

УДК 612.825; 616:613.6

DOI 10.37279/2413-1725-2020-6-3-146-162

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВОСПРИЯТИЯ РЕЧИ И ИХ ОСОБЕННОСТИ У ДЕТЕЙ В НОРМЕ И ПРИ НАРУШЕНИЯХ РАЗВИТИЯ

***Начарова М. А., Михайлова А. А., Говорун Я. Ю., Португальская А. А.,
Павленко В. Б.***

*Таврическая академия (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: alikina93@gmail.com*

Нейрональная синхронизация, отражающаяся в паттерне реакций ЭЭГ, представляет собой механизм, с помощью которого мозг объединяет различные типы информации, содержащиеся в речевом сообщении и представленные в разных областях мозга (например, фонологическую, орфографическую, семантическую и синтаксическую информацию). В настоящее время становится очевидным, что путем анализа изменений мощности ритмов ЭЭГ в сочетании с предъявлением широкого набора задач на понимание речевых высказываний можно выявить механизмы функционирования языковой сети мозга. Чем выше реактивность ритмов ЭЭГ во время восприятия речи, тем лучше развиты у детей речевые навыки. В условиях относительного покоя для ЭЭГ детей с высоким уровнем развития речи характерен умеренный уровень мощности тета- и бета-ритмов и высокий – альфа- и мю-ритмов ЭЭГ. Выявленные закономерности позволяют наметить способы коррекции речевого развития детей с помощью методики биологической обратной связи по ЭЭГ.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, речь, ритмы ЭЭГ, «зеркальные» нейроны, возрастные особенности восприятия речи.

ВВЕДЕНИЕ

Один из основателей отечественной психолингвистики Л. С. Выготский утверждал, что мышление ребенка развивается в зависимости от овладения социальными средствами мышления, т. е. в зависимости от речи [1]. В настоящее время признается, что развитие речевой сферы является важнейшим фактором, определяющим когнитивное и социальное развитие ребенка. Оценка речевого развития – наиболее диагностически значимый инструмент для определения неврологического статуса и психического развития ребенка. Исходя из тесной связи между развитием речи и мышления, размер активного словаря ребенка, т.е. количество слов, которое он понимает и произносит, расценивают как не прямой показатель уровня его вербального интеллекта [2]. Нарушение процессов восприятия, понимания и продуцирования речи у детей приводит к задержкам психического развития ребенка. Понимание нейрофизиологических механизмов организации речевой деятельности в целом и их особенностей у детей является

необходимым условием разработки и применения адекватных методов диагностики и коррекции нарушений речевого развития.

Для оценки функционального состояния головного мозга широкое распространение получило использование электроэнцефалографии. С использованием данного метода рядом авторов проведено значительное количество исследований процессов речевого восприятия, однако их результаты зачастую противоречивы, а объективное сопоставление зачастую представляет значительные трудности. В связи с этим, целью данной работы явился краткий обзор публикаций, посвященных анализу динамики биологической активности головного мозга при восприятии речи и ее особенностям у детей. Поиск по ключевым словам был проведен с использованием баз научной литературы Pubmed.com, ScienceDirect.com, eLIBRARY.ru.

1. МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ВОСПРИЯТИЯ РЕЧИ У ДЕТЕЙ

Широко применяемым методом анализа нейрофизиологических механизмов становления речи являются регистрация и интерпретация динамики ритмов осцилляторной активности мозга, регистрируемой в виде электро- и магнитоэнцефалограмм (ЭЭГ и МЭГ) [3–6], а также компонентов, связанных с событием вызванных ЭЭГ-потенциалов [7–9].

Изучение особенностей вызванных потенциалов в ответ на предъявление звуковых тонов или сочетаний слогов у детей весьма информативно, т.к. обеспечивает раннюю диагностику речевого развития и позволяет предсказать успешность будущего освоения речи ребенком [10, 11]. Однако для регистрации таких потенциалов путем усреднения отрезков ЭЭГ требуется многократное предъявление одних и тех же, по возможности, кратких стимулов. В связи с этим, при изучении восприятия и степени понимания целостных сообщений, состоящих из одного или нескольких предложений, более информативным является анализ текущей ЭЭГ или МЭГ. Восприятие таких сигналов отражается в изменении амплитуд ритмов ЭЭГ и МЭГ у взрослых [12–16], а также ритмов ЭЭГ у детей [4–6, 17].

Одним из приемов для изучения нейрофизиологических особенностей восприятия речи на основе анализа паттерна ЭЭГ является методика, описанная в исследовании С. Krause с соавторами [12]. Взрослым испытуемым предъявляли два вида стимулов, один из которых представлял собой нативную (естественную) запись речи, а другой – такую же запись, но воспроизведенную в реверсном режиме (задом наперед). Таким образом, второй стимул представлял собой речеподобный сигнал, лишенный семантического содержания. Прослушивание нативной речи, в отличие от реверсированной, вызывало значимую супрессию мощности альфа-ритма (8–12 Гц) испытуемых. Авторы указанного исследования расценили такую реакцию как отражение когнитивных усилий необходимых для понимания и запоминания текста. Таким образом, применение приема, включающего сравнение изменений ЭЭГ в ответ на нативную и реверсированную речь, позволяет оценить особенности

активации ЦНС испытуемых в ответ на осмысленные сообщения, доступные для их понимания.

Новым интересным методом, позволяющим оценить степень вовлеченности когнитивных ресурсов в переработку речевой информации, является также измерение размера зрачка с помощью ай-трекера. Чем больше требуется когнитивных ресурсов для понимания предложения, тем шире зрачок, что указывает на дополнительную активацию норадренергической системы мозга [18].

2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОЗГОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ВОСПРИЯТИЯ РЕЧИ

Предложения несут как синтаксическую (роль слов в предложении и их порядок), так и семантическую (смысловую) составляющую. Для восприятия и осознания смысла предложения необходима одновременная обработка речевого сигнала, как на уровне фонем, так и на уровне отдельных слов, а также уточнение значения этих слов в их взаимодействии и в соответствии с занимаемым местом в предложении [19]. За данные процессы отвечает языковая нейронная сеть – обширные регионы коры, включая ассоциативные, моторные и сенсомоторные области обоих полушарий, в том числе область Вернике и центр Брока [20]. Показано, что языковые задачи высокого уровня, такие как понимание смысла предложений, активируют доминантное (левое) полушарие, тогда как более низкоуровневые языковые задачи (например, орфографический анализ и анализ звучания слов), а также связанные с обработкой речи процессы внимания и памяти задействуют двусторонние лобно-теменные области [13]. В настоящее время принято считать [21], что ключевую роль в процессах понимания речи играют нейронные схемы или контуры (action perception circuit – «контуры восприятия-действия»), окружающие сильвиеву борозду левого полушария. Состоят контуры из нервных клеток, способных обеспечивать как восприятие речевых сигналов, так и их генерацию. Такие контуры перисильвиевой коры в процессе речевой деятельности обмениваются сигналами, распространяющимися как во фронтальном, так и в темпоральном направлении через двусторонние связи разной длины, входящие в аркуатный пучок. Важнейшей подгруппой нейронов, входящих в «контуры восприятия-действия», являются зеркальные нейроны. М. Arbib выдвинул гипотезу о том, что появление системы зеркальных нейронов в процессе эволюции могло быть ключевым механизмом, обеспечивающим появление речи у человека [22].

