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

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук
Ребрейкина Анна Борисовна

федеральная территория «Сириус»
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 10
1.1. Биоэлектрическая активность головного мозга у детей 10
1.2. Сенсомоторные ритмы 11
1.3. Возрастные изменения сенсомоторных ритмов 13
1.4. Модуляция сенсомоторных ритмов в различных экспериментальных условиях 14
1.4.1. Наблюдение движения 14
1.4.2. Выполнение движения 15
1.5. Латерализация сенсомоторных ритмов 17
1.6. Речевое развитие 18
1.7. Связь сенсомоторных ритмов с речью 20
1.7.1. Сенсомоторные ритмы и восприятие речи у взрослых 20
1.7.2. Сенсомоторные ритмы и восприятие речи у детей 21
1.8. Постановка проблемы исследования 27
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 28
2.1. Участники исследования 28
2.2. Оценка речевого развития 29
2.3. Стимульный материал 30
2.4. Процедура исследования 31
2.5. Предварительная обработка данных ЭЭГ 33
2.6. Статистический анализ 34
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 36
3.1. Основные характеристики сенсомоторных ритмов 36
3.1.1. Диапазон 8–13 Гц 36
3.1.2. Диапазон 13–30 Гц 37
3.2. Эффект латерализации для пассивного сгибания и разгибания правой и левой руки 40
3.2.1. Диапазон 8–13 Гц 40

3.2.2. Диапазон 13–30 Гц 42

3.3. Сенсомоторные ритмы и речевое развитие 43

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ 46

4.1. Модуляция сенсомоторных ритмов в ответ на различные экспериментальные условия (ПСР и НВР) 47

4.1.1. Пассивное сгибание рук 48

4.1.2. Наблюдение видеозаписей с движением рук 49

4.2. Возрастные изменения сенсомоторных ритмов 51

4.2.1. Изменения сенсомоторных ритмов в течение года 51

4.2.2. Поперечные (кросс-секционные) изменения сенсомоторных ритмов у детей 3–10 лет 51

4.3. Связь между сенсомоторным ритмом и речевым развитием 54

4.4. Ограничения 55

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 57

ВЫВОДЫ 59

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 60

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 61

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Обзор литературы по теме связь сенсомоторных ритмов с речью у детей 70

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Родительский опросник для определения доминирующей руки ребенка 75

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты статистического анализа 77

ВВЕДЕНИЕ

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) ритмов. Они ассоциируются с работой сенсомоторной нейронной сети [27, 59, 94], а их наиболее выраженная модуляция (преимущественно подавление) наблюдается в условиях, связанных с двигательной активностью [59]. Сенсомоторные ритмы рассматривают как потенциальные нейрофизиологические маркеры развития [1, 27], индикаторы формирования моторной нейронной сети [68]; их также исследуют при атипичном нейрокогнитивном развитии, например у людей с РАС [17]. 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 [41, 102].

Однако исследования сенсомоторных ритмов преимущественно проводились на взрослых, а немногочисленные исследования детей сосредоточены на младенческом и детском возрасте до 3 лет [40], 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 [1, 15]. 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 [4, 72]. Однако вопрос о возрастной динамике модуляции сенсомоторных ритмов остается дискуссионным: некоторые исследования показывают усиление модуляции с возрастом, тогда как другие такой динамики не обнаруживают [37, 61, 107]. 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 [37]. 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) [3, 65]. В то же время ряд авторов в целом ставят под сомнение [105] 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 [34]. 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 [34] или пассивное сгибание и разгибание кисти участника [72], 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 [70, 74], 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 [70, 94]. В то же время у детей в исследовании К. Патцвальд и ее с коллег [86] обнаружили, что более выраженная десинхронизация мю-ритма наблюдалась у детей с большим рецептивным словарным запасом глаголов, а А.А. Михайлова с коллегами [71] 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 [63, 71].

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. Салтукароглу 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Биоэлектрическая активность головного мозга у детей

Электроэнцефалография (ЭЭГ) представляет собой регистрацию биоэлектрической активности головного мозга, которая в первую очередь отражает суммарную активность постсинаптических потенциалов синхронно активированных пирамидных нейронов, формирующих макроскопические потенциалы поля, регистрируемые на поверхности скальпа [55]. К преимуществам электроэнцефалографии можно отнести неинвазивность, относительно низкую стоимость, возможность комбинированных исследований с другими методами нейровизуализации мозга. Кроме того, интерес к ЭЭГ-исследованиям вновь возрастает в значительной степени благодаря стремительному прогрессу мощности вычислительной техники, а также благодаря новым методам анализа и обработки сигнала [90], что в совокупности позволяет обрабатывать данные исследований с выборкой в сотни и тысячи испытуемых [66].

На сегодняшний день в клинической практике ЭЭГ используется в первую очередь для неврологической дифференциальной диагностики эпилепсии [19], а ее более широкий потенциал для оценки общего возрастного развития [16], а также в качестве нейрофизиологического маркера расстройств аутистического спектра (РАС) [46], синдрома дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) [77], болезни Альцгеймера [46], шизофрении [12] и депрессии [16] остается недостаточно изученным, и, как следствие, мало используемым и почти не применяемым в клинической практике. Одной из ключевых проблем применения ЭЭГ-исследований в диагностике у детей и подростков является высокая индивидуальная вариабельность и выраженная нелинейная изменчивость ЭЭГ-данных с возрастом. Возрастные изменения осцилляторной активности, спектрального состава, организации крупномасштабных сетей ярко выражены на протяжении младенчества, раннего детства и подросткового возраста. Идентичные ЭЭГ-характеристики могут отражать нормативное созревание в одном возрасте, но атипичное развитие — в другом [16]. Для решения данной проблемы необходимы смешанные лонгитюдные исследования, которые будут комбинировать поперечный и продольный анализ возрастных изменений с возможностью изучать не только общие усредненные паттерны формирования биоэлектрической активности с возрастом, но и индивидуальные траектории развития [16, 64].

В частотном диапазоне ЭЭГ-активности взрослых выделяют дельта (1–4 Гц), тета (4–8 Гц), альфа (8–13 Гц), бета (13–30 Гц) и гамма (свыше 30 Гц) ритмы. Каждый из ритмов имеет свою

преимущественную локализацию: альфа-ритм регистрируется в затылочных и теменных отведениях; тета-ритм — в лобных и височных; бета-ритм — в прецентральных и фронтальных отведениях; гамма-ритм — в прецентральных, фронтальных, височных, теменных; дельта-ритм не имеет определенной локализации [7]. Кроме того, выделяют роландический/сенсомоторные (мю) ритмы (8–30 Гц), наиболее выраженная модуляция которого наблюдается в проекции сенсомоторной коры. В период онтогенеза частотный диапазон ритмов активно меняется: в младенческом возрасте наблюдается доминирование медленноволновой ЭЭГ-активности (дельта- и тета-ритмы) [5]. Со взрослением происходит постепенный сдвиг, проявляющийся уменьшением доли медленноволновой активности и преобладанием более быстрой ЭЭГ-активности с доминированием альфа- и бета-ритмов [31, 43]. Считается, что данные изменения начинаются в затылочных регионах мозга, распространяясь в дальнейшем на центральные и фронтальные регионы [33].

1.2. Сенсомоторные ритмы

Одним из первых исследований, где описывают сенсомоторные ритмы, является работа Г. Дж. Гасто и Дж. Берта 1954 года, где у нескольких участников исследования была зарегистрирована биоэлектрическая активность головного мозга в альфа-диапазоне в проекции роландических областей при просмотре фильмов. Авторы описали, что активность ритмов была выражена в покое, однако при наблюдении движения (боксерского матча) выраженность уменьшилась [44]. Далее в 1989 году в работе Дж. Тихонена и его коллег [106] в рамках МЭГ-исследования впервые обнаружили бета-компонент (диапазон) сенсомоторных ритмов в частотном диапазоне ~20 Гц. Модернизация и совершенствование методов регистрации и анализа ЭЭГ в период с конца 1970-х по конец 1980-х позволили собрать большой пул исследовательских данных, на основании которых было сформировано представление о сенсомоторных ритмах как об одном из вариантов типичной биоэлектрической активности головного мозга, встречающегося массово в популяции у взрослых людей [58, 87, 106], а уже в 1999 году у младенцев был выявлен онтогенетический предшественник взрослого мю-ритма [101].

На сегодняшний день считается, что сенсомоторные ритмы представляют собой биоэлектрическую активность головного мозга, которая наиболее выражена в проекции сенсомоторной коры в частотных диапазонах альфа-активности (8–13 Гц, иногда выделяют более широкий диапазон 7–15 Гц [76]) и бета-активности (13–30 Гц, более широкий диапазон

составляет 13–40 Гц [13, 109]) у взрослых людей и ассоциируется с работой сенсомоторной нейронной сети [27, 49, 94]. В анатомическом смысле под сенсомоторной сетью подразумевается совокупность взаимосвязанных областей: моторная кора (прецентральная извилина, премоторная и дополнительная моторная кора), средняя часть цингулярной извилины, соматосенсорная кора (постцентральная извилина, части верхней и нижней париетальной долек) [63].

Альфа- и бета-компоненты (диапазоны) сенсомоторных ритмов различаются по топографическому доминированию и функциональным свойствам. Альфа-компонент сенсомоторных ритмов проявляется в основном в постцентральной соматосенсорной коре [48] и отражает преимущественно сенсомоторную функцию. Бета-компонент регистрируется в основном в прецентральной моторной коре, и его активность связывают с моторным контролем [8].

В основном сенсомоторные ритмы изучаются в рамках условий, стимульный материал которых включает двигательную активность (её наблюдение, выполнение, представление и пр.) [34, 40, 59, 94].

Многие исследователи рассматривают сенсомоторные ритмы как потенциальные нейрофизиологические маркеры развития [1, 27], индикаторы формирования моторной нейронной сети [68], атипичного нейрокогнитивного развития у людей с РАС [17]. В этой связи особый интерес представляют работы, предполагающие вовлечение сенсомоторных сетей в речевые процессы. Появляется все больше доказательств того, что процесс восприятия речи задействует обширную мультисенсорную сеть, которая включает сенсомоторные области головного мозга [41, 102]. Согласно исследованию Т. Салтукароглу и его коллег сенсомоторные ритмы могут служить индикатором изменяющихся во времени процессов сенсомоторной интеграции при восприятии и производстве речи [94]. Кроме того, часть исследователей предлагают интерпретировать сенсомоторные ритмы как корреляты активности системы зеркальных нейронов (СЗН) [40]. Систему зеркальных нейронов выделяют в качестве одного из потенциальных механизмов, обеспечивающих появление речи у человека [11]. СЗН и области головного мозга, связанные с речевыми функциями, значительно перекрываются, в связи с чем изменения сенсомоторных ритмов могут быть рассмотрены как косвенные индикаторы обработки речи [52]. Исследование В. Сало и ее коллег, показавшее, что сенсомоторная сеть может играть вспомогательную роль в развитии речи у младенцев посредством связи жестовой и речевой коммуникации [93], также косвенно подтверждает вовлечение СЗН в процесс развития восприятия речи.

1.3. Возрастные изменения сенсомоторных ритмов

У детей активность сенсомоторных ритмов регистрируется уже в первые месяцы жизни, альфа-диапазон (мю ритм) наблюдается уже в младенческом возрасте [101]. Наиболее выраженный рост частоты сенсомоторных ритмов наблюдается в первый год жизни: так, в возрасте 11 недель при выполнении движения была зарегистрирована модуляция мю-ритмов частотой ~2,75 Гц, а к 47-й неделе частота мю-ритмов поднимается до 8,25 Гц, далее рост замедляется и к 4 годам модуляцию мю-ритмов можно диагностировать в диапазоне 9 Гц [15]; в подростковом возрасте происходит стабилизация частоты модуляции около 10 Гц [36].

Подобный скачкообразный рост частоты сенсомоторных ритмов в период первого года жизни связан с общим развитием головного мозга: процессами активной миелинизации нейронов, формированием и развитием структурных и функциональных характеристик кортикальных сетей, изменением плотности и ориентации нейронных ансамблей [15].

Амплитудные характеристики сенсомоторных ритмов с возрастом, в отличие от частотных, уменьшаются, что связано с увеличением толщины черепа и, соответственно, повышением сопротивления тканей [37].

Важно отметить, что основной пул исследований сенсомоторных ритмов в детском возрасте на сегодняшний день сфокусирован на младенцах и детях до 3 лет [40]. В то же время возрастные особенности сенсомоторной активности в дошкольном и младшем школьном возрасте исследованы мало, хотя в это время биоэлектрическая активность головного мозга характеризуется высокой индивидуальной вариабельностью и функциональной незрелостью.

Более того, львиная доля исследований сенсомоторных ритмов у детей сфокусирована исключительно на альфа-диапазоне [4, 15, 37], а немногие работы, включающие бета-диапазон, имеют небольшую выборку исследования [42], исследуют более взрослых детей (возрастом 9–15 лет) [107] или ставят под сомнение наличие бета-диапазона сенсомоторных ритмов у младенцев и детей в период раннего детства [105]. Так, в исследовании С. Торпа и его коллег значимый уровень ERD (десинхронизация, вызванная событием) в бета-диапазоне (15–25 Гц) наблюдался только в группе взрослых и отсутствовал у детей 4 лет, в связи с чем авторы предположили, что бета-диапазон сенсомоторных ритмов формируется после 4 лет [105]. В целом, при достаточно обширном исследовании возрастных изменений сенсомоторной активности, проблема возрастной динамики десинхронизации сенсомоторных ритмов в обоих диапазонах остается дискуссионной. Исследования показывают как увеличение силы десинхронизации с возрастом [4, 72], так и отсутствие возрастных изменений [37].

Вопрос о топографии проявлений супрессии сенсомоторных ритмов у детей также требует дальнейших исследований. Хотя традиционно сенсомоторные ритмы анализируются в центральных отведениях, отражающих активность сенсомоторной коры, в ряде работ супрессия мю-ритма также отмечается в париетальных областях [105]. А в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов в ряде задач супрессия также отмечается во фронтальных областях [71].

1.4. Модуляция сенсомоторных ритмов в различных экспериментальных условиях

В основном сенсомоторные ритмы изучаются в рамках экспериментальных условий, стимульный материал которых включает двигательную активность, а именно её наблюдение, выполнение или представление [34, 40, 94]. Последнее условие – представление движения – чаще встречается в исследовательских подходах при работе со взрослыми и в исследованиях, связанных с нейроинтерфейсами, а у детей практически не используется, так как сложно проконтролировать выполнение задания.

1.4.1. Наблюдение движения

Дизайны исследований с наблюдением движения используют демонстрацию движений вживую либо на видеозаписи. Предъявляются такие движения, как игра с игрушками (кубики, машинка и др.), указательные движения, манипуляции руками с различными объектами или просто демонстрация движений рук. В первый год жизни уже наблюдается разница активации сенсомоторных ритмов в зависимости от типа наблюдаемого биологического движения: так, в случае предъявления целенаправленных действий в возрасте 8 месяцев наблюдается более выраженная десинхронизация сенсомоторных ритмов, по сравнению с движениями, не направленными на определенную цель; в более старшем детском возрасте и у взрослых данная зависимость также сохраняется [1, 34]. Существенным фактором, оказывающим влияние на степень супрессии мю-ритма в период младенчества и раннего детства, является факт знакомства с выполняемым движением [30] и принадлежность наблюдаемого действия к моторному репертуару ребёнка [91]. Еще одним фактором, влияющим на модуляцию сенсомоторных ритмов в период младенчества и раннего детства, является тип демонстрации движения: предъявляется ли демонстрация биологического движения на видео или показывается очно одним из членов

исследовательской команды [92]. В исследовании Л. Рёйсхарт и его коллег было показано, что у детей возрастом 1,5–3 лет более выраженное подавление мю-ритма наблюдалось при демонстрации стимулов «вживую» в сравнении с предъявлением стимулов на видеопрезентации. Авторы предположили, что детям сложно переносить опыт из двухмерного пространства на видеопрезентации, по сравнению с опытом в трехмерном пространстве при демонстрации «вживую». Данное явление называют эффектом видеодефицита (video deficit effect): дети в возрасте до трёх лет демонстрируют пониженную способность к переносу знаний и сенсомоторного опыта, полученных посредством двумерной видеопрезентации, по сравнению с обучением в условиях очного взаимодействия [14, 92].

У взрослых также наблюдается тенденция к более ярко выраженной супрессии мю-ритма при предъявлении целенаправленного движения вживую, чем на видео. Так, например, в исследовании Н.Н. Лебедевой и ее коллег десинхронизация сенсомоторных ритмов была только при демонстрации стимулов «вживую», а при демонстрации стимулов на видео значимой десинхронизации не было. Авторы связывают данное явление с важностью «живого» социального контакта [60].

Необходимо отметить, что в ряде научных работ у младенцев и детей младшего дошкольного возраста наблюдалось не классическое снижение мощности мю-ритма, но, напротив, увеличение мощности мю-ритма при наблюдении за движением как на видео [38, 56, 92], так и вживую [69, 108], что противоречит устоявшейся концепции десинхронизации мю-ритма при предъявлении движения.

1.4.2. Выполнение движения

При выполнении движения наблюдается самая выраженная десинхронизация сенсомоторных ритмов по сравнению с наблюдением за движением или его представлением, поскольку происходит прямая активация моторной коры головного мозга [34, 40, 60, 92]. Однако использование у детей в качестве экспериментального условия самостоятельного выполнения движения сопряжено с рядом методологических ограничений. Во-первых, предлагаемое движение должно соответствовать уже освоенному моторному репертуару ребёнка, что существенно влияет на возрастной диапазон испытуемых [91]. Во-вторых, выполнение целенаправленного действия требует сохранной мотивации, понимания инструкций и произвольного контроля движения, что затруднительно при работе с маленькими детьми, а также

с участниками, имеющими когнитивные или моторные дефициты, включая, например, детей с ДЦП или низкофункциональными формами РАС.

В исследовании Д. Митюревой и ее коллег данные ограничения предложили обойти с помощью разработанного ими инклюзивного условия пассивного сгибания кисти, во время которого исследователь сгибает и разгибает кисть испытуемого [72]. Подобное условие не требует от участников активного включения и произвольного контроля движения, при этом вызывает выраженную десинхронизацию сенсомоторных ритмов. Более того, в нём комбинируется эффект от тактильной стимуляции собственной руки и наблюдения за движением «вживую», что, предположительно, дополнительно может усиливать десинхронизацию мю-ритма [34, 92]. Однако в рамках исследования Д. Митюревой инклюзивное условие пассивного сгибания кисти было апробировано на относительно небольшой выборке широкого возрастного диапазона (19 взрослых (20–31 лет, M = 23,8 ± 3) и 32 ребенка (3–16 лет, M = 9,53 ± 3,4)), среди которых лишь 4 участника было младше 5 лет, что существенно ограничивает возможность обобщения полученных результатов на ранний дошкольный возраст [72].

Таким образом, на сегодняшний день исследовательские условия, используемые для модуляции сенсомоторных ритмов, отличаются высокой вариативностью в зависимости от исследовательских задач. Многие из них имеют ограничения для применения у детей, в особенности у детей с нарушениями развития. Активное воспроизведение движения доступно не всем испытуемым, качество и длительность выполнения движения могут сильно варьировать между детьми, что может влиять на результат исследования. Демонстрацию движений вживую сложно стандартизировать, так как каждый участник исследовательской команды вносит свой индивидуальный вклад при показе движений, а также даже одному и тому же человеку затруднительно повторять стимульный материал полностью идентично множество раз. Кроме того, результаты подобных исследований сложно соотносить между собой, так как типы движений и условия их демонстрации могут разительно отличаться между научными исследованиями. Видеозаписи движений удобны для использования в исследованиях, однако исследования, использующие данный стимульный материал, показывают противоречивые результаты: одни исследования продемонстрировали десинхронизацию сенсомоторной активности [22, 79], другие не выявляют значимых изменений сенсомоторных ритмов [37, 61, 72], а третьи демонстрируют увеличение мощности сенсомоторных ритмов [57]. Все это свидетельствует о том, что использование видеозаписей для исследований сенсомоторных ритмов требует дальнейшего изучения для выявления факторов, влияющих на получаемые результаты. Инклюзивное условие пассивного сгибания кисти, предложенное в работе Д. Митюревой и ее коллег, представляется перспективным для исследования сенсомоторных ритмов, однако на сегодняшний день требует дополнительных исследований на более младшей

выборке детей. Таким образом, задача поиска и определения оптимальных экспериментальных условий для дошкольников и детей с нарушениями развития остается актуальной.

1.5. Латерализация сенсомоторных ритмов

Межполушарная латерализация биоэлектрической активности мозга при движении рук обусловлена контралатеральной организацией моторного контроля: вследствие перекреста пирамидного тракта правая рука управляется преимущественно левым полушарием, а левая — правым [95]. Корковым центром моторного контроля служит область первичной моторной коры прецентральной извилины, в то же время сенсорная обратная связь от реализованного движения поступает в первичную соматосенсорную кору постцентральной извилины.

Поскольку данные регионы являются ключевыми источниками сенсомоторных ритмов, латерализация модуляции сенсомоторных ритмов зависит от того, какой рукой совершалась манипуляция. У взрослых людей наиболее выраженная супрессия в альфа-диапазоне сенсомоторных ритмов наблюдается в центральных и центрально-париетальных отведениях полушария, контралатерального руке, совершившей движение. В то же время в бета-диапазоне супрессия выражена более диффузно с преобладанием в центральных каналах (Cz) [59].

У детей исследований, описывающих межполушарную латерализацию сенсомоторных ритмов, сравнительно немного [4, 42, 59, 105]. Так, согласно исследованию А. Кайды и ее коллег, у детей 4–6 лет в альфа-диапазоне (6–13 Гц) наблюдается выраженная супрессия в контралатеральном (левом) полушарии при манипуляции правой рукой (движение левой руки в работе не изучалось), в ипсилатеральном полушарии супрессия незначима. В 7–10 лет супрессия в альфа-диапазоне сенсомоторных ритмов в центральных отведениях остаётся контралатеральной, однако в теменных отведениях приобретает двусторонний характер. Что интересно, у подростков 11–14 лет при повторном выполнении движения супрессия также наблюдается в ипсилатеральном полушарии в отведении C4 [4].

В то же время исследования латерализации сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне неоднозначны и мало представлены в научном поле. Согласно работе У. Гетца и его коллег, у детей в 4–6 лет наблюдается десинхронизация в бета-диапазоне в обоих полушариях, однако она значительно уступает супрессии взрослых по амплитуде. У детей возрастом 11–13 лет, как и у взрослых, была обнаружена более выраженная супрессия в контралатеральном полушарии при движении пальцами правой руки, однако после поправки на множественные сравнения результаты перестали быть значимыми [42].

Таким образом, данные о межполушарной латерализации сенсомоторных ритмов у детей 3–10 лет остаются фрагментарными. Для альфа-диапазона латерализация описана только при движении правой рукой [4]. Данные исследований бета-диапазона неоднозначны и немногочисленны. Между тем именно в возрасте 3–10 лет происходит становление ведущей руки: в в 3–5 лет предпочтение только начинает формироваться, к 6 годам оно стабилизируется, однако продолжает формироваться до 10 лет [95], что делает актуальным изучение возрастной динамики латерализации альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов при движении правой и левой рукой. Можно предположить, что в процессе становления ведущей руки может происходить усиление асимметрии модуляции сенсомоторных ритмов, более выраженное для ведущей руки.

1.6. Речевое развитие

Речь представляет собой чрезвычайно сложную высокоуровневую систему, которая играет важную роль в развитии когнитивных и социальных функций человека [18]. Благодаря современным методам нейровизуализации за последние 25 лет сделано множество фундаментальных открытий в понимании нейрофизиологических механизмов речевого развития [45]. Так, в работах Г. Хикока и Д. Пёппеля была сформирована двухпоточная модель восприятия речи, которая постулирует, что обработка речевого сигнала осуществляется по двум частично сегрегированным кортикальным путям, обеспечивающим понимание речи и её производство. Согласно модели, ранние этапы восприятия и обработки речи происходят билатерально в слуховых областях дорсальной верхней височной извилины и верхней височной борозды, после чего информационные потоки расходятся на вентральный и дорсальный. Вентральный поток, включающий в себя передние и задние отделы височной коры, организован билатерально, хотя и с преобладанием левого полушария. Он вовлечен в процессы доступа к лексико-семантической информации, извлечения значений слов и их интеграции с воспринятыми словами, а также в формирование слов во фразы и предложения, что в совокупности можно отнести к рецептивному компоненту речи. Дорсальный поток, характеризующийся выраженной левополушарной доминантностью, включает структуры теменно-височной области сильвиевой борозды и лобной доли. Дорсальный поток преимущественно вовлечен в обеспечение сенсомоторной интеграции и реализацию речевых актов, что можно отнести к экспрессивному компоненту речи [50, 51].

Описанная модель характеризует зрелую речевую систему взрослого человека, однако ключевые её компоненты начинают формироваться с первых месяцев и дней жизни человека.

Более того, человек уже рождается со способностью к восприятию, обработке и усвоению речи [29], которая уже присутствовала у Homo sapiens около 135 тысяч лет назад [73].

Восприятие речи является мультимодальным процессом, включающим комбинированное взаимодействие слуховых, зрительных и двигательных систем, формирование которых начинается на ранних этапах онтогенеза [41]. В исследованиях с применением функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) было обнаружено, что уже в возрасте 3 месяцев у младенцев наблюдается усиление мозговой активности при восприятии речи в областях, гомологичных центрам обработки речи у взрослых [35]. Таким образом, механизмы, реализующие рецептивный компонент речевого развития, начинают формироваться еще до начала собственного речепроизводства. Примечательно, что в течение первого года жизни опыт общения на родном языке видоизменяет способность к речевой дискриминации у младенцев, что проявляется в лучшем различении звуков родного языка и одновременно в снижении различения звуков иностранного языка. Более того, данная тенденция сохраняется и для сопоставления артикуляционных движений. Так, в исследовании Ф. Понса и его коллег было выявлено, что в возрасте 6 месяцев и англо-, и испаноязычные младенцы сопоставляли услышанные и увиденные слоги «ba» и «va», а в 11 месяцев это делали только англоязычные, поскольку в испанском «b» и «v» звучат одинаково [88]. Таким образом, в первый год жизни происходит адаптация мультисенсорной системы восприятия речи к родному языку ребенка.

