

На правах рукописи



Рогачёв Антон Олегович

**Психофизиологические механизмы развития высокоуровневых процессов
понимания языка и речи в онтогенезе**

5.12.2. Междисциплинарные исследования мозга

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата психологических наук

федеральная территория «Сириус»

2026

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

Научный руководитель:

Сысоева Ольга Владимировна

кандидат психологических наук

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

Защита состоится 29 июня 2026 года в 14:00 на заседании диссертационного совета НТУ.5.12.2.09 на базе АНОО ВО «Университет «Сириус» по адресу: 354340, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., д. 1.

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

Автореферат разослан «28» мая 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат психологических наук



Карпова Н. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Речь — форма взаимодействия людей при помощи языка — системы знаков, соотносящей понятийное (семантическое) содержание с их звучанием и написанием. Также, речь — это высшая психическая функция, играющая ключевую роль в когнитивной деятельности человека. Речь опосредует многие психические функции человека — восприятие, память, внимание и мышление. От планомерного и гармоничного развития речи в детстве во многом зависит как когнитивное развитие, так и дальнейший жизненный путь ребенка, так как речь влияет на способности к обучению и получению образования, овладение профессиональными навыками и социализацию [Dubois и др., 2020]. Активное развитие речи происходит в дошкольном и младшем школьном возрастах, когда ребенок учится говорить, писать и читать, общаться с другими людьми, а также начинает осваивать школьную программу. В этом же возрастном диапазоне наиболее динамично развиваются и мозговые системы понимания и продуцирования речи, связанные с рецептивной речью — способностью к пониманию речи [Castles, Rastle, Nation, 2018; Kuhl, 2004]. Выявление психофизиологических механизмов рецептивной речи и их развития в онтогенезе является важной задачей современной психофизиологии, что имеет как фундаментальную, так и практическую актуальность, связанную с разработкой объективных методов ранней диагностики нарушений развития речи.

Степень научной разработанности темы исследования

К настоящему времени, при помощи широкого набора методов нейровизуализации накоплено большое количество данных о психофизиологических механизмах рецептивной речи и об их развитии на разных этапах онтогенеза. Так, показаны мозговые системы, участвующие в обработке различных компонентов речи — акустического, связанного с декодированием и извлечением лингвистической информации из аудиосигнала, фонетического, связанного с декодированием отдельных фонем и их сочетаний, и лексико-семантического, связанного с обработкой лингвистических и семантических характеристик речи [Di Liberto et al., 2023; Hickok, Poeppel, 2007; Kuhl, 2010, 2004]. Однако зачастую эти данные вступают в противоречия друг с другом [Seyednozadi, Pishghadam, Pishghadam, 2021; Junge и др., 2021], что может быть связано с методическими причинами. Так, наиболее часто используемый подход — метод вызванных потенциалов — требует многократного предъявления однотипных, выровненных по различным характеристикам стимулов, что может исказить получаемые результаты и влиять на их интерпретации. В последние годы активно развиваются методические подходы, использующие в качестве стимульных материалов натуралистические, естественные записи речи, что позволяет проводить анализ психофизиологических механизмов обработки речи на разных уровнях, но в условиях, приближенных к экологически валидным [Alday, 2019; Crosse и др., 2021, 2016; Hamilton, Huth, 2020] — методология нейронного отслеживания. Несмотря на кратное увеличение количества исследований с применением такой методологии в последние годы, в том числе с участием детей [Van Hirtum и др., 2023; например, Di Liberto et al., 2023; Kalashnikova et al., 2018], недостаточно изученными остаются возрастные группы от 3 до 6 лет, включающие в себя периоды активного развития речи. Кроме того, не проводилось исследований, которые анализировали бы нейронное отслеживание естественной речи с уровнем развития способностей к пониманию речи.

Отдельным направлением работ в области возрастной психофизиологии являются исследования статистического научения — способности к имплицитному извлечению статистических закономерностей в окружающем мире. Обзоры и мета-анализы демонстрируют, что этот базовый процесс научения играет значительную роль в освоении языка, так как оно требует усвоения большого количества правил звукобуквенного соответствия, грамматических правил и т.д. [Schmalz, Altoè, Mulatti, 2017; Schmalz, Treccani, Mulatti, 2021]. Кроме того, статистическое научение и нейронное отслеживание естественной

речи имеют общую нейрофизиологическую основу [Sjuls, Harvei, Vulchanova, 2023], что открывает перспективы интеграции этих данных.

Так же, как и в исследованиях нейронного отслеживания естественной речи, в литературе представлено значительное количество данных о развитии и механизмах статистического научения у детей разных возрастов, однако малоизученным остаются дошкольные возраста (от 3 до 6 лет). Также не проводилось исследований, которые бы охватывали широкие возрастные периоды от дошкольного до младшего школьного возрастов — предыдущие работы фокусировались в основном или на младенцах [Saffran и др., 1996], или на детях младшего и среднего школьного возрастов [Arciuli и Simpson, 2011; van Witteloostuijn и др., 2019].

Цель и задачи

Цель исследования — изучить вклад статистического научения и нейронного отслеживания естественной речи в динамику развития психофизиологических механизмов рецептивной речи на разных этапах онтогенеза (у детей от 3 до 9 лет).

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Изучить психофизиологические механизмы обработки акустического и семантического компонентов естественной речи у детей.
2. Изучить возрастную динамику зрительного статистического научения у детей.
3. Интегрировать полученные результаты в психофизиологическую модель развития рецептивной речи.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является рецептивная речь. Предметом исследования является вклад статистического научения и нейронного отслеживания естественной речи в развитие психофизиологических механизмов рецептивной речи у детей.

Гипотезы исследования

1. Обработка статистически предсказуемого стимула будет более эффективной, чем обработка статистически непредсказуемого стимула в парадигме зрительного статистического научения.
2. Количество правильных узнаваний триплетов, предъявленных в ходе зрительного статистического научения, превзойдет случайный уровень, что будет свидетельствовать об успешном усвоении статистических закономерностей стимулов.
3. Параметры зрительного статистического научения будут коррелировать с возрастом детей и с их уровнем развития рецептивной речи.
4. Выраженность нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи будет коррелировать с возрастом детей и с их уровнем развития рецептивной речи.
5. Параметры зрительного статистического научения и нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи будут коррелировать друг с другом.

Научная новизна

1. Впервые проведено психофизиологическое исследование в парадигме нейронного отслеживания естественной речи на русскоязычных участниках.
2. Впервые на выборке детей в возрасте от 3 до 9 лет показано, что нейронное отслеживание акустического и семантического компонентов естественной речи связана с возрастом детей и с их уровнем развития рецептивной речи.
3. Показаны особенности имплицитных и эксплицитных мер зрительного статистического научения (время реакции и количество правильных распознаваний последовательностей стимулов) на выборке с широким возрастным диапазоном от 3 до 9 лет.
4. Предложена модель, интегрирующая процессы нейронного отслеживания естественной речи и статистического научения на основе их общих психологических и физиологических механизмов, демонстрирующая их развитие в онтогенезе.