Для понимания предложения запускается две группы взаимосвязанных когнитивных операций: поиск в памяти фонологических, синтаксических и семантических свойств слов (1); интеграция информации об отдельных словах в общее представление многословного высказывания (2) [23, 24]. Обработка фонологических и лингвистических (семантических и синтаксических) компонентов сигнала при восприятии предложений отражаются в изменении различных ритмов ЭЭГ. При чтении визуально предъявленных текстов стадия поиска слов у взрослых испытуемых сопровождается усилением мощности тета-ритма, особенно в левой

височной области. Одновременно наблюдается снижение амплитуды альфа-ритма в лобно-теменных и височных областях, отражающее активацию внимания и семантические операции [25, 13]. Стадия интеграции визуально предъявленных слов в предложение сопровождается ростом и тета-, и бета-ритмов. Однако если предъявленные предложения содержат грамматические и логические ошибки, растет мощность только тета-ритма, а бета-ритма – снижается [26].

При слуховом восприятии вербальных стимулов у взрослых испытуемых регистрируется увеличение мощности тета-ритма [25–29]. Изменения мощности данного ритма M. Bastiaansen и соавторы связывают с двумя группами когнитивных операций при восприятии речи: поиске в ресурсах памяти фонологических, синтаксических и семантических свойств воспринимаемых слов, а также интеграции слов в целостное сообщение.

Слуховое восприятие речи сопровождается десинхронизацией альфа-ритма в височных и лобно-центральных отделах неокортекса [16]. Отдельные авторы связывают выраженную супрессию альфа-ритма в височных областях левого полушария с точностью распознавания цифр в шуме и степенью понимания речевого сообщения [30].

В некоторых работах отмечается синхронизация сенсомоторного альфа-ритма (мю-ритма) до и во время начала предъявления вербального стимула и его последующая, более выраженная, десинхронизация. Предполагается, что ранняя синхронизация мю-ритма может отражать тормозящий вход в премоторную кору от сенсорных областей до и во время начала восприятия речи, в то время как последующая десинхронизация мю-ритма может индексировать сенсорную обратную связь во время восприятия речи и ее внутреннего воспроизводства [31]. Как известно, подавление мю-ритма происходит во время выполнения собственных движений или их представления, а также при наблюдении за движениями окружающих. Тот факт, что мю-ритм также реагирует в процессе слухового восприятия и при выполнении когнитивных задач, включающих вербальные задания, авторы исследования расценивают как отражение тесных внутренних взаимосвязей между восприятием речи и ее внутренней генерацией в процессе переработки речевого сообщения.

В большинстве работ описывается прирост мощности бета-ритма при восприятии речевых сигналов выявлен во фронтальных, теменных и некоторых других отделах [27, 32]. Бета-активность рассматривают как отсроченный индекс корковой активации [33]. В росте мощности данного ритма, как предполагает группа авторов [26, 27], отражается выполнение второй, завершающей группы когнитивных операций, обеспечивающих понимание предложений, – семантическая и синтаксическая интеграция отдельных слов в общий образ многословного высказывания. Увеличенный по мощности бета-ритм связывают с поддержанием активного состояния нейронных цепей, участвующих в этих процессах [34].

В противоположность этому, в центральных регионах коры регистрируется десинхронизация мю-бета-ритма как при распознавании, так и при воспроизведении речи [31, 35], имеющая преимущественно левостороннюю локализацию.

Предполагается, что десинхронизация сенсомоторного бета-ритма во время распознавания речи может объясняться процессами внутреннего моделирования речевого высказывания [31]. Внутренние модели создаются в двигательных областях и передаются в слуховые области высокого порядка для облегчения процессов распознавания речи [36].

Что касается наиболее высокочастотного диапазона ЭЭГ, то обнаружено увеличение мощности гамма-ритма (частотная полоса от 40 Гц и выше) в ответ на семантически правильное ключевое слово в предложении, относительно его семантически аномального аналога [37]. В результате сформировано представление о том, что нейронная синхронизация гамма-диапазона участвует в операциях семантического объединения на уровне предложения. Кроме этого, было показано, что восприятие существительных вызывает большую синхронизацию гамма-ритма в зрительных зонах, тогда как распознавание глаголов – в моторных областях [38].

Стоит отметить, что, несмотря на пристальное внимание многих исследований к изучению мозговых механизмов восприятия и понимания речи, до сих пор не существует однозначного представления об организации и функционировании данной системы. При этом становится очевидным, что можно зафиксировать динамику работы языковой сети мозга путем тщательного анализа изменений мощности ритмов ЭЭГ в сочетании с тонкими экспериментальными манипуляциями с широким набором задач по пониманию речевых высказываний. Нейрональная синхронизация, отражающаяся в паттерне реакций ЭЭГ, представляет собой механизм, с помощью которого мозг объединяет различные типы языковой информации (например, фонологическую, орфографическую, семантическую и синтаксическую информацию), представленные в разных областях мозга.

3. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЭЭГ ПРИ ВОСПРИЯТИИ РЕЧИ У ДЕТЕЙ

Процесс понимания смысла целостного речевого сообщения является ключевым элементом речевой деятельности ребенка [39]. При этом способность к пониманию предложений проходит в онтогенезе ряд ключевых этапов. Установлено [11], что для обучения восприятию фонем родного языка критическим периодом является первый год жизни ребенка, тогда как обучение восприятию предложения (освоение синтаксиса) происходит в возрастном периоде от 18 до 36 месяцев. В этом периоде также происходит особенно бурное развитие словарного запаса. Благодаря этому в возрасте двух-трех лет дети уже адекватно воспринимают целостный смысл простых высказываний. В дальнейшем словарный запас расширяется, а возможности понимания речи у детей дошкольного и школьного возраста приближаются к таковым у взрослых. Однако паттерны реакций у детей отличаются от таковых у взрослых.

Так J. Schneider с соавторами [5, 6] проведено исследование, в котором одни и те же речевые сообщения предъявлялись взрослым и детям 10–12 лет. У детей, в отличие от взрослых, при слуховом восприятии правильных предложений и предложений с грамматическими ошибками было более выражено увеличение амплитуды тета-ритма ЭЭГ. Данная группа исследователей полагает, что рост

мощности тета-ритма отражает семантическую интеграцию, которая требует от детей больших ресурсов, чем у взрослых.

Усиление мощности тета-ритма при слуховом восприятии речи обнаружено в нашей лаборатории [40] у детей раннего возраста (2–3,5 года), а также в других лабораториях при исследованиях с участием малышей в возрасте до года и дошкольников четырех-семи лет [22], детей 13 лет [41]. Такое усиление связывают с вовлечением процессов памяти, а также с эмоциональной активацией. Кроме того, L. Meyer и коллеги [42] высказали предположение о том, что изменения мощности тета-ритма у детей отражают модуляции нисходящего контроля, необходимые для выполнения вербальных задач. Длительное когнитивное взаимодействие во время выполнения задания постепенно увеличивает тета-мощность у детей, и различные требования к задаче дополнительно модулируют тета-мощность. Более конкретные, связанные с языком требования отражаются в тета-модуляциях над левосторонними лобно-височными областями мозга. Таким образом, колебания тета-диапазона ЭЭГ отражают активность нейронных механизмов, которые лежат в основе, как понимания языка, так и общих когнитивных способностей.