Экспрессивная речь также развивается постепенно, адаптируясь со временем под особенности родного языка ребенка. Выделяют несколько этапов формирования вокальной продукции [84, 100]. В первые недели жизни преобладают крик и вегетативные звуки. С 6–8 недель появляется гуление – мягкие гласноподобные звуки, сопровождающие эмоциональное общение со взрослым. В 4–7 месяцев репертуар расширяется за счёт вокальной игры: полноценных гласных, визга, рычания и «маргинального лепета» [84, 100]. Эти ранние вокализации – протофоны – имеют преимущественно эндогенную природу: они одинаково часты в одиночестве и при общении и сходны у слышащих и глухих детей [85]. Ключевым событием доречевого развития считается формирование в 6–10 месяцев канонического лепета – слогов, сопоставимых по своим характеристикам со слогами взрослой речи («ба-ба», «ма-ма») [84]. В отличие от более ранних вокализаций, его своевременное появление зависит от слухового опыта: у глухих детей он возникает значительно позже [83]. Первые слова появляются около 12 месяцев, и их звуковой состав во многом повторяет предпочитаемые ребёнком слоги лепета [110], а к 18–20 месяцам словарный запас составляет уже около 50 слов [82]. Примерно в этот же период у детей начинают формироваться первые фразы.

Последующее речевое развитие сопровождается расширением словарного запаса и освоением грамматической системы родного языка, которое продолжается на протяжении всего

дошкольного и младшего школьного возраста. Данное интенсивное развитие требует значительной перестройки речевой сети коры головного мозга в ходе онтогенеза. В работе М.А. Скайде и А.Д. Фридеричи была предложена периодизация данного процесса на два этапа. Первый этап включает в себя первые три года жизни ребенка, в течение которых в основном формируются системы, связанные с восходящими процессами обработки речи. Восходящие процессы представляют собой построение репрезентаций на основе поступающего сенсорного сигнала, к ним можно отнести автоматическое выделение фонологических форм слов, их лексико-семантическую и морфосинтаксическую категоризацию и построение простых фразовых структур; эти процессы реализуются в основном билатерально в верхневисочной коре. Второй этап начинается в 3–4 года и продолжается вплоть до подросткового периода. В свою очередь второй этап формирования речевой сети в основном представляет собой формирование и консолидацию нисходящих процессов, при которых обработка поступающей информации происходит с учетом контекста и уже имеющегося опыта. Изменения происходят постепенно, по мере возрастания функциональной селективности и структурной связности левой нижней лобной коры. В это время происходит активное развитие анализа семантических и синтаксических отношений в предложении [97]. Таким образом, период от 3 до 10 лет представляет собой этап интенсивной перестройки речевой сети, в ходе которого формируются основные нейрональные механизмы речевой системы, окончательное созревание которых продолжается в подростковом возрасте.

1.7. Связь сенсомоторных ритмов с речью

В течение многих лет актуальным остается вопрос о том, как нейронная активность в сенсомоторных областях головного мозга связана с такими многокомпонентными процессами, как восприятие и продукция речи. Анализ функциональной активности головного мозга, в сочетании с предъявлением широкого набора задач на понимание и обработку речевых стимулов, позволяет выявлять механизмы функционирования речевой сети головного мозга [6, 53].

1.7.1. Сенсомоторные ритмы и восприятие речи у взрослых

Впервые связь восприятия речи и моторных областей была показана в исследовании Л. Фадиги и его коллег, где было выявлено, что прослушивание слов вызывает специфическую для

фонем активацию речевых моторных центров [39]. Далее в ряде работ была описана реактивность сенсомоторных ритмов при прослушивании речевых стимулов у взрослых людей [78, 81, 94]. Выраженность реактивности зависела от сопутствующих когнитивных требований к восприятию речи и характера речевого сигнала [94]. В то же время в работе Э. Либенталь и ее коллег с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) было продемонстрировано, что во время пассивного прослушивания речи наблюдается активность в сенсомоторных областях, не проявляющаяся во время пассивного восприятия не-речи [62]. Кроме того, активное восприятие речи (восприятие речи, предполагающее ответное реагирование при прослушивании: выбрать правильный ответ, целевой стимул, ответить на вопрос) или восприятие речи в условиях, усложняющих распознавание (шум, ускоренная речь и пр.), характеризуется усилением выраженности и продолжительности десинхронизации сенсомоторных ритмов [94].

Восприятие глаголов, обозначающих активное действие (англ. action verbs), вызывает десинхронизацию сенсомоторных ритмов во фронто-центральных областях, включая премоторную и моторную кору [75, 96], в то время как восприятие глаголов, обозначающих абстрактные действия, а также существительных, обозначающих перцептивные объекты, не вызывает аналогичной реактивности. Эти исследования демонстрируют, что семантическое понимание действия связано с активностью моторных нейронных сетей головного мозга. Восприятие «активного» глагола задействует моторные области, соответствующие проекции части тела в коре головного мозга, которая используется для выполнения этого действия [26]. Так, в корковых областях, связанных с контролем движений рта, наблюдается изменение биоэлектрической активности при прослушивании слов, связанных с едой, а при прослушивании слов, обозначающих инструменты, происходит аналогичное изменение активности в областях коры, связанных с движением рук [24, 89]. Также звуки, характерные для выполнения действий, вызывают десинхронизацию сенсомоторных ритмов [96].

Эти данные свидетельствуют о том, что активность сенсомоторных сетей включена в процессы восприятия речи у взрослых людей.

1.7.2. Сенсомоторные ритмы и восприятие речи у детей

Вовлечение сенсомоторной нейронной сети в восприятие речи у детей было выявлено относительно недавно. В детском возрасте ассоциация сенсомоторной активности и процессов восприятия речи остаётся достаточно противоречивой областью исследований. В рамках данного

диссертационного исследования был проведен анализ экспериментальных исследований в период с 2010 по 2025 год, в которых изучалась связь между сенсомоторной активностью и восприятием речи у детей. В результате анализа актуальной литературы было выявлено лишь 7 работ, посвященных связи сенсомоторной активности мозга и речи у детей [63]. Их перечень, используемые в них методики и основные результаты представлены в Приложении А, Таблица А.1. В одном из первых исследований связь показателей десинхронизации мю-ритма и уровня речевого развития у детей не была выявлена [111]. Так, в работе П. Уоррейн была проанализирована электрическая активность мозга у детей в возрасте 18–30 месяцев в экспериментальных условиях: 1) наблюдение за бесцельно движущимися предметами (использовалось как фоновое состояние); 2) наблюдение целенаправленного действия с предметом; 3) повторение ребенком демонстрируемых действий; 4) наблюдение целенаправленного действия без предмета. Для оценки речевого развития детей исследователи просили родителей заполнить опросник коммуникативного развития MacArthur CDI. По результатам исследования была обнаружена десинхронизация мю-ритма в центральных отведениях во всех экспериментальных условиях кроме фонового. Однако корреляция между подавлением мю-ритма, уровнем владения языком и возрастом испытуемых отсутствовала [111].

В работах К. Антоньини и М. Даума 2018 и 2019 годов была выявлена десинхронизация мю-ритма в ответ на речевые стимулы, обозначающие активное действие (глаголы), у детей в возрасте 1,5–2 года [9, 10], а в более поздних работах обнаружили, что более выраженный показатель индекса десинхронизации мю-ритма соответствует более высокому уровню развития навыка рецептивной речи уже в младенческом возрасте [93].

В исследовании К. Антоньини было проанализировано знание глаголов у детей с использованием MacArthur CDI опросника речевого и коммуникативного развития ребенка раннего возраста [9]. Дети были разделены на группы с относительно высоким и низким экспрессивным словарным запасом «активных» глаголов. ЭЭГ регистрировали при прослушивании глаголов, за которым шел видеоролик с соответствующим (конгруэнтным) или с несоответствующим (неконгруэнтным) действием. По результатам исследования семантическая конгруэнтность не влияла на подавление сенсомоторных ритмов в альфа диапазоне во время восприятия глаголов у детей с высоким уровнем экспрессивного словарного запаса глаголов. Однако в группе детей, у которых экспрессивный словарный запас глаголов был меньше, в левом центро-париетальном кластере электродов при предъявлении конгруэнтных видеоклипов наблюдалась более выраженная десинхронизация сенсомоторных ритмов в альфа-диапазоне по сравнению с неконгруэнтными условиями. Авторы исследования интерпретируют данные результаты таким образом: дети с менее развитым экспрессивным словарным запасом глаголов используют семантику глагола для формирования референтных прогнозов

относительно последующего видеоролика. Важно отметить, что в правом центро-париетальном и окципитальном кластерах каналов у детей этой группы наблюдалась обратная картина: десинхронизация мю-ритма была более выражена при неконгруэнтном условии.

Для бета-диапазона сенсомоторных ритмов наблюдалась обратная картина: у детей с высоким экспрессивным запасом глаголов в проекции левого центро-париетального кластера наблюдалось подавление в случае предъявления конгруэнтного условия и синхронизация при неконгруэнтном условии. В группе детей с более низким экспрессивным словарным запасом глаголов в бета-диапазоне не наблюдалось никаких значимых отличий между конгруэнтным и неконгруэнтным условиями. Авторы суммируют результаты следующим образом: обработка семантической конгруэнтности больше отражается в бета-диапазоне, чем в альфа-диапазоне сенсомоторных ритмов. Дети с разным уровнем экспрессивного словарного запаса глаголов по-разному воспринимают информацию: у детей с большим запасом глаголов наблюдается основная активность в бета-диапазоне при восприятии конгруэнтных стимулов, а у детей с меньшим запасом глаголов наблюдается основная активность в альфа-диапазоне. В заключение авторы приходят к выводу, что семантическая конгруэнтность влияет на сенсомоторную обработку действий, но механизмы этого влияния сложны и зависят от опыта ребенка [9].

В более позднем исследовании К. Антоньини с коллегами в ходе регистрации ЭЭГ детям предъявляли глаголы, обозначающие активное действие, псевдоглаголы (фонологически схожие с глаголами слова, лишенные семантического содержания), а также видеоролик с выполнением целенаправленных действий. По результатам исследования была выявлена десинхронизация мю-ритма при восприятии глаголов и просмотре видео с действиями. Десинхронизация мю-ритма при прослушивании глаголов происходила преимущественно в левых центральных отведениях. Данному явлению авторы дают несколько объяснений: в первую очередь предполагается, что большинство детей являются правшами. Альтернативное объяснение предполагает, что эта латерализация может отражать сходство с общими языковыми процессами, поскольку обработка глаголов действия, как и общая языковая обработка, преимущественно осуществляется в левых отделах головного мозга. При прослушивании псевдоглаголов десинхронизации мю-ритма не наблюдалось [10].

В исследовании К. Патцвальд изучались способности детей 18 месяцев интегрировать вербальные и поведенческие сигналы при восприятии действий других людей. В работе использовали экспериментальное условие, схожее с условием в исследовании К. Антоньини и М. Даума [9]. Регистрация ЭЭГ проводилась в двух экспериментальных условиях: 1) просмотр видеоролика с действиями, соответствующими озвученной цели (конгруэнтные стимулы); 2) просмотр видеоролика с действиями, не соответствующими озвученной цели (неконгруэнтные стимулы). Для оценки у детей рецептивного и продуктивного словарного запаса, связанного с

действием, родители заполняли опросник Relational Word Inventory. Было обнаружено, что мощность мю-ритма снижается для конгруэнтных стимулов по сравнению с неконгруэнтными. Наиболее выраженная десинхронизация наблюдалась у детей с большим рецептивным словарным запасом глаголов. Важным результатом стало выявление связи между языковыми навыками ребенка и особенностями восприятия действий [86].

В.В. Белалов с коллегами исследовал особенности речевого развития и нейрофизиологических механизмов восприятия речи у детей раннего возраста в зависимости от условий их воспитания. Авторы сравнили результаты 141 ребенка из биологических семей и детского дома в возрасте 2–3,5 лет, используя шкалу методики рецептивной коммуникации BSID-III и анализ сенсомоторных ритмов. В ходе регистрации ЭЭГ детям предъявлялось два экспериментальных условия: 1) прослушивание нативной (естественной) речи; 2) прослушивание аналогичных речевых стимулов в реверсированном варианте. По результатам исследования восприятие как нативной, так и реверсированной речи детьми, воспитывающимися в биологических семьях, сопровождалось увеличением мощности мю-ритма, а у детей-сирот – ее снижением или отсутствием изменений. Уровень развития рецептивной речи был ниже у детей-сирот. Кроме того, были выявлены особенности возрастной динамики созревания мю-ритма: у детей из семей частота мю-ритма закономерно увеличивалась с возрастом, тогда как у детей из детского дома этот процесс был замедлен. Авторы предположили, что у детей из семей усиление высокочастотного мю-ритма в альфа-диапазоне при восприятии речи отражает активизацию тормозных процессов, способствующих эффективной обработке информации. У воспитанников детского дома, напротив, снижение мощности мю-ритма может указывать на недостаточное развитие механизмов внимания и рабочей памяти [2].

А.А. Михайлова с коллегами в своем исследовании выдвинули предположение, что реактивность мю-ритма может отражать способность детей понимать намерения и цели действий других людей, а также изучили связь сенсомоторных ритмов с развитием речевого восприятия. Для оценки уровня развития рецептивной коммуникации использовали BSID-II, для регистрации ЭЭГ разработали следующие экспериментальные условия: 1) наблюдение мнимого действия; 2) наблюдение реального действия; 3) выполнение действия ребенком. Для контроля была зарегистрирована фоновая запись ЭЭГ. Результаты показали, что при наблюдении реального действия происходит более выраженная десинхронизация мю-ритма по сравнению с мнимым действием, что интерпретируется авторами как свидетельство активации системы зеркальных нейронов (СЗН) и понимания цели действия. Также, согласно результатам исследования, дети с высоким уровнем понимания речи, по сравнению с детьми, имеющими средний уровень понимания речи, в условии наблюдения реального действия демонстрировали большую десинхронизацию мю-ритма в проекции левополушарных лобных и теменных отведений.

Авторы считают, что это указывает на более развитую зеркальную нейронную систему и лучшее понимание намерений других людей [71].

В. Сало с соавторами исследовали механизмы развития коммуникативных навыков у младенцев через изучение роли сенсомоторной системы мозга в восприятии указательных жестов. Исследователи выдвинули предположение, что опыт наблюдения жестов способствует формированию языковых навыков через активацию сенсомоторной системы [93]. Исследование включало два визита. В первом визите на основании родительского опроса был оценен уровень рецептивного словарного запаса младенцев и проведена видеорегистрация игрового взаимодействия диад «ребёнок – родитель», во время которого фиксировалось количество указательных жестов. Далее проводилась запись высокоплотной ЭЭГ (128 каналов) в фоновом состоянии и в экспериментальных условиях: 1) наблюдения за выполнением асессором указательных жестов; 2) наблюдения за хватательными действиями. После этого часть родителей проходила обучение, направленное на повышение эффективности использования указательных жестов при коммуникации с ребенком. Далее через месяц дети с родителями приходили второй раз, где повторно проводили экспериментальную часть с группой контроля и группой, где родители прошли обучение. Согласно результатам исследования, увеличение использования указательных жестов родителями при взаимодействии с младенцами было ассоциировано с увеличением уровня десинхронизации мю-ритма, преимущественно в правом полушарии, а также с увеличением рецептивного словарного запаса. Важным уточнением является тот факт, что данный эффект был специфичен именно для указательных жестов и не происходил при наблюдении за хватательными действиями. По мнению авторов, данное исследование впервые демонстрирует, что сенсомоторная система мозга может опосредовать связь между опытом наблюдения жестов и языковым развитием. В. Сало с коллегами интерпретируют результаты как свидетельство того, что восприятие коммуникативных действий базируется на той же нейронной системе, которая обеспечивает понимание действий.

Механизмы и предпосылки связей сенсомоторной системы и речи

Способность к обработке речевого сигнала предусмотрена эволюционно и является возможной с рождения [29, 73]. В своём обзоре М. Франкен и коллеги объединили ранее не связанные между собой результаты предыдущих исследований и предположили, что восприятие речи является не только слуховым, но и фундаментально мультимодальным сенсомоторным процессом, включающим зрительную и двигательную системы [41]. Систему зеркальных

нейронов (СЗН) также выделяют в качестве одного из потенциальных механизмов, обеспечивающих появление речи у человека [11]. Деятельность СЗН тесно связывают с активностью сенсомоторных ритмов у взрослых [20, 40].

В обозреваемых экспериментальных статьях ряд авторов также интерпретировали десинхронизацию сенсомоторных ритмов при восприятии коммуникативных и речевых стимулов как нейрофизиологический коррелят активности СЗН у детей [2, 71, 86]. Вероятно, вклад сенсомоторных механизмов в восприятие речи в детском возрасте гораздо более значимый, чем предполагалось ранее. В обзоре Д. Чой и коллег уточняется, что мультимодальные речевые нейронные сети формируются раньше, чем было принято считать, а именно до появления речевых вокализаций уже на стадии внутриутробного развития [29].

В исследовании В. Сало и коллег впервые представлены доказательства того, что сенсомоторная сеть играет вспомогательную роль в развитии речи у младенцев посредством связи жестовой и речевой коммуникации [93]. Так, связь соматосенсорных процессов с восприятием речи у младенцев подтверждается также исследованиями, использующими метод вызванных потенциалов. Было показано, что еще до того, как младенцы начинают говорить, их артикуляционные конфигурации влияют на то, как они воспринимают речь: торможение артикуляции у младенцев долепетного периода приводит к избирательному нарушению процесса различения звуков, ассоциированных с данной артикуляцией, и не влияет на дифференциацию других звуков речи [21, 28]. Предположительно, когда механизмы восприятия речи только формируются, вклад сенсомоторной нейронной сети носит поддерживающий характер. Наиболее сильно это проявляется в младенческом возрасте, а в процессе созревания головного мозга этот вклад, вероятно, уменьшается.

У взрослых сенсомоторная нейронная сеть становится более активной при условиях, когда восприятие речи затруднено и требуются дополнительные когнитивные ресурсы для её распознавания [81, 94]. Это может отражать особенности функционирования первичной моторной коры как сенсорной в начале жизни человека, которая лишь позднее приобретает функциональность, соответствующую взрослому варианту [29]. На основании данных фМРТ при обработке сигнала во время процесса сенсомоторного речевого обучения было выявлено, что у взрослых задействовалась ассоциативная слуховая кора, в то время как у детей 5–12 лет активировались другие области, а именно соматосенсорные и области первичной моторной коры [80]. Это уточняет возрастные особенности процесса восприятия речи на анатомо-функциональном уровне.

Большая часть публикаций, направленных на изучение сенсомоторных ритмов при восприятии речи в детском возрасте, посвящена возрастному периоду первых трёх лет жизни и включает альфа-диапазон [2, 10, 86]. При этом, например, было показано, что в 18 месяцев у

детей с хорошими речевыми навыками при просмотре конгруэнтных видеороликов наблюдается большее подавление активности в альфа-диапазоне сенсомоторных ритмов, чем у детей с низкими речевыми навыками [86], тогда как у детей в возрасте 24 месяцев с хорошими речевыми навыками наблюдается подавление в бета-диапазоне, а у детей с плохими речевыми навыками подавление при просмотре конгруэнтных видеороликов наблюдается в альфа-диапазоне [9], то есть реакция подобна более младшим детям. Можно предположить, что с возрастом все большую роль в речевой рецепции приобретает бета-активность, что подтверждает важность её исследования для понимания механизмов развития речи. Необходимо отметить и то, что лишь небольшое количество работ направлено на исследование детей более старшего возраста при типичном развитии [80]. Таким образом, особенности реорганизации сенсомоторной сети при восприятии речи в процессе перехода от младенческого к взрослому типу функционирования остаются недостаточно изученными.

1.8. Постановка проблемы исследования

Таким образом, обзор литературы показал, что возрастной диапазон детей дошкольного и младшего школьного возраста (т.е. 3–10 лет) остается малоизученным с точки зрения характеристик сенсомоторных ритмов и динамики их развития, несмотря на то что именно в этот возрастной период продолжается активное развитие двигательных навыков, когнитивных функций и речи. Несмотря на общие закономерности развития этих функций, индивидуальные траектории их развития могут существенно различаться. Биоэлектрическая активность в этом возрастном диапазоне также характеризуется высокой межиндивидуальной вариативностью. Даже в течение одного года биоэлектрическая активность мозга, а также психомоторные и когнитивные функции и речь могут претерпевать значительные изменения.

Анализ литературы позволяет сделать вывод о малом количестве исследований модуляции сенсомоторных ритмов и ее связи с речевым развитием в дошкольном и раннем школьном периодах и об отсутствии лонгитюдных исследований сенсомоторных ритмов у детей данного возрастного периода. Настоящее исследование направлено на исследование вышеуказанных вопросов.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Участники исследования

Для исследования были отобраны 56 детей в возрасте от 3 до 10 лет, которые прошли два этапа лонгитюдного исследования проекта «Механизмы сенсорной интеграции в развитии устной и письменной речи» направления «Развитие человека: мозг и психика» Научно-технологического университета «Сириус». Двенадцать детей были исключены из финальной выборки: 2 были исключены в связи с неполным прохождением экспериментальных условий, 10 были исключены в связи с большим количеством шумов и артефактов на записи. В финальную выборку вошли 44 ребенка (мальчиков: 24; девочек: 20; возраст: на момент первого этапа лонгитюда: 3,58–8,83; M = 6,12 ± 1,29; на момент второго этапа лонгитюда: 4,75–10,16; M = 7,34 ± 1,3). Между первым и вторым этапом лонгитюда в среднем проходил один год и два месяца (M = 14,65 ± 2,92 месяца).

Для изучения возрастных особенностей сенсомоторных ритмов финальная выборка исследования была поделена на три подгруппы: младшая возрастная группа – дети возрастом от 3 лет до 4 лет 11 месяцев (8 человек), средняя возрастная группа – дети возрастом от 5 лет до 6 лет 11 месяцев (23 человека) и старшая возрастная группа – дети возрастом от 7 лет до 8 лет 11 месяцев (13 детей) 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 ± 2,92 месяца).

У детей оценивалась ведущая рука для дальнейшего изучения межполушарной латерализации с помощью родительского опросника, который содержал 18 вопросов о предпочитаемой руке в различных повседневных ситуациях; каждый пункт оценивался по шкале от −2 (всегда использует левую руку) до 2 (всегда использует правую руку), итоговый балл рассчитывался как среднее значение по всем пунктам. Участники, набравшие более 0,7 балла, считались правшами; участники, набравшие от −0,7 до 0,7 балла, считались амбидекстрами; участники, набравшие менее −0,7 балла, считались левшами. По результатам опросника выборка состояла из 34 правшей, 2 левшей, 5 амбидекстров и 3 ребенка, чьи родители не заполнили опросник. Вопросы родительского опросника и варианты ответов представлены в Приложении Б.

Исследование одобрено Комитетом по биоэтике Университета «Сириус» (заключение Комитета по биоэтике от 13.07.2022) в соответствии с Хельсинкской декларацией. Родители участников подписали информированное согласие, дети дали устное согласие на участие в исследовании. Исследование проводилось в соответствии с утвержденными протоколами сбора и обработки данных ЭЭГ и поведенческих данных.

2.2. Оценка речевого развития

Речевое развитие детей оценивалось на первом этапе лонгитюдного исследования с помощью русской версии стандартизированной психометрической методики оценки речевого развития Preschool Language Scales, Fifth Edition (PLS-5) [103]. Данные только 32 участников из финальной выборки исследования были включены в анализ, поскольку у 12 респондентов поведенческие данные были собраны со значительной задержкой по отношению к нейрофизиологической части исследования (ЭЭГ). Для анализа были использованы стандартизованные по возрасту баллы шкалы «Общее речевое развитие» (Total Language), оценивающей общие навыки языкового развития и складывающейся из результатов шкал «Слуховое восприятие» (Auditory Comprehension) и «Экспрессивная коммуникация» (Expressive Communication), которые также были стандартизованы по возрасту. Шкала «Слуховое восприятие» оценивает способность ребенка понимать устную речь и включает в себя 65 заданий, увеличивающихся по уровню сложности. Шкала «Экспрессивная коммуникация» оценивает, как ребенок выражает себя вербально и как взаимодействует с окружающими, и включает в себя 67 заданий, также увеличивающихся по уровню сложности. В методике применяется правило базового и потолочного уровней. Все задания являются дихотомическими. Выполненные задания получают оценку «1»; невыполненные задания оцениваются как «0». Для достижения потолочного уровня необходимо набрать 6 нулей подряд. В среднем PLS-5 проводится в течение 30–60 минут в зависимости от возраста ребёнка. Методика используется для оценки как предречевых, так и языковых навыков в области семантики, морфологии, синтаксиса, интегративных и ранних навыков грамотности [103].

2.3. Стимульный материал

Пассивное сгибание кисти ребенка (ПСР)

Экспериментальное условие пассивного сгибания кисти ребенка было заимствовано из исследования Д. Митюревой с коллегами [72] и представляло собой пассивное сгибание и разгибание правой и левой кисти ребенка поочередно 15 раз представителем исследовательской команды (асессором) (всего по 3 серии сгибаний/разгибаний кисти по 15 раз для каждой руки). Перед началом манипуляции с рукой ребенку заранее проговаривали, что сейчас будут сгибать и разгибать кисть, и просили смотреть на его кисть во время манипуляции.

Наблюдение за видеозаписью движений рук (НВР)

Стимульным материалом для экспериментального условия наблюдения за видеозаписью движений рук послужил видеоролик, на котором крупном планом демонстрировались кисти рук, манипулирующие ярким мылом (манипуляции с предметом, имеющим яркие визуальные характеристики, были необходимы для удержания внимания у маленьких детей). На видеозаписи демонстрировались следующие манипуляции: выбор предмета, захват предмета, удерживание предмета и сдавливание предмета (мыла) пальцами, показанные крупным планом.

