

DOI: 10.25629/НС.2024.12.13

УДК:159.91

ВАК: 5.3.6 Клиническая психология

МЕТОД fNIRS В ИССЛЕДОВАНИЯХ МОЗГОВЫХ МЕХАНИЗМОВ РЕЧЕВОГО РАЗВИТИЯ РЕБЕНКА

Ефимова В. Л.¹, Защирина О. В.¹, Королева И. В.²

¹Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена

²Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи
Минздрава РФ

Аннотация

В статье представлен обзор англоязычных исследований мозговых механизмов языкового развития ребенка, проведенных с использованием функциональной инфракрасной спектроскопии ближнего диапазона (fNIRS). По сравнению с другими методами нейровизуализации fNIRS имеет ряд преимуществ для исследований детей. Самое главное из них – это возможность проводить обследование в естественных для детей коммуникативных ситуациях без дискомфорта. Был проведен обзор научной литературе по теме за последние 15 лет. Поиск проводился в поисковой системе PubMed по вышеуказанным ключевым словам и словосочетаниям. Для обзора использованы статьи, которые содержали доказательную и экспериментальную базу по изучаемому вопросу. Было установлено, что наиболее перспективные направления использования fNIRS в области психофизиологии языкового развития: изучение языковой латерализации у младенцев, детей и взрослых; особенности активации мозга ребенка в ответ на различные речевые и неречевые стимулы; закономерности развития языковой коннективности, которые позволяют выявлять детей из группы риска нарушений развития на ранних этапах; изменения языковой коннективности, характерные для детей с дислексией, аутизмом, эпилепсией и другими неврологическими заболеваниями и нарушениями развития; траектория развития языковых сетей мозга у билингвальных детей, детей с нарушениями слуха и детей после кохлеарной имплантации. Данные исследований, содержащихся в обзоре, способствуют углублению понимания мозговых механизмов раннего языкового развития, и прокладывает путь для будущих исследований в этой области. Ограничением методики fNIRS является небольшая глубина проникновения света инфракрасного диапазона в ткани мозга. Это не позволяет изучать с помощью этого метода участие субкортикальных структур в развитии языковой коннективности.

Ключевые слова

fNIRS, функциональная инфракрасная спектроскопия, восприятие речи, дети, латерализация, нейровизуализация, развитие ребенка, нарушения речевого развития, билингвизм, аутизм, младенцы

Введение

Растущее количество детей с нарушениями речевого развития во всем мире приводит к необходимости поиска новых инструментальных методов оценки закономерностей речевого развития ребенка. Важно учитывать, что онтогенетические расстройства речевого развития следует отличать от приобретенных нарушений речи, которые возникают у взрослых. Процесс овладения родным языком начинается еще внутриутробно, когда начинает функционировать

слуховая система плода. Вероятно, риск возникновения тяжелых нарушений речевого развития закладывается уже в этот период. Поэтому особое значение приобретают исследования мозговых механизмов, участвующих в обработке слышимой речи. Современные методы нейровизуализации создают для этого новые возможности, что особенно важно для исследований младенцев, детей раннего возраста и детей с коммуникативными нарушениями. Во всех этих случаях выводы о понимании речи, сделанные на основе особенностей поведения ребенка, могут быть ненадежными.

Изучение нейронных сетей, лежащих в основе восприятия речи, может способствовать лучшему пониманию того, как мозг с удивительной легкостью справляется с этой сложной когнитивной функцией и как быстро усваивается родной язык в младенчестве, если ребенок развивается без особенностей.

Современные инструментальные методы исследований позволяют визуализировать развитие и функционирование языковых сетей мозга. Наиболее известным методом, позволяющим оценить функциональные особенности мозга при восприятии речи является функциональная магнитная томография (фМРТ). Однако у этого метода есть ряд ограничений в тех случаях, когда необходимо проводить обследование детей. Поэтому сейчас достаточно широко в подобных исследованиях используется метод функциональной инфракрасной спектроскопии (fNIRS).

В настоящей статье представлен обзор зарубежных исследований восприятия речи детьми, проведенных с использованием fNIRS.

Цель статьи – провести обзор зарубежных исследований восприятия речи детьми, проведенных с использованием fNIRS, выявить наиболее перспективные направления исследований.

Был проведен обзор научной литературы по теме за последние 20 лет. Поиск проводился в поисковой системе PubMed по вышеуказанным ключевым словам и словосочетаниям. Для анализа использованы статьи, которые содержали доказательную и экспериментальную базу по изучаемым вопросам.

