

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
Биология. Химия. Том 11 (77). 2025. № 4. С. 3–17.

УДК 612.825; 616.22-008.5

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-4-3-17

ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ РЕЧИ В НОРМЕ И ПРИ ЕЕ НАРУШЕНИЯХ

Александрова С. Е., Павленко В. Б.

*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь,
Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: vpav55@gmail.com*

Приводится краткий обзор актуальных исследований нейрофизиологических механизмов генерации речи взрослых и детей. Анализ данных литературы показал, что за управление процессами речевой коммуникации отвечает языковая нейронная сеть – обширные регионы коры, включая ассоциативные, моторные и сенсомоторные области обоих полушарий, а не только область Вернике и центр Брока. Предполагается, что отклонения в динамике ритмов ЭЭГ, выявленные у лиц с речевыми нарушениями, могут являться частью патологического механизма, препятствующего адекватному протеканию процессов речевой продукции. Исходя из этого, можно заключить, что дальнейшее уточнение паттерна ЭЭГ-реакций, сопровождающих речь, позволит приблизиться к разработке персонализированных методов коррекции, включая метод биологической обратной связи. В настоящее время имеется лишь ограниченное количество работ в данной области с участием детей, что требует дополнительного привлечения внимания специалистов к этой проблеме.

Ключевые слова: звукопроизношение, внутренняя и внешняя речь, электроэнцефалограмма, расстройства речи, заикание.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение нейрофизиологических основ восприятия и генерации речи представляет собой одно из ключевых направлений современной нейронауки. В последние годы отмечается рост числа публикаций, посвященных роли различных структур мозга в речевой коммуникации. Также отмечается рост числа детей и подростков с речевыми нарушениями, что делает анализ текущего состояния исследований в этой области особенно актуальными. Доступным методом изучения механизмов восприятия и генерации речи является регистрация электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Ранее нами был опубликован обзор работ, посвященных динамике ритмов ЭЭГ при восприятии речи у здоровых взрослых и

типично развивающихся детей, а также у индивидов с нарушениями речевой функции [1]. Что касается генерации речи, недавно вышли обзорные статьи, посвященные изменениям ритмов ЭЭГ в разных регионах мозга при выполнении речевых заданий разного уровня сложности [2], а также динамике альфа- и бета-ритмов в моторных и сенсомоторных областях у испытуемых с нормальным развитием речи и с речевыми расстройствами [3]. К сожалению, в этих работах практически не отображены исследования речевых функций у детей, а также публикации российских исследователей. В недавней отечественной обзорной работе подробно описаны психофизиологические подходы к изучению процессов звукопроизношения и их коррекции [4], однако анализ динамики ритмов ЭЭГ в процессе генерации речи не являлся целью указанной публикации.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является обзор актуальных исследований нейрофизиологических механизмов генерации речи взрослых и детей, выполненных с применением электрофизиологических методов, прежде всего, регистрации ЭЭГ, за рубежом и в Российской Федерации. Поиск по ключевым словам был проведен с использованием баз научной литературы Pubmed.com, ScienceDirect.com, eLIBRARY.ru.

1. НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ РЕЧИ. СВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ ВОСПРИЯТИЯ

В настоящее время принято разграничивать различные типы речи [4]. К внешней речи относят речь, формируемую артикуляцией и представленную звуками. К внутренней (скрытой) – два подтипа: речь, сопровождающаяся внутренним проговариванием (схожа с внешней речью, отвечает за вербальное мышление) и речь, характеризующуюся свернутостью, образностью (является субстратом образного мышления).

Показано, что как произношение речевых сообщений вслух, так и внутренняя речь вовлекают общие нейронные сети, хотя во втором случае их активация менее выражена [5]. С помощью сигналов, зарегистрированных в моторной и сенсомоторной областях коры у больных, с вживленными по медицинским показаниям микроэлектродными матрицами, продемонстрировано декодирование внутренней речи [6]. Установлено, что внутренняя речь задействует похожую (но не идентичную) кортикальную сеть, что и физически воспроизводимая речь. Выявлен фактор «моторного намерения», которое отличает два подтипа внутренней речи, обеспечивая более высокую степень активации нейронных сетей при внутреннем проговаривании слов и предложений по сравнению с формированием образной, свернутой речи. Также показано пространственное перекрытие корковых регионов, вовлеченных в восприятие речи других людей и генерацию как внутренней, так и внешней речи. Особый интерес представляет связь между моторной системой и восприятием речи. Установлено, что обработка глаголов действия активирует премоторную кору, что свидетельствует о тесной взаимосвязи между языковыми и сенсомоторными процессами [7].

Исходя из результатов этих и подобных исследований, можно заключить, что за управление процессами речевой коммуникации отвечает языковая нейронная сеть – обширные регионы коры, включая ассоциативные, моторные и сенсомоторные

области обоих полушарий, а не только область Вернике и центр Брока. При этом восприятие и генерация речи тесно связаны, т.к. опираются на нейронные сети (action perception circuit – «контуры восприятия-действия»), окружающие центральную борозду левого полушария [8]. Важнейшей подгруппой нейронов, входящих в «сети восприятия-действия», являются зеркальные нейроны, на ключевую роль которых в восприятии и генерации речи указывают Ю. В. Бушов и его коллеги [9–11].

Генерация речи включает несколько этапов: концептуализация (формирование идеи), лексический подбор (выбор слов), синтаксическое планирование (построение структуры предложения) и артикуляторное программирование (планирование последовательности движений) [12]. Центральным механизмом в обеспечении плавной речевой продукции является концепция внутренних моделей. Внутренние модели представляют собой нейронные механизмы, генерирующие сенсорные прогнозы на основе моторных команд (прямое моделирование) и обновляющие моторные планы на основе сенсорной обратной связи (обратное моделирование). Прямая модель позволяет предсказывать сенсорные последствия собственных речевых актов, что критически важно для мониторинга и коррекции речи в реальном времени [13].