Наблюдение за видеозаписью с движением фракталов (НВФ)

Наблюдение видеозаписи с фракталами являлось контрольным условием. Согласно исследованию К. Куэвас и ее коллег, где были рассмотрены практические рекомендации к проведению исследований по изучению сенсомоторных ритмов у детей, для контрольного условия можно использовать демонстрацию бессмысленного абстрактного изображения, которое в свою очередь не должно вызывать модуляцию мю-ритма [34]. На видеозаписи демонстрировались фракталы на черном фоне, которые медленно двигались и менялись на протяжении всего ролика. Скриншоты видеостимулов, использованных для условий НВФ и НВР, находятся в открытом доступе; соответствующая ссылка приведена в конце раздела 2.5.

2.4. Процедура исследования

Регистрация ЭЭГ с использованием вышеописанных экспериментальных условий в рамках лонгитюдного исследования проводилась дважды с интервалом в один год между исследованиями. Экспериментальная процедура для первого этапа незначительно менялась в течение этого времени: изначально условия наблюдения видеозаписей НВР и НВФ длились 30 секунд (n = 12 участников прошли эту версию экспериментального протокола, средний возраст (месяцы) M = 66,00 ± 13,82; возрастной диапазон 43,0–88,0). Впоследствии время представления стимулов было удвоено за счёт их демонстрации 2 раза, в результате чего общая продолжительность каждого условия составила 60 секунд (n = 15; M = 67,40 ± 13,64; диапазон 48,0–94,0). Демонстрация чередовалась с другими экспериментальными задачами, которые не оценивались в данном исследовании. В финальной вариации 30-секундный сегмент был увеличен до 45 секунд, в результате чего общая продолжительность каждого условия составила 90 секунд (n = 17; M = 84,12 ± 12,68; диапазон 62,0–106,0). Для второго нейрофизиологического этапа условия НВР и НВФ остались без изменений, и каждое условие длилось 90 секунд для всех участников. Изначально было предположено, что более короткий временной интервал просмотра видеозаписи позволит лучше удерживать внимание участников, но в ходе проведения исследования было принято решение об увеличении времени записей для снижения риска потери данных из-за артефактов, связанных с движениями детей.

Перед условием ПСР в течение 30 секунд для ознакомления с процедурой исследования детям демонстрировался слайд с инструкцией, которая зачитывалась вслух. Кроме того, в процессе ознакомления с инструкцией с детьми устанавливался тактильный контакт для привыкания к прикосновению руки асессора. Далее выполнялось условие ПСР, во время которого асессор сгибал и разгибал кисть ребенка 15 раз; асессор, выполняющий условие, стоял со стороны сгибаемой руки. После выполняли пробу с закрытыми глазами в течение 45 секунд (не анализировалась в данной работе). Подробная схема эксперимента показана на Рисунке 1.

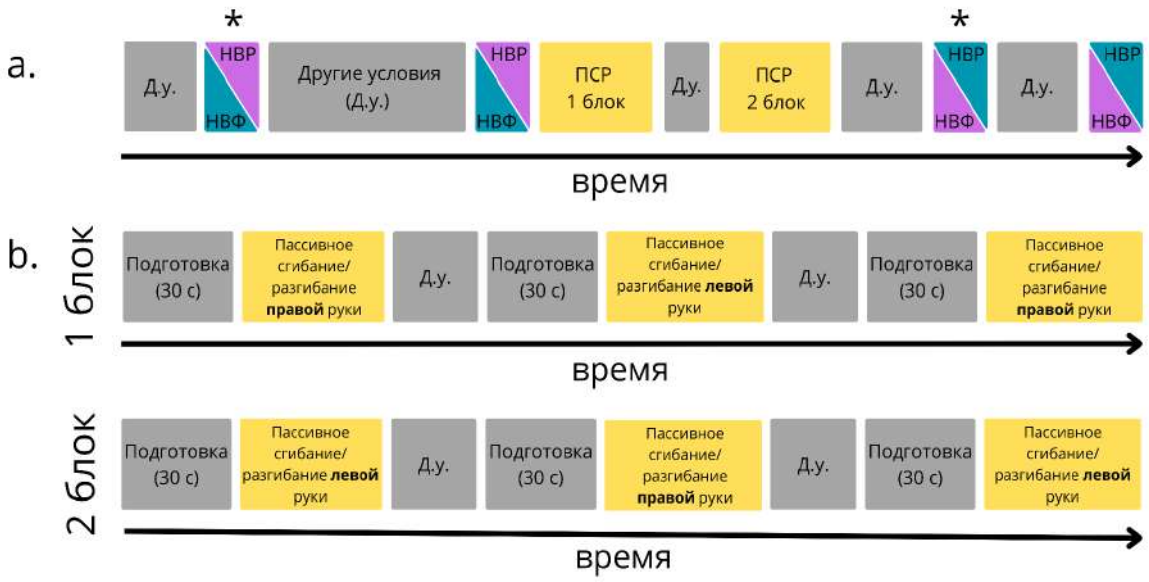


Рисунок 1 — Схема эксперимента. (a) Общая схема эксперимента. Анализируемые в данном исследовании условия выделены цветом. Другие условия (Д.у.) — условия, не включенные в данное исследование (отмечены серым). Синий блок (НВФ) — контрольное условие «Наблюдение видео с фракталами» (90 секунд (в целом)), фиолетовый блок (НВР) — условие «Наблюдение за движением рук на видео» (90 секунд (в целом)). (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)

Запись ЭЭГ проводилась в шумоизолированной и электрически изолированной комнате с использованием 32-канальной активной электродной системы (actiCHamp, Brain Products, Германия) с частотой дискретизации 50 кГц. Электроды размещались в соответствии с международной системой 10–20. Электрод FCz был установлен в качестве референта. Импеданс большинства электродов поддерживался на уровне ниже ~25 кОм. При регистрации ЭЭГ использовался полосовой фильтр 0,1–100 Гц.

Стимульный материал предъявлялся участнику на LED-мониторе с диагональю 23,8 дюйма и разрешением 1920×1080 пикселей, который располагался на расстоянии 60 см от участника. Эксперимент проводился с использованием программного обеспечения Presentation (версия 23.1.09.29.22), которое синхронизирует предъявление стимулов с записью ЭЭГ.

2.5. Предварительная обработка данных ЭЭГ

Анализ и предварительная обработка данных ЭЭГ выполнялись с использованием Python в Jupyter Notebook, пакет MNE-python версии 1.7.0 (https://mne.tools/). Для предварительной обработки исходных данных частота дискретизации записи ЭЭГ была снижена с 50 кГц до 500 Гц (высокая частота регистрации обоснована экспериментальными условиями, не исследуемыми в данной диссертационной работе). Данные ЭЭГ были отфильтрованы с помощью полосового фильтра 1–50 Гц. Каналы с большим количеством артефактов и высоким уровнем шума (выбирались вручную) были интерполированы. Сегменты ЭЭГ-записи с большим количеством артефактов отмечались вручную как плохие эпохи, чтобы они не искажали результаты ICA в последующем анализе, а также автоматически удалялись на последних этапах препроцессинга. После интерполяции данные были очищены от оставшихся артефактов с помощью анализа независимых компонентов (ICA) с алгоритмом FastICA. Автоматическая маркировка независимых компонентов была выполнена с помощью платформы ALICE, основанной на машинном обучении [99]. После этого для компонентов, автоматически классифицированных как глазные или мышечные артефакты, вручную было выполнено подтверждение для их удаления, на основании топографии и характерных для артефактов паттернов активности. Затем было проведено перереферирование ЭЭГ-записи относительно усредненного сигнала, и далее запись была сегментирована на двухсекундные эпохи. Эпохи, ранее помеченные как плохие, а также эпохи, содержащие шумы и артефакты высокой амплитуды, были исключены с использованием фильтра с пороговым значением амплитуды 200 мкВ. Порог был выбран экспериментально: более жесткий порог в 150 мкВ удалял физиологические сегменты ЭЭГ-сигнала у 3–4-летних детей. Более мягкие пороги (более 200 мкВ) оставляли большое количество артефактов и шумов в записи.

Доля отклоненных эпох значительно варьировалась в зависимости от экспериментального условия. Для условия ПСР, которое включало в среднем 45 эпох (каждая продолжительностью 2 секунды), было исключено 7,5% эпох. В условии НВР (90 с), которое состояло из 45 эпох, доля отклоненных эпох составила 7,3%. В контрольном условии (НВФ (90 с)), также состоящем из 45 эпох, было исключено 10% эпох.

Далее к данным был применен анализ плотности источника тока (Current source density (CSD)) с рекомендуемыми настройками библиотеки MNE (sphere = „auto“, lambda2 = 1e-05, stiffness = 4, n_legendre_terms = 50). Целью применения преобразования CSD было улучшение пространственной точности данных ЭЭГ и усиление локальных источников нейронных сигналов [25]. После этого к записям ЭЭГ было применено быстрое преобразование Фурье (БПФ), и была

определена средняя амплитуда сигнала для диапазонов 8–13 Гц и 13–30 Гц в каждом отведении и для каждого экспериментального условия. Единый диапазон частот 8–13 Гц для альфа-диапазона сенсомоторных ритмов использовался для всех возрастных подгрупп на основании исследования П. Маршалла, которое показало, что частота альфа-диапазона в центральных отведениях увеличивается с 7–8 Гц у детей 10–24 месяцев до 9 Гц к 4 годам [67]; исследование М. Берчикки также показало, что сенсомоторные ритмы у детей приближаются к данному диапазону частот примерно с 3–4-летнего возраста [15]. В итоговый анализ исследования вошли отведения F3, F4, FC1, FC2, FC5, FC6, C3, C4, CP1, CP2, CP5, CP6. Столь широкий пул отведений (относительно традиционных C3, C4) обоснован исследованиями, показывающими, что сенсомоторная активность, помимо центральных областей, может наблюдаться во фронтальных и париетальных областях [105].

Скрипты, использованные для анализа данных, и непосредственно сами данные можно найти по ссылке: https://osf.io/mnuaz/overview.

2.6. Статистический анализ

Статистический анализ данных был проведен с помощью дисперсионного анализа повторных измерений (Repeated Measures ANOVA (RM ANOVA)) в графическом интерфейсе для языка программирования R – JASP (версия 0.95.0.0). Для ANOVA были выбраны следующие внутригрупповые факторы: Этап лонгитюда (Уровни: Первый и Второй этап), Условие (Уровни: НВФ, ПСР, НВР), Полушарие (Уровни: Правое, Левое) и Регион (Уровни: F(3/4), FC(5/6), FC(1/2), C(3/4), CP(5/6), CP(1/2)) и межгрупповой фактор возраст (Уровни: Младшие дети (3–4 года), Средние (5–6 лет), Старшие (7–8 лет)), возраст указан на момент первого этапа лонгитюдного исследования.

Оценка латерализации супрессии сенсомоторных ритмов при сгибании правой и левой руки условия ПСР проводилась для второго этапа лонгитюдного исследования (по техническим причинам из-за нарушений маркировки условия сгибания правой и левой руки в 1-м срезе этот показатель невозможно исследовать). Была рассчитана RM ANOVA со следующими внутригрупповыми факторами: Латерализация (Уровни: НВФ (контроль), ПСР правая рука, ПСР левая рука), Полушарие (Уровни: Левое, Правое) и Регион (уровни: F3/F4, FC5/FC6, FC1/FC2, C3/C4, CP5/CP6, CP1/CP2) и межгрупповой фактор возраст (Уровни: Младшие дети (3–4 года), Средние (5–6 лет), Старшие (7–8 лет)), возраст указан на момент первого этапа лонгитюдного исследования.

Для изучения связи сенсомоторных ритмов и речевого развития предварительно для каждого анализируемого отведения был рассчитан индекс модуляции для экспериментальных условий по формуле: Log10(экспериментальное условие / контрольное условие (НВФ)). Использовали ЭЭГ-данные первого этапа лонгитюдного исследования, поскольку оценка речевого развития проводилась только на первом этапе лонгитюдного исследования. Затем для каждого диапазона (альфа 8–13 Гц и бета 13–30 Гц) сенсомоторных ритмов был проведен корреляционный анализ Спирмена между индексами модуляции (условия ПСР и НВР) и показателями PLS-5 (Слуховое восприятие, Экспрессивная коммуникация, Общее речевое развитие). Поправка на множественные сравнения выполнялась методом FDR (Benjamini–Hochberg). Полные результаты дисперсионного и корреляционного анализа приведены в Приложении В (Таблицы В.1–В.26, Рисунок В.1).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Основные характеристики сенсомоторных ритмов

3.1.1. Диапазон 8–13 Гц

Был выявлен значимый фактор 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)). Полный анализ результатов RM ANOVA для диапазона 8–13 Гц представлен в Таблице B.1 Приложения B.

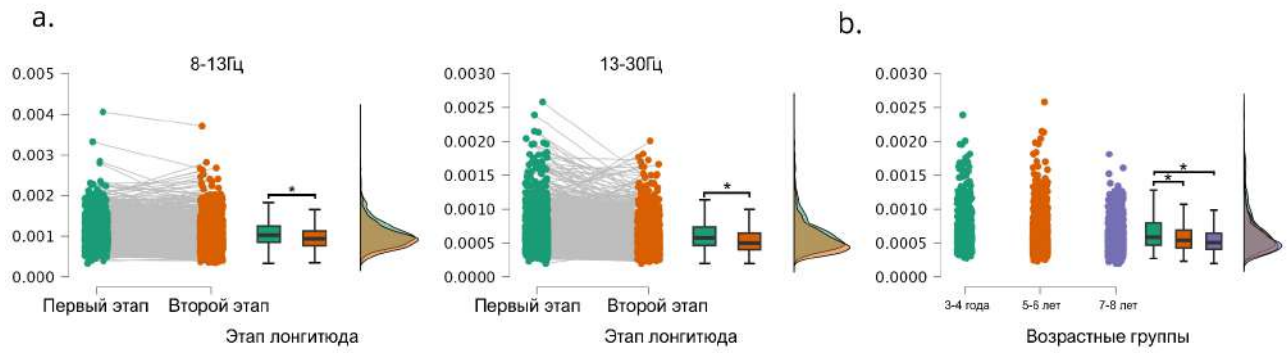


Рисунок 2 — Возрастные изменения. (a) Различие между первым и вторым этапами лонгитюдного исследования для диапазонов 8–13 Гц и 13–30 Гц. Апостериорный анализ фактора Этап лонгитюда выявил, что амплитуда была выше для первого этапа лонгитюдного исследования, независимо от условия или канала, по сравнению 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 «*»

Кроме того, фактор Условие также был значим ($F = 24{,}488$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}374$), как и взаимодействие Условие × Регион ($F = 9{,}785$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}193$). Апостериорный анализ фактора Условие выявил различия между условиями НВФ и ПСР (Cohen’s $d = 0{,}285$, $t = 5{,}840$, $p(\text{Holm}) < 0{,}001$), а также НВФ и НВР (Cohen’s $d = -0{,}123$, $t = -2{,}148$, $p(\text{Holm}) = 0{,}038$). Экспериментальное условие ПСР значимо отличалось от контрольного условия НВФ: наблюдалось уменьшение амплитуды – десинхронизация сенсомоторных ритмов. В то же время для экспериментального условия НВР наблюдалось увеличение амплитуды по сравнению с

контрольным условием НВФ, что говорит о синхронизации. Кроме того, экспериментальные условия ПСР и НВР значимо отличались друг от друга (Cohen's d = −0,407, t = −5,721, p(Holm) < 0,001) (см. Рисунок 3).

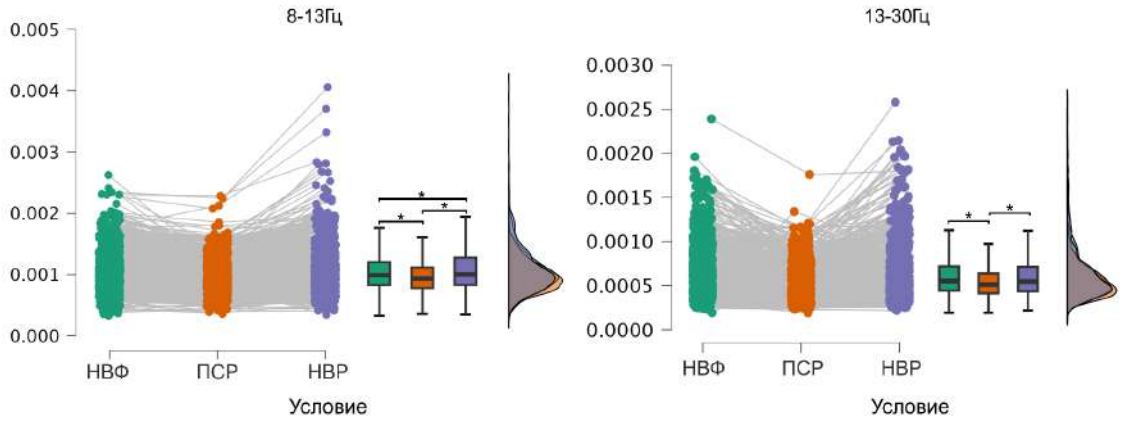


Рисунок 3 — Различия между условиями (НВФ, НВР, ПСР) для диапазонов 8–13 Гц и 13–30 Гц. Для диапазона 8–13 Гц значимые различия наблюдались между условием НВФ и обоими экспериментальными условиями (ПСР и НВР), а также между двумя экспериментальными условиями. В то же время для диапазона 13–30 Гц значимые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

Апостериорный анализ взаимодействия факторов Условие × Регион выявил значимые различия между условиями НВФ и ПСР, а также между ПСР и НВР во фронтально-центральных, центральных и центрально-теменных регионах (FC1/FC2, C3/C4, CP1/CP2), тогда как различия между НВФ и НВР не были значимыми при рассмотрении по отдельным регионам (см. Рисунок В.1 и полный апостериорный анализ взаимодействия Условие × Регион в Таблице В.3 — Приложение В).

3.1.2. Диапазон 13–30 Гц

Был выявлен значимый эффект фактора Этап лонгитюда (F = 50,144, p < 0,001, η^2p = 0,550): общие значения амплитуды (независимо от условия) были выше для первого этапа лонгитюда, чем для второго (см. Рисунок 2(а)). Кроме того, был значим фактор Полушарие (F = 4,182, p = 0,047, η^2p = 0,093): амплитуда была выше в правом полушарии, чем в левом. Полный анализ результатов RM ANOVA для диапазона 13–30 Гц представлен в Приложении В: Таблица В.4.

Также был значим межгрупповой фактор Возрастная группа ($F = 4{,}746$, $p < 0{,}014$, $\eta^2p = 0{,}188$). Апостериорный анализ выявил значимые отличия между группами 3–4 года и 5–6 лет (Cohen's $d = 0{,}531$, $t = 2{,}429$, $p(Holm) = 0{,}039$), а также группами 3–4 года и 7–8 лет (Cohen's $d = 0{,}727$, $t = 3{,}040$, $p(Holm) = 0{,}012$). Однако значимых отличий между группами 5–6 и 7–8 лет не было ($p = 0{,}294$) (см. Рисунок 2(b)).

Фактор Условие также был значим ($F = 35{,}818$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}466$), как и взаимодействие Условие × Регион ($F = 12{,}718$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}237$). Апостериорный анализ выявил различия между условием контроля НВФ и ПСР (НВФ vs ПСР; Cohen's $d = 0{,}491$, $t = 8{,}767$, $p(Holm) < 0{,}001$), а также между экспериментальными условиями ПСР и НВР (НВР vs ПСР; Cohen's $d = -0{,}468$, $t = -6{,}781$, $p(Holm) < 0{,}001$). Однако условие НВР от контрольного НВФ значимо не отличалось ($p = 0{,}746$) (см. Рисунок 3). Апостериорный анализ взаимодействия Условие × Регион для условий НВФ и ПСР выявил значимые отличия для всех регионов, которые вошли в анализ (см. Рисунок 4). Кроме того, для взаимодействия Условие × Регион между экспериментальными условиями ПСР и НВР также были обнаружены значимые различия в следующих регионах: F3/F4, FC5/FC6, FC1/FC2, C3/C4, CP5/CP6 (см. полный апостериорный анализ взаимодействия Условие × Регион для диапазона 13–30 Гц в Таблице В.6 — Приложение В).

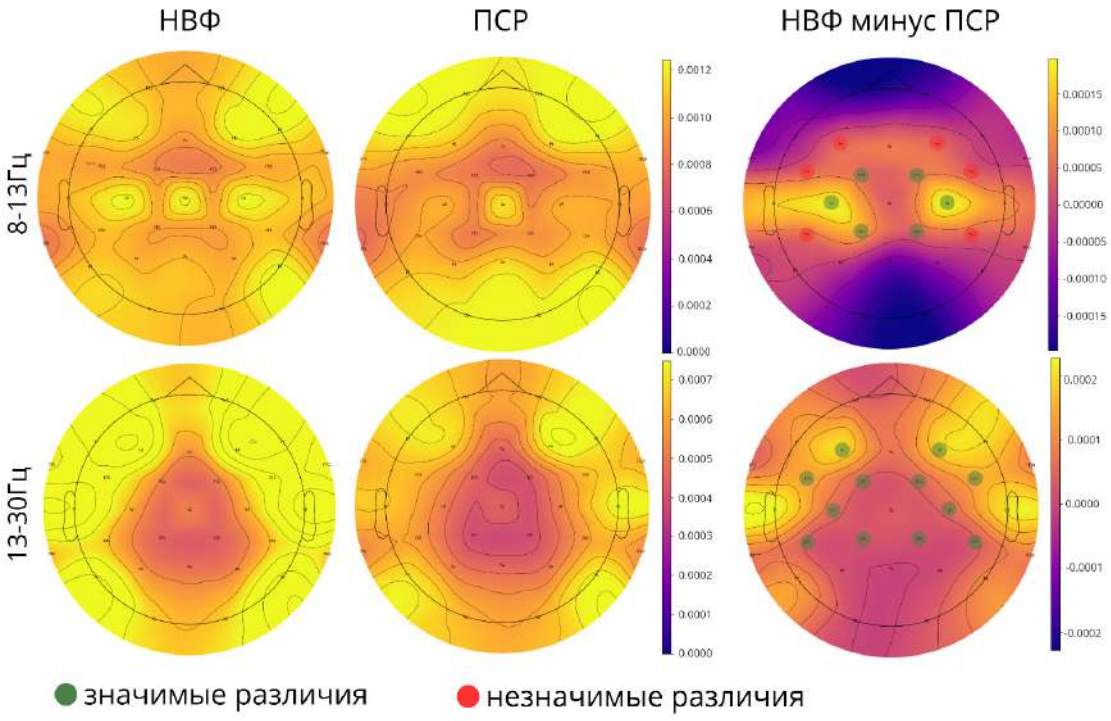


Рисунок 4 — Топография биоэлектрической активности для условия НВФ и ПСР в двух частотных диапазонах. Для разности биоэлектрической активности (НВФ − ПСР) выделены каналы, которые вошли в анализ и в которых были обнаружены значимые отличия

Более того, было обнаружено тройное значимое взаимодействие Возрастная группа × Условие × Регион ($F = 1,865$, $p = 0,014$, $\eta^2p = 0,083$) в диапазоне 13–30 Гц. Чтобы интерпретировать возрастные эффекты, для каждой возрастной группы была рассчитана RM ANOVA со следующими факторами: Условие (уровни: НВФ, ПСР, НВР) и Регион (уровни: F(3/4), FC(5/6), FC(1/2), C(3/4), CP(5/6), CP(1/2)) для бета-диапазона сенсомоторных ритмов.

Для возрастной группы 3–4 года был обнаружен значимый фактор Условие ($F = 14,77$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,678$) и значимое взаимодействие Условие × Регион ($F = 6,114$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,466$). Апостериорный анализ фактора Условие выявил различия между условиями НВФ и ПСР (НВФ vs ПСР; Cohen's $d = 0,812$, $t = 4,880$, $p(Holm) = 0,005$), а также между экспериментальными условиями (ПСР vs НВР; Cohen's $d = −0,729$, $t = −4,159$, $p(Holm) = 0,008$). Анализ взаимодействия Условие × Регион выявил значимые различия между условиями НВФ и ПСР в регионе FC1/2 (Cohen's $d = 0,252$, $t = 7,623$, $p(Holm) = 0,017$).

Для возрастной группы 5–6 лет был обнаружен значимый фактор Условие ($F = 13,99$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,389$) и значимое взаимодействие Условие × Регион ($F = 5,945$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,213$). Апостериорный анализ фактора Условие выявил различия между условиями НВФ и ПСР (НВФ vs ПСР; Cohen's $d = 0,445$, $t = 5,625$, $p(Holm) < 0,001$), а также между экспериментальными условиями (ПСР vs НВР; Cohen's $d = −0,542$, $t = −4,381$, $p(Holm) < 0,001$). Апостериорный анализ взаимодействия Условие × Регион выявил значимые различия между условиями НВФ и ПСР в регионах F3/4 (Cohen's $d = 1,190$, $t = 4,384$, $p(Holm) = 0,012$) и C3/4 (Cohen's $d = 0,299$, $t = 4,465$, $p(Holm) = 0,010$), а также значимые различия между экспериментальными условиями ПСР и НВР в регионах FC5/6 (Cohen's $d = −0,848$, $t = −3,755$, $p(Holm) = 0,045$), C3/4 (Cohen's $d = −0,421$, $t = −3,797$, $p(Holm) = 0,042$) и CP5/6 (Cohen's $d = −0,285$, $t = −3,725$, $p(Holm) = 0,047$).

