его рецептивным компонентом) у детей возрастом 3–10 лет.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования заключается в углублении понимания возрастных изменений сенсомоторных ритмов у детей возрастом 3–10 лет, когда биоэлектрическая активность мозга характеризуется высокой индивидуальной вариабельностью и функциональной незрелостью. Исследование не выявило усиления модуляции (десинхронизации) мю-ритма с возрастом в диапазоне 3–10 лет. Это позволяет утверждать, что базовые механизмы модуляции сенсомоторной активности формируются уже к трём годам и сохраняют относительную стабильность на протяжении всего дошкольного и младшего школьного возраста. Эти данные вносят вклад в понимание закономерностей созревания сенсомоторной системы, а также предполагают, что процесс созревания может иметь нелинейный характер. Полученные результаты расширяют представления о различных функциональных свойствах альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов, а также расширяют теоретическую модель «сенсомоторного основания речи», перенося её с младенческого и взрослого возраста на дошкольный и младший школьный период.

Практическая значимость работы

Полученные результаты могут быть применены в разработке неинвазивных психофизиологических методик оценки сенсомоторного развития нейротипичных детей, а также в разработке методик нейрофизиологического скрининга расстройств нервно-психического развития у детей с особенностями развития.

Методология и методы исследования

Исследование опирается на современные эмпирические данные и теоретические представления о функциональной роли сенсомоторных ритмов в системе зеркальных нейронов, сформированные в работах Дж. Риццолатти и П. Маршалла, в процессах речепроизводства и речевосприятия у взрослых – Т. Салтукларoглу и Дж. Скиппера, и у детей – В. Сало и К. Патцвальд.

Методы исследования:

1. Метод электроэнцефалографии (32-канальная система actiCHamp Plus (BrainProducts GmbH)).
2. Шкалы дошкольного языкового развития 5-й версии (Preschool Language Scales, Fifth Edition, PLS-5).
3. Экспериментальные условия, направленные на модуляцию сенсомоторных ритмов у детей: пассивное сгибание кисти руки и наблюдение видеозаписи с движениями рук.
4. Методы статистической обработки данных (дисперсионный анализ с повторными измерениями и корреляционный анализ).

Личный вклад автора

Автор работы принимал непосредственное участие в организации и проведении исследования. Самостоятельно выполнил обработку данных, а также с большой долей самостоятельности провел анализ и обсуждение полученных результатов. Диссертационная работа написана полностью самостоятельно. Автор активно участвовал в подготовке научных публикаций и докладов на конференции.

Положения, выносимые на защиту

1. Наблюдение видео с движением рук может вызывать синхронизацию в альфа-диапазоне (8–13 Гц) сенсомоторных ритмов у детей возрастом 3–10 лет, что может свидетельствовать о торможении детьми собственных движений.
2. В период с 3 до 10 лет нет выраженных возрастных изменений модуляции сенсомоторных ритмов при пассивном движении руки или наблюдении за движением рук.
3. Межполушарная латерализация десинхронизации сенсомоторных ритмов у детей возрастом 4–10 лет при пассивном движении правой и левой кистью ребенка наблюдается только в альфа-диапазоне и не усиливается с возрастом.
4. При пассивном сгибании и разгибании рук в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов десинхронизация наблюдается в обоих полушариях, а ее топография включает в себя более обширные регионы, чем в альфа-диапазоне. Отсутствие межполушарной латерализации и более обширная область модуляции в бета-диапазоне дополняют концепцию различного функционального значения сенсомоторной активности в альфа- и бета-диапазонах.
5. Индекс модуляции сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне связан с речевым развитием у детей. Чем сильнее десинхронизация, тем выше показатели речевого развития (в первую очередь его рецептивного компонента). Это свидетельствует о вовлеченности сенсомоторной системы в организацию речевых процессов у детей.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 5.12.2. Междисциплинарные исследования мозга (биологические науки) по следующему направлению исследований: п. 2 «Развитие мозга. Молекулярно-генетические основы развития когнитивных функций мозга в норме и при патологии. Нейроморфологические и нейрофизиологические основы развития когнитивных функций мозга в норме и при патологии. Критические периоды развития мозга и созревания когнитивных функций».

Степень достоверности и апробация исследования

Достоверность полученных результатов определяется использованием в работе современных нейрофизиологических методов исследования, применением адекватных методов сбора, обработки данных и статистического анализа. Материалы и результаты диссертационного исследования были представлены на научных семинарах и конференциях: Десятой

международной конференции по когнитивной науке (г. Пятигорск, 2024), 83-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы экспериментальной и клинической медицины» (г. Волгоград, 2025), на XXV съезде Физиологического общества им. И.П. Павлова (г. Москва, 2026), а также неоднократно обсуждались на семинарах Научного центра когнитивных исследований Университета «Сириус».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Липатов В.А.**, Павлова П.А., Ребрейкина А.Б., Сысоева О.В. Сенсомоторные ритмы как нейрофизиологические корреляты процессов восприятия речи в детском возрасте // Национальный психологический журнал. – 2025. – Т. 20, № 3. – С. 136–147. – DOI: 10.11621/npj.2025.0311.

2. **Lipatov V.**, Rebreikina A., Sysoeva O. Opposite modulation of sensorimotor rhythms in 3-8 years children by passive hand movement and hand movement observation // Neuroreport. – 2026. – Vol. 37, No. 6. – P. 215–221. – DOI: 10.1097/WNR.0000000000002254.

3. **Lipatov V.**, Rebreikina A., Sysoeva O. A mixed longitudinal EEG study of sensorimotor rhythm modulation and its relationship with language development in children aged 3–10 years // Brain Sci. – 2026. – Vol. 16, No. 8. – P. 880. – DOI: 10.3390/brainsci16080880.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа изложена на 112 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка сокращений и списка литературы, включающего 112 наименований. Работа иллюстрирована одной таблицей и 10 рисунками, имеет 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** раскрывается актуальность диссертационного исследования; формулируются его объект, предмет, цель и задачи; раскрываются научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость; излагаются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе «Обзор литературы»** представлен анализ современных исследований, посвящённых сенсомоторным ритмам головного мозга и их роли в моторных, когнитивных и речевых процессах. Раскрывается история изучения сенсомоторных ритмов — от первого описания роландического ритма при наблюдении движения (Gastaut & Bert, 1954) и обнаружения его бета-компонента (диапазона) (Tiihonen et al., 1989) до выявления сенсомоторных ритмов уже у младенцев (Stroganova et al., 1999). Показано, что сенсомоторные ритмы включают два функционально различных компонента (диапазона): альфа-диапазон (8–13 Гц), локализованный преимущественно в постцентральной соматосенсорной коре и отражающий сенсомоторную функцию, и бета-диапазон (13–30 Гц), связанный с прецентральной моторной корой и моторным контролем (Hari & Salmelin, 1997; Angelini et al., 2018).