Современные представления об участии конкретных мозговых структур в нейрофизиологическом обеспечении речи человека с учетом концепции внутренних моделей отражены в модели «двойного потока» [14, 15], которая постулирует, что обработка и генерация речи осуществляется преимущественно благодаря двум корковым путям: вентральному слухо-концептуальному и дорсальному слухо-моторному. Эти пути связывают следующие области мозга: (1) заднюю часть верхней височной извилины и верхней височной борозды, где происходит первичная обработка и распознавание звуков речи, и (2) венотлатеральную префронтальную кору, а также часть премоторной коры, вовлеченные у человека в репродукцию и восприятие грамматики. Основной звуко-инициирующей структурой у людей является моторная кора. Мотокортикальный путь контроля вокализаций начинается от первичной моторной коры (4 поле Бродмана), примыкающей к ней премоторной (6 поле), и венотлатеральной префронтальной коры (44 поле), и дальше, через ретикулярную формацию или напрямую, приходит к мотонейронам в стволе мозга (см. обзор [16]). Модели моторного контроля, инициированные в премоторных и моторных регионах, сравниваются с явными сенсорными результатами в соматосенсорных и слуховых регионах [15, 17]. Дорсальный поток левого полушария доминирует у большинства индивидов, играя ключевую роль в сенсомоторном контроле речи, включая инициацию, коррекцию ошибок и плавную коартикуляцию звуков [18].

2. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ РЕЧЕВОЙ ПРОДУЦИИ

Изучение механизмов речевой продукции представляет собой сложную задачу, требующую применения нейровизуализации и различных электрофизиологических методов. Однако, несмотря на значительный прогресс, данная область сталкивается

с рядом методологических проблем и технических вызовов. Непосредственно отражает электрическую активность коры мозга в процессе восприятия и генерации речи регистрация активности отдельных нейронов [6] и электрокортикограмма (ЭКоГ) [19]. Хотя эти методы исключительно информативны, очевидно, что их применение возможно только у больных при соответствующих медицинских показаниях.

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) обеспечивает высокое пространственное разрешение, позволяя точно локализовать активные области мозга. Она широко используется для изучения сетей, связанных с речевой продукцией, включая классические области Брока и Вернике, а также такие области, как передняя поясная кора и мозжечок, малодоступные при других методах исследования [20]. Однако низкое временное разрешение фМРТ затрудняет изучение быстро протекающих процессов, лежащих в основе речи. Кроме того, стандартные задачи на речевую продукцию внутри МРТ-сканера затруднены из-за необходимости избегать движения (часто используются задачи на внутреннюю речь или артикуляцию без звука) [21].

Магнитоэнцефалография (МЭГ) сочетает высокое временное разрешение ЭЭГ с лучшим пространственным разрешением благодаря более точной локализации источников внутри черепа. Это позволяет детально исследовать активность глубоких структур мозга, участвующих в речевой продукции, таких как базальные ганглии и таламус. Тем не менее, МЭГ также подвержена артефактам движения, включая артефакты от мышц лица и глаз, а также требует сложного и дорогостоящего оборудования [22].

Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) позволяет исследовать причинно-следственные связи между активностью определённых мозговых областей и речевой продукцией, временно модулируя их активность. Хотя ТМС предоставляет ценную информацию о функциональной роли различных регионов, она не позволяет напрямую наблюдать за спонтанной нейронной активностью во время речи [23]. Ее использование также ограничено в исследованиях с участием детей.

Электроэнцефалография обеспечивает неинвазивное получение информации с высоким временным разрешением, что обуславливает её широкое применение для изучения быстрых динамических процессов, лежащих в основе речевой продукции у взрослых здоровых испытуемых и детей. Однако ЭЭГ имеет низкое пространственное разрешения и сталкивается с проблемой контаминации электромиографической активностью. Внешняя речь сопровождается активацией лицевых, язычных и гортанных мышц, что приводит к мощным мышечным артефактам, маскирующим активность нейронных сетей [24]. Движения артикуляторов также создают механические артефакты, влияющие на качество сигналов ЭЭГ/МЭГ. Движения глаз (саккады, моргание) добавляют ещё один уровень артефактов [25].

Для решения этой проблемы используют два подхода. Высокочастотные компоненты ЭЭГ (диапазон гамма-ритма), которые совпадают по частоте с

основным диапазоном электромиограммы, анализируют не при вокализации, а при мысленном произнесении слов. [26, 27].

Второй подход заключается в изучении низко- и среднечастотных диапазонов ЭЭГ (тета-, альфа-, мю- и бета-ритмов) с применением метода независимых компонент для удаления артефактов и выделения интересующей активности. Анализ независимых компонент (independent component analysis – ICA) позволяет разделить многоканальный сигнал на статистически независимые компоненты, каждый из которых представляет собой потенциально отдельный источник активности (нейральный или артефактный). ICA предполагает, что регистрируемые сигналы ЭЭГ/МЭГ представляют собой смесь независимых источников. После выполнения ICA исследователь визуально или автоматически идентифицирует источники активности, соответствующие артефактам (например, компоненты с топографией, характерной для моргания глаз, или с временной динамикой, совпадающей с ЭМГ-сигналом от мышц лица). Эти компоненты затем удаляются из исходных данных, позволяя получить более чистую запись [28]. Ограничением данного метода является некоторая субъективность идентификации артефактных компонентов. Используя ICA, можно случайно удалить нейральную активность, имеющую схожие характеристики с артефактами, или не полностью удалить сложные артефакты [29]. Тем не менее, группой исследователей из США [30–32, 5, 33] с применением данного метода успешно изучалась динамика мю-альфа- и мю-бета-ритмов при произношении слов не только у бегло говорящих людей, но и у заикающихся, чья речь сопровождается многочисленными механическими артефактами.

3. ДИНАМИКА РИТМОВ ЭЭГ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ РЕЧИ

При подготовке артикуляции слова мозгу необходимо планировать и программировать движения для предполагаемой речи. Во время артикуляции мозг отслеживает речевые движения и осуществляет нисходящий контроль, если они отклоняются от заданной траектории. В процессе речевой деятельности происходят изменения паттерна ЭЭГ в широком частотном диапазоне. Какие ЭЭГ-ритмы наиболее тесно связаны с этими процессами и какова их динамика? Для удобства изложения, рассмотрим связь ритмов ЭЭГ с речевой продукцией в порядке увеличения их частотных диапазонов.