Для возрастной группы 7–8 лет был обнаружен значимый фактор Условие ($F = 6,929$, $p < 0,004$, $\eta^2p = 0,366$). Апостериорный анализ выявил значимые различия между условиями НВФ и ПСР (Cohen's $d = 0,544$, $t = 3,691$, $p(Holm) = 0,009$), а также между экспериментальными условиями (ПСР vs НВР; Cohen's $d = −0,454$, $t = −3,278$, $p(Holm) = 0,013$). Взаимодействие Условие × Регион незначимо для данной возрастной группы ($p = 0,157$), что может указывать на равномерность различий между условиями независимо от региона.

3.2. Эффект латерализации для пассивного сгибания и разгибания правой и левой руки

3.2.1. Диапазон 8–13 Гц

В диапазоне 8–13 Гц были выявлены следующие значимые факторы: Латерализация ($F = 15{,}543$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}275$) и межгрупповой фактор Возрастная группа ($F = 3{,}831$, $p = 0{,}030$, $\eta^2p = 0{,}157$), а также значимые взаимодействия: Латерализация × Полушарие ($F = 14{,}408$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}260$), Латерализация × Полушарие × Регион ($F = 5{,}557$, $p < 0{,}001$, $\eta^2p = 0{,}119$). Полный анализ результатов RM ANOVA для эффекта Латерализации в диапазоне 8–13 Гц представлен в Приложении В: Таблица В.16.

Апостериорный анализ фактора Латерализация выявил, что пассивное сгибание как правой руки (Cohen's $d = 0{,}327$, $t = 4{,}229$, $p(Holm) < 0{,}001$), так и левой (Cohen's $d = 0{,}306$, $t = 4{,}013$, $p(Holm) < 0{,}001$) значимо отличается от контрольного условия НВФ (см. Рисунок 5).

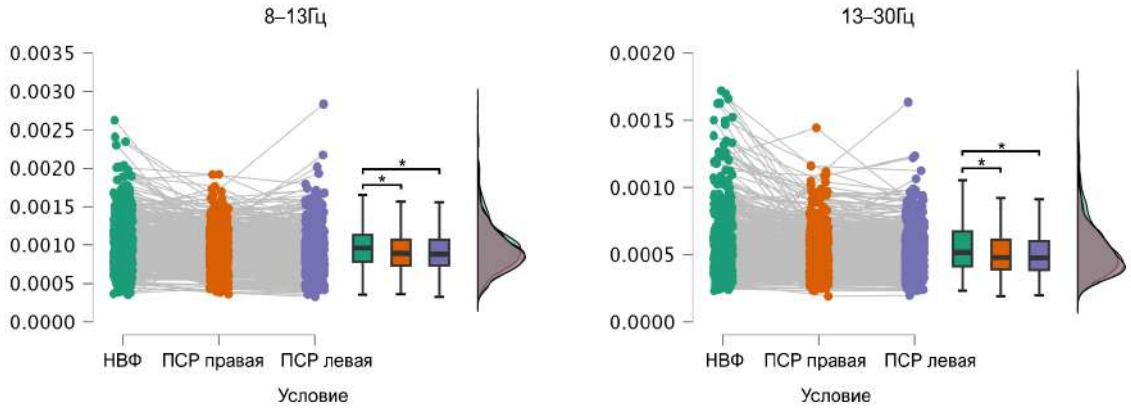


Рисунок 5 — Различия между условиями НВФ, ПСР для правой и ПСР для левой руки для диапазонов 8–13 Гц и 13–30 Гц. Для обоих частотных диапазонов пассивное сгибание как правой, так и левой руки значимо отличается от условия контроля НВФ. Значимые различия отмечены символом «*»

Апостериорный анализ взаимодействия Латерализация × Полушарие выявил, что при сгибании правой руки амплитуда ритма в контралатеральном (левом) полушарии была значимо ниже, чем амплитуда в условии контроля НВФ как в левом полушарии (Cohen's $d = -0{,}503$, $t = -4{,}643$, $p(Holm) < 0{,}001$), так и в правом (Cohen's $d = 0{,}478$, $t = 4{,}795$, $p(Holm) < 0{,}001$) (см. Рисунок

6(a)). В то же время амплитуда ритма в правом полушарии при сгибании правой руки значимо не отличалась от амплитуды в условии контроля НВФ как в правом, так и в левом полушарии. Кроме того, было обнаружено, что при пассивном сгибании правой руки наблюдается значимая межполушарная асимметрия: общая амплитуда ЭЭГ была выше в правом полушарии (ипсилатеральном руке), чем в левом (Cohen's d = −0,328, t = −4,083, p(Holm) = 0,002) (см. Рисунок 6(b)).

В то же время при пассивном сгибании левой руки амплитуда в контралатеральном (правом) полушарии значимо отличалась от условия контроля НВФ как в левом полушарии (Cohen's d = 0,384, t = 4,676, p(Holm) < 0,001), так и в правом (Cohen's d = 0,409, t = 4,947, p(Holm) < 0,001) (см. Рисунок 6(a)). Аналогично результатам для пассивного сгибания правой руки, при сгибании левой руки в левом полушарии нет значимых отличий от условия контроля НВФ как в правом, так и в левом полушарии. Однако в случае пассивного сгибания левой руки межполушарных различий не обнаружено.

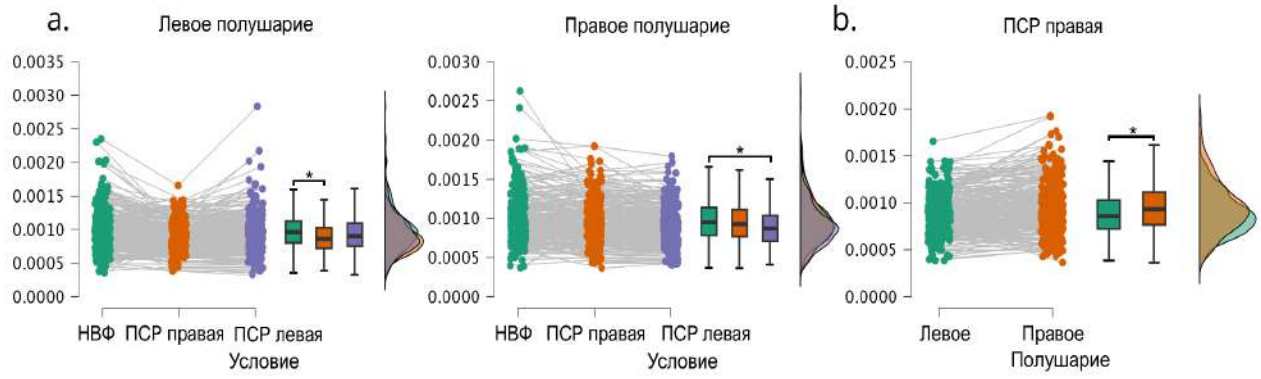


Рисунок 6 — Межполушарная латерализация сенсомоторных ритмов при пассивном сгибании и разгибании правой и левой руки в диапазоне 8–13 Гц. (a) Взаимодействие Латерализация × Полушарие: разница между контрольным условием и пассивным сгибанием правой и левой руки в правом и левом полушарии в диапазоне 8–13 Гц. (b) Взаимодействие Латерализация × Полушарие: значимые отличия между полушариями при пассивном сгибании правой руки в диапазоне 8–13 Гц. Значимые различия отмечены символом «*»

Апостериорный анализ взаимодействия Латерализация × Полушарие × Регион выявил контралатеральную сгибаемой руке десинхронизацию в центральных регионах: между условием контроля НВФ и пассивным сгибанием правой руки наблюдаются значимые различия в отведении C3 (Cohen's d = 1,290, t = 5,783, p(Holm) < 0,001), аналогично, для сгибания левой руки в отведении C4 (Cohen's d = 1,053, t = 5,398, p(Holm) = 0,002). Кроме того, в отведении FC2 наблюдаются значимые различия между условиями НВФ и сгибанием левой руки (канал FC2,

НВФ vs ПСР левая рука; Cohen’s d = 0,533, t = 4,554, p(Holm) = 0,020), а также между пассивным сгибанием правой и левой руки (канал FC2, ПСР правая рука vs ПСР левая рука; Cohen’s d = 0,368, t = 4,971, p(Holm) = 0,006). Полный апостериорный анализ для взаимодействия Латерализация × Полушарие × Регион находится в Таблицах В.19 и В.20 Приложения В. Топография биоэлектрической активности для разницы между условием НВФ и пассивным сгибанием правой и левой руки в диапазоне 8–13 Гц представлена на Рисунке 7.

Апостериорный анализ межгруппового фактора Возрастная группа выявил значимые различия между детьми в группе 3–4 года и старшими детьми в группе 7–8 лет (Cohen’s d = 0,931, t = 2,768, p(Holm) = 0,025). Соответственно, дети в младшей возрастной группе демонстрировали более высокие значения амплитуды по сравнению с детьми старшей группы, независимо от других факторов.

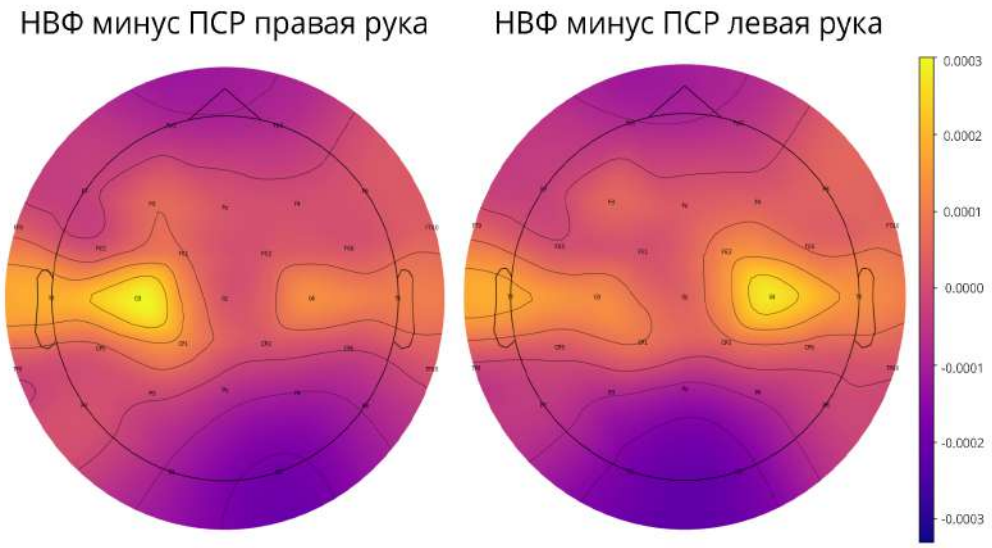


Рисунок 7 — Топография биоэлектрической активности для разницы между контрольным условием и пассивным сгибанием правой (слева) и левой (справа) руки в диапазоне 8–13 Гц

3.2.2. Диапазон 13–30 Гц

В диапазоне 13–30 Гц были выявлены следующие значимые факторы: Латерализация (F = 38,646, p < 0,001, η^2p = 0,485) и межгрупповой фактор Возрастная группа (F = 4,239, p = 0,021, η^2p = 0,171). Полный анализ результатов RM ANOVA для эффекта Латерализации в диапазоне 13–30 Гц представлен в Приложении В: Таблица В.22.

Апостериорный анализ фактора Латерализация выявил, что пассивное сгибание как правой руки (Cohen’s d = 0,473, t = 6,327, p(Holm) < 0,001), так и левой (Cohen’s d = 0,530, t = 6,797, p(Holm) < 0,001) значимо отличается от контрольного условия НВФ (см. Рисунок 5). В то же время апостериорный анализ фактора Возрастная группа выявил аналогичные диапазону 8–13 Гц результаты для диапазона 13–30 Гц: дети в младшей возрастной группе 3–4 года значимо отличаются от старшей возрастной группы 7–8 лет независимо от других факторов (Cohen’s d = 0,788, t = 2,888, p(Holm) = 0,018).

3.3. Сенсомоторные ритмы и речевое развитие

Корреляционный анализ Спирмена между показателями методики для оценки речевого развития PLS-5 (Слуховое восприятие, Экспрессивная коммуникация и Общее речевое развитие) и индексом модуляции в экспериментальном условии пассивное сгибание кисти руки в альфа-диапазоне сенсомоторных ритмов не выявил значимых корреляций (полный анализ корреляции шкал PLS-5 × ПСР для диапазона 8–13 Гц представлен в Таблице В.25 Приложения В).

Однако для бета-диапазона сенсомоторных ритмов были обнаружены следующие значимые отрицательные корреляции индекса модуляции: для шкалы «Общее речевое развитие» значимые отрицательные корреляции наблюдались в отведениях F3 (ρ Spearman’s = −0,479, p(FDR) = 0,033) и F4 (ρ Spearman’s = −0,513, p(FDR) = 0,032) (см. Рисунок 9).

Для показателя «Слуховое восприятие» значимые отрицательные корреляции были обнаружены в отведениях F4 (ρ Spearman’s = −0,619, p(FDR) = 0,001), FC1 (ρ Spearman’s = −0,466, p(FDR) = 0,021), FC6 (ρ Spearman’s = −0,417, p(FDR) = 0,041), C3 (ρ Spearman’s = −0,482, p(FDR) = 0,02) и CP2 (ρ Spearman’s = −0,487, p(FDR) = 0,02) (см. Рисунок 10). Для показателя «Экспрессивная коммуникация» значимых корреляций обнаружено не было.

Описанные выше корреляции для обоих диапазонов сенсомоторных ритмов представлены на Рисунке 8 (полный анализ корреляций PLS-5 × ПСР для диапазона 13–30 Гц представлен в Таблице В.26 Приложения В).

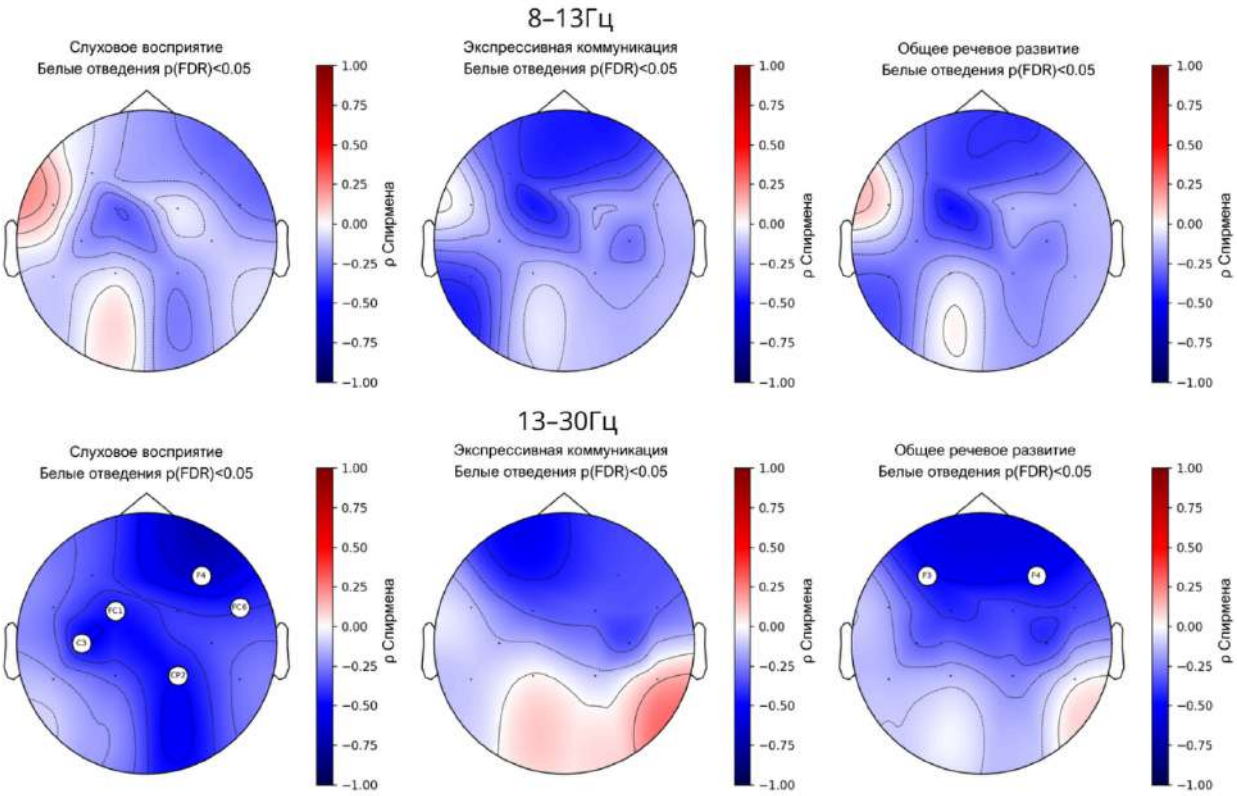


Рисунок 8 — Корреляции между показателями методики оценки речевого развития PLS-5 (Слуховое восприятие, Экспрессивная коммуникация и Общее речевое развитие) и индексом модуляции в экспериментальном условии пассивного сгибания кисти ребенка в диапазонах 8–13 Гц и 13–30 Гц. Отведения, где были обнаружены значимые корреляции, отмечены белым цветом

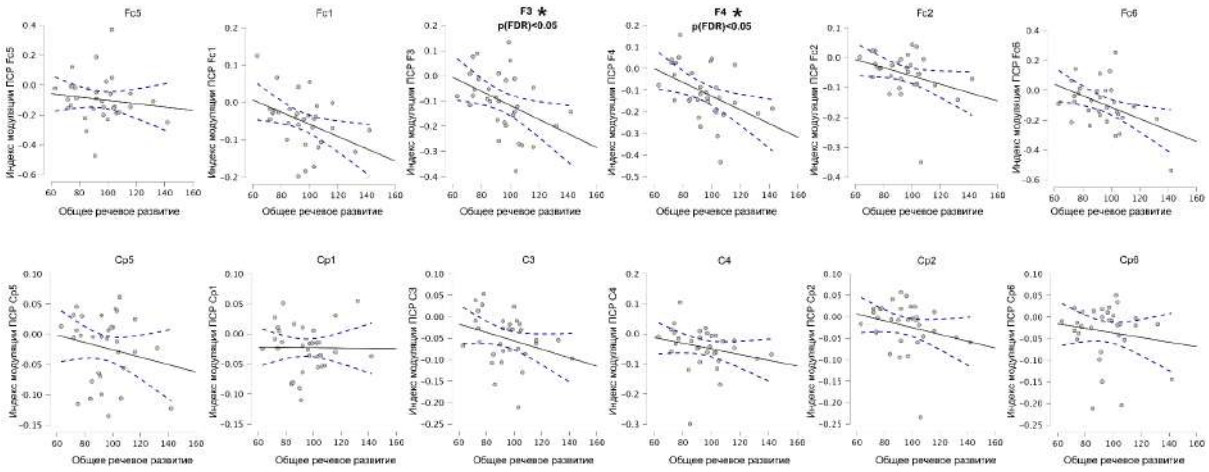


Рисунок 9 — Корреляция между показателем «Общее речевое развитие» и модуляцией ритма в условии пассивного сгибания кисти ребенка для диапазона 13–30 Гц. Значимые корреляции отмечены «*» и «FDR (p < 0,05)»

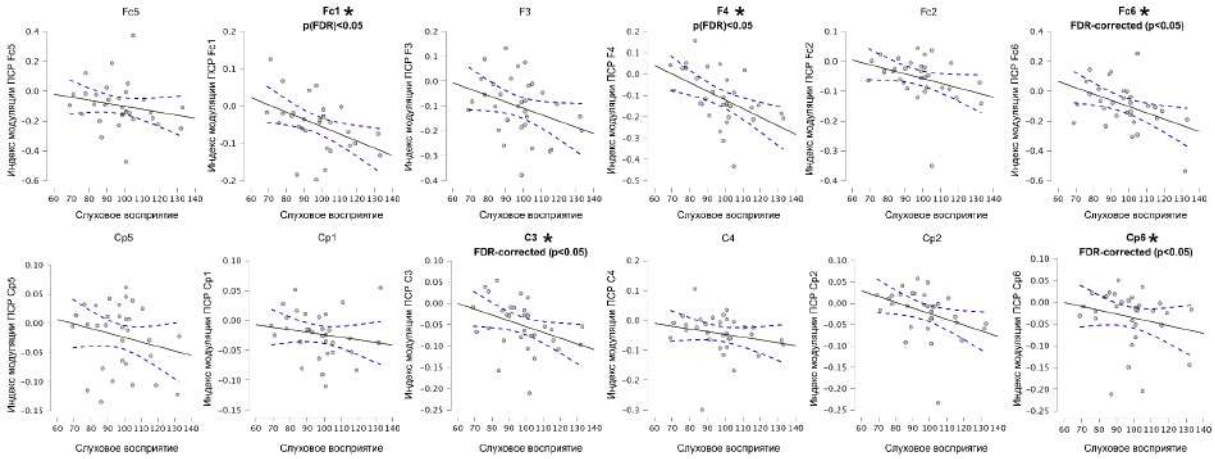


Рисунок 10 — Корреляция между показателем «Слуховое восприятие» и модуляцией ритма в условии пассивного сгибания кисти ребенка для диапазона 13–30 Гц. Значимые корреляции отмечены «*» и «FDR ($p < 0,05$)»

Таким образом, для бета-диапазона сенсомоторных ритмов была выявлена устойчивая обратная связь между индексом десинхронизации и речевым развитием: чем сильнее подавление, тем выше уровень речевого развития ребёнка.

Значимых корреляций между индексом модуляции сенсомоторных ритмов в условии наблюдения видеозаписи с движением рук и показателями речевого развития ни в одном из частотных диапазонов обнаружено не было.

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящее исследование показало, что пассивное сгибание и разгибание кисти вызывало десинхронизацию сенсомоторных ритмов в обоих частотных диапазонах. Напротив, наблюдение за движениями рук на видеозаписи вызывало синхронизацию сенсомоторной активности в альфа-диапазоне, без модуляции в бета-диапазоне. Подавление активности в полушарии, контралатеральном пассивно сгибаемой кисти, наблюдалось только в альфа-диапазоне; в бета-диапазоне эффектов латерализации выявлено не было. Возрастных изменений модуляции сенсомоторных ритмов не было обнаружено ни для одного из частотных диапазонов, ни для одного из экспериментальных условий — ни при продольном, ни при поперечном (кросс-секционном) сравнении. Эффекты латерализации также не изменялись с возрастом.

Ключевым результатом настоящего исследования является связь между речевым развитием и десинхронизацией сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне при пассивном сгибании и разгибании кисти, что подчеркивает связь между нейрофизиологией сенсомоторной системы и речевыми навыками. Основные результаты исследования обобщены в Таблице 1.

Таблица 1 — Основные результаты, связанные с экспериментальными условиями, для альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов, включая топографию модуляции, латерализацию, поперечные и продольные возрастные эффекты, а также корреляции с показателями речевого развития (PLS-5)

Эффект	**Альфа-диапазон (8–13 Гц)**	**Бета-диапазон (13–30 Гц)**
Модуляция для каждого условия	ПСР: десинхронизация	ПСР: десинхронизация
	НВР: синхронизация	НВР: модуляция незначима
Области, где была обнаружена значимая разница с условием контроля (НВФ)	ПСР: FC1/FC2, C3/C4, CP1/CP2	ПСР: F3/F4, FC5/FC6, FC1/FC2, C3/C4, CP5/CP6, CP1/CP2
	НВР: взаимодействие условие × область незначимо	НВР: модуляция незначима

Продолжение Таблицы 1

Эффект	**Альфа-диапазон (8–13 Гц)**	**Бета-диапазон (13–30 Гц)**
Латерализация	ПСР: контралатеральная (стабильна с возрастом)	незначима*
	НВР: незначима	
Поперечный анализ (Условие × Возрастная группа)	незначима*	незначима*
Продольный анализ (Условие × Точка измерения)	незначима*	незначима*
Корреляция с речевым развитием (PLS-5)	незначима*	десинхронизация при ПСР отрицательно коррелирует с показателем «Слуховое восприятие»
		НВР: незначима

Примечание — ПСР — пассивное сгибание кисти; НВР — наблюдение видео с движением рук; незначима* — незначимо во всех условиях.

4.1. Модуляция сенсомоторных ритмов в ответ на различные экспериментальные условия (ПСР и НВР)

Десинхронизация сенсомоторных ритмов наблюдалась в условии пассивного сгибания кисти ребенка (ПСР) в обоих диапазонах, что согласуется с предыдущими исследованиями, использующими аналогичные условия [65, 72]. При этом для условия наблюдения движения рук на видеозаписи (НВР) была обнаружена значимая синхронизация в альфа-диапазоне сенсомоторных ритмов, что подтверждает результаты нашего предыдущего исследования [65]. В то же время в бета-диапазоне условие НВР не показало значимых отличий от контрольного условия (НВФ).

4.1.1. Пассивное сгибание рук

Важным развитием предыдущих исследований, использовавших условие ПСР [65, 72], является изучение индивидуального вклада в супрессию мю-ритма сгибания правой и левой кисти по отдельности. Важно отметить, что ранее проведенные исследования, которые изучали подавление сенсомоторных ритмов в условиях, связанных с движением рук, у детей возрастом 3–10 лет, имели существенные ограничения: так, в работе М. Берчикки и его коллег во время исследования рассматривалась исключительно активность левого полушария [15], или экспериментальные условия включали только движение правой руки [4, 15, 37], или исследователи в целом не уточняли, какой рукой проводилось действие [71, 105]. Согласно результатам данного исследования значимая десинхронизация мю-ритма наблюдалась в контралатеральном сгибаемой руке полушарии, что согласуется с данными, полученными у взрослых (см. обзор [59]). В ипсилатеральном сгибаемой руке полушарии значимой супрессии в сравнении с условием контроля не было как для правой, так и для левой руки. Аналогичные результаты получены в исследовании движений правой рукой у детей данного возраста [37]. При сгибании кисти правой руки также была выявлена более низкая амплитуда в левом полушарии, чем в правом, тогда как при сгибании кисти левой руки аналогичных межполушарных различий не было. Наличие межполушарной асимметрии именно при сгибании кисти правой руки может объясняться преобладанием правшей в нашей выборке, поскольку 34 из 44 детей являются правшами согласно опроснику, который заполнили их родители.