Результаты и обсуждение

fNIRS – это метод изучения функционирования мозга, который имеет множество преимуществ для исследования детей по сравнению с другими методами нейровизуализации. Преимущества этого метода следующие:

- 1) во время проведения исследования прибор не производит шум, это особенно важно, когда оценивается реакция ребенка на слуховые стимулы;
- 2) прибор портативен, что позволяет проводить исследования не в клинике, а в условиях привычных для ребенка;
- 3) прибор обладает относительной устойчивостью к движениям головы, поэтому ребенку не нужно сохранять полную неподвижность;
- 4) fNIRS совместим со слуховыми аппаратами и кохлеарными имплантами;
- 5) возможно синхронизировать fNIRS с другими диагностическими приборами, например, с ЭЭГ;
- 6) для исследования не требуется введение контрастного вещества;
- 7) Отсутствует вредное излучение, поэтому исследование безопасно для ребенка.

Во время проведения fNIRS световой сигнал ближнего инфракрасного диапазона направляется через кожу головы и кости черепа в кору головного мозга. Источники и детекторы инфракрасного цвета вмонтированы в шапочку, которую надевают на испытуемого. Измеряется интенсивность света, который возвращается на кожу головы. Таким образом оценивается изменение концентрации оксигенированного гемоглобина и дезоксигенированного гемоглобина. Эти изменения интерпретируются как косвенное отражение активности нейронов. Единственным ограничением для проведения fNIRS является небольшая глубина проникновения инфракрасного света в ткань мозга, она составляет не более 2-3 см.

Группой авторов в 2024 году был проведен интегративный обзор баз данных Medline, Scopus и LILACS, нацеленный на исследования с использованием fNIRS для изучения особенностей, связанных с речью, и активации коры головного мозга во время слуховой стимуляции у детей без нарушений развития в возрасте от 0 до 3-х лет. Выделены уникальные преимущества fNIRS для педиатрических исследований. Показана способность fNIRS выявлять нейронные корреляты языковой обработки и последовательные этапы овладения языком. Показано, что с самого рождения младенцы проявляют способности, которые закладывают основу для развития речи. Переход от диффузных к специфическим паттернам нейронной активации в значительной степени зависит от языкового опыта, социального взаимодействия и просодических особенностей речи людей, с которыми общаются дети. Этот переход отражает созревание мозговых сетей, участвующих в обработке языковых данных [12].

Было показано, что fNIRS может регистрировать корковые корреляты уровня разборчивости речи для слушателя. Полученные данные соответствовали результатам фМРТ. Была обнаружена связь между уровнем разборчивости речи и активацией в верхних височных областях коры [19].

Данные, полученные с помощью нескольких методов нейровизуализации подтверждают, что левое полушарие играет ведущую роль в понимании речи [6,8,14].

Причем активность левого полушария в ответ на речь наблюдается даже у новорожденных [22].

Также интересно, что левое полушарие у новорожденных активировалось только в ответ на четкую и разборчивую речь. Если же речь была неразборчивой или воспроизводилась в обратном направлении, активация происходила в правом полушарии [24].

Была выдвинута гипотеза о связи между структурой слуховых стимулов и активностью мозга, которая лежит в основе слуховых предпочтений младенцев. С помощью fNIRS оценивалась активность мозга 4-месячных младенцев женского и мужского пола в отношении обращенной к ним речи взрослых. Было установлено, что повышенная активация лобных отделов мозга, особенно префронтальной коры, которая отвечает за эмоции и вознаграждение, избирательно вызывается женским голосом, обращенным к младенцу. Возможно, это объясняет пред-почтительную реакцию младенцев на мать [25].

Исследования, касающиеся влияния пола на функциональную организацию мозга, отвечающую за речь, у детей и взрослых, показывают противоречивые результаты. Данных о гендерных различиях в функциональных языковых системах у новорожденных очень мало. С помощью fNIRS были исследованы гендерные различия в функциональных связях в состоянии покоя в областях мозга, связанных с языком, у новорожденных. Результаты показали, что новорожденные девочки продемонстрировали значительно более сильные функциональные связи между верхней височной извилиной и средней височной извилиной, верхней височной извилиной и зоной Брока в правом полушарии, а также между правой верхней височной извилиной и левой зоной Брока. Тем не менее, статистический анализ не выявил функциональной латерализации областей мозга, связанных с языком, в состоянии покоя в обеих группах. В совокупности эти результаты позволяют предположить, что формирование языковой системы у девочек может начаться раньше, чем у мальчиков, поскольку более прочные функциональные связи в правом полушарии головного мозга новорожденных девочек, вероятно, формировались в результате обработки просодической информации, которая в основном и составляет первый опыт речи новорожденных в утробе матери. Большее воздействие слуховой информации после рождения может привести к усилению функциональных связей в языковой системе в обеих группах, что приводит к более сильной латерализации слева у мальчиков и более сбалансированному доминированию левого полушария у девочек [9].