Рост мощности тета-ритма (4–8 Гц), наблюдающийся в процессе речевой деятельности преимущественно в височных областях, традиционно связывают с активацией процессов памяти при восприятии отдельных слов, понимании предложения в целом или извлечения слов из памяти при формулировании собственного сообщения [2, 1]. Особую роль отводят среднелобному тета-ритму, источником которого являются нейронные сети передней поясной и верхней лобной извилин. Осцилляции данного ритма являются характерным электрофизиологическим признаком процессов контроля исполнительных функций. Такие осцилляции выявлены в процессе генерации речи в условиях выполнения усложненной задачи (рассогласование пар стимулов, необходимость выбора языка при ответе и т.п.) [2].

Сотрудниками Томского государственного университета проведены ряд исследований характеристик мю-ритма в частотном диапазоне 8–12 Гц и корковых взаимодействий на его частоте при произнесении вслух и мысленном воспроизведении слов. Мю-ритм, являясь поддиапазоном альфа-ритмов, представляет особый интерес, поскольку его подавление (десинхронизация) тесно связано с активацией сенсомоторной системы. Характер выявленных изменений мю-ритма зависел от частоты: на одних частотах наблюдался рост спектральной мощности ЭЭГ, на других – снижение. Обнаружено также усиление уровней корковых связей на частоте мю-ритма между центральными и лобными, центральными и височными, центральными и затылочными зонами коры на этапах подготовки и выполнения коммуникативного действия [34]. Применение фМРТ позволило описать этапы активации мозговых структур при произнесении слов вслух и про себя. По мнению исследователей, основную роль в обеспечении указанной деятельности, вероятно, выполняет префронтальная кора, которая участвует в планировании и инициации действий, а также в оценке их эффективности. Важную роль при этом играют и коммуникативные зеркальные нейроны, которые расположены в латеральной части премоторной коры и близко расположенной к ней зоне Брока. Предполагают, что эти нейроны выполняют функцию посредника и обеспечивают взаимодействие между префронтальной корой, сенсорными, двигательными зонами коры, а также местами хранения в мозге энграмм слов [10, 11].

Группой исследователей из США изучалась динамика сенсомоторных мю-альфа- (8–13 Гц) и мю-бета- (15–25 Гц) ритмов у взрослых испытуемых при произношении слогов, слов и при развернутых ответах на вопросы [30, 32, 5, 33]. Кластеры компонентов мю-ритма локализовались билатерально в сенсомоторных регионах с характерными спектральными пиками в бета- и альфа-частотах диапазонов. Снижение мощности осцилляций относительно исходного уровня наблюдается в области сенсомоторной коры в альфа- и бета-диапазонах частот до и во время движений (связанная с событием десинхронизация – event-related desynchronization, ERD). Указанные изменения наблюдались в премоторной, первичной моторной (M1), первичной соматосенсорной (S1), дополнительной моторной областях и сенсомоторной коре после начала действия стимула/сигнала и сохранялись на протяжении всей артикуляции. После прекращения движения мощность возвращается к исходному уровню, при этом бета-колебания в области прецентральной извилины, в частности, демонстрируют значительное увеличение мощности или синхронизацию, известное как «отдача». По мнению указанных авторов, бета-ритмы (15–30 Гц) распространяются росто-каудально от двигательных до слуховых областей, отражая предсказательные временные сигналы «сверху вниз», и формируют начало и завершение последовательностей движений. Альфа-ритмы (8–14 Гц) распространяются в сенсомоторной коре каудо-рострально, обеспечивая сенсорную обратную связь. Изменения сенсомоторных ритмов более выражены при внешней, чем при внутренней речи. Анализируя результаты этих и собственных исследований группа исследователей [3] приходит к выводу о функциональной диссоциации ERD альфа- и бета ритмов: 1) функционально

сенсомоторный альфа-ритм связан с обработкой соматосенсорной обратной связи, тогда как бета-ритм связан с двигательными процессами; 2) учитывая каноническую роль вовлеченных областей мозга, эти функциональные модуляции альфа- и бета-колебаний должны быть наиболее выражены прежде всего в S1 и M1, соответственно; 3) альфа-ERD более тесно связан с процессами, преимущественно на стадии артикуляции, а сенсомоторный бета-ERD – с процессами, охватывающими планирование речи и артикуляцию.

Приведенные выше результаты электрофизиологических исследований подтверждают активное участие внутренних моделей в речевой продукции. Анализ динамики мю-альфа-ритмов, регистрируемых ЭЭГ над сенсомоторной корой, демонстрирует их десинхронизацию при активации моторных областей, включая случаи внутренней речи. Это указывает на то, что даже при мысленном проговаривании активируются те же сенсомоторные механизмы, что и при фактической артикуляции, подтверждая роль внутреннего прямого моделирования [35].

При выполнении задач, требующих концептуально обусловленного словообразования (например, называние картинок), снижение мощности альфа-бета-диапазона наблюдается не только в регионах, связанных с управлением движениями, но и в лобных, височных и нижнетеменных областях мозга [2]. Важно отметить, что эти области мозга не участвуют в двигательных аспектах речи, а скорее в аспектах памяти, связанных с производством языка, в частности, в извлечении концептуальной и лексической информации из памяти.

Регистрацией ЭЭГ у взрослых здоровых испытуемых при мысленном произношении слов выявлено повышение мощности гамма-ритма ЭЭГ (64–68 Гц) во фронтальных, височных и теменных отведениях левого полушария, а также депрессия альфа-ритма в теменных и затылочных отведениях ЭЭГ, это свидетельствовало о повышении активности соответствующих структур коры [26]. Кроме того, в диапазоне гамма-частот в левом полушарии обнаружены устойчивые паттерны когерентности [27].