Рассматриваются возрастные характеристики сенсомоторных ритмов: скачкообразный рост их частоты на первом году жизни и последующая стабилизация к подростковому возрасту (Berchicci et al., 2011; Demas et al., 2020), а также общее снижение амплитуды ЭЭГ с возрастом (Berchicci et al., 2011). Отмечается, что подавляющее большинство исследований сосредоточено на младенцах и детях до 3 лет (Fox et al., 2016), тогда как дошкольный и младший школьный возраст, характеризующийся высокой вариабельностью и незрелостью биоэлектрической активности мозга, мало представлен в исследовательском поле, при этом бета-диапазон сенсомоторных ритмов исследован существенно меньше альфа-диапазона, а само его наличие у детей раннего возраста ставится под сомнение рядом авторов (Thorpe et al., 2016). Отдельно

обозначен пробел в изучении возрастной динамики топографии и межполушарной латерализации сенсомоторной десинхронизации, поскольку межполушарная латерализация у детей возрастом 3–4 года исследовалась только при движении правой рукой (Eismont et al., 2017).

Анализируется ряд экспериментальных условий активации сенсомоторных ритмов — наблюдение действия и его выполнение. Показано, что на модуляцию мю-ритма при наблюдении влияют целенаправленность действия, знакомство с ним и способ демонстрации (вживую или на видео) (Ruysschaert et al., 2013; Cuevas et al., 2014), а также описываются нетипичные случаи модуляции мю-ритма в виде синхронизации при наблюдении движения (Köster & Meyer, 2023). Констатируется, что самостоятельное выполнение движения как экспериментальное условие вызывает наиболее выраженную десинхронизацию, однако ограничено в применении у детей с нарушениями развития, а предложенное в качестве альтернативы инклюзивное условие пассивного сгибания кисти (Mitiureva et al., 2023) апробировано лишь на небольшой выборке, что делает поиск универсальных, подходящих для широкого круга участников экспериментальных условий актуальной задачей.

Значительная часть главы посвящена связи сенсомоторных ритмов с речевым развитием. Исследования взрослых показали вовлеченность сенсомоторной системы в восприятие слов, связанных с действием, а также в восприятие речи в условиях шума, то есть в условиях, при которых речь труднее различить (Saltuklaroglu et al., 2018; Michaelis et al., 2021). В то же время у детей роль сенсомоторной системы в задачах речевосприятия и речепроизводства исследована мало, и основной пул исследований ограничен возрастом до 3 лет, преимущественно альфа-диапазоном (Lipatov et al., 2025).

Во **второй главе «Материалы и методы исследования»** представлено описание лонгитюдного исследования характеристик сенсомоторных ритмов у детей возрастом 3–10 лет. Из 56 человек первоначальной выборки 12 были исключены (2 — из-за неполного прохождения экспериментальных условий, 10 — из-за большого количества шумов и артефактов записи); в финальную выборку вошли 44 ребёнка (20 девочек; возраст на первом этапе лонгитюда 3,58–8,83 года, $M = 6,12 \pm 1,29$; на втором этапе — 4,75–10,16 года, $M = 7,34 \pm 1,3$; средний интервал между этапами — $14,65 \pm 2,92$ месяца). Для изучения возрастных особенностей выборка была разделена на три подгруппы: младшую (3–4 года 11 мес., $n = 8$), среднюю (5–6 лет 11 мес., $n = 23$) и старшую (7–8 лет 11 мес., $n = 13$). Возраст указан на момент первого этапа лонгитюдного исследования. Данное разделение на возрастные подгруппы обеспечило одинаковый двухлетний временной интервал для каждого поперечного среза смешанного лонгитюдного исследования. Состав подгрупп сохранялся на протяжении всего исследования: те же дети были повторно обследованы на втором этапе лонгитюда в среднем через один год и два месяца ($14,65 \pm 2,92$ месяца). У детей оценивалась ведущая рука с помощью родительского опросника; согласно его результатам выборка включала 34 правши, 2 левши, 5 амбидекстров и 3 ребенка, чьи родители не заполнили опросник. Исследование одобрено Комитетом по биоэтике Университета «Сириус» (заключение от 13.07.2022) в соответствии с Хельсинкской декларацией; родители подписали информированное согласие, дети дали устное согласие.

Речевое развитие оценивалось на первом этапе лонгитюда с помощью русскоязычной версии методики Preschool Language Scales, Fifth Edition (PLS-5) (Talantseva et al., 2022); в анализ вошли данные 32 из 44 участников (у остальных 12 поведенческие данные были собраны со значительной задержкой относительно ЭЭГ-части). Использовались стандартизованные по возрасту баллы шкал Total Language (Общее речевое развитие), Auditory Comprehension (Слуховое восприятие) и Expressive Communication (Экспрессивная коммуникация).

Исследование включало три экспериментальных условия. Пассивное сгибание кисти ребёнка (ПСР) — заимствованное из работы (Mitiureva et al., 2023) — представляло собой поочерёдное сгибание и разгибание правой и левой кисти ребёнка асессором по 15 раз для каждой руки. Наблюдение видео с движением рук (НВР) — видеоролик с крупным планом движения рук. Наблюдение видео с движением фракталов (НВФ) — контрольное условие с движущимися фракталами, выбранное согласно рекомендациям исследования (Cuevas et al., 2014).

Нейрофизиологический компонент исследования проводился в два этапа с интервалом около года, схема эксперимента представлена на Рисунке 1.