Что интересно, межполушарной асимметрии при сгибании кистей правой и левой рук для бета-диапазона не обнаружено, что согласуется с некоторыми ранее проведенными исследованиями для данного возраста [42], однако противоречит работе [107], где ранее была обнаружена межполушарная асимметрия в пробах на движение. Возможно, расхождение с работой М.П. Треварроу связано с более старшим возрастом участников исследования (9–15 лет), по сравнению с выборкой нашего исследования (3–10 лет).

К важным результатам данного исследования также относится расширение ранее полученных данных о топографии биоэлектрической активности в условии ПСР, поскольку в предыдущем исследовании ранее были проанализированы только центральные отведения C3 и C4 [65]. Согласно результатам данного исследования, для альфа-диапазона сенсомоторных ритмов значимое подавление сенсомоторной активности наблюдалось во фронтально-центральных (FC1/FC2), центральных (C3/C4) и центрально-париетальных (CP1/CP2) регионах. Наблюдаемая топография десинхронизации сенсомоторных ритмов согласуется с ранее опубликованными статьями, где изучалась модуляция в альфа-диапазоне для экспериментальных

условий, связанных с движением [59, 105]. В то же время для бета-диапазона сенсомоторных ритмов значимая супрессия наблюдалась во всех отведениях, которые вошли в анализ, что, в свою очередь, расширяет ранее имеющиеся данные для возрастной группы дошкольников и школьников, где ранее анализировались только центральные отведения ЭЭГ (C3, Cz, C4) [3].

Что интересно, МЭГ-исследования показали более локальную топографию активности бета-диапазона сенсомоторных ритмов, которая локализовалась в проекции первичной моторной коры [42, 107]. Возможно, это связано с более высокой пространственной точностью локализации источников для МЭГ. Кроме того, важно упомянуть и разницу в экспериментальных условиях: в МЭГ-исследованиях движение осуществлялось только одним пальцем, в то время как в нашем исследовании сгибалась вся кисть, моторное и сенсомоторное представительство которой больше, чем у пальцев.

Различная топография десинхронизации альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов, 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, согласно которому альфа-диапазон преимущественно отражает сенсомоторную функцию, тогда как бета-диапазон связан с моторным контролем [59, 94].

4.1.2. Наблюдение видеозаписей с движением рук

Для условия наблюдения движения рук на видеозаписи (НВР) наблюдалась значимая синхронизация сенсомоторных ритмов только в альфа-диапазоне. Межполушарной асимметрии синхронизации или ее доминирования в каком-либо отведении не наблюдалось. В бета-диапазоне условие НВР не отличалось от контроля. Аналогичные результаты были получены и в нашей предыдущей работе [65]. Полученные нами результаты согласуются с теоретической моделью «блокирования через торможение» (gating by inhibition), предложенной М. Кёстером и М. Мейером, согласно которой альфа-синхронизация при наблюдении за действием отражает активное торможение моторной системы, предотвращающее явное движение при наблюдении за другими [57].

Известно, что электроэнцефалографические исследования демонстрируют, что наблюдение за действиями других людей задействует особую корковую сеть — сеть наблюдения за действием (action observation network, AON), — которая перекрывается с областями, активируемыми при реальном выполнении движения. Десинхронизация мю-ритма при

наблюдении за действием широко интерпретируется как показатель работы системы зеркальных нейронов человека, обеспечивающей понимание действия, имитацию и социальное познание [32]. В свою очередь подавление мю-ритма при пассивном наблюдении зависит от множества экспериментальных и индивидуальных факторов. Сеть наблюдения за действием и общая система зрительного внимания могут перекрываться друг с другом, что затрудняет разграничение их вклада. Кроме того, на амплитуду мю-ритма влияют такие характеристики стимула, как цвет фона, содержание объекта и требования к вниманию [20]. Более того, выбор базового/контрольного условия имеет решающее значение для выявления модуляции мю-ритма [52]. Ч. Тангвирьясакул с коллегами [104] показали, что у разных взрослых участников более выраженные эффекты подавления мю-ритма наблюдались при разных базовых условиях. Даже при выбранном оптимальном базовом условии подавление мю-ритма при наблюдении за движениями отсутствовало у 30% участников. Аналогично, Х. М. Хобсон [52] сообщила, что у 16–21% участников подавления не наблюдалось, вероятно, из-за различий в вовлечённости внимания и экспериментальных условиях; например, базовое (контрольное) условие могло оказаться более привлекательным для некоторых участников, чем экспериментальное условие.

Двигательный опыт наблюдателя также влияет на величину зеркального моторного ответа при наблюдении за действием [23]. Например, у младенцев подавление ритма происходит только при наблюдении за движениями, входящими в их двигательный репертуар [54]. Считается, что наблюдение за знакомым и за новым действием вызывает различную модуляцию в альфа- и бета-диапазонах [47]. Так, например, Г. Гвидали с коллегами при использовании совместной регистрации ТМС-ЭЭГ (транскраниальная магнитная стимуляция в сочетании с ЭЭГ) у взрослых показали, что типичный, естественно приобретённый моторный резонанс при наблюдении за действием связан с выраженной альфа-связностью первичной моторной коры, тогда как бета-связность более избирательно связана с новоприобретёнными сенсомоторными ассоциациями [47].

Следовательно, вполне вероятно, что синхронизация в альфа-диапазоне, наблюдаемая при НВР в нашем исследовании, может отражать вовлечение уже сформированного механизма наблюдения за действием, что согласуется с отсутствием какой-либо модуляции в бета-диапазоне в этом условии.

Таким образом, как предыдущие исследования, так и данное исследование указывают на то, что условие наблюдения за движением требует дальнейшего тщательного изучения для уточнения условий, при которых возникает синхронизация/десинхронизация, а также для разграничения самостоятельного вклада альфа- и бета-диапазонов сенсомоторных ритмов в этом контексте.

4.2. Возрастные изменения сенсомоторных ритмов

4.2.1. Изменения сенсомоторных ритмов в течение года

В рамках смешанного лонгитюдного исследования модуляции сенсомоторных ритмов в данной диссертационной работе была выдвинута гипотеза, согласно которой у детей в течение одного года будут наблюдаться продольные возрастные изменения модуляции сенсомоторных ритмов. Однако данная исследовательская гипотеза не подтвердилась. Амплитуда как в альфа-, так и в бета-диапазоне снижалась на протяжении одного года независимо от экспериментальных условий. Этот результат прежде всего указывает на активное созревание биоэлектрической активности мозга у детей 3–10 лет, что согласуется с общими закономерностями развития ритмической активности [1, 15]. При этом модуляция сенсомоторных ритмов в условиях ПСР и НВР присутствовала уже с 3-летнего возраста и оставалась стабильной на протяжении года.

4.2.2. Поперечные (кросс-секционные) изменения сенсомоторных ритмов у детей 3–10 лет

Альфа-диапазон сенсомоторных ритмов

В рамках данного диссертационного исследования в альфа-диапазоне модуляция сенсомоторных ритмов, как для условия пассивного сгибания кистей рук (ПСР), так и для наблюдения движения рук на видеозаписи (НВР) оставалась стабильной и не изменялась на протяжении всего изучаемого возрастного периода от 3 до 10 лет у типично развивающихся детей. Данное заключение подтверждается отсутствием значимых взаимодействий фактора Условие с факторами Возрастная группа или Этап лонгитюда. Таким образом, исследовательская гипотеза о том, что модуляция сенсомоторных ритмов будет увеличиваться с возрастом для детей 3–10 лет в рамках экспериментальных условий данного исследования, не подтверждается. Литературные данные для данной возрастной группы немногочисленны, и их результаты неоднозначны.

В исследованиях Е. В. Эйсмонт (выборка 4–14 лет) и Дж. Лепаж (выборка 6–11 лет) возрастной модуляции не наблюдалось ни при наблюдении за движением, ни при его выполнении [37, 61]. В то же время С. Торп и его коллеги обнаружили возрастные изменения

модуляции сенсомоторных ритмов при активном выполнении движения [105]. Сходная картина возрастного увеличения альфа-десинхронизации для условия пассивного сгибания кисти руки (ПСР) наблюдалась в исследовании Д. Митюревой, у которой было заимствовано данное экспериментальное условие [72]. Однако подобное возрастное усиление модуляции может объясняться широким возрастным диапазоном выборок, включавших как детей, так и взрослых. При этом в условии наблюдения за движением в исследовании Д. Митюревой (выборка 4–31 год) возрастной модуляции обнаружено не было, тогда как в исследованиях Л. М. Оберман (выборка 6–47 лет) и В. Е. Брансдон (выборка 10–86 лет) модуляция при наблюдении движения возрастала с возрастом [22, 79]. Можно предположить, что для выявления возрастных изменений модуляции необходим более широкий возрастной диапазон; возможно, более выраженные изменения модуляции сенсомоторной активности происходят после 10 лет.

Следует отметить, что используемое исследовательское условие также может влиять на возрастную модуляцию. Так, в большинстве упомянутых выше исследований [37, 61, 105] использовалось самостоятельно инициированное движение, требующее от участников планирования и произвольного контроля. Непосредственное сгибание и разгибание кисти в рамках условия ПСР выполнялись членом исследовательской группы и не требовали моторного вовлечения или планирования движения со стороны участника. Исследования на взрослых показали, что степень десинхронизации сенсомоторных ритмов при выполнении движения может зависеть от сложности движения [59]. Следовательно, можно предположить, что возрастные изменения десинхронизации могут варьироваться в зависимости от степени вовлеченности процессов моторного контроля, которые продолжают созревать на протяжении детства. Для прояснения этого вопроса необходимы дальнейшие исследования, сравнивающие модуляцию сенсомоторных ритмов в задачах с различным уровнем вовлечённости и сложности движения.

Бета-диапазон сенсомоторных ритмов

Топография десинхронизации сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне при пассивном сгибании и разгибании кисти с возрастом увеличивается: от фронтально-центральных регионов у детей 3–4 лет до фронтальных, фронтально-центральных, центральных, центрально-париетальных и париетальных регионов к 7–8 годам. Согласно анализу литературы, приведенному в данной диссертационной работе, ранее возрастные изменения топографии бета-диапазона сенсомоторных ритмов в рамках ЭЭГ-исследований не описывались: исследования

или описывали исключительно альфа-диапазон [4], или количество отведений было ограничено, не позволяя изучить динамику развития [3].

В то же время возрастных изменений модуляции бета-диапазона сенсомоторных ритмов в рамках заявленных экспериментальных условий между возрастными группами детей 3–4, 5–6 и 7–8 лет, согласно результатам данного исследования, выявлено не было. Интересно заметить, что в МЭГ-исследовании для условия движения пальцами и выборки детей возрастом 4–6 и 11–13 лет, а также группы взрослых возрастом 24–42 года наблюдается увеличение десинхронизации сенсомоторных ритмов с возрастом [42]. Однако авторы не исключили, что увеличение силы сигнала может быть связано с уменьшением расстояния между МЭГ-датчиками и корой по мере увеличения размера головы. В более позднем аналогичном МЭГ-исследовании для детей 9–15 лет возрастных изменений модуляции сенсомоторных ритмов обнаружено не было [107]. В исследовании Д. Митюревой с аналогичным условием ПСР и схожим условием контроля наблюдалась возрастная модуляция десинхронизации в бета-диапазоне. Однако, как уже писалось ранее, выборка исследования охватывала более широкий возрастной диапазон 4–31 год. В совокупности эти данные позволяют предположить, что, подобно альфа-диапазону, выявление возрастных изменений модуляции бета-диапазона сенсомоторных ритмов может потребовать более широкого возрастного диапазона, чем представленный в настоящем исследовании. Более того, нельзя исключить, что более выраженная возрастная модуляция бета-сенсомоторной активности может проявляться после 10–11 лет.

Возрастные изменения межполушарной латерализации сенсомоторной активности при пассивном сгибании кисти правой и левой руки

Согласно гипотезе исследования, было выдвинуто предположение, что латерализация сенсомоторной активности будет усиливаться с возрастом для детей возрастом 3–10 лет. Эта гипотеза была основана на поведенческом исследовании С. М. Шаруна и П. Дж. Брайдена, которое демонстрирует, что выраженное предпочтение руки, особенно у правшей, устанавливается к 6 годам, тогда как дети 3–5 лет демонстрируют лишь слабые и непостоянные тенденции [95]. Однако результаты данного исследования не выявили возрастных изменений межполушарных различий при пассивном сгибании и разгибании правой или левой кисти начиная с 3-летнего возраста. Это расхождение между нейрофизиологической латерализацией мю-ритма и предпочтением руки, согласно поведенческим данным, может объясняться двумя факторами. Во-первых, условие ПСР не предполагало произвольного контроля собственного

движения, что может быть решающим условием для выявления возрастного усиления латерализации. Во-вторых, размер выборки мог оказаться недостаточным для обнаружения тонких эффектов развития, если таковые существуют. Для прояснения этого вопроса необходимы дальнейшие исследования с дополнительным включением экспериментальных условий активного движения и более крупных выборок.

4.3. Связь между сенсомоторным ритмом и речевым развитием

В рамках исследования была обнаружена отрицательная корреляция между показателями речи PLS-5 (Общее речевое развитие и Слуховое восприятие) и индексом модуляции в бета-диапазоне сенсомоторных ритмов при пассивном сгибании и разгибании кисти. То есть, чем более выражена десинхронизация бета диапазона сенсомоторных ритмов, тем более высокие значения показателя «Слуховое восприятие». Примечательно, что для показателя «Слуховое восприятие» корреляция была выявлена в отведениях: F4, FC1, FC6, C3 и CP2, тогда как для показателя «Экспрессивная коммуникация» корреляции с сенсомоторными ритмами выявлено не было. Полученный результат представляется неожиданным, поскольку связь сенсомоторных ритмов с экспрессивной коммуникацией кажется более закономерной и ранее уже была показана у взрослых [94]. Однако результаты данного исследования позволяют предположить, что в возрастной группе 3–10 лет восприятие речи, а не её продукция, в большей степени опирается на вовлечение обширных сенсомоторных сетей. Это позволяет предположить, что сенсомоторная система может играть вспомогательную роль в декодировании аудио-вербальной информации, даже когда явного моторного ответа не требуется. Насколько нам известно, наше исследование является первым, описывающим связь между сенсомоторной системой и речевым развитием у детей дошкольного и младшего школьного возраста от 3 до 10 лет. Исследования вклада сенсомоторной сети в речевое развитие, и, в частности, в процессы восприятия речи, немногочисленны и, как правило, посвящены преимущественно младенцам и детям раннего возраста — до 3–4 лет (обзор см. в [28, 63, 93]).

Ранее связь между модуляцией сенсомоторных ритмов и показателями развития рецептивной речи (с помощью теста Бейли (BSID-III) для младенцев и детей раннего возраста) была обнаружена в исследовании А.А. Михайловой, однако для более младшей возрастной группы (1,5–3,5 года; средний возраст 2,5 года) и для альфа-диапазона (бета-диапазон не рассматривался) — в левых лобных и теменных каналах (F3 и P3) [71]. Альфа- и бета-диапазоны сенсомоторных ритмов в исследованиях роли сенсомоторной системы в процессах

речевосприятия у детей ранее обсуждались только в работе К. Антоньини и М. Даума [9]. В статье анализировали, как предъявление связанных и несвязанных с последующим действием глаголов влияет на сенсомоторные ритмы при восприятии действий у детей возрастом 23–24 месяца. Согласно результатам исследования, у детей с высокими речевыми навыками наблюдается подавление сенсомоторных ритмов в бета-диапазоне, в то время как у детей с более низкими речевыми навыками (меньшим словарным запасом глаголов) подавление сенсомоторной активности происходит в альфа-диапазоне при просмотре конгруэнтных стимулов (когда действие соответствовало предшествующему глаголу). Аналогичные результаты, но только в альфа-диапазоне, были получены в работе К. Патцвальда и ее коллег с похожим дизайном исследования более младших детей в возрасте 18 месяцев. У детей с хорошими речевыми навыками наблюдалась большая десинхронизация сенсомоторных ритмов, чем у детей с низкими речевыми навыками [86]. Таким образом, можно предположить, что с возрастом все большую роль в речевой рецепции приобретает бета-активность, что согласуется с результатами нашего исследования.

В рамках данного исследования подтверждается гипотеза исследования о связи сенсомоторных ритмов с речевым развитием в дошкольном и младшем школьном возрасте у детей. Если рассматривать показатель супрессии сенсомоторных ритмов как нейрофизиологический маркер развития сенсомоторной системы, то дети с более развитой сенсомоторной системой имеют более развитые показатели речевого развития.

4.4. Ограничения

Результаты исследования, свидетельствующие об отсутствии возрастных изменений модуляции сенсомоторных ритмов, следует интерпретировать с осторожностью, поскольку выборка и аналитический подход имеют ограниченные возможности по выявлению небольших эффектов. Например, как видно из таблиц Приложения В, было выявлено несколько пограничных эффектов, представляющих интерес: продольное взаимодействие «Этап лонгитюда × Условие × Регион × Возрастная группа» для альфа-диапазона сенсомоторных ритмов ($p = 0{,}051$, $\eta^2p = 0{,}072$); продольное взаимодействие «Этап лонгитюда × Условие» для бета-диапазона ($p = 0{,}067$, $\eta^2p = 0{,}064$); поперечное взаимодействие «Условие × Возрастная группа» для бета-диапазона ($p = 0{,}063$, $\eta^2p = 0{,}102$); и взаимодействие «Латерализация × Регион × Возрастная группа» для латерализации бета-диапазона ($p = 0{,}067$, $\eta^2p = 0{,}069$). Анализ чувствительности и мощности, проведенный в G* Power 3.1, показал, что минимальные обнаруживаемые размеры

эффекта (мощность = 80 %, α = 0,05) для этих анализов составляют $\eta^2p = 0,103$, $\eta^2p = 0,073$, $\eta^2p = 0,132$ и $\eta^2p = 0,113$ соответственно, что превышает наблюдаемые размеры эффекта, указывая на недостаточную статистическую мощность для обнаружения эффектов наблюдаемой величины. В будущих исследованиях следует использовать более крупные выборки, чтобы иметь возможность выявлять небольшие эффекты, тогда как в рамках данного исследования можно утверждать лишь отсутствие средних и крупных возрастных эффектов в рамках исследуемого возрастного диапазона (3–10 лет).

Кроме того, следует отметить ряд дополнительных ограничений. Возрастные группы были несбалансированными по количеству детей, что могло снизить статистическую мощность межгрупповых сравнений и повысить риск ошибок II рода. Только 32 из 44 участников прошли исследование PLS-5, которое использовалось для оценки речевого развития на первом этапе лонгитюдного исследования. Кроме того, развитие речи не оценивалось на втором этапе лонгитюдного наблюдения, что позволило бы сравнить динамику развития речи с динамикой изменений сенсомоторных ритмов. Эффекты латерализации не исследовались на первом этапе исследования; таким образом, изменения латерализации с возрастом на индивидуальном уровне остались неизученными. Кроме того, ведущая рука определялась с помощью родительского опросника, поэтому полученные ответы носят субъективный характер и не всегда точно отражают реальное представление о ведущей руке ребенка. В будущих исследованиях целесообразно использовать поведенческие задачи на определение ведущей руки, которые будет выполнять непосредственно ребёнок, что позволит получить более объективные и надёжные данные. Наконец, продолжительность условий НВФ и НВР менялась в течение сбора данных для первого этапа исследования: сначала продолжительность составляла 30 секунд, затем увеличилась до 60 секунд, а позже — до 90 секунд. В рамках исследования не стандартизировали продолжительность условий НВФ и НВР между всеми участниками до единого значения; эта изменчивость привела к разному количеству эпох ЭЭГ, доступных для анализа, у участников. Более длительные записи, как правило, дают более сбалансированные средние значения амплитуды сигнала, но более подвержены снижению внимания к концу записи, тогда как более короткие сегменты менее подвержены артефактам и выбросам. Таким образом, нельзя исключить возможность того, что изменяющаяся продолжительность экспериментальных условий на первом этапе исследования могла внести некоторую степень искажения в полученные результаты, и будущие исследования должны быть направлены на большую унификацию и стандартизацию экспериментальных условий.

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БПФ — быстрое преобразование Фурье

ДЦП — детский церебральный паралич

МЭГ — магнитоэнцефалография

НВР — наблюдение за видеозаписью движения рук

НВФ — наблюдение за видеозаписью с движением фракталов

ПСР — пассивное сгибание кисти ребёнка (руки)

РАС — расстройство аутистического спектра

СДВГ — синдром дефицита внимания и гиперактивности

СЗН — система зеркальных нейронов

ТМС-ЭЭГ — транскраниальная магнитная стимуляция в сочетании с электроэнцефалографией

фМРТ — функциональная магнитно-резонансная томография

ЭЭГ — электроэнцефалография

AON — сеть наблюдения за действием (action observation network)

BSID-II, BSID-III — шкалы развития младенцев и детей раннего возраста Бейли, 2-я и 3-я версии (Bayley Scales of Infant and Toddler Development)

CDI — опросник коммуникативного развития (MacArthur Communicative Development Inventories)

CSD — анализ плотности источника тока (Current Source Density)

ERD — десинхронизация, связанная с событием (event-related desynchronization)

FDR — метод поправки на множественные сравнения (False Discovery Rate, поправка Бенджамини–Хохберга)

ICA — анализ независимых компонент (Independent Component Analysis)

PLS-5 — шкалы дошкольного языкового развития, 5-я версия (Preschool Language Scales, Fifth Edition)

RM ANOVA — дисперсионный анализ с повторными измерениями (Repeated Measures Analysis of Variance)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аликина М.А., Махин С.А., Павленко В.Б. Амплитудно-частотные, топографические, возрастные особенности и функциональное значение сенсомоторного ритма ЭЭГ // Уч. зап. Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 3–24. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/amplitudno-chastotnye-topograficheskie-vozrastnye-osobennosti-i-funktsionalnoe-znachenie-sensomotornogo-ritma-eeg (дата обращения: 14.10.2026).

2. Белалов В.В., Базанова О.М., Михайлова А.А., Дягилева Ю.О., Павленко В.Б. Реактивность мю-ритма ЭЭГ при восприятии речи у детей от двух до трёх с половиной лет: влияние условий воспитания // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2020. – Т. 70, № 2. – С. 193–205.

3. Галкин Д.В., Эйсмонт Е.В., Кайда А.И., Павленко В.Б. Реактивность сенсомоторного бета-ритма ЭЭГ у детей четырех-четырнадцати лет // Уч. зап. Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 8–20. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/reaktivnost-sensomotornogo-beta-ritma-eeg-u-detey-chetyreh-chetyrnadtsati-let (дата обращения: 14.10.2026).

4. Кайда А., Махин С., Эйсмонт Е., Павленко В. Возрастная динамика и топография реактивности индивидуального мю-ритма ЭЭГ у детей 4-14 лет // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. – 2019. – Т. 45. – С. 106–127.

5. Клиточенко Г.В., Долецкий А.Н. Электроэнцефалография детей и подростков: учеб. пособие. – Волгоград: Изд-во ВолгГМУ, 2024. – С. 25.

6. Начарова М.А., Михайлова А.А., Говорун Я.Ю., Португальская А.А., Павленко В.Б. Нейрофизиологические механизмы восприятия речи и их особенности у детей в норме и при нарушениях развития // Уч. зап. Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2020. – Т. 6, № 3. – С. 146–162.

7. Николаева Е.И. Психофизиология. Психологическая физиология с основами физиологической психологии: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 480 с.

8. Angelini M., Fabbri-Destro M., Lopomo N.F., Gobbo M., Rizzolatti G., Avanzini P. Perspective-dependent reactivity of sensorimotor mu rhythm in alpha and beta ranges during action observation: an EEG study // Sci. Rep. – 2018. – Vol. 8. – P. 12429.

9. Antognini K., Daum M.M. Effects of verb-action congruence on sensorimotor processing of goal-directed actions in two-year-olds: A technical report // PsyArXiv Preprints. – 2018. – DOI: 10.31234/osf.io/g8fu4.

10. Antognini K., Daum M.M. Toddlers show sensorimotor activity during auditory verb processing // Neuropsychologia. – 2019. – Vol. 126. – P. 82–91.

11. Arbib M.A. From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics // Behav. Brain Sci. – 2005. – Vol. 28, No. 2. – P. 105–124.

12. Atkinson R.J., Michie P.T., Schall U. Duration mismatch negativity and P3a in first-episode psychosis and individuals at ultra-high risk of psychosis // Biol. Psychiatry. – 2012. – Vol. 71, No. 2. – P. 98–104.

13. Barone J., Rossiter H.E. Understanding the role of sensorimotor beta oscillations // Front. Syst. Neurosci. – 2021. – Vol. 15. – P. 655886.

14. Barr R. Transfer of learning between 2D and 3D sources during infancy: Informing theory and practice // Dev. Rev. – 2010. – Vol. 30, No. 2. – P. 128–154.

15. Berchicci M., Zhang T., Romero L., Peters A., Annett R., Teuscher U., Bertollo M., Okada Y., Stephen J., Comani S. Development of mu rhythm in infants and preschool children // Dev. Neurosci. – 2011. – Vol. 33. – P. 130–143.

16. Berger C., Höhne E., Reis O., Kölch M., Brehme H. EEG biomarkers as indices of functional brain systems in child and adolescent psychiatry: Evidence, ethics, and a route to individualized care // Diagnostica. – 2026.

17. Bernier R., Dawson G., Webb S., Murias M. EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder // Brain Cogn. – 2007. – Vol. 64, No. 3. – P. 228–237.

18. Berwick R.C., Friederici A.D., Chomsky N., Bolhuis J.J. Evolution, brain, and the nature of language // Trends Cogn. Sci. – 2013. – Vol. 17, No. 2. – P. 89–98.

19. Boutros N.N. The forsaking of the clinical EEG by psychiatry: how justified? // CNS Spectr. – 2018. – Vol. 23, No. 3. – P. 196–204.

20. Bowman L.C., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H., Cannon E.N., Vanderwert R.E., Ferrari P.F., van IJzendoorn M.H., Fox N.A. The mu-rhythm can mirror: Insights from experimental design, and looking past the controversy // Cortex. – 2017. – Vol. 96. – P. 121–125.