Регистрация ЭКоГ у больных эпилепсией с имплантированными матрицами электродов показала, что ее амплитуда в ряде корковых областей увеличивалась в гамма-диапазоне и снижалась в мю- и бета-диапазонах частот в ситуации, когда испытуемый явно или скрыто повторял слова, предъявленные либо визуально, либо на слух [19]. Рост амплитуды ЭКоГ в диапазоне высоких гамма-частот (70–170 Гц) отражал активацию нейронных сетей, связанные с предъявлением стимула и с вербальной реакцией испытуемого. Произношение слов вслух слов было в первую очередь связано с ростом гамма-ритма в верхней и средней частях височной доли, зоне Вернике, супрамаргинальной извилине, зоне Брока, премоторной коре, первичной моторной коре. Скрытое производство слов было в первую очередь связано с усилением гамма-ритма в верхней височной доле и супрамаргинальной извилине [19]. Результаты исследования указывают на вовлечение обширных регионов неокортекса в процессы генерации внутренней и внешней речи. Ограничением данного исследования являлось имплантация электродных матриц лишь в левом полушарии.

4. ОСОБЕННОСТИ ЭЭГ-РЕАКЦИЙ У ЛЮДЕЙ С ТЕМПО-РИТМИЧЕСКИМИ НАРУШЕНИЯМИ РЕЧИ И НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К КОРРЕКЦИИ ТАКИХ НАРУШЕНИЙ У ДЕТЕЙ

Одними из наиболее распространенных расстройств речевой функции являются темпо-ритмические нарушения, в частности заикание. Заикание – многофакторное расстройство, возникающее в результате сложного взаимодействия отклонений в двигательной, языковой, когнитивной и эмоциональной сферах, которое влияет на функционирование нейронов, особенно в сетях контроля речевых моторных функций. Заикание встречается примерно у 5 % детей дошкольного возраста и примерно у 1 % взрослых и часто сопровождается негативным влиянием на качество жизни [36]. Причиной заикания считают минимальную дисфункцию мозга, проявляющуюся в ухудшении функционирования нейронных цепей базальных ганглиев, тормозящих и синхронизирующих контуров корково-подкорковых связей, а также сенсомоторных механизмов внутреннего моделирования [37–39]. Группа исследователей из США [31, 38, 33] показала, что у заикающихся взрослых при выполнении заданий на произношение слов вслух в левом полушарии отмечается более слабая десинхронизацию мю-альфа- и мю-бета-ритмов, чем у испытуемых с нормальной речью. Подобные, хотя и менее выраженные различия, обнаружены также при выполнении заданий на внутреннюю речь. Снижение десинхронизации мю-бета-ритма у лиц с заиканием было интерпретировано как свидетельство снижения способности к прямому моделированию, в то время как снижение десинхронизации мю-альфа-ритма – как показатель ослабления сенсорной обратной связи. Поскольку эти различия присутствовали и в спонтанной беглой речи, было высказано предположение, что они отражают базовую сенсомоторную нестабильность у пациентов с подобными нарушениями.

Исследования ЭЭГ у детей с темпо-ритмическими нарушениями речи крайне немногочисленны, а результаты их противоречивы. У детей с заиканием при корреляционном анализе ЭЭГ, зарегистрированной в состоянии относительного покоя, выявлены нарушения связей теменно-затылочной коры правого полушария с другими структурами [39]. Такую особенность Фесенко Ю. А. и Лохов М. И. считают главной особенностью патогенеза данного нарушения. В то же время, насколько нам известно, анализ ЭЭГ непосредственно в процессе генерации речи у заикающихся детей пока не проводился. Однако при выполнении движений рук у таких детей выявили ряд особенностей в динамике сенсомоторных ритмов ЭЭГ, которые заключались в снижении модуляции мощности и фазовой синхронизации бета-ритма 13–30 Гц в левом полушарии (отсутствовала т.н. «отдача»), снижении латерализации фазовой синхронизации при инициации движения на низких частотах и изменении межполушарной фазовой синхронизации в дельта- и бета-диапазонах [36]. В совокупности эти результаты указывают на дефицит функционирования левой сенсомоторной коры при заикании, который может не ограничиваться речью, а также на дополнительное рекрутирование правого полушария для поддержки сенсомоторной обработки.

Одним из перспективных психофизиологических способов коррекции функционального состояния является метод биологической связи (БОС). В работе

Морковиной А. Д и соавторов [4] представлен обзор методов БОС, основанных на использовании характеристик акустического спектра речи, ритма дыхательных движений, биоакустической коррекции с преобразованием ЭЭГ-сигнала в звуковой. Положительные результаты при лечении заикания с применением оригинального варианта БОС с воздействием звуковой стимуляцией, подобранной на основе индивидуальных особенностей ЭЭГ пациента, получены Фесенко Ю. А. и Лоховым М. И [39]. К сожалению, детальное описание методики и динамики ритмов ЭЭГ в процессе БОС авторами не приводятся.

Заикание – это сложное и многогранное явление, которое не сводится только к внешним речевым нарушениям. Как показал опрос пациентов [40], заикание начинается с определенного комплекса внутренних ощущений: предчувствия запинки, потери контроля над речью или момента «застывания». Эти переживания запускают целый каскад реакций – эмоциональных, когнитивных и поведенческих. Участники исследования описывали, как ожидание запинки порождает тревогу, что в свою очередь приводит к избеганию определенных слов или ситуаций общения. Со временем эти стратегии преодоления могут закрепляться, существенно влияя на повседневную жизнь. Можно предположить, что перспективными для коррекции темпо-ритмических нарушений речи могут являться БОС-тренинги по параметрам мю- и тета-ритмов ЭЭГ, направленные на оптимизацию психофизиологического состояния в целом. После таких тренингов, проводимых в нашей лаборатории с участием детей с повышенной тревожностью было выявлено снижение оценок по шкале «Трудности общения» [41]. Ряд исследований указывает на роль сенсомоторной нейронной сети в процессах речевого развития (см. обзор [42]). Однако конкретные протоколы для сеансов БОС, направленные на коррекцию непосредственно темпо-ритмических характеристик речи детей с учетом возможной роли сенсомоторных ритмов ЭЭГ, до сих пор не разработаны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного обзора свидетельствуют о наличии характерного паттерна ЭЭГ-реакций при генерации внешней и внутренней речи. При этом надо учитывать, что синхронизация или десинхронизация определенных ритмов ЭЭГ является не только индикатором активации или торможения нейронных цепей коры мозга, но и имеет собственное функциональное значение. Указывают [43], что синхронизированные нейронные колебания, отражающиеся в ритмах ЭЭГ, могут выполнять связующую роль посредством координации и регуляции как локальной обработки, так и межзональных взаимодействий. Синхронизированное синаптическое возбуждение с гораздо большей вероятностью вызывает потенциал действия в нейроне, чем временно некоррелированные входные сигналы. Таким образом, ЭЭГ-осцилляции могут лежать в основе интеграции анатомически распределенной нейронной активности в когерентные когнитивные состояния.