Теоретическая значимость работы

В работе продемонстрированы мозговые механизмы нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи у детей в возрасте от 3 до 9 лет, а также особенности зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет. Полученные результаты вносят вклад в понимание мозговых механизмов обработки естественной речи у детей и их связи с развитием рецептивной речи, а также в понимание психологических механизмов зрительного статистического научения. Кроме того, модель, интегрирующая процессы нейронного отслеживания и статистического научения на основании их общих психологических и физиологических механизмов, развивает представления о вкладе этих процессов в развитие рецептивной речи у детей.

Практическая значимость работы

Полученные результаты могут быть применены в разработке неинвазивных психофизиологических методик оценки мозговых механизмов рецептивной речи в экспериментально простых, экологически валидных условиях. Классические когнитивно-поведенческие методы оценки развития речи требуют непосредственного взаимодействия специалиста и оцениваемого ребенка, что может быть затруднено у детей из особых клинических групп; в свою очередь, подобные методики позволят проводить оценку рецептивной речи без вербального взаимодействия с ребенком, и при этом смогут дать также информацию о развитии мозговых механизмов восприятия речи. Результаты исследования могут быть востребованы в фундаментальных исследованиях и практических задачах, например, в дошкольном и начальном школьном образовании как средство диагностики рецептивной речи.

Методология и методы исследования

Исследование имеет методологическую основу в концепциях высших психических функций Л. С. Выготского, теории функциональных систем П. К. Анохина, системной психофизиологии В. Б. Швыркова и Ю. И. Александрова, теории прогностического кодирования К. Фристана. Также исследование опирается на современные эмпирические работы и теоретические представления в области психофизиологии речи (Д. Поппель, Н. Динг, Э. Лалор, Л. Мейер, Л. Уильямс, Дж. М. Ди Либерто, О. В. Сысоева, А. Б. Ребрейкина) и статистического научения (Дж. Сафран, Л. Богартс, Дж. Арчули).

Методы исследования:

1. Метод электроэнцефалографии (32-канальная система actiCHamp Plus (BrainProducts GmbH)).
2. Шкалы дошкольного языкового развития 5-й версии (Preschool Language Scales, Fifth Edition, PLS-5) (Talantseva и др., 2022).
3. Когнитивно-поведенческие методики (экспериментальная парадигма, направленная на оценку способности к зрительному статистическому научению).

Положения, выносимые на защиту

1. ИмPLICITные меры зрительного статистического научения (время реакции на целевые стимулы с разной предсказуемостью) у детей от 3 до 9 лет не изменяются с возрастом и остаются стабильными.
2. ЭкPLICITные меры зрительного статистического научения (количество правильных ответов при распознавании последовательностей стимулов) увеличивается с возрастом, что опосредуется общим когнитивным и психологическим развитием.
3. У детей в возрасте от 3 до 9 лет уровень нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи увеличивается с возрастом и с уровнем развития рецептивной речи.
4. Зрительное статистическое научение у детей является активным, а не полностью пассивным имPLICITным процессом, который вовлекает селективное внимание и формирует структуру деятельности в зависимости от экспериментальной задачи.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов определяется значительным и достаточным для выбранных методов статистического анализа количеством наблюдений, использованием в работе современных нейрофизиологических методов исследования, применением адекватных методов сбора, обработки данных и статистического анализа. Материалы и результаты диссертационного исследования были представлены на научных семинарах и конференциях: на международной конференции «Volga Neuroscience Meeting — 2023» (г. Нижний Новгород, 2023), на конференции «Междисциплинарные исследования проблем развития и здоровья ребенка» (г. Москва, 2023), на международной конференции «Нейроинформатика — 2023» (г. Москва, 2023), на Семинаре по когнитивным исследованиям Департамента психологии НИУ ВШЭ (г. Москва, 2023), на VI «Международном форуме по когнитивным нейронаукам «Cognitive Neuroscience — 2023» (г. Екатеринбург, 2023), на «X Международной конференции по когнитивной науке» (г. Пятигорск, 2024), на VIII «Международном форуме по когнитивным нейронаукам «Cognitive Neuroscience — 2025» (г. Екатеринбург, 2025), на Научном семинаре Центра языка и мозга НИУ ВШЭ «Нейролингвистический четверг» (г. Москва, 2025), а также неоднократно обсуждались на семинарах Научного центра когнитивных исследований Университета «Сириус».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 89 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 143 наименования. Работа иллюстрирована двумя таблицами и 16 рисунками, имеет три приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В **первой главе «Обзор литературы»** представлен обзор современных исследований психофизиологических механизмов процессов рецептивной речи. Раскрывается понятие речи как высшей психической (психологической) функции, имеющей центральный характер для человеческой деятельности, опосредующей взаимодействия человека с окружающим миром и с самим собой [Выготский, 1984, 2018]. Исходя из роли речи как высшей психической функции, делается вывод, что развитие речи в целом и развитие процессов понимания устной речи в частности играют важную и ключевую роль в психологическом развитии ребенка. Современные психофизиологические исследования с применением различных методов нейровизуализации позволили идентифицировать ключевые нейронные сети и мозговые системы, которые обеспечивают восприятие речи и обработку различных ее компонентов (связанных с физической формой сигнала, с фонетическими, лексическими и семантическими особенностями речи) [Fedorenko, Ivanova, и др., 2024; Fedorenko, Piantadosi, и др., 2024; Friederici, 2011, 2017; Hickok и Poeppel, 2007]. Эти мозговые системы начинают формироваться на самых ранних этапах онтогенеза, еще в младенческом возрасте, когда мозговая активность проявляет специфическую чувствительность именно к человеческой речи [Dehaene-Lambertz и др., 2002]. В ходе онтогенеза мозговые системы приобретают специализацию на фонетическую, просодическую и статистическую структуры родного языка [Kuhl, 2004, 2010].

Одним из наиболее популярных подходов к изучению психофизиологических механизмов рецептивной речи является электроэнцефалография (ЭЭГ) – метод неинвазивной регистрации электрической активности мозга. Несмотря на преимущества данного метода, он накладывает определенные методические ограничения на дизайны экспериментов. Так, требуется многократное предъявление однотипных стимулов, что может вызвать эффекты запоминания [Marie и Golestani, 2017]. Кроме того, такие стимулы обладают невысокой экологической валидностью – видом валидности эксперимента, рассматривающим отношения

между объектами реального мира и их репрезентациями в исследованиях [Fahmie и др., 2023]. В совокупности, указанные методические проблемы могут приводить к рассогласованиям и противоречиям в данных экспериментальных исследований, что выявляют систематические обзоры [Seyednozadi и др., 2021; Van Petten и Luka, 2012], а использование «лабораторных» стимулов затрудняет понимание механизмов работы головного мозга в естественных, а не только экспериментальных условиях.