У детей старше 6 лет задневисочные области коры справа значимо больше реагировали на речь, чем соответствующие области в левом полушарии. Было высказано предположение, что распределение обработки услышанной речи на оба полушария могло бы снизить эффективность этой обработки [18].

Несмотря на все проведенные работы, в настоящее время по-прежнему недостаточно инструментальных исследований латеритизации восприятия речи от младенчества до состояния взрослого человека. Предстоит выяснить, меняется ли языковая латеритизация по мере взросления ребенка и овладения языком.

В одном из исследований дети продемонстрировали более низкую скорость обработки информации, воспринимаемой на слух по сравнению со взрослыми. Было подтверждено, что активация в верхних височных областях, которые принято называть «слуховой корой», значимо связана со способностью к восприятию речи. Более того: чем правильнее ребенок выполнял задания на распознавание слов, тем больше была активация [16].

Это может свидетельствовать о том, что активация связана не с какими-то отдельными свойствами звукового сигнала, а с общей разборчивостью, понятностью речи для испытуемого. Особенно выраженная связь между разборчивостью речи и уровнем активации наблюдалась в левой височной коре. Этот же результат был получен в нескольких работах с использованием fNIRS у младенцев и детей [4,18,24].

Также исследование показало, что прослушивание зашумленной речи, требующее приложения усилий, является более сложной когнитивной задачей, вызывающей активацию лобных областей. Но возможно для детей восприятие речи в целом требует больше усилий по сравнению со взрослыми. За пределами верхней височной коры были другие области, в которых реакция fNIRS зависела от разборчивости речи. Например, области, расположенные над задними средними височными областями в правом полушарии, демонстрировали относительную деактивацию во время обработки предложений (по сравнению с исходным состоянием молчания), причем амплитуда этой деактивации была больше в более сложных условиях прослушивания [16].

Было показано, что как межполушарные гомологичные, так и внутрислошарные связи между областями мозга, отвечающими за язык, значительно усиливаются в течение первого года жизни. Определение траектории развития основных языковых областей у детей с нормальным слухом, измеряемой функциональной коннективностью, потенциально может позволить лучше понять измененную коннективность и ее влияние на задержку или нарушения развития речи у детей [20].

Исследования показывают отличия между детьми и взрослыми в восприятии поэтической речи. Стихи с ярко выраженными просодическими закономерностями легко запоминаются детьми, а гармоничные акустические паттерны облегчают им комплексную обработку фраз. Во время исследования с использованием fNIRS 94 ребенка в возрасте от 2 до 12 лет прослушивали рифмованную речь или прозу. В качестве контрольной группы были отобраны 73 взрослых. Результаты показали, что восприятие поэтических фраз является высокоинтегрированным процессом, характеризующимся меньшей нагрузкой на мозг в обеих группах. Однако ранняя активация крупномасштабной сети была вызвана только в детской группе. Кроме того, поэтическая речь вызывала активацию в областях фонологического кодирования в детской группе, но не в контрольной группе взрослых. Эта активация уменьшалась с возрастом детей. Нейронные реакции на поэтическую речь были положительно связаны с эффективностью речевого общения детей, особенно с беглостью речи и семантическими аспектами. Эти результаты показывают чувствительность нервной системы детей к комплексному восприятию языка, что способствует раннему развитию речи за счет укрепления более сложных языковых сетей в мозге [17].