Логично предположить, что отклонения в динамике ритмов ЭЭГ, выявленные у лиц с речевыми нарушениями, могут являться частью патологического механизма, препятствующего адекватному протеканию процессов речевой продукции. Исходя из этого, можно заключить, что дальнейшее уточнение паттерна ЭЭГ-реакций,

сопровождающих речь, позволит приблизиться к разработке персонализированных методов коррекции, включая БОС по ЭЭГ, при различных нарушениях ее генерации. В настоящее время имеется лишь ограниченное количество исследований в данной области с участием детей, что требует дополнительного привлечения внимания специалистов к этой проблеме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-78-10035, <https://rscf.ru/project/25-78-10035/>

Список литературы

1. Начарова М. А. Нейрофизиологические механизмы восприятия речи и их особенности у детей в норме и при нарушениях развития / М. А. Начарова, А. А. Михайлова, Я. Ю. Говорун [и др.] // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2020. – Т. 6 (72), вып. 3. – С. 146–162.
2. Piai V. Speaking waves: Neuronal oscillations in language production / V. Piai, X. Zheng // The psychology of learning and motivation / ed. by K.D. Federmeier. – Elsevier Academic Press, 2019. – P. 265–302.
3. Huang L. Z. Functional Roles of Sensorimotor Alpha and Beta Oscillations in Overt Speech Production / L. Z. Huang, Y. Cao, E. Janse, V. Piai // bioRxiv. – 2024. – 2024.09.04.611312.
4. Морковина А. Д. Анализ психофизиологических механизмов и подходов в коррекции звукопроизношения / А. Д. Морковина, А. О. Шевченко, В. В. Строганова, А. В. Вартанов // Национальный психологический журнал. – 2023. – № 1(49). – С. 77–89.
5. Bowers A. Power and phase coherence in sensorimotor mu and temporal lobe alpha components during covert and overt syllable production / A. Bowers, T. Saltuklaroglu, D. Jenson, A. Harkrider, D. Thornton // Exp Brain Res. – 2019. – Vol. 237, № 3. – P. 705–718.
6. Kunz E. M. Inner speech in motor cortex and implications for speech neuroprostheses / E. M. Kunz, B. Abramovich Krasa, F. Kamdar [et al.] // Cell. – 2025. – Vol. 188 (17). – P. 4658–4673.
7. Zheng Y. Neural representation of sensorimotor features in language-motor areas during auditory and visual perception / Y. Zheng, J. Zhang, Y. Yang, M. Xu // Commun Biol. – 2025. – Vol. 8, № 1. – P. 41–53.
8. Pulvermüller F. Neural reuse of action perception circuits for language, concepts and communication / Pulvermüller F. // Prog Neurobiol. – 2018. – Vol. 160. – P. 1–21.
9. Бушов Ю. В. Зеркальные нейроны в восприятии времени и речевых процессах / Ю. В. Бушов, В. Л. Ушаков, М. В. Светлик [и др.]. – Москва: Русайнс, 2021. – 212 с.
10. Скрыбина А. А. Зеркальные нейроны в эволюции языка и в формировании билингвизма / А. А. Скрыбина, Ю. В. Бушов // Вестник психофизиологии. – 2022. – № 2. – С. 12–21.
11. Скрыбина А. А. Активность зеркальных нейронов у монолингвов и билингвов при наблюдении и произнесении эмоционального и неэмоционального слов на родном и неродном языках / А. А. Скрыбина, М. В. Светлик, Ю. В. Бушов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 207–220.
12. Indefrey P. The spatial and temporal signatures of word production components / P. Indefrey, W. J. Levelt // Cognition. – 2004. – Vol. 92, № 1-2. – P. 101–144.
13. Houde J. F. Speech production as state feedback control / J. F. Houde, S. S. Nagarajan // Front Hum Neurosci. – 2011. – Vol. 5. – P. 1–23.
14. Hickok G. The cortical organization of speech processing / G. Hickok, D. Poeppel // Nat Rev Neurosci. – 2007. – Vol. 8, № 5. – P. 393–402.
15. Hickok G. Sensorimotor integration in speech processing: computational basis and neural organization / G. Hickok, J. Houde, F. Rong // Neuron. – 2011. – Vol. 69, № 3. – P. 407–422.
16. Станкова Е. П. Эволюция центральных механизмов устной речи / Е. П. Станкова, О. В. Кручинина, А. Н. Шеповальников, Е. И. Гальперина // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 171–183.