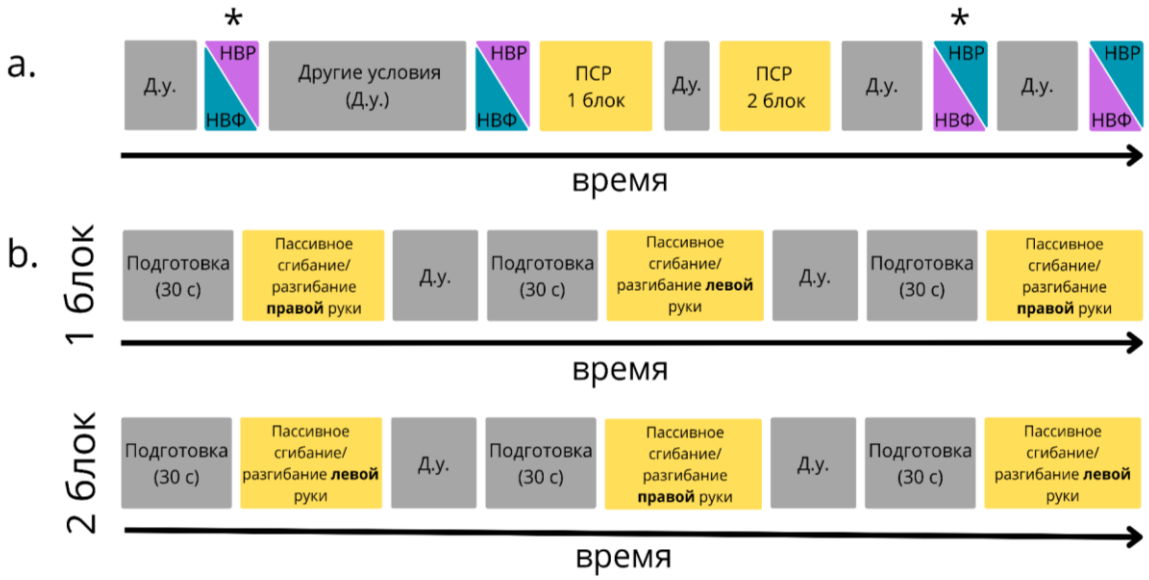


Рисунок 1 — Схема эксперимента. (a) Общая схема эксперимента. Анализируемые в данном исследовании условия выделены цветом. Другие условия (Д.у.) — условия, не включенные в данное исследование (отмечены серым). Синий блок (НВФ) — контрольное условие «Наблюдение видео с фракталами», фиолетовый блок (НВР) — условие «Наблюдение за движением рук на видео». (b) Схема блоков 1 и 2 демонстрирует схему эксперимента для условия «Пассивное сгибание рук» (ПСР). Сначала выполнялась подготовка (ознакомление с инструкцией и пробный тактильный контакт) (30 секунд), далее условие ПСР для правой или левой руки, после чего условие закрытых глаз (45 секунд), которое также не исследовалось в рамках данной работы.

Запись ЭЭГ проводилась в шумо- и электроизолированном помещении 32-канальной активной системой actiCHamp (Brain Products, Германия) с частотой дискретизации 50 кГц, референтным электродом FCz и импедансом электродов не выше ~25 кОм; стимулы предъявлялись на 23,8-дюймовом LED-мониторе (1920×1080) через программу Presentation. Предобработка данных выполнялась в MNE-python (версия 1.7.0): в первую очередь было выполнено понижение частоты дискретизации до 500 Гц, далее была применена полосовая фильтрация 1–50 Гц. После этого была выполнена интерполяция каналов, содержащих артефакты и шумы (не более 4). Далее проводилась очистка от артефактов методом независимых

компонентов (FastICA) с автоматической маркировкой компонентов через платформу ALICE (Soghoyan et al., 2021) и последующей ручной верификацией компонентов, подвергающихся удалению. Затем выполнялись перереферирование по усреднённому сигналу и сегментация ЭЭГ-записи на 2-секундные эпохи с последующим исключением эпох с амплитудой выше 200 мкВ (доля исключённых эпох составила ~7,5% для ПСР, ~7,3% для НВР и ~10% для НВФ). Далее к данным применялись анализ плотности источника тока (CSD) и быстрое преобразование Фурье для расчёта средней амплитуды сигнала в диапазонах 8–13 Гц и 13–30 Гц по 12 отведениям (F3, F4, FC1, FC2, FC5, FC6, C3, C4, CP1, CP2, CP5, CP6), выбранным с учётом данных о более широкой, чем традиционные C3/C4, топографии сенсомоторных ритмов (Thorpe et al., 2016); единый альфа-диапазон 8–13 Гц для всех возрастных подгрупп обоснован исследованиями созревания частоты мю-ритма у детей (Marshall et al., 2002; Berchicci et al., 2011). Скрипты и данные размещены в открытом доступе: https://osf.io/mnuaz/overview.

Статистический анализ проводился методом дисперсионного анализа с повторными измерениями (RM ANOVA) в программе JASP (версия 0.95.0.0) с внутригрупповыми факторами: Этап лонгитюда, Условие, Полушарие и Регион и межгрупповым фактором Возрастная группа (для основного анализа результаты условия ПСР для правой и левой руки усреднялись между собой, отдельно они считались только для анализа межполушарной латерализации). Межполушарная латерализация модуляции сенсомоторных ритмов при сгибании правой и левой руки анализировалась отдельно для второго этапа лонгитюда (из-за технических ограничений маркировки на первом этапе) также с помощью RM ANOVA с факторами Латерализация (уровни: НВФ, ПСР для правой руки, ПСР для левой руки), Полушарие, Регион и Возрастная группа. Для изучения связи сенсомоторных ритмов с речевым развитием рассчитывался индекс модуляции по формуле Log10(экспериментальное условие / НВФ) с использованием данных ЭЭГ первого этапа лонгитюда; далее для каждого отведения и частотного диапазона вычислялись корреляции Спирмена между индексом модуляции и показателями PLS-5 с поправкой на множественные сравнения методом FDR (Benjamini–Hochberg).

В **третьей главе «Результаты исследования»** приведены основные результаты, полученные в рамках исследования.

Для альфа-диапазона (8–13 Гц) сенсомоторных ритмов был обнаружен значимый эффект для фактора Этап лонгитюда ($F = 27{,}853$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}405$): значения амплитуды (независимо от условия) были выше для первого этапа лонгитюда, чем для второго (см. Рисунок 2(a)).