21. Bruderer A.G., Danielson D.K., Kandhadai P., Werker J.F. Sensorimotor influences on speech perception in infancy // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2015. – Vol. 112, No. 44. – P. 13531–13536.

22. Brunsdon V.E.A., Bradford E.E.F., Ferguson H.J. Sensorimotor mu rhythm during action observation changes across the lifespan independently from social cognitive processes // Dev. Cogn. Neurosci. – 2019. – Vol. 38. – P. 100659.

23. Calvo-Merino B., Glaser D.E., Grèzes J., Passingham R.E., Haggard P. Action observation and acquired motor skills: An fMRI study with expert dancers // Cereb. Cortex. – 2005. – Vol. 15. – P. 1243–1249.

24. Carota F., Moseley R., Pulvermüller F. Body-part-specific representations of semantic noun categories // J. Cogn. Neurosci. – 2012. – Vol. 24, No. 6. – P. 1492–1509.

25. Carvalhaes C., de Barros J.A. The surface Laplacian technique in EEG: Theory and methods // Int. J. Psychophysiol. – 2015. – Vol. 97, No. 3. – P. 174–188.

26. Cervetto S., Abrevaya S., Martorell Caro M., Kozono G., Muñoz E., Ferrari J., Sedeño L., Ibáñez A., García A.M. Action semantics at the bottom of the brain: Insights from dysplastic cerebellar gangliocytoma // Front. Psychol. – 2018. – Vol. 9. – P. 1194.

27. Cheyne D.O. MEG studies of sensorimotor rhythms: A review // Exp. Neurol. – 2013. – Vol. 245. – P. 27–39.

28. Choi D., Dehaene-Lambertz G., Peña M., Werker J.F. Neural indicators of articulator-specific sensorimotor influences on infant speech perception // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2021. – Vol. 118, No. 20. – e2025043118.

29. Choi D., Yeung H.H., Werker J.F. Sensorimotor foundations of speech perception in infancy // Trends Cogn. Sci. – 2023. – Vol. 27, No. 8. – P. 773–784.

30. Chung H., Meyer M., Debnath R., Fox N.A., Woodward A. Neural correlates of familiar and unfamiliar action in infancy // J. Exp. Child Psychol. – 2022. – Vol. 220. – P. 105415.

31. Clarke A.R., Barry R.J., McCarthy R., Selikowitz M. Age and sex effects in the EEG: development of the normal child // Clin. Neurophysiol. – 2001. – Vol. 112, No. 5. – P. 806–814.

32. Condy E.E., Miguel H.O., Millerhagen J., Harrison D., Khaksari K., Fox N., Gandjbakhche A. Characterizing the action-observation network through functional near-infrared spectroscopy: A review // Front. Hum. Neurosci. – 2021. – Vol. 15. – P. 627983.

33. Cragg L., Kovacevic N., McIntosh A.R., Poulsen C., Martinu K., Leonard G., Paus T. Maturation of EEG power spectra in early adolescence: a longitudinal study // Dev. Sci. – 2011. – Vol. 14, No. 5. – P. 935–943.

34. Cuevas K., Cannon E.N., Yoo K., Fox N.A. The infant EEG mu rhythm: Methodological considerations and best practices // Dev. Rev. – 2014. – Vol. 34, No. 1. – P. 26–43.

35. Dehaene-Lambertz G., Dehaene S., Hertz-Pannier L. Functional neuroimaging of speech perception in infants // Science. – 2002. – Vol. 298, No. 5600. – P. 2013–2015.

36. Démas J., Bourguignon M., Périvier M., De Tiège X., Dinomais M., Van Bogaert P. Mu rhythm: State of the art with special focus on cerebral palsy // Ann. Phys. Rehabil. Med. – 2020. – Vol. 63. – P. 439–446.

37. Eismont E.V., Makhin S.A., Bakunova A.V., Kaida A.I., Pavlenko V.B. Properties of the EEG μ rhythm and its reactivity during the performance, observation, imitation, and auditory recognition of movements in children aged 4–14 years // Hum. Physiol. – 2017. – Vol. 43. – P. 274–279.

38. Endedijk H.M., Meyer M., Bekkering H., Cillessen A.H.N., Hunnius S. Neural mirroring and social interaction: Motor system involvement during action observation relates to early peer cooperation // Dev. Cogn. Neurosci. – 2017. – Vol. 24. – P. 33–41.

39. Fadiga L., Craighero L., Buccino G., Rizzolatti G. Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study // Eur. J. Neurosci. – 2002. – Vol. 15, No. 2. – P. 399–402.

40. Fox N.A., Bakermans-Kranenburg M.J., Yoo K.H., Bowman L.C., Cannon E.N., Vanderwert R.E., Ferrari P.F., van IJzendoorn M.H. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis // Psychol. Bull. – 2016. – Vol. 142, No. 3. – P. 291–313.

41. Franken M.K., Liu B.C., Ostry D.J. Towards a somatosensory theory of speech perception // J. Neurophysiol. – 2022. – Vol. 128, No. 6. – P. 1683–1695.

42. Gaetz W., Macdonald M., Cheyne D., Snead O.C. Neuromagnetic imaging of movement-related cortical oscillations in children and adults: Age predicts post-movement beta rebound // NeuroImage. – 2010. – Vol. 51. – P. 792–807.

43. Gasser T., Verleger R., Bächer P., Sroka L. Development of the EEG of school-age children and adolescents. I. Analysis of band power // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. – 1988. – Vol. 69, No. 2. – P. 91–99.

44. Gastaut H.J., Bert J. EEG changes during cinematographic presentation // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. – 1954. – Vol. 6, No. 3. – P. 433–444.

45. Gaudet I., Hüsser A., Vannasing P., Gallagher A. Functional brain connectivity of language functions in children revealed by EEG and MEG: A systematic review // Front. Hum. Neurosci. – 2020. – Vol. 14. – P. 62.

46. Goodspeed K., Armstrong D., Dolce A. et al. Electroencephalographic (EEG) biomarkers in genetic neurodevelopmental disorders // J. Child Neurol. – 2023. – Vol. 38, No. 6–7. – P. 466–477.

47. Guidali G., Arrigoni E., Bolognini N., Pisoni A. M1 large-scale network dynamics support human motor resonance and its plastic reshaping // NeuroImage. – 2025. – Vol. 308. – P. 121082.

48. Hari R., Salmelin R. Human cortical oscillations: A neuromagnetic view through the skull // Trends Neurosci. – 1997. – Vol. 20. – P. 44–49.

49. Hervault M., Zanone P.G., Buisson J.C., Huys R. Cortical sensorimotor activity in the execution and suppression of discrete and rhythmic movements // Sci. Rep. – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 22364.

50. Hickok G., Poeppel D. The cortical organization of speech processing // Nat. Rev. Neurosci. – 2007. – Vol. 8, No. 5. – P. 393–402.

51. Hickok G., Poeppel D. Neural basis of speech perception // Neurobiology of Language / ed. by G. Hickok, S.L. Small. – San Diego: Academic Press, 2016. – P. 299–310.

52. Hobson H.M., Bishop D.V.M. Mu suppression – A good measure of the human mirror neuron system? // Cortex. – 2016. – Vol. 82. – P. 290–310.

53. Hsu C.W., Huang C.C., Hsu C.C.H., Bi Y., Tzeng O.J.L., Lin C.P. Revisiting human language and speech production network: A meta-analytic connectivity modeling study // NeuroImage. – 2025. – Vol. 306. – P. 121008.

54. Khurana S., Kulkarni A., Bulea T.C., Bennett H.J. EEG signatures of motor development in early childhood: A systematic review // Pediatr. Res. – 2026. – Advance online publication. – DOI: 10.1038/s41390-026-05160-8.

55. Kirschstein T., Köhling R. What is the source of the EEG? // Clin. EEG Neurosci. – 2009. – Vol. 40, No. 3. – P. 146–149.

56. Köster M., Langeloh M., Kliesch C., Kanngiesser P., Hoehl S. Motor cortex activity during action observation predicts subsequent action imitation in human infants // NeuroImage. – 2020. – Vol. 218. – P. 116958.

57. 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. – P. 101239.

58. Kuhlman W.N. Functional topography of the human mu rhythm // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. – 1978. – Vol. 44, No. 1. – P. 83–93.

59. Larionova E.V., Garakh Z.V., Zaytseva Y.S. The mu rhythm in current research: Theoretical and methodological aspects // Neurosci. Behav. Physiol. – 2022. – Vol. 52, No. 7. – P. 999–1016.

60. Lebedeva N.N., Burkitbaev S.E., Karimova E.D. Activation of the mirror system of the brain depends on how stimuli are presented: Directly by the experiments or on video clips // Neurosci. Behav. Physiol. – 2021. – Vol. 51, No. 2. – P. 192–200.

61. Lepage J.-F., Théoret H. EEG evidence for the presence of an action observation-execution matching system in children // Eur. J. Neurosci. – 2006. – Vol. 23. – P. 2505–2510.

62. Liebenthal E. et al. Neural dynamics of phonological processing in the dorsal auditory stream // J. Neurosci. – 2013. – Vol. 33, No. 39. – P. 15414–15424.

63. Lipatov V., Pavlova P., Rebreikina A., Sysoeva O. Sensorimotor rhythms as neurophysiological correlates of speech perception processes in childhood // National Psychological Journal. – 2025. – Vol. 20. – P. 136–147.

64. 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.

65. 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. – P. 215–221.

66. Loo S.K., Lenartowicz A., Makeig S. Research review: Use of EEG biomarkers in child psychiatry research – current state and future directions // J. Child Psychol. Psychiatry. – 2016. – Vol. 57, No. 1. – P. 4–17.

67. Marshall P.J., Bar-Haim Y., Fox N.A. Development of the EEG from 5 months to 4 years of age // Clin. Neurophysiol. – 2002. – Vol. 113. – P. 1199–1208.

68. Marshall P.J., Young T., Meltzoff A.N. Neural correlates of action observation and execution in 14-month-old infants: An event-related EEG desynchronization study // Dev. Sci. – 2011. – Vol. 14, No. 3. – P. 474–480.

69. Marshall P.J., Saby J.N., Meltzoff A.N. Infant brain responses to object weight: Exploring goal-directed actions and self-experience // Infancy. – 2013. – Vol. 18, No. 6. – P. 942–960.

70. Michaelis K., Miyakoshi M., Norato G., Medvedev A.V., Turkeltaub P.E. Motor engagement relates to accurate perception of phonemes and audiovisual words, but not auditory words // Commun. Biol. – 2021. – Vol. 4, No. 1. – P. 108.

71. Mikhailova A., Orekhova L.S., Dyagileva Y.O., Mukhtarimova T.I., Pavlenko V.B. Reactivity of the EEG μ rhythm on observing and performing actions in young children with different levels of receptive speech development // Neurosci. Behav. Physiol. – 2021. – Vol. 51, No. 1. – P. 85–92.

72. Mitiureva D., Bobrov P., Rebreikina A., Sysoeva O. An inclusive paradigm to study mu-rhythm properties // Int. J. Psychophysiol. – 2023. – Vol. 190. – P. 42–55.

73. Miyagawa S., DeSalle R., Nóbrega V.A., Nitschke R., Okumura M., Tattersall I. Linguistic capacity was present in the Homo sapiens population 135 thousand years ago // Front. Psychol. – 2025. – Vol. 16. – P. 1503900.

74. Mkrtychian N.A., Kostromina S.N., Gnedykh D.S., Tsvetova D.M., Blagovechtchenski E.D., Shtyrov Y.Y. Psychological and electrophysiological correlates of word learning success // Psychol. Russia. – 2021. – Vol. 14, No. 2. – P. 171–192.

75. Moreno I., de Vega M., León I. Understanding action language modulates oscillatory mu and beta rhythms in the same way as observing actions // Brain Cogn. – 2013. – Vol. 82, No. 3. – P. 236–242.

76. Mudgal S.K., Sharma S.K., Chaturvedi J., Sharma A. Brain computer interface advancement in neurosciences: Applications and issues // Interdiscip. Neurosurg. – 2020. – Vol. 20. – P. 100694.

77. Mueller A., Candrian G., Kropotov J.D., Ponomarev V.A., Baschera G.M. Classification of ADHD patients on the basis of independent ERP components using a machine learning system // Nonlinear Biomed. Phys. – 2010. – Vol. 4, Suppl. 1. – S1.

78. Niccolai V., Klepp A., Weissler H., Hoogenboom N., Schnitzler A., Biermann-Ruben K. Grasping hand verbs: oscillatory beta and alpha correlates of action-word processing // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9, No. 9. – e108059.

79. 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 // Brain Res. Cogn. Brain Res. – 2005. – Vol. 24. – P. 190–198.

80. Ohashi H., Ostry D.J. Neural development of speech sensorimotor learning // J. Neurosci. – 2021. – Vol. 41, No. 18. – P. 4023–4035.

81. Oliveira D.S., Saltuklaroglu T., Thornton D., Jenson D., Harkrider A.W., Rafferty M.B., Casenhiser D.M. Mu rhythm dynamics suggest automatic activation of motor and premotor brain regions during speech processing // J. Neurolinguistics. – 2021. – Vol. 60. – P. 101006.

82. Oliver B., Buckley S. The language development of children with Down syndrome: First words to two-word phrases // Down Syndr. Res. Pract. – 1994. – Vol. 2, No. 2. – P. 71–75.

83. Oller D.K., Eilers R.E. The role of audition in infant babbling // Child Dev. – 1988. – Vol. 59, No. 2. – P. 441–449.

84. Oller D.K. The emergence of the speech capacity. – Psychology Press, 2000.

85. Oller D.K. et al. Protophones, the precursors to speech, dominate the human infant vocal landscape // Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. – 2021. – Vol. 376, No. 1836. – P. 20200255.

86. Patzwald C., Matthes D., Elsner B. Eighteen-month-olds integrate verbal cues into their action processing: Evidence from ERPs and mu power // Infant Behav. Dev. – 2020. – Vol. 58. – P. 101414.

87. Pfurtscheller G. Rolandic mu rhythms and assessment of cerebral functions // Am. J. EEG Technol. – 1986. – Vol. 26, No. 1. – P. 19–32.

88. Pons F., Lewkowicz D.J., Soto-Faraco S., Sebastián-Gallés N. Narrowing of intersensory speech perception in infancy // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2009. – Vol. 106, No. 26. – P. 10598–10602.

89. Popp M., Trumpp N.M., Sim E.J., Kiefer M. Brain activation during conceptual processing of action and sound verbs // Adv. Cogn. Psychol. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 236–255.

90. Portnova G.V., Atanov M.S. Age-dependent changes of the EEG data: Comparative study of correlation dimension D2, spectral analysis, peak alpha frequency and stability of rhythms // Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol. – 2016. – Vol. 4, No. 2. – URL: https://ssrn.com/abstract=3535022.

91. Reid V.M., Striano T., Iacoboni M. Neural correlates of dyadic interaction during infancy // Dev. Cogn. Neurosci. – 2011. – Vol. 1, No. 2. – P. 124–130.

92. Ruysschaert L., Warreyn P., Wiersema J.R., Metin B., Roeyers H. Neural mirroring during the observation of live and video actions in infants // Clin. Neurophysiol. – 2013. – Vol. 124, No. 9. – P. 1765–1770.

93. Salo V.C., Debnath R., Rowe M.L., Fox N.A. Experience with pointing gestures facilitates infant vocabulary growth through enhancement of sensorimotor brain activity // Dev. Psychol. – 2023. – Vol. 59, No. 4. – P. 676–690.

94. Saltuklaroglu T., Bowers A., Harkrider A.W., Casenhiser D., Reilly K.J., Jenson D.E., Thornton D. EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing // Brain Lang. – 2018. – Vol. 187. – P. 41–61.

95. Scharoun S.M., Bryden P.J. Hand preference, performance abilities, and hand selection in children // Front. Psychol. – 2014. – Vol. 5. – P. 82.

96. Schomers M.R., Pulvermüller F. Is the sensorimotor cortex relevant for speech perception and understanding? An integrative review // Front. Hum. Neurosci. – 2016. – Vol. 10. – P. 435.

97. Skeide M.A., Friederici A.D. The ontogeny of the cortical language network // Nat. Rev. Neurosci. – 2016. – Vol. 17, No. 5. – P. 323–332.

98. Skipper J.I., Devlin J.T., Lametti D.R. The hearing ear is always found close to the speaking tongue: Review of the role of the motor system in speech perception // Brain Lang. – 2017. – Vol. 164. – P. 77–105.

99. Soghoyan G., Ledovsky A., Nekrashevich M., Martynova O., Polikanova I., Portnova G., Rebreikina A., Sysoeva O., Sharaev M. A toolbox and crowdsourcing platform for automatic labeling of independent components in electroencephalography // Front. Neuroinform. – 2021. – Vol. 15. – P. 720229.

100. Stark R.E. Stages of speech development in the first year of life // Child Phonology. Vol. 1: Production / ed. by G.H. Yeni-Komshian, J.F. Kavanagh, C.A. Ferguson. – New York: Academic Press, 1980. – P. 73–92.

101. Stroganova T.A., Orekhova E.V., Posikera I.N. EEG alpha rhythm in infants // Clin. Neurophysiol. – 1999. – Vol. 110. – P. 997–1012.

102. Stroganova T.A., Komarov K.S., Goiaeva D.E., Obukhova T.S., Ovsiannikova T.M., Prokofyev A.O., Orekhova E.V. Effects of the periodicity and vowelness of sounds on auditory cortex responses in children // Neurosci. Behav. Physiol. – 2022. – Vol. 52, No. 3. – P. 395–404.

103. Talantseva O., Zhukova M., Trubitsyna A., Teedemaa A., Grigorenko E. Psychometric properties of the Preschool Language Scales, Fifth Edition (PLS-5) in Russian-speaking children: A classical and item response theory study // Clinical Psychology and Special Education. – 2022. – Vol. 11, No. 2. – P. 174–195.

104. Tangwiriyasakul C., Verhagen R., van Putten M.J.A.M., Rutten W.L.C. Importance of baseline in event-related desynchronization during a combination task of motor imagery and motor observation // J. Neural Eng. – 2013. – Vol. 10. – P. 026009.

105. 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. – P. 254–269.

106. Tiihonen J., Kajola M., Hari R. Magnetic mu rhythm in man // Neuroscience. – 1989. – Vol. 32, No. 3. – P. 793–800.

107. Trevarrow M.P., Kurz M.J., McDermott T.J., Wiesman A.I., Mills M.S., Wang Y.-P., Calhoun V.D., Stephen J.M., Wilson T.W. The developmental trajectory of sensorimotor cortical oscillations // NeuroImage. – 2019. – Vol. 184. – P. 455–461.

108. Upshaw M.B., Bernier R.A., Sommerville J.A. Infants' grip strength predicts mu rhythm attenuation during observation of lifting actions with weighted blocks // Dev. Sci. – 2016. – Vol. 19, No. 2. – P. 195–207.

109. Vázquez Y., Ianni G.R., Rassi E., Rouse A.G., Schieber M.H., Yazdani F., Prut Y., Freiwald W.A. Neural synchrony links sensorimotor cortices in a network for facial motor control // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2025. – Vol. 122, No. 52. – e2512604122.

110. Vihman M.M. et al. From babbling to speech: A re-assessment of the continuity issue // Language. – 1985. – Vol. 61, No. 2. – P. 397–445.

111. Warreyn P., Ruysschaert L., Wiersema J.R., Handl A., Pattyn G., Roeyers H. Infants' mu suppression during the observation of real and mimicked goal-directed actions // Dev. Sci. – 2013. – Vol. 16, No. 2. – P. 173–185.

112. Willems R.M., Hagoort P., Casasanto D. Body-specific representations of action verbs: Neural evidence from right- and left-handers // Psychol. Sci. – 2010. – Vol. 21, No. 1. – P. 67–74.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Обзор литературы по теме связь сенсомоторных ритмов с речью у детей

Таблица А.1 — Исследование ассоциации между сенсомоторными ритмами ЭЭГ и рецептивной коммуникацией в детском возрасте

Авторы, год	**Выборка**	**Экспери-мен-таль-ные условия**	**Частотный диапазон**	**Основные результаты**
Warreyn et al., 2013	35 детей; 18-30 месяцев	1) Наблюдение за бесцельно движущимися предметами (использовалось как фоновое состояние); 2) Наблюдение целенаправленного действия с предметом; 3) Повторение ребенком демонстрируемых действий; 4) Наблюдение целенаправленного действия без предмета.	Диапазон мю-ритма опре-де-лял-ся ин-ди-ви-ду-аль-но, среднее значение составило 7,84 Гц.	– Десинхронизация мю-ритма была выявлена при наблюдении и выполнении целенаправленных действий. – Корреляция между показателями десинхронизации мю-ритма с возрастом и языковыми способностями не выявлена.

Продолжение Таблицы А.1

Авторы, год	**Выборка**	**Экспери-мен-таль-ные условия**	**Частотный диапазон**	**Основные результаты**
Antognini & Daum, 2018	37 детей; 23-24 месяцев	Аудиальное предъявление глаголов (в анализе рассматривалось как условие сравнения) за которым следовало видео с конгруэнтным или неконгруэнтным действием.	Альфа-диапазон: 6-10 Гц. Бета-диапозон: 15-18 Гц.	– Семантическая конгруэнтность не влияла на десинхронизацию в альфа-диапазоне у детей с высоким уровнем речевого развития, но были выявлены отличия в десинхронизации альфа-диапазоне у детей с относительно меньшим словарным запасом. – В бета-диапазоне разница в выраженности десинхронизации была выявлена только у детей с более высоким уровнем речевого развития.

Продолжение Таблицы А.1

Авторы, год	**Выборка**	**Экспери-мен-таль-ные условия**	**Частотный диапазон**	**Основные результаты**
Antognini & Daum 2019	47 детей; 18 и 24 месяцев	1) Прослушивание предложений с глаголами действия; 2) Прослушивание предложений с псевдоглаголами (для главголов и пседовглаголов условием сравнения был аудио фрагмент аудиозаписи с местоимением “Я”); 3) Видеоролик с демонстрацией целенаправленного действия (условие сравнение межстимульный интервал).	Анализ был проведен в диапазоне 4-20 Гц, с фокусом на частоте 6-10 Гц.	– В обеих возрастных группах была выявлена десинхронизация мю-ритма при восприятии глаголов и просмотре видео с действиями, которая не наблюдалось при прослушивании псевдоглаголов. – Межвозрастных различий в силе десинхронизации мю-ритма выявлено не было.
Patzwald et al., 2020	38 детей; 18 месяцев	Просмотр видео с действиями, соответствующими и не соответствующими озвученной цели (условие сравнение межстимульный интервал, когда не происходило никаких действий).	6-9 Гц	– Мощность мю-ритма снижалась для конгруэнтных стимулов по сравнению с неконгруэнтными. – Наиболее выраженная десинхронизация в проекции электрода C4 наблюдались у детей в группе с большим рецептивным запасом активных глаголов.

Продолжение Таблицы А.1

Авторы, год	**Выборка**	**Экспери-мен-таль-ные условия**	**Частотный диапазон**	**Основные результаты**
Белалов и др, 2020	141 ребёнок; 30-38 месяцев	1) Регистрация спокойного состояния (контрольное условие); 2) Прослушивание нативной речи; 3) Прослушивание той же речи в реверсивном виде.	Частотный диапазон мю-ритма опре-де-лял-ся ин-ди-ви-ду-аль-но.	– Восприятие речи у детей воспитывающихся в семьях сопровождалось увеличением мощности мю-ритма, у детей-сирот наблюдалось снижение или отсутствием изменений мю-ритма при восприятии речи. – Уровень развития рецептивной речи был ниже у детей-сирот.
Mikhailova et al., 2021	39 детей; 17-41 месяцев	1) Наблюдение за видео с вращающимся мячом (контрольное условие); 2) наблюдение за имитационным действием (ребенок не видит реальной цели, над которой совершается действие); 3) Наблюдение за реальным действием; 4) Выполнение реального действия ребенком.	Ин-ди-ви-ду-аль-но опре-де-лен-ный мю-ритм для каждого ис-пы-ту-е-мо-го. Средняя частота пика мю-ритма составила 7,8 (0,1) Гц, с нижней границей 6,9 (0,1) Гц и верхней границей 8,8 (0,1) Гц.	– Дети с высоким уровнем речевого развития демонстрировали большую десинхронизацию мю-ритма в условиях наблюдения реального действия по сравнению с детьми, имеющих средний уровень понимания речи.

Продолжение Таблицы А.1

Авторы, год	**Выборка**	**Экспери-мен-таль-ные условия**	**Частотный диапазон**	**Основные результаты**
Salo et al., 2023	81 младенец; 10-12 месяцев	Исследование включало 2 визита (второй визит был через месяц). Дети делились на 2 группы. Первая контроль, во второй родители проходили обучение по применению указательных жестов в взаимодействии с детьми. 1) Наблюдение за разноцветным маяком (контрольное условие); 2) Наблюдение за указательным жестом; 3) Наблюдение за хватательным жестом.	6-9 Гц	– Увеличение использования указательных жестов родителем при взаимодействии с ребёнком была ассоциирована с увеличением уровня десинхронизации мю-ритма, а также с увеличением рецептивного словарного запаса младенцев.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Родительский опросник для определения доминирующей руки ребенка

Таблица Б.1 — Родительский опросник для определения доминирующей руки ребенка

	Всегда поль-зу-ет-ся левой рукой	**Обычно поль-зу-ет-ся левой рукой**	**Поль-зу-ет-ся оди-на-ко-во правой и левой рукой**	**Обычно поль-зу-ет-ся правой рукой**	**Всегда поль-зу-ет-ся правой рукой**
Пожалуйста, выберите подходящий ответ для каждого из пунктов: - Какой рукой Ваш ребёнок держит ложку?					
- Какой рукой держит хлеб, печенье?					
- Какой рукой ребенок рисует?					
- Какой рукой ребенок пишет?					
- Какой рукой копает лопатой?					
- Какой рукой чистит зубы?					
- Какой рукой отвинчивает крышку (бутылка с питьевой водой, соком, кетчупом, банки с мыльными пузырями)?					
- Какой рукой ставит кубики, когда строит башню?					
- Какой рукой кладет кусочки, собирая пазл?					