Восприятие речевых сообщений у взрослых испытуемых, как правило, сопровождается снижением амплитуды альфа-ритма, отражающим активацию внимания и семантические операции [25, 13]. В то же время, рядом исследователей у детей двух-трех [40] и 10–12 лет [6] в центральных, теменных и затылочных регионах в процессе восприятия речевых сигналов был обнаружен рост мощности мю- и альфа-ритма. Поскольку в работе J. M. Schneider и соавторов [6] мощность альфа-ритма была тем выше, чем сложнее для восприятия было предложение или словосочетание, данный феномен связывают с активацией процессов рабочей памяти. L. Meyer с коллегами [43] считают, что усиление альфа-ритма отражает тормозные процессы, необходимые для предотвращения разного рода преждевременных реакций, мешающих интеграции вербальной информации. Последнее предположение согласуется с представлением о том, что рост мощности альфа-ритма связан с процессом активного торможения нейронных цепей, не участвующих в текущей когнитивной задаче [44].

Поскольку в исследованиях, которые проводились в нашей лаборатории [40], речевой сигнал (стихотворение, в котором персонажами являлись животные) предъявлялся через акустическую колонку, росту мощности мю-ритма была также дана следующая интерпретация. Условия, при которых речевой сигнал шел из колонки, – непривычны для детей раннего возраста. Наблюдалось резкое снижение двигательной активности и концентрации зрительного внимания на неподвижном источнике звука. Именно для таких состояний ребенка характерен рост мощности мю-ритма [44–46].

Интересные результаты были получены при анализе изменений ЭЭГ в диапазоне альфа-ритма у малышей 18 и 24 месяцев при предъявлении предложений, обозначающих действия [4]. Восприятие таких предложений сопровождается падением мощности центрального мю- (6–10 Гц) и затылочного альфа-ритма в том же частотном диапазоне. При предъявлении предложений с псевдословами изменения мю-ритма отсутствовали, в то время как затылочного альфа-ритма –

сохранялись. Авторы работы связывают десинхронизацию мю-ритма с активацией сенсо-моторной системы при восприятии предложений, обозначающих действия, а альфа-ритма – с процессами внимания.

Что касается высокочастотного диапазона ЭЭГ, то J. Schneider с соавторами [5, 6] выявлено, что у детей 10–12 лет, в отличие от взрослых, при слуховом восприятии предложений изменения бета-ритма были менее выражены. Изменения бета-ритма связаны с синтаксической интеграцией, которая у детей развита относительно слабо.

4. ВОСПРИЯТИЕ РЕЧИ У ДЕТЕЙ С НАРУШЕНИЯМИ РАЗВИТИЯ. РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА РЕЧЕВЫХ НАРУШЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ КОРРЕКЦИИ

Как отмечено выше, изучение особенностей вызванных потенциалов в ответ на предъявление звуковых тонов или сочетаний слогов позволяет предсказать успешность будущего освоения речи ребенком [10, 11]. Применение указанной методики, несмотря на ее ограничения, может иметь важное диагностическое значение, а также позволяет оценить нейрофизиологические механизмы нарушений в развитии речи у детей. Так, было показано, что у 20-ти месячных детей из семей с риском нарушения развития речи компонент N400 связанного с событием вызванного потенциала, возникающего в ответ на предъявленные слова, имеет больший латентный период, чем у детей из семей с нормально развитой речью [48]. В другом исследовании [49] выявлено, что значимое увеличение латентного периода компонента P3 вызванных потенциалов, зарегистрированных в ответ на девиантный тон в oddball парадигме, являлось у годовалых детей индикатором высокой вероятности последующего развития расстройств аутистического спектра, диагностированных у этих детей в возрасте 20-ти месяцев. Были выявлены корреляции между латентным периодом P3 и степенью отставания в развитии речи. Таким образом, анализ временных параметров компонентов связанных с событием ЭЭГ-потенциалов указывает на замедление процесса переработки вербальной информации или ее компонентов у детей с нарушением речевого развития.

Анализ текущей ЭЭГ показал, что степень речевого развития и его нарушения отражаются как в особенностях фоновой активности, так и в динамике ЭЭГ при восприятии целостных речевых сообщений.

Исследование спектров мощности фоновой ЭЭГ у детей 16, 24 и 36 месяцев показало, что индивидуальные различия в мощности гамма-ритма 31–50 Гц во фронтальных отведениях коррелировали с речевыми и когнитивными навыками [50]. Дети с семейным анамнезом языковых нарушений и, следовательно, с более высоким риском языковых расстройств демонстрировали более низкую мощность гамма-ритма, чем дети контрольной группы без такого семейного анамнеза. Авторы исследования предполагают, что высокочастотная нейронная синхронизация может иметь решающее значение для когнитивного и лингвистического развития.

В другом исследовании [51] пониженные показатели произвольного владения речью были выявлены у группы детей 7–8 лет, отличающихся в ситуации спокойного бодрствования с закрытыми глазами большей мощностью тета-ритма во

фронтальных и центральных отведениях. По мнению автора исследования, указанные особенности ЭЭГ свидетельствуют о незрелости фронто-таламической системы, что отражается в дефиците фонематического слуха, определяющего развитие звукового анализа и разделяющего звукокомплексы (сочетания звуков, слогов и слов) на составные элементы (фонемы). Незрелость данной системы приводит также к нарушениям понимания логико-грамматических отношений, внешнего содержания высказывания и его подтекста, нарушению лексического строя речи и к трудностям словоупотребления.

Использование метода независимых компонент при анализе фоновой ЭЭГ показало, что у детей 4–9 лет с расстройствами аутистического спектра, имеющих нарушения коммуникативной функции мощность тета- и бета-ритмов, выше, чем у здоровых детей [52]. Такие особенности фоновой ЭЭГ были более выражены у детей с тяжелыми формами нарушений речи и расценивались как отражение дисбаланса возбуждения и торможения в неокортексе.

В исследовании экспрессивной стороны речевой деятельности детей 4–11 лет выявлены положительные корреляции между выраженностью альфа-ритма ЭЭГ, с одной стороны, и качеством артикуляции гласных и употреблением детьми сложных предложений, с другой [53]. Очевидно, что употребление таких предложений свидетельствует и о лучшем понимании речевых сообщений. Показано, также, что у детей с асимметричной локализацией альфа-ритма (зарегистрированного во время относительного покоя) отмечается более четкое произношение слов, что определяет разборчивость их речи. Дети, с преобладанием тета-ритма в структуре фоновой ЭЭГ, отличались более высоким основным тоном речи, что свидетельствовало о замедленном созревании ее артикуляции. Авторы данной работы приходят к заключению, что пониженная мощность альфа-ритма и повышенная – тета-активности указывают на незрелость мозговых структур, результатом чего является отставание в развитии речи.

Было обнаружено, что у детей с дислексией менее выражена десинхронизация нижнего диапазона бета-ритма во время чтения в областях, связанных с областью Брока (в локусе FC5) и угловой извилиной (в локусах CP5, P3) [54], регистрируется повышенный индекс медленной активности ЭЭГ в диапазонах дельта- и тета-ритмов в лобной и правой височных областях мозга, повышенная мощность бета1-ритма в локусе F7 и повышенная когерентность ЭЭГ во фронтальной, центральной и височной областях [55]. Предполагается, что при чтении у людей с дислексией происходит меньшая активация верхней височной и угловой извилины левого полушария, что отражается в сниженном индексе бета-ритма в отведениях T3 и T5 [56, 57].