В ответ на указанные методические сложности, в последние годы набирают популярность исследования нейронного отслеживания (neural tracking) – феномена, связанного с синхронизацией между мозговой активностью и различными компонентами естественных, натуралистических речевых стимулов при их восприятии [Crosse и др., 2021; Ding и Simon, 2014; Lalor и Foxe, 2010; Obleser и Kayser, 2019]. В области нейролингвистики, исследования нейронного отслеживания естественной речи демонстрируют мозговые механизмы обработки акустического, фонетического и лексико-семантического компонентов речи [Broderick и др., 2018, 2022, Di Liberto и др., 2015, 2018, 2023, Ding и Simon, 2014, Ghitza и др., 2013, Kösem и др., 2023, Van Hirtum и др., 2023, Daube и др., 2019]. Исследования предполагают, что нейронное отслеживание естественной речи является иерархическим процессом, вклад в который вносит отслеживание всех указанных компонентов речи, находящихся в сложных, реципрокных взаимодействиях друг с другом [Gwilliams, 2020, Gwilliams и др., 2023, Karunathilake и др., 2023, Kazanina и Tavano, 2023b, 2023a, Klimovich-Gray и Molinaro, 2020, Meyer, 2018, Meyer и др., 2020a, 2020b]. Существует ограниченное количество исследований нейронного отслеживания естественной речи с участием детей [Araújo и др., 2024, Di Liberto и др., 2018, 2023, Jessen и др., 2019, 2021, Kalashnikova и др., 2018, Keshavarzi и др., 2022, 2024, Van Hirtum и др., 2023], однако возрастные диапазоны, покрывающие периоды речевого развития (в частности, от 3 до 9 лет), остаются малоизученными.

Другим процессом, вносящим вклад в развитие рецептивной речи, является статистическое научение – способность к имплицитному, неосознаваемому извлечению статистических закономерностей из сенсорного входа [Bertels и др., 2015; Perruchet и Pacton, 2006; Saffran и др., 1996]. Исследования демонстрируют, что статистическое научение является модально-неспецифическим, общим механизмом научения, который лежит в основе таких психических функций, как внимание, память и речь. Отдельным направлением исследования является изучение связи между статистическим научением и речевым развитием, так как освоение языка требует освоения большого количества правил и соответствий [Van Witteloostuijn и др., 2019]. Кроме того, на нейрофизиологическом уровне статистическое научение связывают с нейронным отслеживанием [Arnal и Giraud, 2012; Sjuls и др., 2023], так как оба вызывают ритмическую активность головного мозга на частотах предъявления как отдельных компонентов стимулов, так и более высокоорганизованных сенсорных единиц (например, для речи – слова и словосочетания, для статистического научения – отдельные стимулы и группы стимулов, основанные на их статистической временной близости). Несмотря на большое количество исследований развития статистического научения, возрастная группа от 3 до 9 лет также остается малоизученной.

Во второй главе «Материалы и методы исследования» представлены материалы и методы исследования, сгруппированные по отдельным экспериментальным задачам работы. Первый эксперимент посвящен исследованию особенностей зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет. В исследовании приняли участие 96 детей (43 девочки, 53 мальчика, средний возраст $6 \pm 1,38$ лет). Все участники были носителями русского языка как родного, с нормальным или скорректированным до нормального зрением. У участников проводилась оценка уровня речевого развития при помощи методики Preschool Language Scales 5 версии (PLS-5) [Talentseva и др., 2022]; методика предоставляет данные об уровне развития рецептивной речи (способности к пониманию обращенной речи) и экспрессивной речи (способности говорить).

Экспериментальная парадигма представляла собой модифицированную задачу, направленную на изучение зрительного статистического научения [van Witteloostuijn и др., 2019a, b]. Экспериментальная парадигма включала в себя две фазы. Первая фаза, или имплицитная фаза, включала в себя предъявление по одному изображений нарисованных инопланетян длительностью 1 с. Всего было 12 разных стимулов, далее для краткости обозначаемых А, В, С, ... J, К, L. Стимулы были сгруппированы в триплеты (ABC, DEF, GHI, JKL) на основании переходных вероятностей между ними: внутри триплета переходная вероятность всегда равнялась 1, т.е. порядок следования стимулов был фиксированным. Триплеты сменялись с вероятностью 0,33, но два одинаковых триплета никогда не следовали друг за другом. Два стимула, D и I (в начале триплета DEF и в конце триплета GHI соответственно) были целевыми; участникам ставилась задача нажимать на пробел при предъявлении этих стимулов. Стимул D был определен как непредсказуемый, т.к. он всегда следует в начале триплета, а стимул I – как предсказуемый, т.к. его положение в триплете фиксированно. Имплицитная фаза состояла из четырех экспериментальных блоков, содержащих по шесть повторений каждого триплета (24 повторения в блоке, всего в эксперименте 96 повторений каждого триплета и 288 предъявлений каждого стимула). Участникам ставилась задача «следить за инопланетянами, выстроившимися в очередь на космический корабль, и давать специальное разрешение двум инопланетянам». Перед началом имплицитной фазы предъявлялась фаза ознакомления, в которой участники знакомились со стимульными материалами и с тем, как выполнять экспериментальную задачу. Схема имплицитной фазы представления на Рисунке 1.

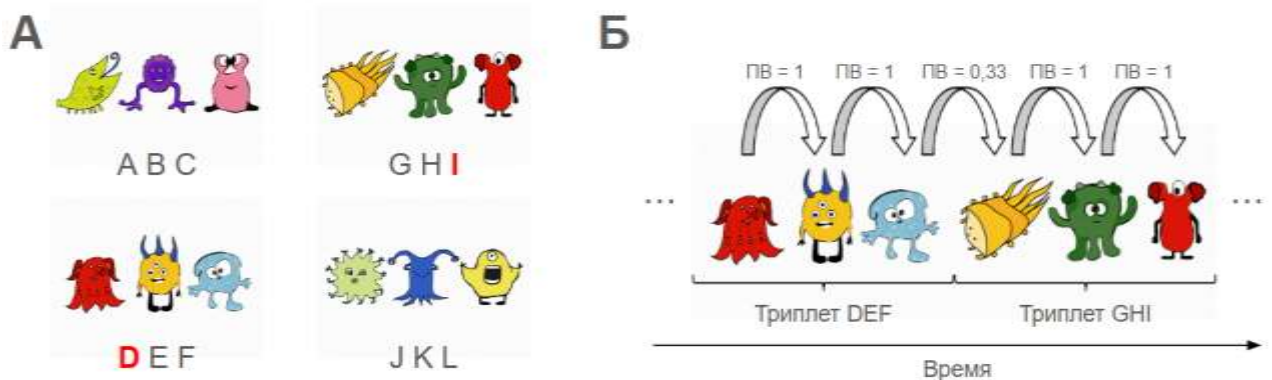


Рисунок 1 — Стимульные материалы и схема эксперимента. (А) Стимулы, использованные в эксперименте и сгруппированные в четыре триплета на основании переходных вероятностей.

Два целевых стимула, предсказуемый (I) и непредсказуемый (D) выделены красным. (Б)

Схема эксперимента: стимулы, сгруппированные в триплеты, предъявлялись на экране по одному друг за другом. ПВ — переходная вероятность между стимулами.

Второй фазой экспериментальной парадигмы была эксплицитная фаза, в которой проверялись результаты научения. В этой фазе участникам одновременно предъявлялись два триплета: корректный и ложный. Ставилась задача при помощи клавиш выбрать ту группу инопланетян, которая действительно прошла на космический корабль. Всего было 16 пар инопланетян.