Билингвизм у ребенка — это достаточно типичный языковой опыт в современном мире, однако относительно мало известно о его влиянии на когнитивное развитие детей и развитие мозга. Теории двуязычия предполагают, что раннее овладение двумя языками может улучшить когнитивные способности детей, особенно те, которые зависят от функционирования лобных долей. В то же время результаты поведенческих исследований содержат много противоречивых данных. Используя fNIRS, исследователи пришли к выводу, что у испано-английских двуязычных детей во время выполнения задания на невербальный контроль внимания наблюда-

лась большая активация левой префронтальной коры по сравнению с аналогичными по возрасту английскими одноязычными детьми. Напротив, у одноязычных детей активация правой префронтальной коры была выше, чем у билингов. Представленные результаты свидетельствуют о том, что раннее двуязычие приводит к значительным изменениям в функциональной организации префронтальной коры головного мозга детей, отвечающей за контроль внимания. Эти данные важны для понимания того, как ранний языковой опыт влияет на когнитивные способности и развитие мозга [3].

Исследования с использованием fNIRS помогают оценить механизмы восприятия речи в тех случаях, когда языковое развитие ребенка отличается от типичного, например при аутизме, дислексии, эпилепсии и других заболеваниях и нарушениях развития.

На данный момент мало что известно о том, как мозг детей с аутизмом обрабатывает речь в реальных социальных ситуациях, несмотря на тот факт, что проблемы с речью, коммуникацией и социальным взаимодействием являются основными признаками расстройства аутистического спектра (РАС). Были исследованы нейронные основы обработки речи в социальных и несоциальных контекстах на выборке из аутичных и нейротипичных детей дошкольного возраста в возрасте от 3 до 6 лет. fNIRS использовалась для измерения реакции мозга детей на "живую речь" экспериментатора в социальном контексте при личном общении, (например, при чтении книги), и "речь в записи", воспроизводимую с помощью аудиозаписи в несоциальном контексте (например, на экране). В группе нейротипичных детей реакция мозга на живую речь в правой височно-теменной области была выше, чем реакция мозга на аудио запись. В группе детей с аутизмом интенсивность реакции мозга не отличалась в зависимости от условий. Группа с аутизмом продемонстрировала в правой в нижней и средней лобных извилинах большую реакцию на записанную речь, чем группа с типичным развитием. В разных группах языковые навыки детей были отрицательно связаны с реакцией мозга на записанную речь в правой нижней и средней лобных извилинах, что позволяет предположить, что обработка записанной речи требует больших когнитивных усилий со стороны детей с более низкими языковыми навыками. Дети, у которых наблюдалась более выраженная реакция мозга на речь, обладали более высоким уровнем развития языковых навыков [21].

Исследования демонстрируют, что у детей с аутизмом часто наблюдается атипичная латерализация активности мозга, связанной с языком, но неясно, какие именно аспекты языка способствуют этому явлению. В одном из исследований использовалась fNIRS для изучения латерализации полушарий путем оценки гемодинамических реакций, связанных с обработкой лингвистических и нелингвистических слуховых стимулов. В исследовании приняли участие группа аутичных детей (средний возраст 5,8 лет) и группа сравнения, состоящая из нейротипичных сверстников (средний возраст 6,5 лет). Детям предъявлялись стимулы, лингвистическая значимость которых систематически снижалась: естественная родная речь, бессмысленная родная речь с искаженным порядком слов, неродная речь и музыка. Результаты показали, что у обеих групп наблюдалась латерализация левого полушария височной доли при прослушивании естественной родной речи. Однако различие между аутичными и нейротипичными детьми проявилось в обработке лингвистической иерархии. В частности, группа сравнения, продемонстрировала снижение латерализации левого полушария по мере снижения лингвистической значимости стимулов. Напротив, в группе детей с аутизмом не наблюдалось подобной закономерности и латерализации при прослушивании искаженной родной речи. Эти результаты свидетельствуют об атипичной нейронной специализации обработки разговорной речи у детей с аутизмом [15].

Игры с куклами могут дать детям возможность практиковать навыки социального взаимодействия, даже когда они играют в одиночку. Internal state language (ISL) – это концепция, согласно которой ребенок во время игры с куклами говорит сам с собой о мыслях и эмоциях других людей. Были опубликованы исследования с использованием fNIRS, которые показали, что височная доля была более активна во время самостоятельной игры детей с куклами, по сравнению с играми на планшете. Использование детьми во время игры речи, обращенной к себе, также было связано с активностью височной доли. Поскольку отличия в социальном взаимодействии