Продолжение Таблицы Б.1

	Всегда поль-з у-ет-ся левой рукой	**Обычно поль-зу-ет-ся левой рукой**	**Поль-зу-е т-ся оди-на-ко -во правой и левой рукой**	**Обычно поль-зу-ет-ся правой рукой**	**Всегда поль-зу-ет-ся правой рукой**
- Какой рукой держит ножницы?					
- Какой рукой вдевает шнурок в отверстие (нанизывает бусы, шнурует ботинки)?					
- Какую руку использует для указательного жеста?					
- Какой рукой берет Вас за руку, чтобы привести куда-нибудь, показать что-нибудь, когда «просит» Вас сделать нужное движение (показать картинку, нажать на кнопку)?					
- Какой рукой открывает ящики?					
- Какой рукой берет телефонную трубку?					
- Какой рукой перелистывает страницы в книжке?					
- Какой рукой открывает дверь шкафа, холодильника?					
- Какой рукой управляет компьютерной мышкой?					

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Результаты статистического анализа

Анализ альфа диапазона (8-13Гц) сенсомоторных ритмов

Таблица В.1 — RM Anova 8-13Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Этап лонгитюда	**5,861×10-6**	**1**	**5,861×10-6**	**27,85**	**< 0,001**	**0,405**
Этап лонгитюда × Возрастная группа	1,503×10-7	2	7,514×10-8	0,357	0,702	0,017
Условие	**6,786×10-6[a]**	**2[a]**	**3,393×10-6[a]**	**24,49[a]**	**< 0,001[a]**	**0,374**
Условие × Возрастная группа	3,922×10-7[a]	4[a]	9,805×10-8[a]	0,708[a]	0,589[a]	0,033
Полушарие	2,233×10-7	1	2,233×10-7	1,909	0,175	0,044
Полушарие × Возрастная группа	5,466×10-9	2	2,733×10-9	0,023	0,977	0,001
Регион	**3,255×10-5[a]**	**5[a]**	**6,511×10-6[a]**	**44,50[a]**	**< 0,001[a]**	**0,520**
Регион × Возрастная группа	1,273×10-6[a]	10[a]	1,273×10-7[a]	0,870[a]	0,562[a]	0,041
Этап лонгитюда × Условие	2,012×10-8	2	1,006×10-8	0,147	0,863	0,004
Этап лонгитюда × Условие ×Возрастная группа	3,989×10-7	4	9,972×10-8	1,458	0,223	0,066
Условие × Полушарие	4,026×10-8	2	2,013×10-8	0,856	0,428	0,020

Продолжение Таблицы В.1

Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**$\eta^2 p$**
Условие × Полушарие × Возрастная группа	1,840×10-8	4	4,601×10-9	0,196	0,940	0,009
Условие × Регион	**3,107×10-6[a]**	**10[a]**	**3,107×10-7[a]**	**9,785[a]**	**< 0,001[a]**	**0,193**
Условие × Регион × Возрастная группа	6,454×10-7[a]	20[a]	3,227×10-8[a]	1,016[a]	0,441[a]	0,047
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие	3,676×10-9	2	1,838×10-9	0,107	0,899	0,003
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие × Возрастная группа	1,627×10-8	4	4,067×10-9	0,236	0,917	0,011
Этап лонгитюда × Условие ×Регион	1,877×10-7[a]	10[a]	1,877×10-8[a]	1,086[a]	0,371[a]	0,026
Этап лонгитюда × Условие ×Регион × Возрастная группа	5,498×10-7[a]	20[a]	2,749×10-8[a]	1,591[a]	0,051[a]	0,072
Условие × Полушарие × Регион	1,065×10-7[a]	10[a]	1,065×10-8[a]	0,912[a]	0,522[a]	0,022
Условие × Полушарие × Регион ×Возрастная группа	1,520×10-7[a]	20[a]	7,599×10-9[a]	0,651[a]	0,873[a]	0,031
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие × Регион	7,991×10-8[a]	10[a]	7,991×10-9[a]	0,811[a]	0,618[a]	0,019

Продолжение Таблицы В.1

Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие × Регион × Возрастная группа	1,097×10-7[a]	20[a]	5,483×10-9[a]	0,557[a]	0,940[a]	0,026
Межгрупповой фактор						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Возрастная группа	2,171×10-5	2	1,086×10-5	3,138	0,054	0,133

Таблица В.2 — Апостериорный анализ (Условие) для RM Anova 8-13Гц

Апостериорный анализ - Условие							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР**	**8,461×10-5**	**1,449×10-5**	**41**	**5,840**	**0,285**	**< 0,001**
НВФ	**НВР**	**-3,640×10-5**	**1,695×10-5**	**41**	**-2,148**	**-0,123**	**0,038**
ПСР	**НВР**	**-1,210×10-4**	**2,115×10-5**	**41**	**-5,721**	**-0,407**	**< 0,001**

Таблица В.3 — Апостериорный анализ (Условие × Регион) для RM Anova 8-13Гц

Апостериорный анализ - Условие × Регион							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, F(3/4)	ПСР, F(3/4)	5,883×10-5	2,453×10-5	41	2,398	0,198	0,739
НВФ, F(3/4)	НВР, F(3/4)	-6,269×10-7	2,358×10-5	41	-0,027	-0,002	1,000
ПСР, F(3/4)	НВР, F(3/4)	-5,946×10-5	2,685×10-5	41	-2,214	-0,200	1,000
НВФ, Fc(5/6)	ПСР, Fc(5/6)	5,049×10-5	2,320×10-5	41	2,176	0,170	1,000
НВФ, Fc(5/6)	НВР, Fc(5/6)	-3,410×10-5	2,311×10-5	41	-1,476	-0,115	1,000
ПСР, Fc(5/6)	НВР, Fc(5/6)	-8,459×10-5	2,622×10-5	41	-3,227	-0,285	0,130
НВФ, Fc(1/2)	**ПСР, Fc(1/2)**	**6,889×10-5**	**1,568×10-5**	**41**	**4,395**	**0,232**	**0,006**
НВФ, Fc(1/2)	НВР, Fc(1/2)	-4,690×10-5	1,695×10-5	41	-2,767	-0,158	0,380
ПСР, Fc(1/2)	**НВР, Fc(1/2)**	**-1,158×10-4**	**2,071×10-5**	**41**	**-5,591**	**-0,390**	**< 0,001**
НВФ, C(3/4)	**ПСР, C(3/4)**	**2,017×10-4**	**3,450×10-5**	**41**	**5,846**	**0,679**	**< 0,001**
НВФ, C(3/4)	НВР, C(3/4)	-9,695×10-5	4,619×10-5	41	-2,099	-0,326	1,000
ПСР, C(3/4)	**НВР, C(3/4)**	**-2,986×10-4**	**4,848×10-5**	**41**	**-6,160**	**-1,006**	**< 0,001**
НВФ, Cp(5/6)	ПСР, Cp(5/6)	5,188×10-5	1,555×10-5	41	3,335	0,175	0,107
НВФ, Cp(5/6)	НВР, Cp(5/6)	-7,261×10-6	1,726×10-5	41	-0,421	-0,024	1,000

Продолжение Таблицы В.3

		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
ПСР, Ср(5/6)	НВР, Ср(5/6)	-5,914×10-5	2,317×10-5	41	-2,552	-0,199	0,552
НВФ, Ср(1/2)	**ПСР, Ср(1/2)**	**7,588×10-5**	**1,494×10-5**	**41**	**5,080**	**0,255**	**< 0,001**
НВФ, Ср(1/2)	НВР, Ср(1/2)	-3,259×10-5	1,487×10-5	41	-2,192	-0,110	1,000
ПСР, Ср(1/2)	**НВР, Ср(1/2)**	**-1,085×10-4**	**1,910×10-5**	**41**	**-5,680**	**-0,365**	**< 0,001**

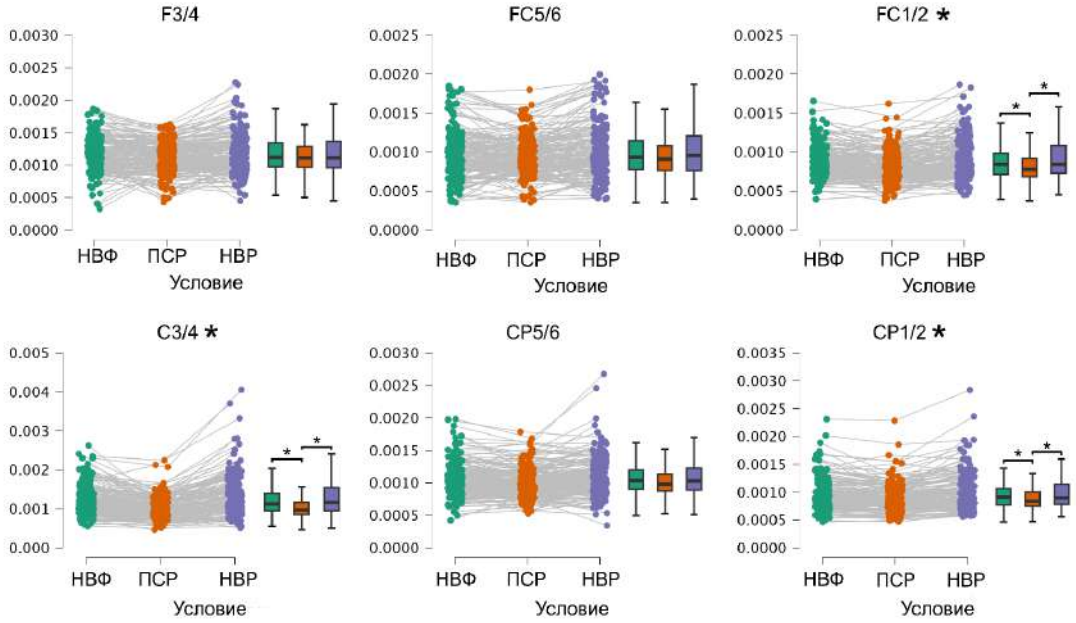


Рисунок В.1 — Апостериорный анализ взаимодействия Условие × Регион для диапазона 8–13 Гц. Выявлены существенные различия между Условиями НВФ и ПСР, а также между Условиями ПСР и НВР во фронтально-центральных (FC1/FC2), центральных (C3/C4) и центро-теменных (CP1/CP2) регионах. Значимые различия отмечены знаком «*»

Анализ бета диапазона (13-30Гц) сенсомоторных ритмов

Таблица В.4 — RM Anova 13-30Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Этап лонгитюда	**5,438×10-6**	**1**	**5,438×10-6**	**50,14**	**< 0,001**	**0,550**
Этап лонгитюда× Возрастная группа	5,006×10-8	2	2,503×10-8	0,231	0,795	0,011
Условие	**4,805×10-6**	**2**	**2,402×10-6**	**35,82**	**< 0,001**	**0,466**
Условие × Возрастная группа	6,253×10-7	4	1,563×10-7	2,331	0,063	0,102
Полушарие	**1,483×10-7**	**1**	**1,483×10-7**	**4,182**	**0,047**	**0,093**
Полушарие × Возрастная группа	3,366×10-8	2	1,683×10-8	0,475	0,626	0,023
Регион	**6,514×10-5[a]**	**5[a]**	**1,303×10-5[a]**	**170,9[a]**	**< 0,001[a]**	**0,807**
Регион × Возрастная группа	**4,586×10-6[a]**	**10[a]**	**4,586×10-7[a]**	**6,015[a]**	**< 0,001[a]**	**0,227**
Этап лонгитюда × Условие	3,243×10-7[a]	2[a]	1,621×10-7[a]	2,797[a]	0,067[a]	0,064
Этап лонгитюда × Условие ×Возрастная группа	2,888×10-7[a]	4[a]	7,221×10-8[a]	1,246[a]	0,298[a]	0,057
Условие × Полушарие	1,368×10-8[a]	2[a]	6,841×10-9[a]	0,662[a]	0,519[a]	0,016
Условие × Полушарие ×Возрастная группа	1,804×10-8[a]	4[a]	4,509×10-9[a]	0,436[a]	0,782[a]	0,021

Продолжение Таблицы В.4

Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Условие × Регион	**3,211×10-6[a]**	**10[a]**	**3,211×10-7[a]**	**12,72[a]**	**< 0,001[a]**	**0,237**
Условие × Регион × Возрастная группа	**9,417×10-7[a]**	**20[a]**	**4,708×10-8[a]**	**1,865[a]**	**0,014[a]**	**0,083**
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие	3,574×10-8	2	1,787×10-8	1,197	0,307	0,028
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие × Возрастная группа	2,388×10-8	4	5,971×10-9	0,400	0,808	0,019
Этап лонгитюда × Условие ×Регион	3,099×10-7[a]	10[a]	3,099×10-8[a]	1,651[a]	0,090[a]	0,039
Этап лонгитюда × Условие ×Регион × Возрастная группа	3,737×10-7[a]	20[a]	1,869×10-8[a]	0,995[a]	0,467[a]	0,046
Условие × Полушарие × Регион	2,445×10-8[a]	10[a]	2,445×10-9[a]	0,278[a]	0,986[a]	0,007
Условие × Полушарие × Регион ×Возрастная группа	1,099×10-7[a]	20[a]	5,497×10-9[a]	0,625[a]	0,894[a]	0,030
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие × Регион	5,073×10-8[a]	10[a]	5,073×10-9[a]	0,584[a]	0,828[a]	0,014
Этап лонгитюда × Условие ×Полушарие × Регион × Возрастная группа	1,986×10-7[a]	20[a]	9,929×10-9[a]	1,142[a]	0,303[a]	0,053

Продолжение Таблицы В.4

Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Межгрупповой фактор						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Возрастная группа	**6,890×10-6**	**2**	**3,445×10-6**	**4,746**	**0,014**	**0,188**

Таблица В.5 — Апостериорный анализ (Условие) для RM Anova 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР**	**9,257×10-5**	**1,056×10-5**	**41**	**8,767**	**0,491**	**< 0,001**
НВФ	НВР	4,332×10-6	1,328×10-5	41	0,326	0,023	0,746
ПСР	**НВР**	**-8,824×10-5**	**1,301×10-5**	**41**	**-6,781**	**-0,468**	**< 0,001**

Таблица В.6 — Апостериорный анализ (Условие × Регион) для RM Anova 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие × Регион							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, F(3/4)	**ПСР, F(3/4)**	**2,118×10-4**	**3,525×10-5**	**41**	**6,009**	**1,123**	**< 0,001**
НВФ, F(3/4)	НВР, F(3/4)	1,384×10-5	3,793×10-5	41	0,365	0,073	1,000
ПСР, F(3/4)	**НВР, F(3/4)**	**-1,980×10-4**	**3,721×10-5**	**41**	**-5,320**	**-1,050**	**< 0,001**
НВФ, Fc(5/6)	**ПСР, Fc(5/6)**	**1,708×10-4**	**2,642×10-5**	**41**	**6,464**	**0,906**	**< 0,001**
НВФ, Fc(5/6)	НВР, Fc(5/6)	-1,702×10-5	3,427×10-5	41	-0,497	-0,090	1,000
ПСР, Fc(5/6)	**НВР, Fc(5/6)**	**-1,878×10-4**	**3,350×10-5**	**41**	**-5,607**	**-0,996**	**< 0,001**
НВФ, Fc(1/2)	**ПСР, Fc(1/2)**	**4,892×10-5**	**8,873×10-6**	**41**	**5,513**	**0,259**	**< 0,001**
НВФ, Fc(1/2)	НВР, Fc(1/2)	4,649×10-6	8,997×10-6	41	0,517	0,025	1,000
ПСР, Fc(1/2)	**НВР, Fc(1/2)**	**-4,427×10-5**	**8,754×10-6**	**41**	**-5,057**	**-0,235**	**< 0,001**
НВФ, C(3/4)	**ПСР, C(3/4)**	**6,484×10-5**	**8,851×10-6**	**41**	**7,326**	**0,344**	**< 0,001**
НВФ, C(3/4)	НВР, C(3/4)	9,471×10-6	1,121×10-5	41	0,845	0,050	1,000
ПСР, C(3/4)	**НВР, C(3/4)**	**-5,537×10-5**	**9,892×10-6**	**41**	**-5,598**	**-0,294**	**< 0,001**
НВФ, Cp(5/6)	**ПСР, Cp(5/6)**	**3,757×10-5**	**8,953×10-6**	**41**	**4,196**	**0,199**	**0,004**
НВФ, Cp(5/6)	НВР, Cp(5/6)	4,693×10-6	1,028×10-5	41	0,456	0,025	1,000

Продолжение Таблицы В.6

		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
ПСР, Ср(5/6)	**НВР, Ср(5/6)**	**-3,288×10-5**	**8,134×10-6**	**41**	**-4,042**	**-0,174**	**0,007**
НВФ, Ср(1/2)	**ПСР, Ср(1/2)**	**2,152×10-5**	**4,284×10-6**	**41**	**5,023**	**0,114**	**< 0,001**
НВФ, Ср(1/2)	НВР, Ср(1/2)	1,036×10-5	4,601×10-6	41	2,252	0,055	0,387
ПСР, Ср(1/2)	НВР, Ср(1/2)	-1,116×10-5	4,062×10-6	41	-2,747	-0,059	0,151

Таблица В.7 — Апостериорный анализ (Возрастная группа) для RM Anova 13-30Гц

Апостериорный анализ - Возрастная группа							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
3-4 летние	**5-6 летние**	**1,001×10-4**	**4,122×10-5**	**41**	**2,429**	**0,531**	**0,039**
3-4 летние	**7-8 летние**	**1,371×10-4**	**4,512×10-5**	**41**	**3,040**	**0,727**	**0,012**
5-6 летние	7-8 летние	3,702×10-5	3,484×10-5	41	1,062	0,196	0,294

Таблица В.8 — RM Anova для группы 3-4 летние в диапазоне 13-30Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Условие	**6,177×10-7**	**2**	**3,088×10-7**	**14,77**	**< 0,001**	**0,678**
Регион	**6,628×10-6**	**5**	**1,326×10-6**	**38,43**	**< 0,001**	**0,846**
Условие × Регион	**5,465×10-7**	**10**	**5,465×10-8**	**6,114**	**< 0,001**	**0,466**

Таблица В.9 — Апостериорный анализ (Условие) для RM Anova для группы 3-4 летние в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР**	**1,457×10-4**	**2,987×10-5**	**7**	**4,880**	**0,812**	**0,005**
НВФ	НВР	1,480×10-5	2,704×10-5	7	0,547	0,082	0,601
ПСР	**НВР**	**-1,309×10-4**	**3,148×10-5**	**7**	**-4,159**	**-0,729**	**0,008**

Таблица В.10 — Апостериорный анализ (Условие × Регион) для RM Anova для группы 3-4 летние в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие × Регион							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, F(3/4)	ПСР, F(3/4)	3,422×10-4	1,033×10-4	7	3,314	1,906	0,437
НВФ, F(3/4)	НВР, F(3/4)	7,785×10-5	8,299×10-5	7	0,938	0,434	1,000
ПСР, F(3/4)	НВР, F(3/4)	-2,644×10-4	6,621×10-5	7	-3,993	-1,472	0,241

Продолжение Таблицы В.10

		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, FC(5/6)	ПСР, FC(5/6)	3,136×10-4	7,864×10-5	7	3,988	1,747	0,241
НВФ, FC(5/6)	НВР, FC(5/6)	-3,422×10-5	6,473×10-5	7	-0,529	-0,191	1,000
ПСР, FC(5/6)	НВР, FC(5/6)	-3,478×10-4	1,148×10-4	7	-3,029	-1,937	0,632
НВФ, FC(1/2)	**ПСР, FC(1/2)**	**4,529×10-5**	**5,941×10-6**	**7**	**7,623**	**0,252**	**0,017**
НВФ, FC(1/2)	НВР, FC(1/2)	4,147×10-6	7,436×10-6	7	0,558	0,023	1,000
ПСР, FC(1/2)	НВР, FC(1/2)	-4,115×10-5	1,008×10-5	7	-4,081	-0,229	0,225
НВФ, C(3/4)	ПСР, C(3/4)	8,849×10-5	2,548×10-5	7	3,473	0,493	0,378
НВФ, C(3/4)	НВР, C(3/4)	2,252×10-5	2,956×10-5	7	0,762	0,125	1,000
ПСР, C(3/4)	НВР, C(3/4)	-6,598×10-5	1,684×10-5	7	-3,918	-0,367	0,248
НВФ, CP(5/6)	ПСР, CP(5/6)	5,610×10-5	2,564×10-5	7	2,188	0,312	1,000
НВФ, CP(5/6)	НВР, CP(5/6)	1,608×10-5	2,625×10-5	7	0,613	0,090	1,000
ПСР, CP(5/6)	НВР, CP(5/6)	-4,002×10-5	1,198×10-5	7	-3,340	-0,223	0,435
НВФ, CP(1/2)	ПСР, CP(1/2)	2,872×10-5	9,512×10-6	7	3,019	0,160	0,632
НВФ, CP(1/2)	НВР, CP(1/2)	2,402×10-6	7,146×10-6	7	0,336	0,013	1,000
ПСР, CP(1/2)	НВР, CP(1/2)	-2,632×10-5	8,800×10-6	7	-2,991	-0,147	0,632

Таблица В.11 — RM Anova для группы 5-6 летние в диапазоне 13-30Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Условие	**4,452×10-7**	**2**	**2,226×10-7**	**13,99**	**< 0,001**	**0,389**
Регион	**7,763×10-6** [a]	**5**[a]	**1,553×10-6** [a]	**83,04**[a]	**< 0,001**[a]	**0,791**
Условие × Регион	**3,164×10-7**	**10**	**3,164×10-8**	**5,945**	**< 0,001**	**0,213**

Таблица В.12 — Апостериорный анализ (Условие) для RM Anova для группы 5-6 летние в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР**	**6,190×10-5**	**1,101×10-5**	**22**	**5,625**	**0,445**	**< 0,001**
НВФ	НВР	-1,338×10-5	1,659×10-5	22	-0,807	-0,096	0,429
ПСР	**НВР**	**-7,528×10-5**	**1,718×10-5**	**22**	**-4,381**	**-0,542**	**< 0,001**

Таблица В.13 — Апостериорный анализ (Условие × Регион) для RM Anova для группы 5-6 летние в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие × Регион							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, F(3/4)	**ПСР, F(3/4)**	**1,654×10-4**	**3,772×10-5**	**22**	**4,384**	**1,190**	**0,012**
НВФ, F(3/4)	НВР, F(3/4)	-2,882×10-5	4,175×10-5	22	-0,690	-0,207	1,000
ПСР, F(3/4)	НВР, F(3/4)	-1,942×10-4	5,371×10-5	22	-3,616	-1,397	0,058
НВФ, FC(5/6)	ПСР, FC(5/6)	9,547×10-5	2,662×10-5	22	3,586	0,687	0,058
НВФ, FC(5/6)	НВР, FC(5/6)	-2,237×10-5	4,432×10-5	22	-0,505	-0,161	1,000
ПСР, FC(5/6)	**НВР, FC(5/6)**	**-1,178×10-4**	**3,138×10-5**	**22**	**-3,755**	**-0,848**	**0,045**
НВФ, FC(1/2)	ПСР, FC(1/2)	2,821×10-5	1,170×10-5	22	2,410	0,203	0,519
НВФ, FC(1/2)	НВР, FC(1/2)	-1,856×10-6	1,153×10-5	22	-0,161	-0,013	1,000
ПСР, FC(1/2)	НВР, FC(1/2)	-3,006×10-5	1,056×10-5	22	-2,846	-0,216	0,235
НВФ, C(3/4)	**ПСР, C(3/4)**	**4,155×10-5**	**9,307×10-6**	**22**	**4,465**	**0,299**	**0,010**
НВФ, C(3/4)	НВР, C(3/4)	-1,699×10-5	1,449×10-5	22	-1,172	-0,122	1,000
ПСР, C(3/4)	**НВР, C(3/4)**	**-5,854×10-5**	**1,542×10-5**	**22**	**-3,797**	**-0,421**	**0,042**
НВФ, CP(5/6)	ПСР, CP(5/6)	2,533×10-5	1,057×10-5	22	2,397	0,182	0,519
НВФ, CP(5/6)	НВР, CP(5/6)	-1,430×10-5	1,263×10-5	22	-1,132	-0,103	1,000

Продолжение Таблицы В.13

		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
ПСР, СР(5/6)	**НВР, СР(5/6)**	**-3,963×10-5**	**1,064×10-5**	**22**	**-3,725**	**-0,285**	**0,047**
НВФ, СР(1/2)	ПСР, СР(1/2)	1,549×10-5	4,823×10-6	22	3,211	0,111	0,117
НВФ, СР(1/2)	НВР, СР(1/2)	4,050×10-6	5,970×10-6	22	0,678	0,029	1,000
ПСР, СР(1/2)	НВР, СР(1/2)	-1,144×10-5	4,868×10-6	22	-2,350	-0,082	0,519

Таблица В.14 — RM Anova для группы 7-8 летние в диапазоне 13-30Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Условие	**2,205×10-7**	**2**	**1,103×10-7**	**6,929**	**0,004**	**0,366**
Регион	**3,717×10-6** [a]	**5**[a]	**7,435×10-7** [a]	**69,28**[a]	**< 0,001**[a]	**0,852**
Условие × Регион	9,720×10-8	10	9,720×10-9	1,474	0,157	0,109

Таблица В.15 — Апостериорный анализ (Условие) для RM Anova для группы 7-8 летние в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Условие							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР**	**7,015×10-5**	**1,901×10-5**	**12**	**3,691**	**0,544**	**0,009**
НВФ	НВР	1,164×10-5	2,332×10-5	12	0,499	0,090	0,627
ПСР	**НВР**	**-5,852×10-5**	**1,785×10-5**	**12**	**-3,278**	**-0,454**	**0,013**