Анализ данных включал в себя несколько этапов. На первом этапе была проведена предобработка данных: на основании индивидуальных ответов участников на целевые стимулы было рассчитано количество правильных ответов и ложных тревог (ситуаций, когда на экране представлен любой нецелевой стимул, но при этом регистрируется нажатие на пробел). Индивидуальные значения времени реакции на целевые стимулы в тех блоках, где количество ложных тревог превышало 8, были удалены из анализа (в среднем, удалено 8,85% данных). В качестве имплицитных мер статистического научения были выбраны количество правильных ответов на предсказуемый и непредсказуемый целевые стимулы, сырое время

реакции на целевые стимулы, а также стандартизованная разность времени реакции между целевыми стимулами. В качестве эксплицитных мер статистического научения использовались общее количество правильных ответов и количество правильных распознаваний отдельных триплетов.

Данные были извлечены из индивидуальных лог-файлов при помощи скриптов, написанных в среде Jupyter Notebook. Статистический анализ проводился в RStudio версии 2024.04.1 [RStudio Team, 2020]. Для исследования того, как факторы экспериментального блока и предсказуемости целевого стимула влияют на имплицитные и эксплицитные меры СН, был проведен дисперсионный анализ с повторными измерениями. Для апостериорных попарных тестов применялся t-критерий Стьюдента. Критический уровень значимости $\alpha = 0,05$ был установлен для двусторонних статистических тестов. В апостериорных тестах для решения проблемы множественных сравнений была применена поправка Бонферрони.

Второй эксперимент посвящен исследованию связи нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи со способностью к пониманию речи у детей. В исследовании приняли участие 56 детей (33 мальчика, 23 девочки, средний возраст $5,63 \pm 1,21$ лет). Все участники были носителями русского языка как родного, с нормальным или скорректированным до нормального зрением, без истории неврологических или психиатрических заболеваний. У участников также оценивался уровень развития рецептивной речи при помощи методики PLS-5.

В ходе исследования проводилась регистрация 32-канальной ЭЭГ (система BrainProducts actiCHamp, Brain Products GmbH, Германия). Референсный электрод был размещен на позиции FCz. Участники находились в экранированной камере с шумоизоляцией и сидели за столом на расстоянии около 70 см от экрана монитора. В ходе исследования участники прослушивали аудиозаписи речевых стимульных материалов, заранее записанных женщиной-диктором и предобработанных в соответствии с методическими рекомендациями (произведено удаление интервалов тишины длительностью более 500 мс, а также удалены посторонние шумы; предобработка производилась в программе Audacity®) [Crosse и др., 2021]. Стимульные материалы включали в себя детский рассказ про ежей (292 с, 659 слов), сказку «Кирпич и воск» (182 с, 395 слов), сказку «Золотая утка» (337 с, 669 слов). В начале сбора данных шесть детей вместо сказки «Золотая утка» слушали рассказ про вомбатов (301 с, 604 слова), однако затем экспериментальный протокол был изменен из-за возможных сложностей в восприятии двух повествовательных текстов о животных. Таким образом, общая длительность прослушивания аудиостимулов и регистрации ЭЭГ составила около 14 минут. Восемь детей из выборки прослушали только два стимула из трех из-за усталости в ходе эксперимента. Параллельно с прослушиванием аудиостимулов, детям предъявлялся видеоряд (специально скомпилированные видео с ежами/вомбатами для рассказов про ежей и вомбатов соответственно, и нерелевантные видео с абстрактными движениями для поддержания внимания на остальные аудиостимулы). Детям давалась инструкция прослушать сказку/рассказ про животных, чтобы затем ответить на вопросы. Для каждого стимула была составлена анкета, включающая в себя 8 закрытых вопросов о содержании стимулов с выбором вариантов «да/нет». Целью использования данной анкеты было поддержание мотивации детей в ходе эксперимента и поверхностная проверка внимания и понимания прослушанных текстов. Аудиостимулы были записаны с частотой дискретизации 44,1 кГц и предъявлялись через наушники Panasonic RP-HS46E-K на громкости 60 дБ. Аудиостимулы и соответствующий видеоряд предъявлялись при помощи программного обеспечения Presentation® (Neurobehavioral Systems, Inc., Berkeley, CA).

Предобработка ЭЭГ-данных производилась при помощи библиотеки MNE Python версии 1.5 [Gramfort и др., 2013]. Предобработка данных включала в себя фильтрацию данных (1–15 Гц), интерполяцию плохих каналов, удаление глазодвигательных артефактов при помощи метода независимых компонент. Дальнейший анализ ЭЭГ-данных производился в среде MATLAB версии 2021b при помощи функций библиотеки mTRF Toolbox [Crosse и др., 2016]. Производилось вычисление функции временного отклика (ФВО; temporal response

function, TRF) — линейного фильтра, соотносящего изменения в компоненте стимула, с изменениями в электрофизиологическом сигнале при помощи линейной свертки. ФВО вычисляется методом обратной корреляции и оптимизируется при помощи перекрестной кросс-валидации с поочередным исключением каждого элемента, а также с помощью регуляризации, необходимой для исключения переобучения модели на конкретном наборе данных. Конечной целью оптимизации модели ФВО является подбор таких параметров, при которых коэффициент корреляции Пирсона между реальными ЭЭГ-данными и данными, которые предсказывает модель (далее — коэффициент прогнозирования), будет максимальным [Crosse и др., 2016].

Для вычисления ФВО использовалось временное окно -200–600 мс. Анализ включал акустический компонент (огibaющая аудиосигнала, преобразование Гильберта) и семантический компонент (семантические несоответствия между словами). Семантические несоответствия вычислялись на основе векторной модели word2vec [Mikolov и др., 2013; Mikolov и др., 2017], предобученной на русскоязычных текстах. Процедура включала лемматизацию слов, извлечение 300-мерных векторов word2vec и вычисление семантического несоответствия как 1 минус коэффициент корреляции Пирсона между вектором слова и средним вектором предыдущих слов [Broderick и др., 2018]. Для первого слова предложения использовался контекст предыдущего предложения (1 минус среднее значение векторов слов предыдущего предложения), а для первого слова текста установлено значение 1 [Broderick и др., 2018]. Значения семантического несоответствия помещались в вектор той же длины, что и матрица ЭЭГ-данных, со значениями семантического несоответствия в индексах, соответствующим временным точкам начала каждого слова, и нулями во всех остальных индексах. Иллюстрация акустического и семантического компонентов стимулов представлена на Рисунке 2.

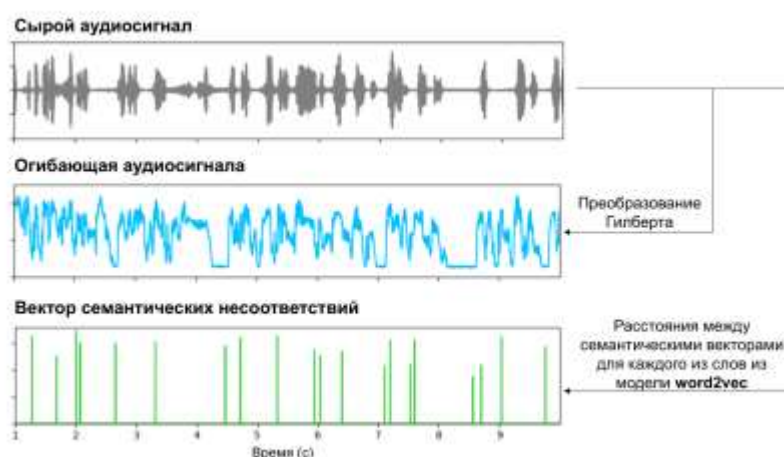


Рисунок 2 — Акустический (огibaющая аудиосигнала) и семантический (семантическое несоответствие) компоненты речевых аудиостимулов, использованных в анализе. Для целей визуализации взяты только первые 10 с одного стимула, а частота дискретизации сырого аудиосигнала понижена до 500 Гц.