часто наблюдаются при аутизме, исследователей интересовала связь мозговых коррелятов игры в куклы у детей с различными уровнями проявления аутичных черт. С помощью fNIRS были изучены корреляты речи, обращенной к себе, у 57 детей (средний возраст 6,5 лет). Оценка мозговой активности проводилась, когда дети играли в куклы и в компьютерные игры на планшете, как в одиночку, так и с социальным партнером. Также оценивались аутистические черты с использованием стандартизированных опросников для родителей. Было установлено, что левая височная доля была более активна, когда дети играли с куклами или планшетом с социальным партнером (взрослым), а также когда играли с куклами в одиночку, по сравнению с тем, когда играли в одиночку с планшетом. Взаимосвязи между языковыми и нейронными коррелятами социальной обработки были различны в зависимости от степени аутичных черт. У детей с меньшим количеством аутичных черт большая активность височной доли была связана с использованием во время игры речи, обращенной к себе. У детей с более выраженными аутистическими чертами повышенная активность височной доли была связана с разговорами с экспериментатором во время игры. Эти различные пути подчеркивают важность учета нейроразнообразия для оптимальной поддержки развития ребенка посредством игры [13].

Понимание того, как языковые способности и мозговая активность детей, пока не умеющих читать и писать, связаны с будущей способностью к чтению, важно для выявления детей группы риска возникновения проблем с чтением. Дети, еще не овладевшие чтением, уже хорошо владеют разговорной речью и их развивающиеся языковые сети в мозге во многом совпадают с сетями мозга, которые формируются в процессе овладения грамотой. В одном из лонгитюдных исследований изучались языковые способности, нейронная активация и коннективность в языковой сети у детей, не умеющих читать и писать (средний возраст 4,2 года). Проверили, как языковые способности, активация мозга и коннективность повлияют на способность детей к чтению через 1 год. На первом этапе исследования 37 детей прошли стандартизированный набор языковых и когнитивных тестов, с помощью fNIRS регистрировалась мозговая активность при восприятии на слух слов и псевдослов. На втором этапе 28 детей выполнили стандартизированные тесты по чтению. Результаты fNIRS достоверно предсказывали нарушения чтения [11].

Нарушения чтения могут быть связаны с фонологическим дефицитом. Но остается неизвестным, каким образом дефицит проявляется у детей и взрослых. Изучалось, как фонологический дефицит у испытуемых с нарушениями чтения может влиять на восприятие иностранной речи. Было проведено исследование с использованием fNIRS во время которого носители китайского языка (дети и взрослые с нарушениями чтения и без нарушений чтения) воспринимали на слух испанскую речь. Было установлено, что между детьми и взрослыми с нарушениями чтения значимо меньшая разница в показателях fNIRS, чем между детьми и взрослыми контрольной группы без нарушений чтения. Оценивалась активация правой нижней лобной извилины и дорсолатеральной префронтальной коры. Результаты свидетельствуют о замедленном восприятии испанской речи испытуемыми с нарушением чтения. Кроме того, было обнаружено, что паттерны активации в левой средней височной извилине, премоторной, дополнительной двигательной областях могут служить надежными маркерами нарушений чтения [7].

Детская лобная и височная эпилепсия связана с нарушениями речи и структурными и функциональными изменениями головного мозга. Однако нет четкого согласия относительно специфических закономерностей мозговой реорганизации языковых систем у детей с таким диагнозом. Было проведено исследование, в котором приняли участие 20 детей с лобной или височной эпилепсией в возрасте от 6 до 18 лет и 29 здоровых детей. Испытуемые прошли нейропсихологическое обследование, затем одновременно fNIRS и ЭЭГ в состоянии покоя и во время выполнения речевого задания на восприятие. ЭЭГ использовалась для выявления потенциальных субклинических приступов у испытуемых. У детей с эпилепсией выявили значительное снижение коннективности в левом полушарии, а также между полушариями, увеличение коннективности в правом полушарии. Также была выявлена более высокая локальная эффективность правого полушария в группе больных эпилепсией по сравнению с контрольной

группой. У детей с эпилепсией когнитивные показатели были значительно ниже во всех областях по сравнению с их здоровыми сверстниками. Эффективность локальной сети в левом полушарии у пациентов с эпилепсией была отрицательно связана с оценкой когнитивных способностей, что позволяет предположить, что реорганизация мозга в ответ на лобную или височную эпилепсию не обеспечивает оптимального когнитивного развития ребенка [10].

Сочетание fNIRS и ЭЭГ применяется и для обследований детей без эпилепсии, так как позволяет более точно интерпретировать особенности обработки мозгом слуховых и зрительных сигналов [1].