17. Guenther F. H. Role of the auditory system in speech production / F. H. Guenther, G. Hickok // *Handb Clin Neurol.* – 2015. – Vol. 129. – P. 161–175.
18. Rogalsky C. The Neuroanatomy of Speech Processing: A Large-scale Lesion Study / C. Rogalsky, A. Basilakos, C. Rorden [et al.] // *J Cogn Neurosci.* – 2022. – Vol. 34, № 8. – P. 1355–1373.
19. Pei X. Spatiotemporal dynamics of electrocorticographic high gamma activity during overt and covert word repetition / X. Pei, E. C. Leuthardt, C. M. Gaona, P. Brunner, J. R. Wolpaw, G. Schalk // *Neuroimage.* – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 2960–2972.
20. Treutler M. Functional MRI of Native and Non-native Speech Sound Production in Sequential German-English Bilinguals / M. Treutler, P. Sörös // *Front Hum Neurosci.* – 2021. – Vol. 15. – P. 1–14.
21. Simonyan K. New Developments in Understanding the Complexity of Human Speech Production / K. Simonyan, H. Ackermann, E. F. Chang, J. D. Greenlee // *J Neurosci.* – 2016. – Vol. 36, № 45. – P. 11440–11448.
22. Baillet S. Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging / Baillet S. // *Nat Neurosci.* – 2017. – Vol. 20. – P. 327–339.
23. Siebner H. R. Transcranial magnetic stimulation of the brain: What is stimulated? – A consensus and critical position paper / H. R. Siebner, K. Funke, A. S. Aberra [et al.] // *Clin Neurophysiol.* – 2022. – Vol. 140. – P. 59–80.
24. Bullock M. Artifact Reduction in Simultaneous EEG-fMRI: A Systematic Review of Methods and Contemporary Usage / M. Bullock, G. D. Jackson, D. F. Abbott // *Front Neurol.* – 2021. – Vol. 12. – P. 1–25.
25. Guenther F. Articulating: the Neural Mechanisms of Speech Production. / Guenther F. – Informa UK Limited, 2019.
26. Кирой В. Н. Электрографические корреляты внутренней речи / В. Н. Кирой, О. М. Бахтин, Н. Р. Миняева, Е. В. Кривко // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова.* – 2015. – Т. 65, № 5. – С. 616–626.
27. Kirov V. Imaginary and Real Speech-Related EEG Patterns in the Neural Network Approach / V. Kirov, O. Bakhtin, E. Krivko, D. Lazurenko, E. Aslanyan, D. Shaposhnikov // *Front Hum Neurosci.* – 2022. – Vol. 15. – P. 1–15.
28. Chaumon M. A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction / M. Chaumon, D. V. Bishop, N. A. Busch // *J Neurosci Methods.* – 2015. – Vol. 250. – P. 47–63.
29. Radüntz T. Automated EEG artifact elimination by applying machine learning algorithms to ICA-based features / T. Radüntz, J. Scouten, O. Hochmuth, B. Meffert // *J Neural Eng.* – 2017. – Vol. 14, № 4. – P. 1–18.
30. 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 // *Front Psychol.* – 2014. – Vol. 5. – P. 1–16.
31. Jenson D. Trait related sensorimotor deficits in people who stutter: An EEG investigation of μ rhythm dynamics during spontaneous fluency / D. Jenson, K. J. Reilly, A. W. Harkrider, D. Thornton, T. Saltuklaroglu // *Neuroimage Clin.* – 2018. – Vol. 19. – P. 690–704.
32. 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. 41–52.
33. Brown E. C. Influences of speaking task demands on sensorimotor oscillations in adults who stutter: Implications for speech motor control / E. C. Brown, A. Bowers, M. B. Rafferty, D. M. Casenhiser, K. Reilly, A. Harkrider, T. Saltuklaroglu // *Clin Neurophysiol.* – 2025. – Vol. 169. – P. 76–88.
34. Бушов Ю. В. Корковые взаимодействия и спектральные характеристики мю-ритма у человека при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального / Ю. В. Бушов, М. В. Светлик, Е. А. Есипенко, С. Р. Джафарова // *Вестник Томского государственного университета. Биология.* – 2019. – № 45. – С. 91–105.
35. Watanabe H. Synchronization between overt speech envelope and EEG oscillations during imagined speech / H. Watanabe, H. Tanaka, S. Sakti, S. Nakamura // *Neurosci Res.* – 2020. – Vol. 153. – P. 48–55.
36. Caruso V. C. Neural oscillatory activity and connectivity in children who stutter during a non-speech motor task / V. C. Caruso, A. H. Wray, E. Lescht, S. E. Chang // *J Neurodev Disord.* – 2023. – Vol. 15, № 1. – P. 1–15.

37. Saltuklaroglu T. EEG Mu (μ) rhythm spectra and oscillatory activity differentiate stuttering from non-stuttering adults / T. Saltuklaroglu, A. W. Harkrider, D. Thornton, D. Jenson, T. Kittilstved // *Neuroimage*. – 2017. – Vol. 153. – P. 232–242.
38. Jenson D. The Application of EEG Mu Rhythm Measures to Neurophysiological Research in Stuttering / D. Jenson, A. Bowers, D. Hudock, T. Saltuklaroglu // *Front Hum Neurosci*. – 2020. – Vol. 14. – P. 1–17.
39. Фесенко Ю. А. Коррекция речевых расстройств детского возраста / Ю. А. Фесенко, М. И. Лохов. – Москва: Юрайт, 2024. – 203 с.
40. Tichenor S. E. Stuttering as Defined by Adults Who Stutter / S. E. Tichenor, J. S. Yaruss // *J Speech Lang Hear Res*. – 2019. – Vol. 62, № 12. – P. 4356–4371.
41. 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), № 4. – С. 214–226.
42. Липатов В. А. Сенсомоторные ритмы как нейрофизиологические корреляты процессов восприятия речи в детском возрасте / В. А. Липатов, П. А. Павлова, А. Б. Ребрейкина, О. В. Сысоева // *Национальный психологический журнал*. – 2025. – № 20(3). – С. 136–147.
43. Palva S. Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks / S. Palva, J. M. Palva // *Front Psychol*. – 2011. – Vol. 2. – P. 1–6.

ELECTROPHYSIOLOGICAL STUDIES OF SPEECH GENERATION MECHANISMS IN HEALTHY INDIVIDUALS AND IN CASES OF DISORDERS

Alexandrova S. E., Pavlenko V. B.

***V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: vpav55@gmail.com***

The aim of this study is to review current research on the neurophysiological mechanisms of speech generation in adults and children, conducted using electrophysiological methods. A keyword search was performed using scientific literature databases such as Pubmed.com, ScienceDirect.com, and eLIBRARY.ru. The analysis of the literature revealed that both overt speech production and inner speech engage common neural networks, although the activation is less pronounced in the latter case. The management of speech communication processes is governed by a language neural network, which includes extensive cortical regions such as associative, motor, and sensorimotor areas of both hemispheres, rather than solely Wernicke's and Broca's areas. Furthermore, speech perception and generation are closely linked, as they rely on neural networks (action perception circuits) surrounding the central sulcus of the left hemisphere. Mirror neurons represent a critical subgroup within these action perception networks.