В исследовании, проведенном в нашей лаборатории, анализировали особенности динамики ЭЭГ при восприятии речи у детей-сирот, воспитывающихся в детском доме [58]. Результаты теста Бэйли показали, что для детей-сирот характерна существенная задержка речевого развития по сравнению с таковой в группе детей из обычных семей. Это еще раз подтвердило, что адекватное развитие речи ребенка формируется при его взаимодействии с родителями или другими значимыми взрослыми. Сравнение ЭЭГ в процессе прослушивания естественной и

реверсированной речи выявило меньшую реактивность гамма-ритма у детей-сирот, чем у детей из биологических семей. Выдвинуто предположение, что меньший уровень увеличения мощности колебаний данного диапазона связан с нарушением процесса осознания речевого сообщения детьми-сиротами, что может являться следствием недостаточного развития нейронных сетей мозга, отвечающих за переработку вербальной информации.

С целью определения роли «системы зеркальных нейронов» в процессах освоения речи, в другом исследовании нашей лаборатории анализировали особенности реактивности мю-ритма ЭЭГ у детей в возрасте 17–41 месяцев с разным уровнем развития понимания речи [59]. У детей с высоким уровнем по шкале «рецептивная речь» теста Бейли отмечена большая десинхронизация мощности ЭЭГ в диапазоне мю-ритма в условиях наблюдения за реальным действием в лобном и теменном локусах левого полушария по сравнению с детьми со средним уровнем по данной шкале. Поскольку изменения мощности мю-ритма в такой ситуации отражают активность системы зеркальных нейронов [60], результаты исследования указывают, что дети раннего возраста, которые демонстрируют более высокий уровень активации зеркальных нейронов в указанных корковых регионах, обладают более высоким уровнем понимания речи.

Одним из перспективных психофизиологических способов коррекции функционального состояния является метод биологической связи (БОС). Известно лишь несколько исследований, использующих тренировки с БОС для коррекции нарушений восприятия речи. Так, проводились БОС-тренинги по параметрам ЭЭГ, направленные на улучшение навыков чтения и правописания у детей с дислексией [57]. Протоколы тренировок основывались на анализе фоновой ЭЭГ и были направлены на нормализацию таких параметров ЭЭГ как (1) повышенная мощность дельта-ритма в отведении Т6; (2) повышенная когерентность в альфа- или бета-диапазоне в F7 – FC3 или F7 – C3 (3) повышенная когерентность ритмов ЭЭГ в отведениях Т3 – Т4. Было показано статистически значимое улучшение правописания, однако значимых изменений в чтении выявлено не было.

Sreedharan и коллеги проводили тренировки с биологической обратной связью по параметрам фМРТ на основе данных об активации зон вокруг области Брока и области Вернике левого полушария у взрослых испытуемых с постинсультной афазией [61]. Предварительно было показано, что функциональные связи между данными речевыми зонами в группе испытуемых с афазией слабее, чем у здоровых людей, а после тренировки произошло их укрепление.

В нашей лаборатории были проведены БОС-тренингов по параметрам мю- и тета-ритмов ЭЭГ, направленные на оптимизацию психофизиологического состояния детей с задержкой психоречевого развития [62]. После тренировок было выявлено значимое улучшение показателей невербального и общего интеллекта, снижение оценок по шкале «Трудности общения». Улучшения показателей вербального интеллекта не достигали уровня статистической значимости, что может свидетельствовать о большем влиянии БОС-тренингов на опосредованно связанные с речевым развитием показатели внимания и навыков самоконтроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом анализа ряда работ, использующих регистрацию ЭЭГ в контексте различного рода исследований речевой коммуникации и рассмотренных в данном кратком обзоре, становится понимание того, что нейрональная синхронизация, отражающаяся в паттерне реакций ЭЭГ, представляет собой механизм, с помощью которого мозг объединяет различные типы информации, содержащиеся в речевом сообщении. Путем анализа изменений мощности ритмов ЭЭГ в сочетании с предъявлением широкого набора вербальных задач можно выявить механизмы функционирования языковой сети мозга.

В настоящее время установлено, что понимания предложения запускается две группы взаимосвязанных когнитивных операций: сначала поиск в памяти фонологических, синтаксических и семантических свойств слов, а затем интеграция информации в общее представление о смысле высказывания. Стадия поиска слов у взрослых и детей сопровождается усилением мощности тета-ритма. Стадия интеграции слов в предложение сопровождается ростом тета-, бета-, и гамма-ритмов. При этом для детей рост тета-ритма более характерен, чем для взрослых. Чем выше реактивность указанных ритмов, тем лучше развиты у детей речевые навыки. Однако в условиях относительного покоя для ЭЭГ детей с высоким уровнем развития речи характерен умеренный уровень мощности тета- и бета-ритмов и высокий – альфа- и мю-ритмов ЭЭГ.

Выявленные закономерности позволяют наметить способы коррекции речевого развития детей с помощью методики биологической обратной связи по ЭЭГ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-015-00074 а.

Список литературы

1. Выготский Л. С. Мышление и речь. / Выготский Л. С. – М., Л.: Государственное социально-экономическое изд-во. – 1934. – 324 с.
2. Cristia A. Predicting individual variation in language from infant speech perception measures / A. Cristia, A. Seidl, C. Junge, M. Soderstrom, P. Hagoort // Child Dev. – 2014. – Vol. 85. – P. 1330–1345.
3. Bell M. A. Using EEG to study cognitive development: Issues and practices / M. A. Bell, K. Cuevas // J. Cogn. Dev. – 2012. – Vol. 13(3). – P. 281–294.
4. Antognini K. Toddlers show sensorimotor activity during auditory verb processing / K. Antognini, M. Daum // Neuropsychologia. – 2019. – Vol. 126. – P. 82–91.
5. Schneider J. M. Developmental differences in beta and theta power during sentence processing / J. M. Schneider, A. D. Abel, D. A. Ogiela, A. E. Middleton, M. J. Maguire // Dev. Cogn. Neurosci. – 2016. – Vol. 19. – P. 19–30.
6. Schneider J. M. Developmental differences in the neural oscillations underlying auditory sentence processing in children and adults / J. M. Schneider, A. D. Abel, D. A. Ogiela, C. McCord, M. J. Maguire // Brain Lang. – 2018. – Vol. 186. – P. 17–25.
7. Kuhl P. K. Infants' brain responses to speech suggest Analysis by Synthesis / P. K. Kuhl, R. R. Ramírez, A. Bosseler, J.-F. L. Lin, T. Imada // PNAS. – 2014. – Vol. 111(31) – P. 11238–11245.
8. Strotseva-Feinschmidt A. Auditory discrimination between function words in children and adults: A mismatch negativity study / A. Strotseva-Feinschmidt, K. Cunitz, A. D. Friederici, T. C. Gunter // Front. psychol. – 2015. – Vol. 6. – P. 1930.