Исследования на основе fNIRS показали свою значимость для детей с нарушениями слуха и детей после кохлеарной имплантации. Не все дети после операции кохлеарной имплантации одинаково успешны в освоении речи. Это может быть связано с тем, что несмотря на восстановление функций периферических отделов слуховой системы, мозг ребенка не может достаточно успешно обрабатывать слышимую речь. Показано, что уровень кортикальной активации левой нижней лобной извилины в ответ на речь может быть маркером внимательного слушания, что создает благоприятные условия для полноценного овладения ребенком речью [26].

fNIRS возможно использовать также в диагностике детей с нарушениями слуха, сравнивая результаты с использованием слухового аппарата и без него. Диагностика поможет правильно программировать слуховые аппараты и кохлеарные импланты, чтобы дать возможность детям максимально эффективно развивать навыки восприятия речи [2,5,23].

Заключение

Исследования механизмов языкового развития ребенка с использованием fNIRS становятся все более распространенными. За время использования этого метода удалось установить, что активация височных областей коры левого полушария, которые принято считать «языковыми», наблюдается уже у младенцев. Однако в том, случае, если обращенная к младенцу речь неразборчивая, происходит активация только левого полушария.

Показано, что обработка речевой информации мозгом детей происходит медленнее, чем у взрослых. Активация префронтальной коры у младенцев более выражена при прослушивании женского голоса, чем мужского. Также было установлено, что у детей в отличие от взрослых наблюдается специфическая активация в ответ на поэтическую речь. В течение первого года жизни ребенка значительно усиливается коннективность, связанная с языком: формируются как межполушарные, так и внутриполушарные специфические связи.

Языковой опыт ребенка безусловно влияет на формирование внутренних связей в мозге, поэтому методика fNIRS оказалась полезной для сравнения того, как развиваются языковые сети при монолингвальном и билингвальном языковом опыте ребенка.

Результаты fNIRS, полученные в дошкольном возрасте, могут предсказывать будущие трудности с овладением письменной речью, которые могут возникнуть у ребенка в школе.

Исследования с использованием fNIRS полезны для разработки эффективных коррекционных маршрутов для детей с особенностями развития. Раннее выявление паттернов функционирования мозга, которые отличаются от типичных, позволит выявлять детей, чье языковое развитие происходит по необычной траектории и добиваться больших успехов в результате терапевтической работы. С помощью fNIRS были выявлены особенности мозговой активности при восприятии речи у детей с аутизмом, детей с височной и лобной эпилепсией, нарушениями чтения.

Еще две группы детей, для полноценного развития речи которых важны результаты fNIRS – это дети с нарушениями слуха и дети, перенесшие операцию кохлеарной имплантации.

Выводы

Исследование fNIRS становится незаменимым средством функциональной нейровизуализации, позволяющим получить представление о динамике овладения языком и связанных с этим этапах развития мозга ребенка. Данные исследований способствуют углублению понимания мозговых механизмов раннего языкового развития, и прокладывает путь для будущих исследований в этой области.