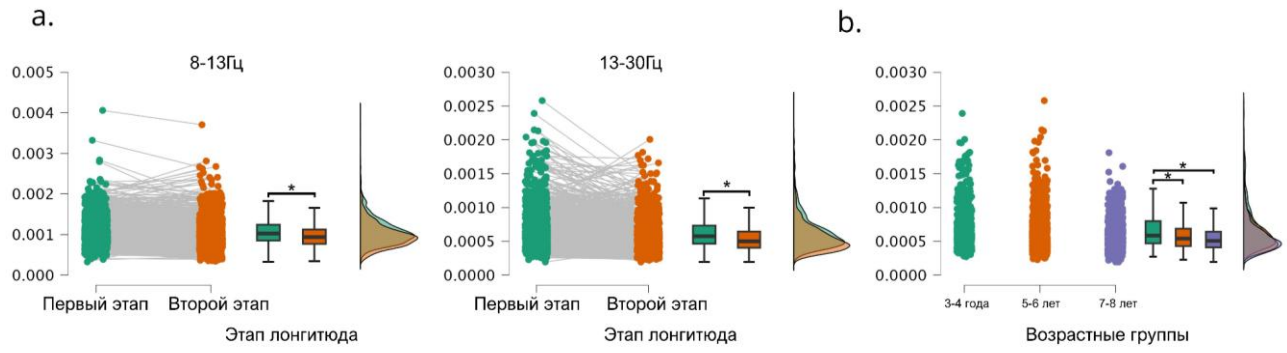


Рисунок 2 — Возрастные изменения. (a) Различие между первым и вторым этапами лонгитюдного исследования для диапазонов 8–13 Гц и 13–30 Гц. Апостериорный анализ фактора Этап лонгитюда выявил, что амплитуда была выше для первого этапа лонгитюдного

исследования, независимо от условия или канала, по сравнению со вторым. (b) Различия между возрастными группами для межгруппового фактора Возрастная группа (группа 3–4 года; группа 5–6 лет; группа 7–8 лет) для диапазона 13–30 Гц. Апостериорный анализ фактора Возрастная группа для диапазона 13–30 Гц выявил значимые различия группы 3–4 года с группами 5–6 лет и 7–8 лет. Значимые различия отмечены символом «*».

Также был обнаружен значимый эффект фактора Условие ($F = 24{,}488$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}374$): амплитуда снижалась при пассивном сгибании кисти (ПСР) по сравнению с условием контроля (НВФ) (Cohen's $d = 0{,}285$, $p(Holm) < 0{,}001$), что указывает на десинхронизацию, тогда как при наблюдении видео с движением рук (НВР) амплитуда, напротив, возрастала относительно условия контроля (Cohen's $d = -0{,}123$, $p(Holm) = 0{,}038$), что свидетельствует о синхронизации (см. Рисунок 3).

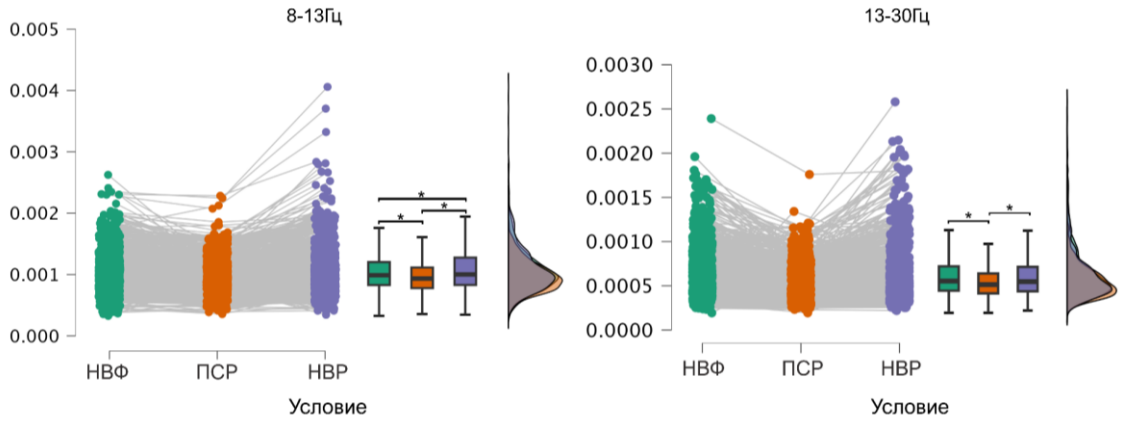


Рисунок 3 — Различия между условиями (НВФ, ПСР, НВР) для диапазонов 8–13 Гц и 13–30 Гц. Для диапазона 8–13 Гц значимые различия наблюдались между условием НВФ и обоими экспериментальными условиями (ПСР и НВР). В то же время для диапазона 13–30 Гц значимые различия наблюдались между условием НВФ и ПСР. В то же время условие НВР значимо не отличалось от условия контроля НВФ в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов. Значимые различия отмечены символом «*».

Кроме того, в альфа-диапазоне было выявлено значимое взаимодействие Условие × Регион, согласно которому ПСР значимо отличается от НВФ во фронтально-центральных, центральных и центрально-париетальных отведениях (FC1/FC2, C3/C4, CP1/CP2) (Рисунок 4).