9. Harwood V. Electrophysiology of perception and processing of phonological information as indices of toddlers' language performance / V. Harwood, J. Preston, B. Grela, D. Roy, O. Harold, J. Turcios, K. Andrada, N. Landi // *J. Speech. Lang. Hear. Res.* – 2017. – Vol. – 60(4). – P. 999–1011.
10. Kuhl P. K. Phonetic learning as a pathway to language: new data and native language magnet theory expanded (NLM-e) / P. K. Kuhl, B. T. Conboy, S. Coffey-Corina, D. Padden, M. Rivera-Gaxiola, T. Nelson // *Philos. Trans. Royal Soc. B.* – 2008. – Vol. 363(1493). – P. 979–1000.
11. Kuhl P. K. Brain mechanisms in early language acquisition / Kuhl P. K. // *Neuron.* – 2010. – Vol. 67(5). – P. 713–727.
12. Krause C. Relative alpha desynchronization and synchronization during speech perception / C. Krause, B. Porn, H. Lang // *Brain Res.* – 1997. – Vol. 5(3). – P. 295–299.
13. Lam N. H. Neural activity during sentence processing as reflected in theta, alpha, beta, and gamma oscillations / N. H. Lam, J. Schoffelen, J. Uddén, A. Hultén, P. Hagoort // *NeuroImage.* – 2016. – Vol. 142. – P. 43–54.
14. Ding N. Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech / N. Ding, L. Melloni, H. Zhang, X. Tian, D. Poeppel // *Nature Neuroscience.* – 2016. – Vol. 19(1) – P. 158–164.
15. Mai G. Delta, theta, beta, and gamma brain oscillations index levels of auditory sentence processing / G. Mai, J. W. Minett, W. S. Wang // *NeuroImage.* – 2016. – Vol. 133. – P. 516–528.
16. Saltuklaroglu T. EEG mu rhythms: rich sources of sensorimotor information in speech processing / T. Saltuklaroglu, A. Bowers, A. W. Harkrider, D. Casenhiser, K. J. Reilly, D. E. Jenson, D. Thornton // *Brain Lang.* – 2018. – Vol. 187. – P. 41–61.
17. Orekhova E. V. EEG theta rhythm in infants and preschool children / E. V. Orekhova, T. A. Stroganova, I. N. Posikera, M. Elam // *Clin. Neurophysiol.* – 2006. – Vol. 117(5). – P. 1047–1062.
18. Lum J. Using Pupillometry to Investigate Sentence Comprehension in Children With and Without Specific Language Impairment / J. Lum, G. Youssef, G. Clark // *Journal of speech, language, and hearing research: JSLHR.* – 2017. – Vol. 60(6). – P. 1648–1660.
19. Friederici A. D. Towards a neural basis of auditory sentence processing / Friederici A. D. // *Trends Cogn. Sci.* – 2002. – Vol. 6. – P. 78–84.
20. Hickok G. The cortical organization of speech processing / G. Hickok, D. Poeppel // *Nat. Rev. Neurosci.* – 2007. – Vol. 8(5). – P. 393–402.
21. Pulvermüller F. Neural reuse of action perception circuits for language, concepts and communication. / Pulvermüller F. // *Prog Neurobiol.* – 2018. – Vol. 160. – P. 1–44.
22. Arbib M. A. From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics / Arbib M. A. // *Behavioral and Brain Sciences.* – 2015. – Vol. 28. – P. 105–124.
23. Hagoort P. On Broca, brain, and binding: a new framework. / Hagoort P. // *Trends Cogn. Sci.* – 2005. – Vol. 9(9). – P. 416–423.
24. Hagoort P. The core and beyond in the language-ready brain. / Hagoort P. // *Neurosci. Biobehav. Rev.* – 2017. – Vol. 81. – P. 194–204.
25. Bastiaansen M. C. Theta responses are involved in lexical semantic retrieval during language processing / M. C. Bastiaansen, M. V. Linden, M. T. Keurs, T. Dijkstra, P. Hagoort // *J. Cogn. Neurosci.* – 2005. – Vol. 17. – P. 530–541.
26. Bastiaansen M. C. Syntactic unification operations are reflected in oscillatory dynamics during on-line sentence comprehension / M. C. Bastiaansen, L. Magyari, P. Hagoort // *J. Cogn. Neurosci.* – 2010. – Vol. 22. – P. 1333–1347.
27. Bastiaansen M. Oscillatory neuronal dynamics during language comprehension / M. Bastiaansen, P. Hagoort // *Prog. Brain. Res.* – 2006. – Vol. 159. – P. 179–196.
28. Hart J. Jr. Semantic memory retrieval circuit: Role of pre-SMA, caudate, and thalamus / J. Jr. Hart, M. J. Maguire, M. Motes, R. A. Mudar, H. S. Chiang, K. B. Womack, M. A. Kraut // *Brain Lang.* – 2013. – Vol. 126(1). – P. 89–98.
29. Приводнова Е. Ю. Топографические особенности тета-активности у молодых и пожилых испытуемых на начальном этапе решения креативной задачи: sLORETA-анализ / Е. Ю. Приводнова, Н. В. Вольф // *Журн. высш. нерв. деят.* – 2018. – Vol. 68(3). – P. 304–312.
30. Dimitrijevic A. Cortical Alpha Oscillations Predict Speech Intelligibility / A. Dimitrijevic, M. L. Smith, D. S. Kadis, D. R. Moore // *Frontiers in human neuroscience.* – 2017. – Vol. 11. – P. 88: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00088>