Библиография

1. Alemi R, Wolfe J, Neumann S, Manning J, Towler W, Koirala N, Gracco VL, Deroche M. Audiovisual integration in children with cochlear implants revealed through EEG and fNIRS // *Brain Res Bull.* – 2023- — Dec; 205:110817. doi: 10.1016/j.brainresbull.2023.110817.
2. Anderson C.A., Lazard D.S., Hartley D.E.- Plasticity in bilateral superior temporal cortex: Effects of deafness and cochlear implantation on auditory and visual speech processing // *Hear Res* – 2017. Jan; 343:138-149. doi: 10.1016/j.heares.2016.07.013.
3. Arredondo M.M., Hu X.S., Satterfield T., Kovelman I. Bilingualism alters children's frontal lobe functioning for attentional control. // *Dev Sci.* – 2017- — May;20(3):10.1111/desc.12377. doi: 10.1111/desc.12377.
4. Bortfeld, H., Fava, E., Boas, D.A., (2009) Identifying cortical lateralization of speech processing in infants using near-infrared spectroscopy // *Dev. Neuropsychol.* – 2009. –34, 52–65.
5. Bortfeld H. Functional near-infrared spectroscopy as a tool for assessing speech and spoken language processing in pediatric and adult cochlear implant users. // *Dev Psychobiol.* – 2019. – Apr;61(3):430-443. doi: 10.1002/dev.21818.
6. Corballis, M.C. The evolution and genetics of cerebral asymmetry. // *Philos. Trans. R Soc. B Biol. Sci.* – 2009 – 364, 867–879.
7. Fu Y., Yan X. Mao J., Su H., Cao F. Abnormal brain activation during speech perception and production in children and adults with reading difficulty. // *NPJ Sci Learn.* – 2024 – Aug 24;9(1):53. doi: 10.1038/s41539-024-00266-2.
8. Homae F., (2014) A brain of two halves: insights into interhemispheric organization provided by near-infrared spectroscopy. // *Neuroimage* – 2014 – 85 (Pt 1), 354–362.
9. Hu A., Tong X., Yang L., Shi Z., Long Q., Chen M., Lee Y. Gender differences in the functional language networks at birth: a resting state fNIRS study. // *Cereb Cortex.* – 2024 – May 2;34(5):bhae196. doi: 10.1093/cercor/bhae196.
10. Hüsser A.M., Vannasing P., Tremblay J., Osterman B., Lortie A., Diadori P., Major P., Rosignol E., Roger K., Fourdain S., Provost S., Maalouf Y., Nguyen D.K., Gallagher A. Brain language networks and cognitive outcomes in children with frontotemporal lobe epilepsy. // *Front Hum Neurosci.* – 2023 – Oct 27; 17:1253529. doi: 10.3389/fnhum.2023.1253529.
11. Jasińska K.K., Shuai L., Lau A.N.L., Frost S., Landi N., Pugh K.R. Functional connectivity in the developing language network in 4-year-old children predicts future reading ability. // *Dev Sci.* – 2020 – Mar;24(2): e13041. doi: 10.1111/desc.13041.
12. Januário G.C., Bertachini A.L.L., Escarce A.G., de Resende L.M., de Miranda D.M. Functional near-infrared spectroscopy and language development: An integrative review. // *Int J Dev Neurosci.* – 2024 – Aug 12. doi: 10.1002/jdn.10366.
13. Keating J., Hashmi S., Vanderwert R.E., Davies R.M., Jones C.R.G., Gerson S.A. (2024) Embracing neurodiversity in doll play: Investigating neural and language correlates of doll play in a neurodiverse sample. // *Eur J Neurosci.* – 2024 –Aug;60(3):4097-4114. doi: 10.1111/ejn.16144.
14. Knecht, S., Deppe, M., Dräger, B., Bobe, L., Lohmann, H., Ringelstein, E., Hengningsen, H. Language lateralization in healthy right-handers. // *Brain* 123 – 2000 – (Pt 1), 74–81.
15. Lai B., Yi A., Zhang F., Wang S., Xin J., Li S., Yu L. Atypical brain lateralization for speech processing at the sublexical level in autistic children revealed by fNIRS. // *Sci Rep.* – 2024 – Feb 2;14(1):2776. doi: 10.1038/s41598-024-53128-7.