Electroencephalography (EEG) provides non-invasive access to information with high temporal resolution, making it widely applicable for studying the rapid dynamic processes underlying speech production in healthy adult subjects and children. However, EEG has low spatial resolution and faces challenges due to contamination by electromyographic activity. Two approaches are employed to address this issue. High-frequency EEG components (gamma rhythm range), which overlap with the primary

electromyogram frequency range, are analyzed not during vocalization but during silent word articulation. The second approach involves examining low- and mid-frequency EEG ranges (theta, alpha, mu, and beta rhythms) using independent component analysis to remove artifacts and isolate relevant activity. This method has successfully been used to study the dynamics of mu-alpha and mu-beta rhythms during word production, not only in fluent speakers but also in individuals who stutter, whose speech is accompanied by numerous mechanical artifacts.

The analysis of these research findings leads to the following conclusions: 1) the sensorimotor alpha rhythm of EEG is functionally associated with the processing of somatosensory feedback, whereas the beta rhythm is linked to motor processes; 2) alpha rhythm desynchronization is more closely related to processes predominantly occurring during the articulation stage, while sensorimotor beta rhythm desynchronization is associated with processes encompassing speech planning and articulation. It has been established that adults who stutter exhibit weaker mu-alpha and mu-beta rhythm desynchronization in the left hemisphere during overt word production tasks compared to individuals with typical speech.

EEG studies in children with tempo-rhythmic speech disorders are extremely limited, and their results are inconsistent. In children who stutter, correlational EEG analysis conducted in a state of relative rest has revealed disruptions in the connectivity of the right parietal-occipital cortex with other brain structures. However, EEG analysis during speech generation in stuttering children has not yet been conducted. Nevertheless, hand movement tasks in such children have shown distinct features in the dynamics of sensorimotor EEG rhythms.

It is reasonable to hypothesize that deviations in EEG rhythm dynamics observed in individuals with speech disorders may be part of a pathological mechanism that hinders the adequate execution of speech production processes. Based on this, it can be concluded that further clarification of EEG response patterns accompanying speech could contribute to the development of personalized correction methods, including EEG biofeedback, for various speech generation disorders. Currently, there is a limited number of studies in this field involving children, necessitating increased attention from specialists to address this issue.

Keywords: speech articulation, inner and outer speech, electroencephalogram, speech disorders, stuttering.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-78-10035, <https://rscf.ru/en/project/25-78-10035/>

References

1. Nacharova M. A., Mikhailova A. A., Govorun Ya. Yu., Portugalskaya A. A., and Pavlenko V. B., Neurophysiological mechanisms of speech perception and their features in children with typical and atypical development, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **3**, 146 (2020).
2. Piai V. and Zheng X., Speaking waves: Neuronal oscillations in language production, *The psychology of learning and motivation*, 265 (2019).

3. Huang L. Z., Cao Y., Janse E. and Piai V., Functional Roles of Sensorimotor Alpha and Beta Oscillations in Overt Speech Production, *bioRxiv*, 2024.09.04.611312 (2024).
4. Morkovina A. D., Shevchenko A. O., Stroganova V. V. and Vartanov A. V., Analysis of psychophysiological mechanisms and approaches in pronunciation correction, *National Psychological Journal*, **1(49)**, 77 (2023).
5. Bowers A., Saltuklaroglu T., Jenson D., Harkrider A. and Thornton D., Power and phase coherence in sensorimotor mu and temporal lobe alpha components during covert and overt syllable production, *Exp Brain Res*, **3**, 705 (2019).
6. Kunz E. M., Abramovich Krasa B., Kamdar F., Avansino D. T., Hahn N., Yoon S., Singh A., Nason-Tomaszewski S. R., Card N. S., Jude J. J., Jacques B. G., Bechevsky P. H., Iacobacci C., Hochberg L. R., Rubin D. B., Williams Z. M., Brandman D. M., Stavisky S. D., AuYong N., Pandarinath C., Druckmann S., Henderson J. M., Willett F. R., Inner speech in motor cortex and implications for speech neuroprostheses, *Cell*, **188**, 4658 (2025).
7. Zheng Y., Zhang J., Yang Y. and Xu M., Neural representation of sensorimotor features in language-motor areas during auditory and visual perception, *Commun Biol*, **1**, 41 (2025).
8. Pulvermüller F., Neural reuse of action perception circuits for language, concepts and communication, *Prog Neurobiol*, **160**, 1 (2018).
9. Bushov Yu. V., Ushakov V. L., Svetlik M. V. et al., Mirror neurons in time perception and speech processes, *Rusains*, Moscow, 212 p. (2021).
10. Skryabina A. A. and Bushov Yu. V., Mirror neurons in the evolution of language and in the formation of bilingualism, *Bulletin of Psychophysiology*, **2**, 12 (2022).
11. Skryabina A. A., Svetlik M. V. and Bushov Yu. V., Mirror neuron activity in monolinguals and bilinguals during observation and pronunciation of emotional and non-emotional words in native and non-native languages, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **3**, 207 (2024).
12. Indefrey P. and Levelt W. J., The spatial and temporal signatures of word production components, *Cognition*, **1–2**, 101 (2004).
13. Houde J. F. and Nagarajan S. S., Speech production as state feedback control, *Front Hum Neurosci*, **5**, 82 (2011).
14. Hickok G. and Poeppel D., The cortical organization of speech processing, *Nat Rev Neurosci*, **5**, 393 (2007).
15. Hickok G., Houde J. and Rong F., Sensorimotor integration in speech processing: computational basis and neural organization, *Neuron*, **3**, 407 (2011).
16. Stankova E. P., Kruchinina O. V., Shepovalnikov A. N. and Galperina E. I., Evolution of central mechanisms of oral speech, *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, **3**, 171 (2020).
17. Guenther F. H. and Hickok G., Role of the auditory system in speech production, *Handb Clin Neurol*, **129**, 161 (2015).
18. Rogalsky C., Basilakos A., Rorden C., Pillay S., LaCroix A. N., Keator L., Mickelsen S., Anderson S. W., Love T., Fridriksson J., Binder J. and Hickok G., The Neuroanatomy of Speech Processing: A Large-scale Lesion Study, *J Cogn Neurosci*, **8**, 1355 (2022).
19. Pei X., Leuthardt E. C., Gaona C. M., Brunner P., Wolpaw J. R. and Schalk G., Spatiotemporal dynamics of electrocorticographic high gamma activity during overt and covert word repetition, *Neuroimage*, **4**, 2960 (2011).
20. Treutler M. and Sörös P., Functional MRI of Native and Non-native Speech Sound Production in Sequential German-English Bilinguals, *Front Hum Neurosci*, **15**, 683277 (2021).
21. Simonyan K., Ackermann H., Chang E. F. and Greenlee J. D., New Developments in Understanding the Complexity of Human Speech Production, *J Neurosci*, **45**, 11440 (2016).
22. Baillet S., Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging, *Nat Neurosci*, **20**, 327 (2017).
23. Siebner H. R., Funke K., Aberra A. S., Antal A., Bestmann S., Chen R., Classen J., Davare M., Di Lazzaro V., Fox P. T., Hallett M., Karabanov A. N., Kesselheim J., Beck M. M., Koch G., Liebetanz D., Meunier S., Miniussi C., Paulus W., Peterchev A. V., Popa T., Ridding M. C., Thielscher A., Ziemann U., Rothwell J. C. and Ugawa Y., Transcranial magnetic stimulation of the brain: What is stimulated? – A consensus and critical position paper, *Clin Neurophysiol*, **140**, 59 (2022).