Статистический анализ производился в RStudio версии 2023.03.01 [RStudio Team, 2020]. Также, для проверки статистической значимости моделей ФВО, в соответствии с методическими рекомендациями [Crosse и др., 2016, 2021], были рассчитаны «нулевые» модели ФВО, в которые на вход подавались те же стимульные материалы, но развернутые во времени («зеркальная речь»).

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

Первая часть работы, направленная на изучение особенностей зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет, показала эффекты статистического научения, выраженные в увеличении времени реакции на непредсказуемый стимул от первого блока к последующим, и в стабильном времени реакции на предсказуемый стимул в ходе имплицитной фазы эксперимента (факторы типа стимула: $F(1; 90) = 35,701$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,08$; экспериментального блока: $F(3; 242) = 3,992$, $p = 0,01$, $\eta^2 = 0,01$; взаимодействие факторов: $F(3; 248) = 11,44$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,02$) (Рисунок 3).

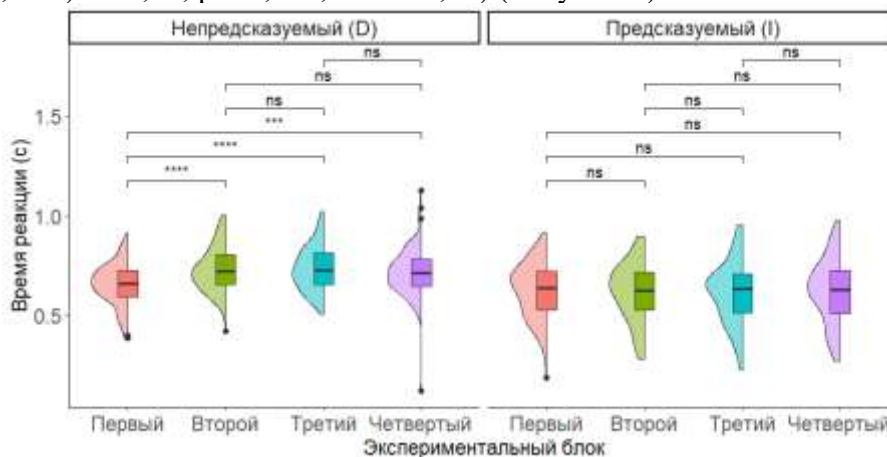


Рисунок 3 — Скрипичные графики среднего времени реакции на целевые предсказуемый (I) и непредсказуемый (D) стимулы в четырех экспериментальных блоках имплицитной фазы статистического научения. Обозначения: *** – $p < 0,001$, **** – $p < 0,0001$, ns – не значимо.

Анализ количества ложных тревог в каждом из экспериментальных блоков показал отсутствие статистически значимых различий между блоками ($F(3; 285) = 0,65$, $p = 0,58$). Количество ложных тревог также не коррелировало с возрастом участников ни в одном из экспериментальных блоков. Количество правильных ответов статистически значимо уменьшилось от первого блока к третьему и четвертому для непредсказуемого стимула и от первого блока к четвертому для предсказуемого стимула (факторы типа стимула: $F(1; 96) = 22,227$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,02$; экспериментального блока $F(3; 285) = 6,982$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,05$; взаимодействие этих факторов ($F(3; 285) = 2,9$, $p = 0,035$, $\eta^2 = 0,01$). Количество правильных ответов на непредсказуемый стимул статистически значимо коррелировало с возрастом участников во втором ($R = 0,44$, $p_{adj} < 0,001$), третьем ($R = 0,34$, $p_{adj} = 0,006$) и четвертом экспериментальных блоках ($R = 0,39$, $p_{adj} = 0,0007$). Для предсказуемого стимула статистически значимые корреляции с возрастом обнаружены в первом ($R = 0,28$, $p_{adj} = 0,04$), третьем ($R = 0,35$, $p_{adj} = 0,003$) и четвертом блоках ($R = 0,37$, $p_{adj} = 0,002$).

Стандартизованная разность времени реакции между целевыми стимулами показала статистически значимое увеличение от первого блока к последующим ($F(3; 233) = 8,9$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,04$). Не выявлено статистически значимой корреляции CPBP с возрастом участников (первый блок: $R = 0,06$, $p = 0,53$; второй блок: $R = 0,043$, $p = 0,698$; третий блок: $R = -0,05$, $p = 0,62$; четвертый блок: $R = 0,017$, $p = 0,87$). Также, не были выявлены статистически значимые корреляции между сырыми баллами по шкале рецептивной речи методики PLS-5 и стандартизованной разностью BP между целевыми стимулами (первый блок: $R = -0,015$, $p = 0,9$; второй блок: $R = -0,032$, $p = 0,79$; третий блок: $R = 0,001$, $p = 0,99$; четвертый блок: $R = -0,13$, $p = 0,26$).

В эксплицитной фазе первого эксперимента анализировались общее количество правильных ответов и количество правильных распознаваний отдельных триплетов в задаче на выбор правильного триплета. Общее количество правильных распознаваний триплетов находилось на уровне случайности в 50% ($t = 1,87$, $p = 0,06$). Результаты показали, что среднее количество распознаваний триплетов ABC, DEF и JKL не превышало уровень случайности (среднее \pm стандартное отклонение, ABC: $49,47 \pm 28,55\%$, $t = -0,18$, $p = 0,86$; DEF:

54,42±29,24%, $t = 1,48$, $p = 0,14$; JKL: 45,31±27,9%, $t = -1,64$, $p = 0,1$). Уровень значимости был достигнут для триплета GHI (55,98±30%, $t = 1,95$, $p = 0,05$). Однофакторный дисперсионный анализ показал статистически значимый эффект фактора типа триплета на среднее количество правильных ответов ($F(1; 92) = 3,343$, $p = 0,02$, $\eta^2 = 0,02$). Апостериорные тесты показали, что среднее количество правильных распознаваний триплетов DEF и GHI, содержащих целевые непредсказуемый и предсказуемый стимулы соответственно, было статистически значимо выше, чем для остальных триплетов (DEF + GHI и ABC + JKL, критерий Вилкоксона: $W = 3732$, $p = 0,02$). Общее количество правильных ответов в эксплицитной фазе статистически значимо увеличивалось с возрастом участников ($R = 0,45$, $p < 0,001$) (Рисунок 4).