16. Lawrence R.J., Wiggins I.M., Hodgson J.C., Hartley D.E.H. Evaluating cortical responses to speech in children: A functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study. // *Hear Res.* – 2020 – Mar 1; 401:108155. doi: 10.1016/j.heares.2020.108155.
17. Luo Q., Gao L., Yang Z., Chen S., Yang J., Lu S. Integrated sentence-level speech perception evokes strengthened language networks and facilitates early speech development. // *Neuroimage.* – 2024 – Apr 1; 289:120544. doi: 10.1016/j.neuroimage.2024.120544.
18. Mushtaq, F., Wiggins, I.M., Kitterick, P.T., Anderson, C.A., Hartley, D.E.H. Evaluating time-reversed speech and signal-correlated noise as auditory baselines for isolating speech-specific processing using fNIRS. // *PLoS ONE* – 2019 – 14, 1–22.
19. Mushtaq F., Wiggins I.M., Kitterick P.T., Anderson C.A., Hartley D.E.H. Investigating Cortical Responses to Noise-Vocoded Speech in Children with Normal Hearing Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). // *J Assoc Res Otolaryngol.* – 2021 – Dec;22(6):703-717. doi: 10.1007/s10162-021-00817-z.
20. Paranawithana I., Mao D., McKay C.M., Wong Y.T. Connections between spatially distant primary language regions strengthen with age during infancy, as revealed by resting-state fNIRS. // *J Neural Eng.* – 2023 – Feb 24;20(1). doi: 10.1088/1741-2552/acbb2d.
21. Pecukonis M., Gerson J., Gustafson-Alm H., Wood M., Yücel M., Boas D., Tager-Flusberg H. The Neural Bases of Language Processing During Social and Non-Social Contexts: A fNIRS Study of Autistic and Neurotypical Preschool-Aged Children. // *Res Sq [Preprint]*. – 2024 – Jun 6: rs.3.rs-4450882. doi: 10.21203/rs.3.rs-4450882/v1.
22. Peña, M., Maki, A., Kováčik, D., Dehaene-Lambertz, G., Koizumi, H., Bouquet, F., Mehler, J. // *Sounds and silence: an optical topography study of language* – 2003.
23. Saliba J., Bortfeld H., Levitin D.J., Oghalai J.S. Functional near-infrared spectroscopy for neuroimaging in cochlear implant recipients. // *Hear Res.* – 2016 – Aug; 338:64-75. doi: 10.1016/j.heares.2016.02.005.
24. Sato, H., Hirabayashi, Y., Tsubokura, H., Kanai, M., Ashida, T., Konishi, I., Uchida-Ota, M., Konishi, Y., Maki, A. Cerebral hemodynamics in newborn infants exposed to speech sounds: a whole-head optical topography study. // *Hum. Brain Mapp.* – 2012 – 33, 2092–2103.
25. Sulpizio S., Doi H., Bornstein M.H., Cui J., Esposito G., Shinohara K. fNIRS reveals enhanced brain activation to female (versus male) infant directed speech (relative to adult directed speech) in Young Human Infants. // *Infant Behav Dev.* – 2018 – Aug; 52:89-96. doi: 10.1016/j.infbeh.2018.05.009.
26. Zhou X.Q., Zhang Q.L., Xi X., Leng M.R., Liu H., Liu S., Zhang T., Yuan W. Cortical responses correlate with speech performance in pre-lingually deaf cochlear implant children. // *Front Neurosci.* – 2023 – Jun 2; 17:1126813. doi: 10.3389/fnins.2023.1126813.

Об авторах

Ефимова Виктория Леонидовна, доктор психологических наук, доцент, профессор кафедры «Возрастной психологии и педагогики семьи», ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена», ORCID: 0000-0001-7029-9317, prefish@ya.ru

Защиринская Оксана Владимировна, доктор психологических наук, доцент, профессор кафедры «Клинической психологии и психологического консультирования», ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена», ORCID: 0000-0002-2666-3529, o.zashhirinskaja@spbu.ru

Королева Инна Васильевна, доктор психологических наук, профессор, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи Минздрава РФ, ORCID 0000-0001-8909-4602, 21074@mail.ru

THE fNIRS METHOD IN STUDIES OF BRAIN MECHANISMS OF CHILD SPEECH DEVELOPMENT

Efimova V. L.¹, Zashchirinskaya O. V.¹, Koroleva I.V.²

¹Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen

²The St. Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech of the Ministry of Health of the Russian Federation

Abstract

The article presents an overview of English-language studies of the brain mechanisms of a child's language development conducted using functional near-range infrared spectroscopy (fNIRS). Compared to other neuroimaging methods, fNIRS has a few advantages for research in children. The most important of them is the opportunity to conduct an examination in natural communicative situations for children without discomfort. A review of the scientific literature on the topic over the past 15 years has been conducted. The search was conducted in the PubMed search engine for the above-mentioned keywords and phrases. For the review, articles were used that contained evidence and experimental base on the issue under study. It was found that the most promising areas of fNIRS use in the field of psychophysiology of language development are: the study of language lateralization in infants, children and adults; features of activation of the child's brain in response to various speech and non-speech stimuli; patterns of development of language connectivity, which will identify children at risk of developmental disorders at early stages; changes in language connectivity characteristic of children with dyslexia, autism, epilepsy and other neurological diseases and developmental disorders; the trajectory of the development of language networks of the brain in bilingual children, children with hearing impairments and children after cochlear implantation. The research data contained in the review contributes to a deeper understanding of the brain mechanisms of early language development and paves the way for future research in this area. The limitation of the fNIRS technique is the small depth of penetration of infrared light into brain tissue. This does not allow us to study the participation of subcortical structures in the development of linguistic connectivity using this method.

Keywords

fNIRS, functional infrared spectroscopy, speech perception, children, lateralization, neuroimaging, child development, speech disorders, bilingualism, autism, infants