Анализ эффекта латерализации при сгибании правой и левой руки

Таблица В.16 — RM Anova для межполушарной латерализации при сгибании правой и левой руки в диапазоне 8-13Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Латерализация	**2,017×10-6** [a]	**2**[a]	**1,008×10-6** [a]	**15,54**[a]	**< 0,001**[a]	**0,275**
Латерализация × Возрастная группа	1,684×10-7 [a]	4[a]	4,209×10-8 [a]	0,649[a]	0,629[a]	0,031
Полушарие	7,278×10-8	1	7,278×10-8	1,237	0,273	0,029
Полушарие × Возрастная группа	5,677×10-8	2	2,839×10-8	0,482	0,621	0,023
Регион	**1,350×10-5** [a]	**5**[a]	**2,700×10-6** [a]	**38,08**[a]	**< 0,001**[a]	**0,482**
Регион × Возрастная группа	3,907×10-7 [a]	10[a]	3,907×10-8 [a]	0,551[a]	0,852[a]	0,026

Продолжение Таблицы В.16

Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Латерализация × Полушарие	**9,910×10-7**	**2**	**4,955×10-7**	**14,41**	**< 0,001**	**0,260**
Латерализация × Полушарие × Возрастная группа	1,222×10-7	4	3,055×10-8	0,888	0,475	0,042
Латерализация × Регион	**1,239×10-6** [a]	**10**[a]	**1,239×10-7** [a]	**6,764**[a]	**< 0,001**[a]	**0,142**
Латерализация × Регион × Возрастная группа	4,179×10-7 [a]	20[a]	2,089×10-8 [a]	1,140[a]	0,305[a]	0,053
Латерализация × Полушарие × Регион	**6,592×10-7** [a]	**10**[a]	**6,592×10-8** [a]	**5,557**[a]	**< 0,001**[a]	**0,119**
Латерализация × Полушарие × Регион × Возрастная группа	1,912×10-7 [a]	20[a]	9,561×10-9 [a]	0,806[a]	0,707[a]	0,038
Межгрупповой фактор						
Факторы	**Сумма квадратов**	**Df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Возрастная группа	**1,057×10-5**	**2**	**5,287×10-6**	**3,831**	**0,030**	**0,157**

Таблица В.17 — Апостериорный анализ фактора Латерализация для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 8-13Гц

Апостериорный анализ - Латерализация							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР правая рука**	**8,557×10-5**	**2,024×10-5**	**41**	**4,229**	**0,327**	**< 0,001**
НВФ	**ПСР левая рука**	**7,996×10-5**	**1,992×10-5**	**41**	**4,013**	**0,306**	**< 0,001**
ПСР правая рука	ПСР левая рука	-5,617×10-6	8,838×10-6	41	-0,636	-0,021	0,529

Таблица В.18 — Апостериорный анализ (Латерализация × Полушарие) для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 8-13Гц

Апостериорный анализ - Латерализация × Полушарие							
		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, левая рука	**ПСР правая рука , левая рука**	**1,251×10-4**	**2,610×10-5**	**41**	**4,795**	**0,478**	**< 0,001**
НВФ, левая рука	ПСР левая рука , левая рука	5,280×10-5	2,443×10-5	41	2,162	0,202	0,256
НВФ, левая рука	НВФ, правая рука	-6,575×10-6	1,862×10-5	41	-0,353	-0,025	1,000

Продолжение Таблицы В.18

		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ, левая рука	ПСР правая рука , правая рука	3,943×10-5	2,150×10-5	41	1,834	0,151	0,295
НВФ, левая рука	**ПСР левая рука , правая рука**	**1,005×10-4**	**2,150×10-5**	**41**	**4,676**	**0,384**	**< 0,001**
ПСР правая рука , левая рука	**ПСР левая рука , левая рука**	**-7,234×10-5**	**1,801×10-5**	**41**	**-4,018**	**-0,276**	**0,002**
ПСР правая рука , левая рука	**НВФ, правая рука**	**-1,317×10-4**	**2,837×10-5**	**41**	**-4,643**	**-0,503**	**< 0,001**
ПСР правая рука , левая рука	**ПСР правая рука , правая рука**	**-8,571×10-5**	**2,099×10-5**	**41**	**-4,083**	**-0,328**	**0,002**
ПСР правая рука , левая рука	ПСР левая рука , правая рука	-2,460×10-5	1,433×10-5	41	-1,716	-0,094	0,295
ПСР левая рука , левая рука	НВФ, правая рука	-5,937×10-5	2,791×10-5	41	-2,127	-0,227	0,256

Продолжение Таблицы В.18

		Mean Difference	**SE**	**f**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
ПСР левая рука , левая рука	ПСР правая рука , правая рука	-1,337×10-5	2,092×10-5	41	-0,639	-0,051	1,000
ПСР левая рука , левая рука	ПСР левая рука , правая рука	4,774×10-5	1,930×10-5	41	2,473	0,182	0,141
НВФ, правая рука	ПСР правая рука , правая рука	4,600×10-5	2,185×10-5	41	2,106	0,176	0,256
НВФ, правая рука	**ПСР левая рука , правая рука**	**1,071×10-4**	**2,165×10-5**	**41**	**4,947**	**0,409**	**< 0,001**
ПСР правая рука , правая рука	**ПСР левая рука , правая рука**	**6,111×10-5**	**1,259×10-5**	**41**	**4,853**	**0,234**	**< 0,001**

Таблица В.19 — Апостериорный анализ (Латерализация × Полушарие × Регион) для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 8-13Гц. Разные экспериментальные условия в пределах одного Полушария и Региона

Апостериорный анализ - Латерализация × Полушарие × Регион							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
НВФ, левая рука , F(3/4)	ПСР правая рука , левая рука , F(3/4)	8,480×10-5	3,468×10-5	41	2,445	0,324	1,000
НВФ, левая рука , F(3/4)	ПСР левая рука , левая рука , F(3/4)	6,656×10-5	3,606×10-5	41	1,846	0,254	1,000
ПСР правая рука , левая рука , F(3/4)	ПСР левая рука , левая рука , F(3/4)	-1,825×10-5	2,039×10-5	41	-0,895	-0,070	1,000
НВФ, правая рука , F(3/4)	ПСР правая рука , правая рука , F(3/4)	3,950×10-5	4,065×10-5	41	0,972	0,151	1,000
НВФ, правая рука , F(3/4)	ПСР левая рука , правая рука , F(3/4)	5,565×10-5	4,272×10-5	41	1,302	0,213	1,000
ПСР правая рука , правая рука , F(3/4)	ПСР левая рука , правая рука , F(3/4)	1,614×10-5	1,316×10-5	41	1,226	0,062	1,000
НВФ, левая рука , Fc(5/6)	ПСР правая рука , левая рука , Fc(5/6)	3,317×10-5	3,777×10-5	41	0,878	0,127	1,000
НВФ, левая рука , Fc(5/6)	ПСР левая рука , левая рука , Fc(5/6)	8,402×10-6	4,086×10-5	41	0,206	0,032	1,000

Продолжение Таблицы В.19

		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
ПСР правая рука , левая рука , Fc(5/6)	ПСР левая рука , левая рука , Fc(5/6)	-2,477×10-5	1,210×10-5	41	-2,048	-0,095	1,000
НВФ, правая рука , Fc(5/6)	ПСР правая рука , правая рука , Fc(5/6)	2,935×10-5	5,085×10-5	41	0,577	0,112	1,000
НВФ, правая рука , Fc(5/6)	ПСР левая рука , правая рука , Fc(5/6)	6,092×10-5	4,554×10-5	41	1,338	0,233	1,000
ПСР правая рука , правая рука , Fc(5/6)	ПСР левая рука , правая рука , Fc(5/6)	3,157×10-5	1,590×10-5	41	1,985	0,121	1,000
НВФ, левая рука , Fc(1/2)	ПСР правая рука , левая рука , Fc(1/2)	9,529×10-5	2,399×10-5	41	3,971	0,364	0,109
НВФ, левая рука , Fc(1/2)	ПСР левая рука , левая рука , Fc(1/2)	9,413×10-6	3,049×10-5	41	0,309	0,036	1,000
ПСР правая рука , левая рука, Fc(1/2)	ПСР левая рука , левая рука , Fc(1/2)	-8,588×10-5	2,620×10-5	41	-3,278	-0,328	0,702
НВФ, правая рука, Fc(1/2)	ПСР правая рука , правая рука , Fc(1/2)	4,328×10-5	3,305×10-5	41	1,309	0,165	1,000

Продолжение Таблицы В.19

		Mean Difference	SE	df	t	Cohen's d	p Holm
НВФ, правая рука, Fc(1/2)	**ПСР левая рука , правая рука , Fc(1/2)**	**1,395×10-4**	**3,062×10-5**	**41**	**4,554**	**0,533**	**0,020**
ПСР правая рука , правая рука , Fc(1/2)	**ПСР левая рука , правая рука , Fc(1/2)**	**9,617×10-5**	**1,935×10-5**	**41**	**4,971**	**0,368**	**0,006**
НВФ, левая рука , C(3/4)	**ПСР правая рука , левая рука , C(3/4)**	**3,376×10-4**	**5,837×10-5**	**41**	**5,783**	**1,290**	**< 0,001**
НВФ, левая рука , C(3/4)	ПСР левая рука , левая рука , C(3/4)	1,375×10-4	5,741×10-5	41	2,395	0,525	1,000
ПСР правая рука , левая рука , C(3/4)	ПСР левая рука , левая рука , C(3/4)	-2,001×10-4	4,794×10-5	41	-4,173	-0,765	0,061
НВФ, правая рука , C(3/4)	ПСР правая рука , правая рука , C(3/4)	1,377×10-4	4,802×10-5	41	2,867	0,526	1,000
НВФ, правая рука , C(3/4)	**ПСР левая рука , правая рука , C(3/4)**	**2,754×10-4**	**5,102×10-5**	**41**	**5,398**	**1,053**	**0,002**
ПСР правая рука , правая рука , C(3/4)	ПСР левая рука , правая рука , C(3/4)	1,377×10-4	3,502×10-5	41	3,932	0,526	0,121

Продолжение Таблицы В.19

		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
НВФ, левая рука , Ср(5/6)	ПСР правая рука , левая рука , Ср(5/6)	7,144×10-5	3,152×10-5	41	2,267	0,273	1,000
НВФ, левая рука , Ср(5/6)	ПСР левая рука , левая рука , Ср(5/6)	2,259×10-5	2,581×10-5	41	0,875	0,086	1,000
ПСР правая рука , левая рука , Ср(5/6)	ПСР левая рука , левая рука , Ср(5/6)	-4,885×10-5	1,679×10-5	41	-2,910	-0,187	1,000
НВФ, правая рука , Ср(5/6)	ПСР правая рука , правая рука , Ср(5/6)	4,267×10-6	2,101×10-5	41	0,203	0,016	1,000
НВФ, правая рука , Ср(5/6)	ПСР левая рука , правая рука , Ср(5/6)	5,009×10-5	2,181×10-5	41	2,297	0,191	1,000
ПСР правая рука , правая рука , Ср(5/6)	ПСР левая рука , правая рука , Ср(5/6)	4,583×10-5	1,539×10-5	41	2,978	0,175	1,000
НВФ, левая рука , Ср(1/2)	ПСР правая рука , левая рука , Ср(1/2)	1,286×10-4	3,204×10-5	41	4,013	0,491	0,096
НВФ, левая рука , Ср(1/2)	ПСР левая рука , левая рука , Ср(1/2)	7,232×10-5	2,737×10-5	41	2,642	0,276	1,000

Продолжение Таблицы В.19

		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
ПСР правая рука , левая рука , Ср(1/2)	ПСР левая рука , левая рука , Ср(1/2)	-5,625×10-5	1,849×10-5	41	-3,043	-0,215	1,000
НВФ, правая рука , Ср(1/2)	ПСР правая рука , правая рука , Ср(1/2)	2,193×10-5	2,173×10-5	41	1,009	0,084	1,000
НВФ, правая рука , Ср(1/2)	ПСР левая рука , правая рука , Ср(1/2)	6,114×10-5	2,474×10-5	41	2,471	0,234	1,000
ПСР правая рука , правая рука , Ср(1/2)	ПСР левая рука , правая рука , Ср(1/2)	3,922×10-5	1,319×10-5	41	2,973	0,150	1,000

Таблица В.20 — Апостериорный анализ (Латерализация × Полушарие × Регион) для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 8-13Гц. Разные полушария условия в пределах одного условия и региона

Апостериорный анализ - Латерализация × Полушарие × Регион							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
НВФ, левая рука , F(3/4)	НВФ, правая рука , F(3/4)	-3,255×10-5	3,534×10-5	41	-0,921	-0,124	1,000
ПСР правая рука , левая рука , F(3/4)	ПСР правая рука , правая рука , F(3/4)	-7,785×10-5	4,208×10-5	41	-1,850	-0,297	1,000
ПСР левая рука , левая рука , F(3/4)	ПСР левая рука , правая рука , F(3/4)	-4,346×10-5	3,976×10-5	41	-1,093	-0,166	1,000
НВФ, левая рука , Fc(5/6)	НВФ, правая рука , Fc(5/6)	-5,147×10-5	4,710×10-5	41	-1,093	-0,197	1,000
ПСР правая рука , левая рука , Fc(5/6)	ПСР правая рука , правая рука , Fc(5/6)	-5,529×10-5	3,753×10-5	41	-1,473	-0,211	1,000
ПСР левая рука , левая рука , Fc(5/6)	ПСР левая рука , правая рука , Fc(5/6)	1,045×10-6	3,538×10-5	41	0,030	0,004	1,000

Продолжение Таблицы В.20

		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
НВФ, левая рука , Fc(1/2)	НВФ, правая рука , Fc(1/2)	8,398×10-6	2,282×10-5	41	0,368	0,032	1,000
ПСР правая рука , левая рука , Fc(1/2)	ПСР правая рука , правая рука , Fc(1/2)	-4,361×10-5	3,257×10-5	41	-1,339	-0,167	1,000
ПСР левая рука , левая рука , Fc(1/2)	ПСР левая рука , правая рука , Fc(1/2)	1,384×10-4	3,387×10-5	41	4,088	0,529	0,079
НВФ, левая рука , C(3/4)	НВФ, правая рука , C(3/4)	3,638×10-5	4,293×10-5	41	0,847	0,139	1,000
ПСР правая рука , левая рука , C(3/4)	ПСР правая рука , правая рука , C(3/4)	-1,635×10-4	4,038×10-5	41	-4,049	-0,625	0,088
ПСР левая рука , левая рука , C(3/4)	ПСР левая рука , правая рука , C(3/4)	1,743×10-4	5,424×10-5	41	3,213	0,666	0,831
НВФ, левая рука , Cp(5/6)	НВФ, правая рука , Cp(5/6)	-3,710×10-7	3,448×10-5	41	-0,011	-0,001	1,000

Продолжение Таблицы В.20

		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p Holm**
ПСР правая рука , левая рука , Ср(5/6)	ПСР правая рука , правая рука , Ср(5/6)	-6,755×10-5	2,352×10-5	41	-2,872	-0,258	1,000
ПСР левая рука , левая рука , Ср(5/6)	ПСР левая рука , правая рука , Ср(5/6)	2,713×10-5	2,324×10-5	41	1,167	0,104	1,000
НВФ, левая рука , Ср(1/2)	НВФ, правая рука , Ср(1/2)	1,639×10-7	2,861×10-5	41	0,006	6,263×1-4	1,000
ПСР правая рука , левая рука , Ср(1/2)	ПСР правая рука , правая рука , Ср(1/2)	-1,065×10-4	2,681×10-5	41	-3,971	-0,407	0,109
ПСР левая рука , левая рука , Ср(1/2)	ПСР левая рука , правая рука , Ср(1/2)	-1,102×10-5	1,819×10-5	41	-0,606	-0,042	1,000

Таблица В.21 — Апостериорный анализ (Возрастная группа) для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 8-13Гц

Апостериорный анализ - Возрастная группа							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
3-4 летние	5-6 летние	1,528×10-4	8,036×10-5	41	1,901	0,584	0,129
3-4 летние	**7-8 летние**	**2,435×10-4**	**8,798×10-5**	**41**	**2,768**	**0,931**	**0,025**
5-6 летние	7-8 летние	9,070×10-5	6,794×10-5	41	1,335	0,347	0,189

Таблица В.22 — RM Anova для межполушарной латерализации при сгибании правой и левой руки в диапазоне 13-30Гц

Внутригрупповые факторы						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η^2p**
Латерализация	**1,808×10-6** [a]	**2**[a]	**9,039×10-7**[a]	**38,65**[a]	**< 0,001**[a]	**0,485**
Латерализация × Возрастная группа	1,780×10-7 [a]	4[a]	4,451×10-8[a]	1,903[a]	0,118[a]	0,085
Полушарие	2,883×10-8	1	2,883×10-8	1,162	0,287	0,028
Полушарие × Возрастная группа	1,108×10-7	2	5,540×10-8	2,233	0,120	0,098
Регион	**1,992×10-5** [a]	**5**[a]	**3,984×10-6**[a]	**144,0**[a]	**< 0,001**[a]	**0,778**
Регион × Возрастная группа	**1,404×10-6** [a]	**10**[a]	**1,404×10-7**[a]	**5,073**[a]	**< 0,001**[a]	**0,198**

Продолжение Таблицы В.22

Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Латерализация × Полушарие	1,887×10-8 [a]	2[a]	9,434×10-9[a]	0,796[a]	0,455[a]	0,019
Латерализация × Полушарие × Возрастная группа	1,321×10-8 [a]	4[a]	3,303×10-9[a]	0,279[a]	0,891[a]	0,013
Латерализация × Регион	**1,407×10-6 [a]**	**10[a]**	**1,407×10-7[a]**	**10,45[a]**	**< 0,001[a]**	**0,203**
Латерализация × Регион × Возрастная группа	4,122×10-7 [a]	20[a]	2,061×10-8[a]	1,531[a]	0,067[a]	0,069
Латерализация × Полушарие × Регион	2,599×10-8 [a]	10[a]	2,599×10-9[a]	0,330[a]	0,973[a]	0,008
Латерализация × Полушарие × Регион × Возрастная группа	7,635×10-8 [a]	20[a]	3,818×10-9[a]	0,485[a]	0,972[a]	0,023
Межгрупповой фактор						
Факторы	**Сумма квадратов**	**df**	**Средний квадрат**	**F**	**p**	**η²p**
Возрастная группа	**2,735×10-6**	**2**	**1,368×10-6**	**4,239**	**0,021**	**0,171**

Таблица В.23 — Апостериорный анализ фактора Латерализация для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Латерализация							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
НВФ	**ПСР правая рука**	**7,368×10-5**	**1,164×10-5**	**41**	**6,327**	**0,473**	**< 0,001**
НВФ	**ПСР левая рука**	**8,256×10-5**	**1,215×10-5**	**41**	**6,797**	**0,530**	**< 0,001**
ПСР правая рука	ПСР левая рука	8,885×10-6	5,978×10-6	41	1,486	0,057	0,145

Таблица В.24 — Апостериорный анализ (Возрастная группа) для RM Anova построенной для выявления межполушарной Латерализация при сгибании правой и левой руки в диапазоне 13-30Гц

Апостериорный анализ - Возрастная группа							
		Mean Difference	**SE**	**df**	**t**	**Cohen's d**	**p(Холм)**
3-4 летние	5-6 летние	8,664×10-5	3,886×10-5	41	2,230	0,556	0,063
3-4 летние	**7-8 летние**	**1,229×10-4**	**4,254×10-5**	**41**	**2,888**	**0,788**	**0,018**
5-6 летние	7-8 летние	3,622×10-5	3,285×10-5	41	1,103	0,232	0,277

Связь модуляции сенсомоторных ритмов и речевого развития

Таблица В.25 — Корреляционный анализ Спирмена между показателями методики для оценки речевого развития PLS-5 (Слуховое восприятие, Экспрессивная коммуникация и Общее речевое развитие) и индексом модуляции экспериментального условия пассивное сгибание кисти руки в диапазоне 8-13Гц

PLS-5 speech measures	**ПСР Modulation Index Channel**	**Spearman`s rho**	**p(FDR)**
Слуховое восприятие	F3	-0,10151458	0,692474956
Слуховое восприятие	FC5	0,100780297	0,692474956
Слуховое восприятие	FC1	-0,317944398	0,375561882
Слуховое восприятие	C3	-0,198072751	0,58694588
Слуховое восприятие	CP5	-0,1070217	0,692474956
Слуховое восприятие	CP1	-0,050481934	0,829896272
Слуховое восприятие	CP6	-0,078751817	0,751880433
Слуховое восприятие	CP2	-0,212941976	0,544378661
Слуховое восприятие	C4	-0,097292454	0,692474956
Слуховое восприятие	FC6	-0,244883272	0,48946327
Слуховое восприятие	FC2	-0,037081275	0,864327021
Слуховое восприятие	F4	-0,227444058	0,505442594
Экспрессивная коммуникация	F3	-0,357897008	0,375561882
Экспрессивная коммуникация	FC5	-0,066256831	0,783960652
Экспрессивная коммуникация	FC1	-0,448013639	0,182308989
Экспрессивная коммуникация	C3	-0,190144256	0,594478821

Продолжение Таблицы В.25

PLS-5 speech measures	**ПСР Modulation Index Channel**	**Spearman`s rho**	**p(FDR)**
Экспрессивная коммуникация	CP5	-0,362485431	0,375561882
Экспрессивная коммуникация	CP1	-0,116362412	0,692474956
Экспрессивная коммуникация	CP6	-0,157291147	0,606976065
Экспрессивная коммуникация	CP2	-0,182619242	0,600858108
Экспрессивная коммуникация	C4	-0,278976129	0,439384127
Экспрессивная коммуникация	FC6	-0,152519186	0,606976065
Экспрессивная коммуникация	FC2	-0,156556999	0,606976065
Экспрессивная коммуникация	F4	-0,343030517	0,375561882
Общее речевое развитие	F3	-0,302852529	0,375561882
Общее речевое развитие	FC5	0,011189585	0,951533406
Общее речевое развитие	FC1	-0,46629384	0,182308989
Общее речевое развитие	C3	-0,250573322	0,48946327
Общее речевое развитие	CP5	-0,301201607	0,375561882
Общее речевое развитие	CP1	-0,100889698	0,692474956
Общее речевое развитие	CP6	-0,163074439	0,606976065
Общее речевое развитие	CP2	-0,228194153	0,505442594
Общее речевое развитие	C4	-0,249656143	0,48946327
Общее речевое развитие	FC6	-0,154086084	0,606976065
Общее речевое развитие	FC2	-0,142162756	0,630228563

Продолжение Таблицы В.25

PLS-5 speech measures	**ПСР Modulation Index Channel**	**Spearman`s rho**	**p(FDR)**
Общее речевое развитие	F4	-0,308722475	0,375561882

Таблица В.26 — Корреляционный анализ Спирмена между показателями методики для оценки речевого развития PLS-5 (Слуховое восприятие, Экспрессивная коммуникация и Общее речевое развитие) и индексом модуляции экспериментального условия пассивное сгибание кисти руки в диапазоне 13-30Гц

PLS-5 speech measures	**ПСР Modulation Index Channel**	**Spearman`s rho**	**p(FDR)**
Слуховое восприятие	F3	-0,341625014	0,078026796
Слуховое восприятие	FC5	-0,283249542	0,137017868
Слуховое восприятие	**FC1**	**-0,466085928**	**0,021522999**
Слуховое восприятие	**C3**	**-0,482423717**	**0,020677854**
Слуховое восприятие	CP5	-0,176778554	0,333106539
Слуховое восприятие	CP1	-0,337953601	0,078026796
Слуховое восприятие	CP6	-0,276457427	0,137017868
Слуховое восприятие	**CP2**	**-0,487380125**	**0,020677854**
Слуховое восприятие	C4	-0,348233558	0,078026796
Слуховое восприятие	**FC6**	**-0,417990412**	**0,041484894**
Слуховое восприятие	FC2	-0,393759084	0,051525901
Слуховое восприятие	**F4**	**-0,619734577**	**0,001862251**
Экспрессивная коммуникация	F3	-0,441773384	0,136342986
Экспрессивная коммуникация	FC5	-0,120400224	0,621252994
Экспрессивная коммуникация	FC1	-0,325227435	0,164250117

Продолжение Таблицы В.26

PLS-5 speech measures	**ПСР Modulation Index Channel**	**Spearman`s rho**	**p(FDR)**
Экспрессивная коммуникация	C3	-0,137285621	0,621252994
Экспрессивная коммуникация	CP5	-0,104432512	0,621252994
Экспрессивная коммуникация	CP1	0,009176846	0,960243784
Экспрессивная коммуникация	CP6	0,124438037	0,621252994
Экспрессивная коммуникация	CP2	-0,114343506	0,621252994
Экспрессивная коммуникация	C4	-0,345600034	0,164250117
Экспрессивная коммуникация	FC6	-0,312012776	0,164250117
Экспрессивная коммуникация	FC2	-0,323575603	0,164250117
Экспрессивная коммуникация	F4	-0,351656752	0,164250117
Общее речевое развитие	**F3**	**-0,479134346**	**0,033174474**
Общее речевое развитие	FC5	-0,191873862	0,390379165
Общее речевое развитие	FC1	-0,423002987	0,063439585
Общее речевое развитие	C3	-0,304320016	0,154924528
Общее речевое развитие	CP5	-0,140695269	0,482674609
Общее речевое развитие	CP1	-0,141062141	0,482674609
Общее речевое развитие	CP6	-0,034302497	0,852147857
Общее речевое развитие	CP2	-0,253324859	0,242742717
Общее речевое развитие	C4	-0,392369206	0,076931258

Продолжение Таблицы В.26

PLS-5 speech measures	**ПСР Modulation Index Channel**	**Spearman`s rho**	**p(FDR)**
Общее речевое развитие	FC6	-0,374025625	0,076931258
Общее речевое развитие	FC2	-0,367605372	0,076931258
Общее речевое развитие	**F4**	**-0,513069972**	**0,032093166**