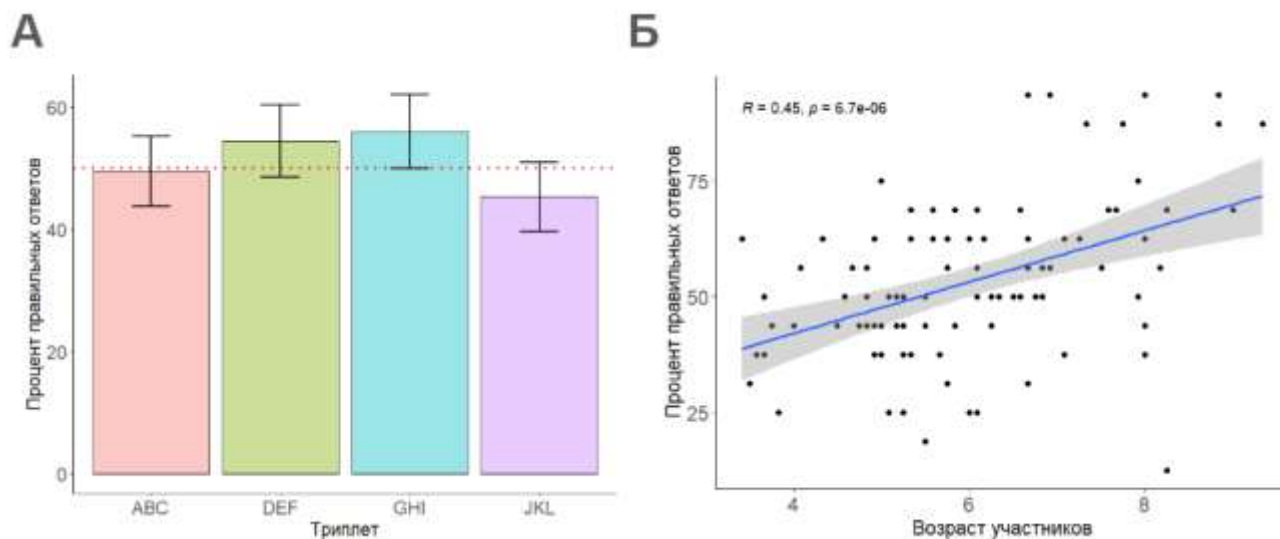


Рисунок 4 — (А) Гистограмма процентов правильных распознаваний отдельных триплетов в эксплицитной фазе эксперимента. Красная линия отражает случайный уровень в 50%, также показаны стандартные ошибки средних. (Б) График корреляции процентов правильных ответов с возрастом участников.

Во второй части исследования, посвященной исследованию связи нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи со способностью к пониманию речи у детей, были показаны модели ФВО для акустического и семантического компонентов естественной речи (Рисунок 5).

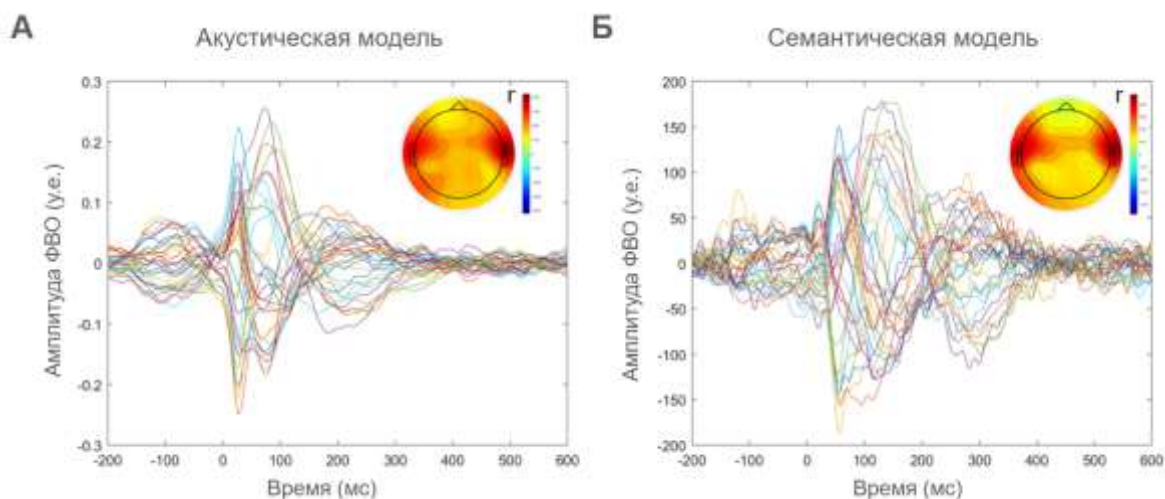


Рисунок 5 — Модели ФВО и топографическое распределение коэффициентов прогнозирования на акустический (А) и семантический (Б) компоненты естественной речи у детей.

Акустическая модель ФВО демонстрирует два пика: первый на латентности между 25 и 80 мс, и второй, менее выраженный, на латентности 200–300 мс. В семантической модели ФВО выделяются два ранних пика (около 50 мс и на латентности 120–150 мс) и поздний пик, наиболее выраженный на латентности около 300 мс. Топография распределения коэффициентов прогнозирования показывает, что наибольшие значения коэффициентов находятся в правой и левой височных областях.

На следующем этапе был проведен корреляционный анализ для выявления связи между коэффициентами прогнозирования акустической и семантической моделей ФВО, возрастом участников и их баллами по шкале рецептивной речи методики PLS-5. Была выявлена статистически значимая корреляция между коэффициентами прогнозирования акустической модели ФВО и возрастом участников ($R = 0,38$, $p = 0,005$) и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5 ($r = 0,4$, $p = 0,003$). Аналогично, для семантической модели ФВО были выявлены статистически значимые положительные корреляции с возрастом участников ($R = 0,53$, $p < 0,001$) и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5 ($r = 0,54$, $p < 0,001$).

Далее был проведен анализ связи между коэффициентами прогнозирования акустической и семантической моделей ФВО по каждому каналу ЭЭГ и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5. Так как баллы по шкале рецептивной речи имеют положительную корреляцию с возрастом (коэффициент корреляции Спирмена: $r = 0,73$, $p < 0,001$), был применен метод частной корреляции между коэффициентами прогнозирования и баллами по шкале рецептивной речи за вычетом возраста участников. Для акустической модели ФВО были обнаружены статистически значимые корреляции в нескольких каналах ЭЭГ (TP9: $R = 0,32$, $p = 0,02$; O1: $R(50) = 0,31$, $p = 0,03$; T8: $R(50) = 0,3$, $p = 0,03$; FC6: $R(50) = 0,3$, $p = 0,03$). Эти каналы сформировали один статистически значимый кластер каналов TP9 и FC6 в правой височной области. Для семантической модели ФВО также были обнаружены статистически значимые корреляции по нескольким каналам (Fp1: $R = 0,33$, $p = 0,02$; C3: $R = 0,28$, $p = 0,04$; Pz: $R = -0,34$, $p = 0,01$; O1: $R = 0,31$, $p = 0,03$; F4: $R = 0,35$, $p = 0,01$). Таким образом, для семантической модели не выявлено статистически значимых кластеров. Так как семантическая модель также включала в себя и акустическую информацию, которая индуцируется моментами начала слов и может потенциально повлиять на данные об обработке семантических несоответствий, был проведен дополнительный анализ. Была рассчитана частная корреляция между коэффициентами прогнозирования семантической модели и баллами по шкале рецептивной речи за вычетом коэффициентов прогнозирования акустической модели. Выявлены статистически значимые корреляции в нескольких каналах (Fp1: $R = 0,43$, $p = 0,001$; F3: $R = 0,3$, $p = 0,03$; FC1: $R = 0,36$, $p = 0,01$; C3: $R = 0,44$, $p = 0,001$; O2: $R = 0,28$, $p = 0,05$; P8: $R = 0,29$, $p = 0,04$; FT10: $R = 0,34$, $p = 0,02$; F4: $R = 0,35$, $p = 0,01$), которые формируют два кластера: в левых фронто-центральных областях и правых теменно-затылочных (Рисунок 6).