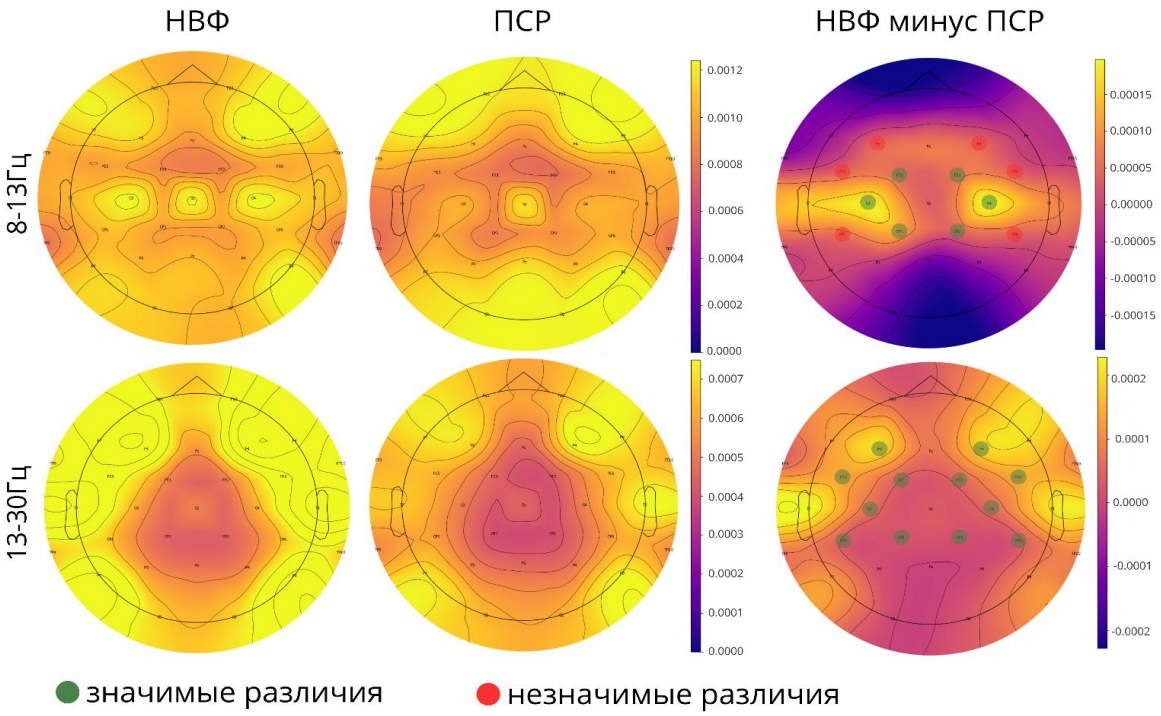


Рисунок 4 — Топография биоэлектрической активности для условия НВФ и ПСР в двух частотных диапазонах. Отведения, где были обнаружены значимые различия, выделены зеленым, красным отмечены отведения, где значимые отличия не наблюдались.

В бета-диапазоне (13–30 Гц) также был выявлен значимый эффект фактора Этап лонгитюда ($F = 50{,}144$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}550$): общие значения амплитуды были выше для первого этапа лонгитюда, чем для второго (см. Рисунок 2(a)). Кроме того, обнаружен значимый эффект для фактора Полушарие (амплитуда выше в правом полушарии, чем в левом: $F = 4{,}182$, $p = 0{,}047$) и значимый эффект для фактора Возрастная группа ($F = 4{,}746$, $p = 0{,}014$): различия обнаружены между младшей (3–4 года) и средней (5–6 лет), а также между младшей и старшей (7–8 лет) группами — амплитуда была выше у младших детей (Рисунок 2(b)). Была обнаружена десинхронизация для условия ПСР по сравнению с контролем (Рисунок 3). Фактор Условие также был значим, однако, в отличие от альфа-диапазона, в бета-диапазоне была обнаружена только десинхронизация для условия ПСР (Cohen's $d = 0{,}491$, $p(Holm) < 0{,}001$), условие НВР не отличалось от контроля. Кроме того, значимая десинхронизация ПСР наблюдалась во всех проанализированных регионах (Рисунок 4). Также было обнаружено значимое тройное взаимодействие Возрастная группа × Условие × Регион ($F = 1{,}865$, $p = 0{,}014$). Чтобы интерпретировать возрастные эффекты более точно, для каждой возрастной группы была рассчитана RM ANOVA с факторами Условие и Регион. Комплексный анализ RM ANOVA для каждой возрастной группы выявил, что топография десинхронизации для условия ПСР расширяется с возрастом: у детей 3–4 лет десинхронизация наблюдалась в регионах FC1/2, у детей 5–6 лет распространялась на регионы F3/4, C3/4, FC5/6 и CP5/6, а у детей 7–8 лет была одинаково выражена во всех проанализированных регионах.

Изучение межполушарной латерализации сенсомоторных ритмов при сгибании правой и левой кисти в альфа-диапазоне выявило значимое взаимодействие факторов Латерализация × Полушарие ($F = 14{,}408$, $p < 0{,}001$). Наблюдалась значимая десинхронизация для сгибания кисти

правой и левой руки в контралатеральном сгибаемой руке полушарии (Рисунок 5(a)); кроме того, при сгибании правой руки наблюдалась значимая межполушарная асимметрия — амплитуда справа была выше, чем слева (Рисунок 5(b)).

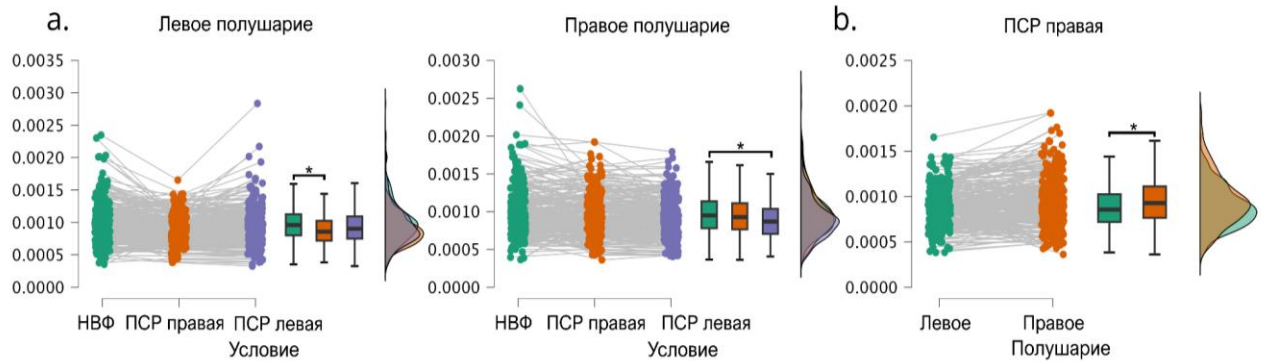


Рисунок 5 — Межполушарная латерализация сенсомоторных ритмов при пассивном сгибании и разгибании правой и левой руки в диапазоне 8–13 Гц. (a) Взаимодействие Латерализация × Полушарие: разница между контрольным условием и пассивным сгибанием правой и левой руки в правом и левом полушарии в диапазоне 8–13 Гц. (b) Взаимодействие Латерализация × Полушарие: значимые отличия между полушариями при пассивном сгибании правой руки в диапазоне 8–13 Гц.
Значимые различия отмечены символом «*».

Анализ взаимодействия Латерализация × Полушарие × Регион выявил контралатеральную сгибаемой руке десинхронизацию в центральных отведениях: в отведении C3 при сгибании правой руки (Cohen’s d = 1,290, p(Holm) < 0,001) и в отведении C4 при сгибании левой руки (Cohen’s d = 1,053, p(Holm) = 0,002), а также в отведении FC2 (Cohen’s d = 0,533, p(Holm) = 0,020) при сгибании левой руки (Рисунок 6).