31. Jenson D. Temporal dynamics of sensorimotor integration in speech perception and production: independent component analysis of EEG data / D. Jenson, A. L. Bowers, A. W. Harkrider, D. Thornton, M. Cuellar, T. Saltuklaroglu // *Frontiers in psychology*. – 2014. – Vol. 5. – 656: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00656>
32. Lewis A. G. A predictive coding perspective on beta oscillations during sentence-level language comprehension / A. G. Lewis, J. M. Schoffelen, H. Schriefers, M. Bastiaansen // *Front. Hum. Neurosci.* – 2016. – Vol. 10. – P. 85.
33. Kropotov Yu. D. Quantitative EEG, event-related potentials and neurotherapy / Kropotov Yu. D. // Academic Press. – 2009. – 542 p.
34. Lewis A. G. Fast oscillatory dynamics during language comprehension: Unification versus maintenance and prediction? / A. G. Lewis, L. Wang, M. Bastiaansen // *Brain Lang.* – 2015. – Vol. 148. – P. 51–63.
35. Thornton D. Sensorimotor activity measured via oscillations of EEG mu rhythms in speech and non-speech discrimination tasks with and without segmentation demands / D. Thornton, A. W. Harkrider, D. Jenson, T. Saltuklaroglu // *Brain Lang.* – 2018. – Vol. 187. – P. 62–73.
36. Bowers A. Suppression of the μ Rhythm during Speech and Non-Speech Discrimination Revealed by Independent Component Analysis: Implications for Sensorimotor Integration in Speech Processing / A. Bowers, T. Saltuklaroglu, A. Harkrider, M. Cuellar // *PLoS ONE*. – 2013. – Vol. 8(8). – e72024: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072024>
37. Bastiaansen M. Frequency-based Segregation of Syntactic and Semantic Unification during Online Sentence Level Language Comprehension / M. Bastiaansen, P. Hagoort // *J Cogn Neurosci*. – 2015. – Vol. 27(11). – P. 2095–2107.
38. Zaidel E. EEG Correlates of Hemispheric Word Recognition / E. Zaidel, A. Hill, S. Weems // *Brain Research in Language. Literacy Studies*. – 2008. – Vol. 1. – P. 225–245.
39. Rossi S. Shedding light on words and sentences: Near-infrared spectroscopy in language research / S. Rossi, S. Telkemeyer, I. Wartenburger, H. Obrig // *Brain Lang.* – 2012. – Vol. 121(2). – P. 152–163.
40. Белалов В. В. Реактивность мю-ритма ЭЭГ при восприятии речи у детей в возрасте от двух до трех с половиной лет: влияние условий воспитания / В. В. Белалов, О. М. Базанова, А. А. Михайлова, Ю. О. Дягилева, В. Б. Павленко // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*. – 2020. – Т. 70, № 2. – С. 193–205.
41. Krause C. M. Brain oscillatory responses during the different stages of an auditory memory search task in children / C. M. Krause, M. Pesonen, H. Hämäläinen // *Neuroreport*. – 2007. – Vol. 18(3). – P. 13–216.
42. Meyer M. Theta oscillations in 4-year-olds are sensitive to task engagement and task demands / M. Meyer, H. M. Endeldijk, F. van Ede et al. // *Sci Rep*. – 2019. – Vol. 9. – 6049: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42615-x>
43. Meyer L. Left parietal alpha enhancement during working memory-intensive sentence processing / L. Meyer, J. Obleser, A. D. Friederici // *Cortex*. – 2013. – Vol. 49(3). – P. 711–721.
44. Bazanova O. M. Interpreting EEG alpha activity / O. M. Bazanova, D. Vernon // *Neurosci. Biobehav. Rev.* – 2014. – Vol. 44 – P. 94–110.
45. Stroganova T. A. EEG alpha rhythm in infants / T. A. Stroganova, E. V. Orekhova, I. N. Posikera // *Clin. Neurophysiol.* – 1999. – Vol. 110(6). – P. 997–1012.
46. Marshall P. J. Development of the EEG from 5 months to 4 years of age / P. J. Marshall, Y. Bar-Haim, N. A. Fox // *Clin. Neurophysiol.* – 2002. – Vol. 113. – P. 1199–1208.
47. Thorpe S. G. Spectral and source structural development of mu and alpha rhythms from infancy through adulthood / S. G. Thorpe, E. N. Cannon, N. A. Fox // *Clin. Neurophysiol.* – 2016. – Vol. 127(1) – P. 254–269.
48. Cantiani C. ERP responses to lexical-semantic processing in typically developing toddlers, in adults, and in toddlers at risk for language and learning impairment / C. Cantiani, V. Riva, C. Piazza et al. // *Neuropsychologia*. – 2017. – Vol. 103. – P. 115–130.
49. Riva V. Distinct ERP profiles for auditory processing in infants at-risk for autism and language impairment / V. Riva, C. Cantiani, G. Mornati et al. // *Sci Rep*. – 2018. – Vol. 8. – 715: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-19009-y>
50. Benasich A. A. Early cognitive and language skills are linked to resting frontal gamma power across the first 3 years / A. A. Benasich, Z. Gou, N. Choudhury, K. D. Harris // *Behav Brain Res*. – 2008. – Vol. 195(2). – P. 215–222.

51. Емельянова Т. В. Влияние дисфункции фронто-таламической системы на развитие речи у детей 7-8 лет / Емельянова Т. В. // Журнал медико-биологических исследований. – 2014. – Вып. №3. – С. 42–49.
52. Kozhushko N. J. Specificity of spontaneous EEG associated with different levels of cognitive and communicative dysfunctions in children / N. J. Kozhushko, Z. V. Nagornova, S. A. Evdokimov [et al.] // Int J Psychophysiol. – 2018. – Vol. 128. – P. 22–30.
53. Lyakso E. E. Speech Features and Electroencephalogram Parameters in 4- to 11-Year-Old Children / E. E. Lyakso, O. Frolova, Y. Matveev // Frontiers in Behavioral Neuroscience. – 2020. – Vol. 14. doi:10.3389/fnbeh.2020.00030.
54. Klimesch W. Alpha en beta band power changes in normal and dyslexic children / W. Klimesch, M. Doppelmayr, H. Wimmer, W. Gruber, D. R'ohm, J. Schwaiger, F. Hutzler // Clin Neurophysiol. – 2001. – Vol. 112. – P. 1186–1195.
55. Arns M. Different brain activation patterns in dyslexic children: Evidence from EEG power and coherence patterns for the double-deficit theory of dyslexia / M. Arns, S. Peters, M. Breteler, L. Verhoeven // Journal of Integrative Neuroscience. – 2007. – Vol. 6. – P. 175–190.
56. Walker J. E. The Neurophysiology of Dyslexia: A Selective Review with Implications for Neurofeedback Remediation and Results of Treatment in Twelve Consecutive Patients / J. E. Walker, C. A. Norman // Journal of Neurotherapy. – 2006. – Vol. 10(1). – P. 45–55.
57. Breteler M. H. Improvements in spelling after QEEG-based neurofeedback in dyslexia: a randomized controlled treatment study / M. H. Breteler, M. Arns, S. Peters, I. Giepman, L. Verhoeven // Applied psychophysiology and biofeedback. – 2010. – Vol. 35(1). – P. 5–11.
58. Белалов В. В. Нейрофизиологический анализ восприятия речи у детей возрастом от двух с половиной до трех с половиной лет, воспитывающихся в семье и детском доме / В. В. Белалов, Ю. О. Дягилева, В. Б. Павленко, О. М. Кочухова // Neurophysiology. Нейрофизиология. – 2014. – Т. 45, № 1. – С. 85–93.
59. Михайлова А. А. Реактивность мю-ритма ЭЭГ при наблюдении и выполнении действий у детей раннего возраста, имеющих разный уровень развития рецептивной речи / А. А. Михайлова, Л. С. Орехова, Ю. О. Дягилева, Т. И. Мухтаримова, В. Б. Павленко // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2020. – Т. 70, № 3. – С. 422–432.
60. Nyström P. Using mu rhythm desynchronization to measure mirror neuron activity in infants / P. Nyström, T. Ljunghammar, K. Rosander, C. von Hofsten // Dev. Sci. – 2011. – Вып. 14(2). – P. 327–335.
61. Sreedharan. Functional Connectivity of Language Regions of Stroke Patients with Expressive Aphasia During Real-Time Functional Magnetic Resonance Imaging Based Neurofeedback / Sreedharan, Sujesh et al. // Brain connectivity. – 2019. – Vol. 9(8). – P. 613–626.
62. Эйсмонт Е. В. Оптимизация психофизиологического состояния детей с задержкой психоречевого развития с помощью метода обратной связи по параметрам ЭЭГ / Е. В. Эйсмонт, М. А. Начарова, Е. В. Никифорова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2019. – Т. 5 (71), Вып. № 4. – С. 214–221.

NEUROPHYSIOLOGICAL MECHANISMS OF SPEECH PERCEPTION AND THEIR PERCULARITIES IN HEALTHY CHILDREN AND CHILDREN WITH DEVELOPMENTAL DISORDERS

Nacharova M. A., Mikhailova A. A., Govorun Ya. Yu., Portugalskaia A. A., Pavlenko V. B.