Рисунок 6 — Топографическое распределение коэффициентов частной корреляции между коэффициентами прогнозирования по каждому каналу ЭЭГ с баллами по шкале рецептивной речи PLS-5 за вычетом возраста участников для акустической (А) и семантической (Б) моделей. (В) Топография частных корреляций между коэффициентами прогнозирования семантической модели и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5 за вычетом коэффициентов прогнозирования акустической модели. ЭЭГ-каналы со значимыми коэффициентами корреляции на уровне $p < 0,05$ обозначены звездочками.

Дополнительно был проведен статистический анализ, направленный на выявление взаимосвязей между параметрами нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи и имплицитными мерами зрительного статистического научения. Для этого были вычислены коэффициенты корреляции между стандартизированной разностью времени реакции во всех четырех экспериментальных блоках и коэффициентами прогнозирования акустической и семантической моделей ФВО. Для акустической модели ФВО не было выявлено статистически значимых корреляций ни в одном из экспериментальных блоков (первый блок: $r = 0,097$, $p = 0,55$; второй блок: $r = 0,217$, $p = 0,18$; третий блок: $r = 0,21$, $p = 0,22$; четвертый блок: $r = 0,15$, $p = 0,36$). Аналогично, статистически значимых корреляций не было выявлено и для семантической модели ФВО (первый блок: $r = 0,08$, $p = 0,63$; второй блок: $r = 0,22$, $p = 0,17$; третий блок: $r = 0,15$, $p = 0,37$; четвертый блок: $r = 0,14$, $p = 0,42$).

В четвертой главе «Обсуждение результатов» представлено обсуждение результатов, полученных в ходе проведения диссертационного исследования.

Полученные результаты, касающиеся имплицитных мер зрительного статистического научения, демонстрируют эффект статистического научения, выраженный в увеличении сырого времени реакции на непредсказуемый стимул и отсутствие изменений времени реакции на предсказуемый стимул, начиная с первого блока. В отличие от предыдущих исследований [Siegelman и др., 2018; van Witteloostuijn и др., 2019], где время реакции снижалось на оба типа стимулов, данное исследование показало стабильное время реакции на предсказуемый стимул и увеличение время реакции на непредсказуемый. Это может объясняться использованием задачи типа Go/No-Go, требующей селективного внимания и подавления ответов [Маракшина и др., 2017; Gomez и др., 2007], в отличие от задач с простым нажатием на кнопку при предъявлении каждого стимула [Van Witteloostuijn и др., 2019; van Witteloostuijn и др., 2019]. Высокое количество правильных ответов и снижение точности распознавания непредсказуемого стимула от первого блока к последним указывают на эффекты утомления при выполнении задачи.

Корреляционный анализ не выявил связи между имплицитными мерами статистического научения и возрастом, что согласуется с другими исследованиями [Tóth-Fáber и др., 2024; van Witteloostuijn и др., 2019] и подтверждает гипотезу о формировании СН в раннем возрасте [Saffran и др., 1996]. Результаты позволяют заключить, что зрительное

статистическое научение уже сформировано у детей к возрасту трех лет и остается стабильным в последующем.

Результаты эксплицитной фазы экспериментальной парадигмы выявили распознавание триплетов незначимо выше уровня случайности (за исключением триплета GHI, содержащего целевой предсказуемый стимул и достигнутого уровня статистической значимости) и положительную корреляцию с возрастом, что частично согласуется с исследованиями зрительного СН у детей [Arciuli и Simpson, 2011, 2012; Raviv и Arnon, 2018; Shufaniya и Arnon, 2018; Van Witteloostuijn и др., 2019]. Впервые показана значимая корреляция возраста с количеством правильных ответов на расширенной выборке детей 3-5 лет. Количество ответов пятилетних детей было около уровня случайности, а младшие дети справлялись хуже, что указывает на низкую надежность и валидность эксплицитных мер СН для детей младшего возраста из-за их зависимости от множества когнитивных и исполнительных функций, таких как рабочая память [Janacsek и Nemeth, 2013] и селективного внимания [van Witteloostuijn и др., 2019], необходимых для выполнения экспериментальной задачи в эксплицитной фазе.

Количество правильных распознаваний было выше для триплетов с целевыми стимулами, что свидетельствует об активной природе СН. Так, селективное внимание к целевым стимулам в ходе имплицитной фазы структурирует деятельность таким образом, что происходит и усиливается интернализация предшествующего и последующего контекстов целевых стимулов, что выражается в результатах эксплицитной фазы.

Статистическое научение может быть рассмотрено как активный процесс интериоризации статистических закономерностей и формирования предпонятий (особого вида понятий по классификации Л. С. Выготского, в данном контексте основанного на временной близости объектов). Имплицитные меры чувствительны к изучению статистического научения у детей [Forest и др., 2023], но их чувствительность зависит от экспериментальной задачи. Эксплицитные меры менее применимы из-за вовлечения рабочей памяти, внимания и способности к вынесению эксплицитных суждений [Jenkins и др., 2024], которые у детей дошкольного возраста находятся на этапе активного развития.

Во второй части работы показаны особенности нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи у детей. Обзор литературы показывает, что особенности нейронного отслеживания у детей дошкольного и младшего школьного возраста были изучены недостаточно. Во-первых, в предыдущих исследованиях с участием детей не рассматривался семантический компонент естественной речи. В работе показаны мозговые механизмы обработки семантических несоответствий между словами в тексте в условиях прослушивания естественной речи. Также, новизной исследования является фокус на широкой возрастной группе детей от 3 до 8 лет, которая покрывает периоды особенно активного психического, когнитивного и речевого развития. Предыдущие исследования в основном фокусировались на изучении младенцев и детей до 3 лет [Attaheri и др., 2022, 2024; Di Liberto и др., 2023; Jessen и др., 2019, 2021; Kalashnikova и др., 2018; Van Hirtum и др., 2023] или на младшем школьном возрасте (Araújo и др., 2024; Di Liberto и др., 2018; Keshavarzi и др., 2022, 2024; Klimovich-Gray и др., 2023; Luo и др., 2023; Pérez-Navarro и др., 2024). Наконец, исследование впервые применяет методологию нейронного отслеживания на русскоязычных участниках; результаты сопоставимы с работами с участием носителей других языков, что дополняет представления о мозговых механизмах обработки естественной речи.

Акустическая модель ФВО выявила статистически значимые корреляции между изменениями огибающей аудиосигнала и ЭЭГ-сигнала в правом височном кластере, связанные с возрастом и развитием рецептивной речи. Данные согласуются с предыдущими исследованиями нейронного отслеживания естественной речи у детей [Ghinst и др., 2019; Ríos-López и др., 2020; Van Hirtum и др., 2023] и взрослых [Broderick и др., 2019; Gillis и др., 2021; Klimovich-Gray и др., 2023], указывая на роль височных областей правого полушария в обработке акустических и фонетических характеристик речи.