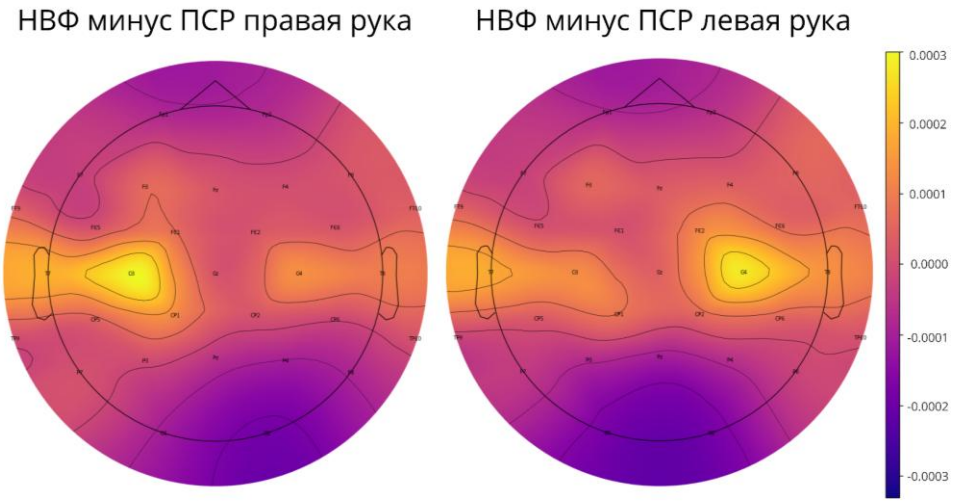


Рисунок 6 — Топография биоэлектрической активности для разницы между контрольным условием и пассивным сгибанием правой (слева) и левой (справа) руки в диапазоне 8–13 Гц.

В бета-диапазоне межполушарной латерализации при сгибании правой и левой руки не наблюдалось, а фактор Возрастная группа был значим как для альфа-, так и для бета-диапазона, однако значимых взаимодействий с ним не было.

Анализ связи сенсомоторных ритмов с речевым развитием не выявил значимых корреляций для альфа-диапазона, тогда как для бета-диапазона были обнаружены значимые отрицательные корреляции индекса модуляции для ПСР с показателем «Total Language» (Общее речевое развитие) в лобных отведениях F3 и F4 (Рисунок 7), а также с показателем «Auditory Comprehension» (рецептивный компонент речевого развития) в отведениях F4, FC1, FC6, C3 и CP2 (Рисунок 7). Чем сильнее десинхронизация сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне при ПСР, тем выше уровень речевого развития ребёнка. Значимых корреляций с показателем «Expressive Communication» (экспрессивный компонент речевого развития) для условия ПСР обнаружено не было. Для условия НВР значимых корреляций с сенсомоторными ритмами не обнаружено.

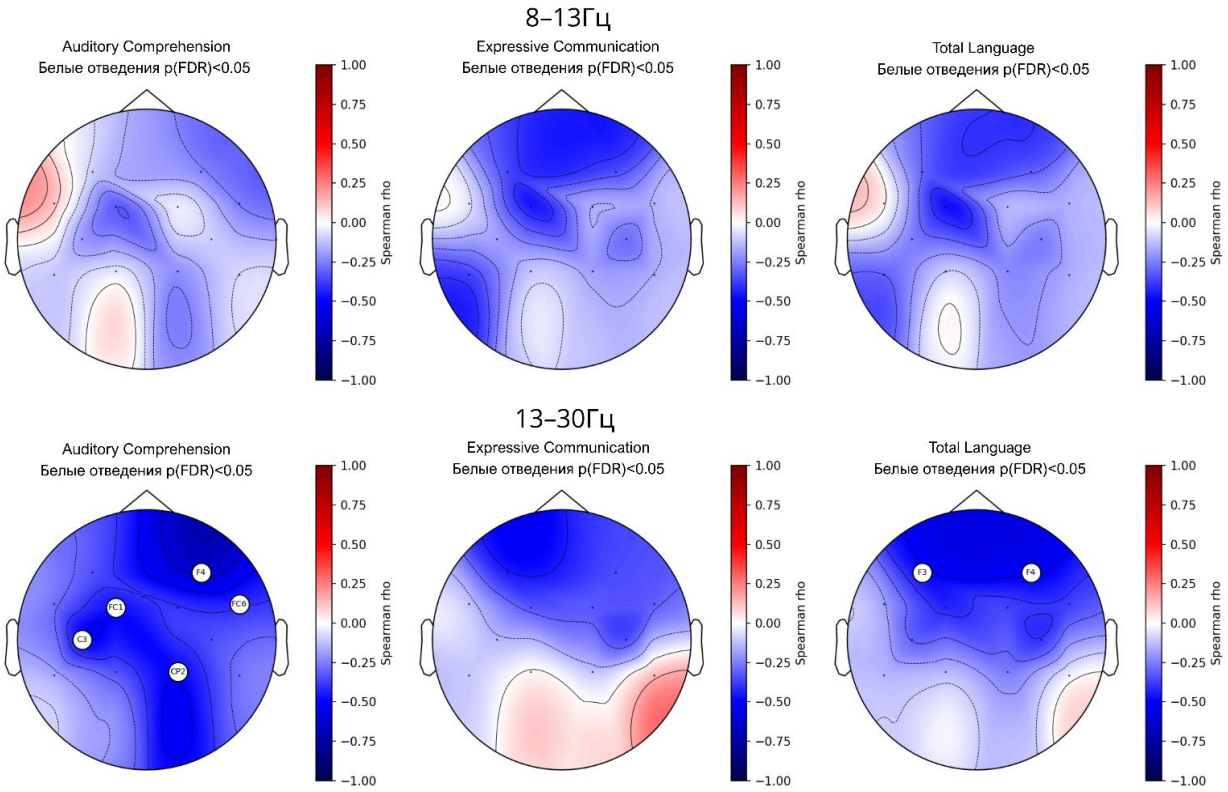


Рисунок 7 — Корреляции между показателями методики оценки речевого развития PLS-5 (Auditory Comprehension, Expressive Communication и Total Language) и индексом модуляции в экспериментальном условии пассивного сгибания рук в диапазонах 8–13 Гц и 13–30 Гц. Отведения, где были обнаружены значимые корреляции, отмечены белым цветом.

В четвёртой главе **«Обсуждение результатов»** проводится интерпретация полученных данных в контексте существующей литературы.