24. Bullock M., Jackson G. D. and Abbott D. F., Artifact Reduction in Simultaneous EEG-fMRI: A Systematic Review of Methods and Contemporary Usage, *Front Neurol*, **12**, 622719 (2021).
25. Guenther F., Articulating: the Neural Mechanisms of Speech Production, *Informa UK Limited*, **34(9)**, 1214 (2019).
26. Kiroy V. N., Bakhtin O. M., Minyaeva N. R. and Krivko E. V., Electrophysiological correlates of inner speech, *Journal of Higher Nervous Activity named after I. P. Pavlov*, **5**, 616 (2015).
27. Kiroy V., Bakhtin O., Krivko E., Lazurenko D., Aslanyan E. and Shaposhnikov D., Imaginary and Real Speech-Related EEG Patterns in the Neural Network Approach, *Front Hum Neurosci*, **15**, 683277 (2022).
28. Chaumon M., Bishop D. V. and Busch N. A., A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction, *J Neurosci Methods*, **250**, 47 (2015).
29. Radüntz T., Scouten J., Hochmuth O. and Meffert B., Automated EEG artifact elimination by applying machine learning algorithms to ICA-based features, *J Neural Eng*, **4**, 046004 (2017).
30. Jenson D., Bowers A. L., Harkrider A. W., Thornton D., Cuellar M. and Saltuklaroglu T., Temporal dynamics of sensorimotor integration in speech perception and production: Independent component analysis of EEG data, *Front Psychol*, **5**, 656 (2014).
31. Jenson D., Reilly K. J., Harkrider A. W., Thornton D. and Saltuklaroglu T., Trait related sensorimotor deficits in people who stutter: An EEG investigation of μ rhythm dynamics during spontaneous fluency, *Neuroimage Clin*, **19**, 690 (2018).
32. Saltuklaroglu T., Bowers A., Harkrider A. W., Casenhiser D., Reilly K. J., Jenson D. E., Thornton D., EEG μ rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing, *Brain Lang*, **187**, 41 (2018).
33. Brown E. C., Bowers A., Rafferty M. B., Casenhiser D. M., Reilly K., Harkrider A. and Saltuklaroglu T., Influences of speaking task demands on sensorimotor oscillations in adults who stutter: Implications for speech motor control, *Clin Neurophysiol*, **169**, 76 (2025).
34. Bushov Yu. V., Svetlik M. V., Esipenko E. A. and Dzhafova S. R., Cortical interactions and spectral characteristics of μ rhythm in humans during observation, pronunciation and mental reproduction of non-emotional words, *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, **45**, 91 (2019).
35. Watanabe H., Tanaka H., Sakti S. and Nakamura S., Synchronization between overt speech envelope and EEG oscillations during imagined speech, *Neurosci Res*, **153**, 48 (2020).
36. Caruso V. C., Wray A. H., Lescht E. and Chang S. E., Neural oscillatory activity and connectivity in children who stutter during a non-speech motor task, *J Neurodev Disord*, **1**, 40 (2023).
37. Saltuklaroglu T., Harkrider A. W., Thornton D., Jenson D. and Kittilstved T., EEG μ (μ) rhythm spectra and oscillatory activity differentiate stuttering from non-stuttering adults, *Neuroimage*, **153**, 232 (2017).
38. Jenson D., Bowers A., Hudock D. and Saltuklaroglu T., The Application of EEG μ Rhythm Measures to Neurophysiological Research in Stuttering, *Front Hum Neurosci*, **14**, 1 (2020).
39. Fesenko Yu. A. and Lokhov M. I., Correction of speech disorders in childhood, *Yurayt*, Moscow, 203 (2024).
40. Tichenor S. E. and Yaruss J. S., Stuttering as Defined by Adults Who Stutter, *J Speech Lang Hear Res*, **12**, 4356 (2019).
41. Eysmont E. V., Nacharova M. A. and Nikiforova E. V., Optimization of the psychophysiological state of children with speech and language development delay using EEG biofeedback, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **4**, 214 (2019).
42. Lipatov V. A., Pavlova P. A., Rebreykina A. B. and Sysoeva O. V., Sensorimotor rhythms as neurophysiological correlates of speech perception processes in childhood, *National Psychological Journal*, **3**, 136 (2025).
43. Palva S. and Palva J. M., Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks, *Front Psychol*, **2**, 204 (2011).