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: alikina93@gmail.com*

Neuronal synchronization, reflected in the EEG pattern, is the mechanism by which the brain integrates different types of information contained in a speech message and

presented in different areas of the brain (for example, phonological, spelling, semantic and syntactic information). The process of understanding a sentence consists of two groups of interrelated cognitive operations: it begins with searching in memory for phonological, syntactic and semantic properties of words, which is followed by integrating information into a general idea of the sentence meaning. The stage of searching for words in adults results in an increase in the theta rhythm power. The stage of integrating words into a sentence results in the growth of theta, beta, and gamma rhythms. At the same time, the growth of theta rhythm is more typical for children than for adults. Higher rhythms reactivity during speech perception indicates better developed speech skills in children. Under conditions of relative relaxation, the EEG of children with a high level of speech development is characterized by a moderate power level of theta and beta rhythms and a high level of alpha and mu rhythms.

It is assumed that a key role in the process of understanding speech is played by the so-called «action perception circuits», surrounding the Sylvian sulcus of the left hemisphere. The «action perception circuits» are composed of nerve cells capable of providing the speech signals perception and generation. The most important subgroup of neurons included in the «action perception circuits» are mirror neurons that are activated when performing and observing actions. The desynchronization of the EEG mu rhythm is considered as mirror neurons activation marker.

In several studies, it revealed that the level of mirror neurons activation and the level of speech understanding in children are connected. It is a topic of great interest to research the mu rhythm alpha and beta components reactivity both during the production of speech and during the perception of another person speech. At present, it is becoming obvious that analyzing the EEG rhythms power changes during the speech understanding in different scenarios could be used to identify the mechanisms of the brain language network and speech disorders. The revealed patterns make it possible to propose ways of correcting the children speech development using EEG biological feedback methods.

Keywords: electroencephalogram, speech, EEG rhythms, "mirror" neurons, age-related characteristics of speech perception.

References

1. Vygotskij L. S. *Myshlenie i rech*, p. 324 (Gosudarstvennoe socialno-ekonomicheskoe izdatelstvo, Moscow, 1934).
2. Cristia A., Seidl A., Junge C., Soderstrom M., Hagoort P. Predicting individual variation in language from infant speech perception measures. *Child Dev.* **85**, 1330 (2014).
3. Bell M. A., Cuevas K. Using EEG to study cognitive development: Issues and practices. *J. Cogn. Dev.* **13**(3), 281 (2012).
4. Antognini K., Daum M. Toddlers show sensorimotor activity during auditory verb processing. *Neuropsychologia.* **126**, 82 (2019).
5. Schneider J. M., Abel A. D., Ogiela D. A., Middleton A. E., Maguire M. J. Developmental differences in beta and theta power during sentence processing, *Dev. Cogn. Neurosci.* **19**, 19 (2016).
6. Schneider J. M., Abel A. D., Ogiela D. A., McCord C., Maguire M. J. Developmental differences in the neural oscillations underlying auditory sentence processing in children and adults, *Brain Lang.* **186**, 17 (2018).
7. Kuhl P. K., Ramírez R. R., Bosseler A., Lin J.-F. L., Imada T. Infants' brain responses to speech suggest Analysis by Synthesis, *PNAS.* **111**(31), 11238 (2015).

8. Strotseva-Feinschmidt A., Cunitz K., Friederici A. D., Gunter T. C. Auditory discrimination between function words in children and adults: A mismatch negativity study, *Front. psychol.* **6**, 1930 (2015).
9. Harwood V., Preston J., Grela B., Roy D., Harold O., Turcios J., Andrada K., Landi N. Electrophysiology of perception and processing of phonological information as indices of toddlers' language performance, *J. Speech. Lang. Hear. Res.* **60**(4), 999 (2017).
10. Kuhl P. K., Conboy B. T., Coffey-Corina S., Padden D., Rivera-Gaxiola M., Nelso T. Phonetic learning as a pathway to language: new data and native language magnet theory expanded (NLM-e), *Philos. Trans. Royal Soc. B.* **363**(1493), 979 (2008).
11. Kuhl P. K. Brain mechanisms in early language acquisition, *Neuron.* **67**(5), 713 (2010).
12. Krause C., Porn B., Lang H. Relative alpha desynchronization and synchronization during speech perception, *Brain Res.* **5**(3), 295 (1997).
13. Lam N. H., Schoffelen J., Uddén J., Hultén A., Hagoort P. Neural activity during sentence processing as reflected in theta, alpha, beta, and gamma oscillations, *NeuroImage.* **142**, 43 (2016).
14. Ding N., Melloni L., Zhang H., Tian X., Poeppel D. Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech, *Nature Neuroscience.* **19**(1), 158 (2016).
15. Mai G., Minett J. W., Wang W. S. Delta, theta, beta, and gamma brain oscillations index levels of auditory sentence processing, *NeuroImage.* **133**, 516 (2016).
16. 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.* **187**, 41 (2018).
17. Orekhova E. V., Stroganova T. A., Posikera I. N., Elam M. EEG theta rhythm in infants and preschool children, *Clin. Neurophysiol.* **117**(5), 1047 (2006).
18. Lum J., Youssef G., Clark G. Using Pupillometry to Investigate Sentence Comprehension in Children With and Without Specific Language Impairment, *Journal of speech, language, and hearing research: JSLHR.* **60**(6), 1648 (2017).
19. Friederici A. D. Towards a neural basis of auditory sentence processing, *Trends Cogn. Sci.* **6**, **78** (2002).
20. Hickok G., Poeppel D. The cortical organization of speech processing, *Nat. Rev. Neurosci.* **8**(5), 393 (2007).
21. Pulvermüller F. Neural reuse of action perception circuits for language, concepts and communication, *Prog Neurobiol.* **160**, 1 (2018).
22. Arbib M. A. From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics, *Behavioral and Brain Sciences.* **28**, 105 (2015).
23. Hagoort P. On Broca, brain, and binding: a new framework, *Trends Cogn. Sci.* **9**(9), 416 (2005).
24. Hagoort P. The core and beyond in the language-ready brain, *Neurosci. Biobehav. Rev.* **81**, 194 (2017).
25. Bastiaansen M. C., Linden M. V., Keurs M. T., Dijkstra T., Hagoort P. Theta responses are involved in lexical semantic retrieval during language processing, *J. Cogn. Neurosci.* **17**, 530 (2005).
26. Bastiaansen M. C., Magyari L., Hagoort P. Syntactic unification operations are reflected in oscillatory dynamics during on-line sentence comprehension, *J. Cogn. Neurosci.* **22**, 1333 (2010).
27. Bastiaansen M., Hagoort P. Oscillatory neuronal dynamics during language comprehension. *Prog. Brain. Res.* **159**, 179 (2006).
28. Hart J. Jr., Maguire M. J., Motes M., Mudar R. A., Chiang H. S., Womack K. B., Kraut M. A. Semantic memory retrieval circuit: Role of pre-SMA, caudate, and thalamus, *Brain Lang.* **126**(1), 89 (2013).
29. Privodnova E. Yu., Volf N. V. Topographic features of theta activity in young and elderly subjects at the initial stage of creative problem solving: Sloreta analysis, *Zhurnal vysshei nervnoi deiatelnosti imeni I. P. Pavlova.* **68**(3), 304 (2018).
30. Dimitrijevic A., Smith M. L., Kadis D. S., Moore D. R. Cortical Alpha Oscillations Predict Speech Intelligibility, *Frontiers in human neuroscience*, **11**, 88 (2017). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00088>
31. Jenson D., Bowers A. L., Harkrider A. W., Thornton D., Cuellar M., Saltuklaroglu T. Temporal dynamics of sensorimotor integration in speech perception and production: independent component analysis of EEG data, *Frontiers in psychology*, **5**, 656 (2014). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00656>
32. Lewis A. G., Schoffelen J. M., Schriefers H., Bastiaansen M. A predictive coding perspective on beta oscillations during sentence-level language comprehension, *Front. Hum. Neurosci.*, **10**, 85 (2016).