Была выявлена десинхронизация сенсомоторных ритмов в условии пассивного сгибания кисти ребенка (ПСР) в альфа- и бета-диапазонах, что согласуется с ранее проведенными исследованиями, а также с работой Д. Митюревой и ее коллег, предложивших данное экспериментальное условие к изучению (Lipatov et al., 2026; Mitiureva et al., 2023). Впервые изучена десинхронизация сенсомоторных ритмов при пассивном сгибании правой и левой руки отдельно. Выявлен контралатеральный характер альфа-десинхронизации при ПСР, что согласуется с данными у взрослых (обзор Larionova et al., 2022) и расширяет результаты более ранних исследований на детях, которые анализировали активность только одного полушария или движения только правой руки (Berchicci et al., 2011; Eismont et al., 2017; Кайда и др., 2019). Обнаруженные значимые межполушарные различия при сгибании правой руки и их отсутствие при сгибании левой руки, вероятно, объясняются преобладанием правшей в выборке исследования (34 из 44 детей). В бета-диапазоне для условия ПСР контерлатеральная латерализация десинхронизации отсутствует, что согласуется с ранее проведенными исследованиями для данного возраста (Gaetz et al., 2010). Что интересно, в подгруппе детей возрастом 9–13 лет межполушарная латерализация в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов уже наблюдается (Trevarrow et al., 2019). Согласно результатам исследования, для альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов в условии ПСР наблюдается различная топография

модуляции. Так, в альфа-диапазоне наблюдается супрессия активности во фронтально-центральных, центральных и центрально-париетальных регионах, а для бета-диапазона наблюдается десинхронизация во всех регионах, вошедших в анализ: F3, F4, FC1, FC2, FC5, FC6, C3, C4, CP1, CP2, CP5, CP6. Различная топография десинхронизации альфа- и бета-диапазонов, а также наличие латерализации при манипуляциях правой и левой рукой только для альфа-диапазона могут косвенно подтверждать представление о различных функциональных свойствах альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов, согласно которому альфа-диапазон преимущественно отражает сенсомоторную функцию, тогда как бета-диапазон связан с моторным контролем (Larionova et al., 2022; Saltuklaroglu et al., 2018).

Для условия наблюдения движения рук на видео (НВР) была обнаружена значимая синхронизация сенсомоторных ритмов только в альфа-диапазоне. Межполушарной асимметрии синхронизации или её доминирования в каком-либо отведении обнаружено не было. В то же время в бета-диапазоне условие НВР не отличалось от контрольного условия. Аналогичные результаты для более младших детей были получены в исследовании М. Кёстера и М. Мейера, которые предложили теоретическую модель «блокирования через торможение» (gating by inhibition), согласно которой синхронизация сенсомоторных ритмов отражает активное подавление моторной системы, предотвращающее непроизвольное движение при наблюдении за действием другого (Köster & Meyer, 2023). Важно отметить, что на модуляцию сенсомоторных ритмов также влияет множество факторов: характеристики стимула, цвет фона, содержание объекта, а также требования к вниманию (Bowman et al., 2017). Более того, выбор базового/контрольного условия имеет решающее значение для выявления модуляции сенсомоторных ритмов (Hobson et al., 2016). Таким образом, данное исследование указывает на то, что условие наблюдения за движением требует дальнейшего тщательного изучения для уточнения условий, при которых возникает синхронизация/десинхронизация в альфа- и бета-диапазонах сенсомоторных ритмов.

Гипотеза об увеличении модуляции сенсомоторных ритмов с возрастом не подтвердилась ни в продольном, ни в поперечном анализе для обоих диапазонов, что согласуется с рядом работ (Eismont et al., 2017; Lepage & Théoret, 2006), но расходится с другими исследованиями, где подобный эффект обнаруживался на существенно более широком возрастном диапазоне, включавшем и взрослых (Thorpe et al., 2016; Mitiureva et al., 2023; Oberman et al., 2005; Brunsdon et al., 2019). Можно предположить, что использованное инклюзивное условие пассивного сжимания кисти, в отличие от задач с самостоятельно инициированным движением, не задействует созревающие на протяжении детства процессы произвольного моторного контроля (Larionova et al., 2022). При этом топография десинхронизации для бета-диапазона сенсомоторных ритмов при ПСР расширялась с возрастом (от фронтально-центральных регионов в 3–4 года до всех представленных в анализе регионов к 7–8 годам), хотя модуляция ритмов не менялась. Гипотеза об усилении латерализации с возрастом, основанная на поведенческих данных о становлении доминирующей руки к 6 годам (Scharoun & Bryden, 2014), также не подтвердилась, что может быть связано с пассивным (не требующим произвольного контроля) характером экспериментальных условий, а также с ограниченным размером выборки.

Обнаружена отрицательная корреляция индекса модуляции сенсомоторных ритмов в бета диапазоне при ПСР с показателями общего речевого развития и рецептивного компонента речи методики PLS-5. То есть чем более выражена десинхронизация бета диапазона сенсомоторных ритмов, тем более высокие значения показателей рецептивной речи. В то же время с показателями экспрессивной коммуникации корреляций обнаружено не было. Данные результаты интерпретируются как свидетельство того, что в возрасте 3–10 лет сенсомоторная

система может играть вспомогательную роль в декодировании аудио-вербальной информации, даже когда явного моторного ответа не требуется. Данное исследование впервые описывает связь между сенсомоторной системой и речевым развитием у детей дошкольного и младшего школьного возраста от 3 до 10 лет. Ранее связь модуляции сенсомоторных ритмов с рецептивной речью была показана лишь для альфа-диапазона и более младшего возраста: у детей 1,5–3,5 года (Mikhailova et al., 2021). В то же время связь обоих (альфа и бета) диапазонов сенсомоторных ритмов с речевым развитием ранее рассматривалась только в работе К. Антоньини и М. Даума (Antognini & Daum, 2018), где было показано, что у детей с высокими речевыми навыками десинхронизация наблюдается в бета-диапазоне, а у детей с более низкими — в альфа-диапазоне при просмотре конгруэнтных стимулов. Аналогичные результаты в альфа-диапазоне были получены в исследовании К. Патцвальд и ее коллег у 18-месячных детей с хорошими речевыми навыками (Patzwald et al., 2020). Таким образом, можно предположить, что с возрастом увеличивается роль бета-активности в речевой рецепции, что согласуется с результатами данного исследования.