33. Kropotov Yu. D. Quantitative EEG, event-related potentials and neurotherapy, *Academic Press.*, 543 (2009).
34. Lewis A. G., Wang L., Bastiaansen M. Fast oscillatory dynamics during language comprehension: Unification versus maintenance and prediction? *Brain Lang.*, **148**, 61 (2015).
35. Thornton D., Harkrider A. W., Jenson D., Saltuklaroglu T. Sensorimotor activity measured via oscillations of EEG mu rhythms in speech and non-speech discrimination tasks with and without segmentation demands, *Brain Lang.*, **187**, 62 (2018).
36. Bowers A., Saltuklaroglu T., Harkrider A., Cuellar M. Suppression of the μ Rhythm during Speech and Non-Speech Discrimination Revealed by Independent Component Analysis: Implications for Sensorimotor Integration in Speech Processing, *PLoS ONE.*, **8**(8) (2013). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072024>
37. Bastiaansen M., Hagoort P. Frequency-based Segregation of Syntactic and Semantic Unification during Online Sentence Level Language Comprehension, *J Cogn Neurosci.*, **27**(11), 2095 (2015).
38. Zaidel E., Hill A., Weems S. EEG Correlates of Hemispheric Word Recognition. *Brain Research in Language. Literacy Studies.* **1**, 225 (2008).
39. Rossi S., Telkemeyer S., Wartenburger I., Obrig H. Shedding light on words and sentences: Near-infrared spectroscopy in language research, *Brain Lang.*, **121**(2), 152 (2012).
40. Belalov V. V., Bazanova O. M., Mikhailova A. A., Dyagileva Yu. O., Pavlenko V. B. EEG mu rhythm reactivity during speech perception in children aged from two to three years: influence of rearing conditions, *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti imeni I. P. Pavlova*, **70**(2), 193 (2020).
41. Krause C. M., Pesonen M., Hämäläinen H. Brain oscillatory responses during the different stages of an auditory memory search task in children, *Neuroreport.*, **18**(3), 213 (2007).
42. Meyer M., Endedijk H. M., Van Ede F., Hunnius S. Theta oscillations in 4-year-olds are sensitive to task engagement and task demands, *Sci Rep.*, **9**, 6049 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42615-x>
43. Meyer L., Obleser J., Friederici A. D. Left parietal alpha enhancement during working memory-intensive sentence processing, *Cortex.*, **49**(3), 711 (2013).
44. Bazanova O. M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity, *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **44**, 94 (2014).
45. Stroganova T. A., Orekhova E. V., Posikera I. N. EEG alpha rhythm in infants, *Clin. Neurophysiol.*, **110**(6), 997 (1999).
46. Marshall P. J., Bar-Haim Y., Fox N. A Development of the EEG from 5 months to 4 years of age, *Clin. Neurophysiol.*, **113**, 1199 (2002).
47. 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.*, **127**(1), 254 (2016).
48. Cantiani C., Riva V., Piazza C., Melesi G., Mornati G., Bettoni R., Marino C., Molteni M. ERP responses to lexical-semantic processing in typically developing toddlers, in adults, and in toddlers at risk for language and learning impairment, *Neuropsychologia.*, **103**, 115 (2017).
49. Riva V., Cantiani C., Mornati G., Gallo M., Villa L., Mani E., Saviozzi I., Marino C. and Molteni M. Distinct ERP profiles for auditory processing in infants at-risk for autism and language impairment, *Sci Rep.*, **8**, 715 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-19009-y>
50. Benasich A. A., Gou Z., Choudhury N., Harris K. D. Early cognitive and language skills are linked to resting frontal gamma power across the first 3 years, *Behav Brain Res.*, **195**(2), 215 (2008).
51. Emelyanova T. V. Influence of fronto-thalamic system dysfunction on speech development in 7–8-year-old children, *Journal of Medical and Biological Research.*, **3**, 42 (2014).
52. Kozhushko N. J., Nagornova Z. V., Evdokimov S. A., Shemyakina N. Specificity of spontaneous EEG associated with different levels of cognitive and communicative dysfunctions in children, *Int J Psychophysiol.*, **128**, 22 (2018).
53. Lyakso E. E., Frolova O., Matveev Y. Speech Features and Electroencephalogram Parameters in 4- to 11-Year-Old Children, *Frontiers in Behavioral Neuroscience.*, **14** (2020) doi:10.3389/fnbeh.2020.00030.
54. Klimesch W., Doppelmayr M., Wimmer H., Gruber W., Röhm D., Schwaiger J., Hutzler F. Alpha end beta band power changes in normal and dyslexic children, *Clin Neurophysiol.*, **112**, 1186 (2001).
55. Arns M., Peters S., Breteler M., Verhoeven L. Different brain activation patterns in dyslexic children: Evidence from EEG power and coherence patterns for the double-deficit theory of dyslexia, *Journal of Integrative Neuroscience*, **6**, 175 (2007).

56. Walker J. E., Norman C. A. The Neurophysiology of Dyslexia: A Selective Review with Implications for Neurofeedback Remediation and Results of Treatment in Twelve Consecutive Patients, *Journal of Neurotherapy*, **10**(1), 45 (2006).
57. Breteler M. H., Arns M., Peters S., Giepmans I., Verhoeven L. Improvements in spelling after QEEG-based neurofeedback in dyslexia: a randomized controlled treatment study, *Applied psychophysiology and biofeedback*, **35**(1), 5 (2010).
58. Belalov V. V., Dyagileva Y. O., Pavlenko V. B., Kochukhova O. M. Neurophysiological analysis of speech perception in 2.5 to 3.5-year-old orphans and children raised in a family, *Neurophysiology*, **45**(1), 85 (2014).
59. Mikhailova A. A., Orekhova L. S., Dyagileva Yu. O., Mukhtarimova T. I., Pavlenko V. B. EEG mu rhythm reactivity in children at an early age with different level of receptive speech development under conditions of action observation and execution, *Zhurnal vysshei nervnoi deiatelnosti imeni I. P. Pavlova*, **70**(3), 422 (2020).
60. Nyström P., Ljunghammar T., Rosander K., Von Hofsten C. Using mu rhythm desynchronization to measure mirror neuron activity in infants, *Dev. Sci.*, **14**(2), 327 (2011).
61. Sreedharan S., Arun K. M., Sylaja P. N., Kesavadas C., Sitaram R. Functional Connectivity of Language Regions of Stroke Patients with Expressive Aphasia During Real-Time Functional Magnetic Resonance Imaging Based Neurofeedback, *Brain connectivity.*, **9**(8), 613 (2019).
62. Eismont E. V., Nacharova M. A., Nikiforova E. V. Optimization of psychophysiological state of children with delayed speech development using EEG biofeedback, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **5** (71, 4), 214 (2019).