Важно осветить ограничения исследования. Результаты исследования, свидетельствующие об отсутствии возрастных изменений модуляции сенсомоторных ритмов, следует интерпретировать с осторожностью, поскольку выборка и представленный в исследовании аналитический подход имеют ограниченные возможности по выявлению небольших эффектов. Также важно отметить несбалансированность возрастных групп по численности, неполный охват выборки для оценки речевого развития (PLS-5: 32 из 44 участников), отсутствие оценки речевого развития на втором этапе лонгитюда и отсутствие из-за технических проблем анализа латерализации на первом этапе исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного смешанного лонгитюдного исследования изучались возрастные изменения модуляции сенсомоторных ритмов и их связь с развитием речи у детей в возрасте от 3 до 10 лет.

Вопреки гипотезе исследования, не были обнаружены возрастные изменения в силе модуляции ни в альфа-, ни в бета-диапазонах сенсомоторных ритмов, ни при пассивном сгибании руки, ни при наблюдении движения рук на видеозаписи. Модуляция оставалась стабильной на протяжении всего исследуемого периода — как при поперечном, так и при продольном анализе. Аналогичным образом, не подтвердилась исследовательская гипотеза о том, что латерализация сенсомоторной активности во время пассивных сгибаний и разгибаний кисти правой или левой руки усиливается с возрастом. Хотя в альфа-диапазоне десинхронизация наблюдалась строго контралатерально по отношению к руке, с которой проводилась манипуляция, эта закономерность не усиливалась с возрастом, что свидетельствует о том, что базовая нейрофизиологическая асимметрия сенсомоторных реакций формируется на ранних этапах развития, по крайней мере в отношении пассивных движений.

В то же время было обнаружено расширение топографии десинхронизации в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов с возрастом в условии пассивного сгибания кистей ребенка. В 3–4 года значимая десинхронизация наблюдалась во фронтально-центральных регионах, в то время как к 7–8 годам супрессия регистрировалась уже во фронтальных, фронтально-центральных, центральных, центрально-париетальных и париетальных регионах. Однако к наиболее значимым результатам исследования можно отнести выявленную связь между десинхронизацией в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов во время пассивного сгибания и

разгибания кисти и результатами речевого исследования (PLS-5), что подтверждает третью гипотезу исследования о том, что сенсомоторные ритмы связаны с развитием речи. Примечательно, что корреляции с показателями рецептивной речи наблюдались в довольно обширной области, тогда как для показателей экспрессивной коммуникации корреляции обнаружены не были. Это свидетельствует о том, что в данной возрастной группе рецептивная речь в большей степени зависит от активности сенсомоторных сетей, чем экспрессивная речь.

Эти результаты предоставляют новые доказательства связи сенсомоторной десинхронизации в бета-диапазоне с развитием рецептивной речи у детей дошкольного и младшего школьного возраста, указывая на потенциальный нейрофизиологический маркер индивидуальных различий в языковых способностях. С учетом клинической значимости раннего овладения языком эти результаты могут способствовать разработке инструментов скрининга для детей, подверженных риску задержки речевого развития, хотя необходимо провести повторные исследования на более крупных выборках.

ВЫВОДЫ

1. Условие наблюдения видео с движением рук может вызывать синхронизацию альфа-диапазона (8–13 Гц) сенсомоторных ритмов у детей возрастом 3–10 лет, что может свидетельствовать о торможении детьми повторения наблюдаемых движений.
2. В период с 3 до 10 лет не наблюдается значимых изменений в модуляции сенсомоторных ритмов при пассивном движении кисти руки или наблюдении за движением рук.
3. Межполушарная латерализация сенсомоторных ритмов при сгибании и разгибании правой и левой руки наблюдается только в альфа-диапазоне, в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов межполушарная латерализация отсутствует.
4. С возрастом выраженность межполушарной латерализации у детей 4–10 лет не изменяется, что свидетельствует о том, что базовая нейрофизиологическая асимметрия сенсомоторных реакций формируется на ранних этапах развития, по крайне мере, в отношении пассивных движений.
5. Бета-диапазон сенсомоторных ритмов имеет более обширную, чем альфа-диапазон, топографию модуляции, которая расширяется с возрастом и к 7–8 годам затрагивает фронтальные, фронтально-центральные, центральные, центрально-париетальные и париетальные регионы.
6. Индекс модуляции сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне связан с речевым развитием у детей. Чем сильнее десинхронизация, тем более высокие показатели речевого развития (в первую очередь его рецептивного компонента).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, индексируемых международными базами данных:

1. **Липатов В.А.**, Павлова П.А., Ребрейкина А.Б., Сысоева О.В. Сенсомоторные ритмы как нейрофизиологические корреляты процессов восприятия речи в детском возрасте // Национальный психологический журнал. – 2025. – Т. 20, № 3. – С. 136–147. – DOI: 10.11621/npj.2025.0311.

2. **Lipatov V.**, Rebreikina A., Sysoeva O. Opposite modulation of sensorimotor rhythms in 3-8 years children by passive hand movement and hand movement observation // Neuroreport. – 2026. – Vol. 37, No. 6. – P. 215–221. – DOI: 10.1097/WNR.0000000000002254.

3. **Lipatov V.**, Rebreikina A., Sysoeva O. A mixed longitudinal EEG study of sensorimotor rhythm modulation and its relationship with language development in children aged 3–10 years // Brain Sci. – 2026. – Vol. 16, No. 8. – P. 880. – DOI: 10.3390/brainsci16080880.

Прочие публикации:

4. **Липатов В.А.**, Павлова П.А., Шайхутдинова Р.И., Сысоева О.В. Связь сенсомоторной активности и речевых навыков у детей младшего дошкольного возраста // Десятая международная конференция по когнитивной науке: тезисы докладов (Пятигорск, 26–30 июня 2024 г.): в 2 ч. Ч. II / отв. ред. М.В. Киреев. – Пятигорск, 2024. – С. 243–244.

5. **Липатов В.А.**, Павлова П.А. Особенности сенсомоторных ритмов у детей старшего дошкольного возраста при различных экспериментальных условиях // Актуальные проблемы экспериментальной и клинической медицины: сборник статей 83-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (Волгоград, 23–25 апреля 2025 г.) / под ред. Д.А. Бабкова. – Волгоград: Изд-во ВолгГМУ, 2025. – С. 516–518.

6. **Липатов В.А.**, Ребрейкина А.Б., Сысоева О.В. Лонгитюдное исследование характеристик сенсомоторного ритма у детей дошкольного и младшего школьного возраста // XXV съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова (Москва, 11–15 августа 2026 г.).