Нейронное отслеживание акустического компонента речи связывают с выделением «акустических граней» [Giraud и др., 2007], соответствующих переходам в мощности и

интенсивности сигнала, связанных со сменой лингвистических единиц (фонем, слогов, слов). Речевые ритмы, соответствующие частоте сменяемости лингвистических единиц, соотносятся с ритмами ЭЭГ [Roerpel и Assaneo, 2020]. Предполагается, что происходит сегментация речевого потока по акустическим граням с последующим декодированием и интеграцией в единицы более высокого порядка [Kazanina и Tavano, 2023b, 2023a; Meyer, 2018; Meyer и др., 2020a, 2020b]. Возрастная динамика нейронного отслеживания указывает на улучшение функционирования систем выделения акустических граней и сегментации речевых единиц с возрастом и развитием рецептивной речи. Предполагается, что это связано с настройкой мозговых систем и влиянием нисходящих процессов, то есть влияния лингвистической и семантической информации на обработку акустического компонента речи [Broderick и др., 2019; Gwilliams и др., 2023; Klimovich-Gray и др., 2023].

Исследование сопоставляет модель ФВО, учитывающую семантические несоответствия, с исследованиями семантических эффектов в методологии регистрации ВП [Broderick и др., 2018]. Обнаружены два кластера ЭЭГ-каналов, коррелирующих с возрастом и уровнем развития рецептивной речи: левая фронтально-центральная и правая теменно-затылочная области. Левополушарная активность, связанная с обработкой семантических несоответствий, отражает развитие процессов семантической обработки и понимания речи [Ильющенок и др., 2007; Соколов, 2009; Bermúdez-Margaretto и др., 2022; Curran и др., 1993; Junge и др., 2021; Henderson и др., 2011]. Морфология моделей ФВО, сходная с N400, наблюдалась в исследованиях нейронного отслеживания речи у взрослых [Broderick и др., 2018, 2019, 2022; Mesik и др., 2021; Zhou и др., 2022]. Правый теменно-затылочный кластер может отражать развитие мозговых систем, связанных с пониманием речи, потенциально отражая процессы, связанные с компонентом P600, указывающим на лексическую обработку [Delogu и др., 2019; Leckey и Federmeier, 2020; van Herten и др., 2005]. Ограничением использованного подхода является использование модели word2vec [Mikolov и др., 2013, 2017], обученной на «взрослом» языковом опыте (т.е. на литературных текстах и текстах из интернета), для оценки семантических несоответствий у детей. Несмотря на это, экологическая валидность стимульного материала (сказки о животных) предполагает валидность анализа.

Обнаружены статистически значимые корреляции между коэффициентами прогнозирования ФВО в акустической и семантической моделях, возрастом и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5, что интерпретируется как нейрофизиологический маркер развития мозговых систем, специализирующихся на восприятии речи [Castles и др., 2018]. Исследование предполагает потенциальные практические и клинические применения методологии нейронного отслеживания [Di Liberto и др., 2022] для углубления понимания психофизиологических механизмов рецептивной речи [Ding и Simon, 2014]. ФВО рассматривается как неинвазивный нейрофизиологический маркер развития понимания устной речи, применимый для нейротипичных детей и детей с особенностями развития. Нейронное отслеживание может быть связано с развитием слухового восприятия, памяти, мышления и внимания [Crosse и др., 2016; Debener и др., 2024].

Далее обсуждается вклад зрительного статистического научения и нейронного отслеживания естественной речи в развитие психофизиологических механизмов рецептивной речи. Нейронное отслеживание естественной речи рассматривается с позиции теории функциональных систем (ТФС) П. К. Анохина [Анохин, 1975, 1978; Александров, 1999; Александров и Крылов, 2005], что позволяет интегрировать нейрофизиологические данные с психологическими аспектами понимания речи. ТФС описывает динамическую интеграцию физиологических систем для достижения адаптивного результата. Нейронное отслеживание рассматривается как компонент функциональной системы, направленной на понимание устной речи, где восходящие компоненты обеспечивают декодирование лингвистической информации [Ding и др., 2016], а внимание определяет активный характер данного процесса [Broderick и др., 2018; Crosse и др., 2016]. Прогнозирование содержания речи [Heilbron и др., 2022; Novsepyan и др., 2020] соотносится с деятельностью акцептора результата действия, а

эффекты семантического несоответствия — с коррекцией содержания акцептора результата действия. Нисходящая регуляция нейронного отслеживания акустического компонента речи зависит от семантического содержания [Broderick и др., 2018; Klimovich-Gray и др., 2023], что сопоставляется с механизмами обратной афферентации. Рассмотрение нейронного отслеживания с точки зрения теории ФС способствует созданию единой психофизиологической модели рецептивной речи.

Зрительное статистическое научение и нейронное отслеживание естественной речи имеют общую нейрофизиологическую основу, заключающуюся в настройке ритмов мозга на характеристики сенсорного входа [Sjuls и др., 2023]. Зрительное статистическое научение может быть рассмотрено как натуральная психическая функция, врожденная способность к извлечению статистических закономерностей, в то время как нейронное отслеживание, как компонент речевой высшей психической функции, формируется в онтогенезе и связано с освоением языка [Выготский, 2016, 2018]. В исследовании не выявлено взаимосвязи между параметрами нейронного отслеживания и зрительным СН у детей 3-9 лет, что может указывать на их функционирование на разных уровнях и этапах развития. Зрительное статистическое научение отражает общие способности к обнаружению статистических закономерностей, а нейронное отслеживание является нейрофизиологическим маркером обработки различных компонентов речи. Ограничения интерпретации связаны с отсутствием ясности в понимании природы нейронного отслеживания [Kazanina и Tavano, 2023b, 2023a; Klimovich-Gray и Molinaro, 2020; Meyer, 2018; Meyer и др., 2020a], различиями в модальности экспериментов и возможным динамическим характером связи между статистическим научением и нейронным отслеживанием в ходе развития. Необходимы дополнительные исследования нейронного отслеживания речи в зрительной модальности, а также оценка чувствительности методик к изучаемым переменным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было продемонстрировано, что у детей в возрасте от 3 до 9 лет уровень нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи — уровень синхронизации электрической активности головного мозга с континуальными изменениями этих компонентов — коррелирует с возрастом детей и с их уровнем развития рецептивной речи — способности к пониманию устной речи. Была показана локализация мозговых систем, которые в наибольшей степени связаны с развитием механизмов обработки акустического и семантического компонентов естественной речи. Полученные данные впервые демонстрируют связь нейронного отслеживания с развитием рецептивной речи, что позволяет интегрировать нейрофизиологические и психологические данные.

Также в работе было показано, что имплицитные меры зрительного статистического научения (время реакции на целевые стимулы в ходе научения) не коррелируют с возрастом детей, тогда как Эксплицитные меры (количество правильных распознаваний последовательностей стимулов) имеют такую корреляцию. Это подтверждает имеющиеся в литературе данные о том, что способность к статистическому научению возникает в младенческом возрасте и дальше остается стабильной. Эксплицитные меры, требующие вовлечения исполнительных функций и достаточно высокого уровня развития мышления, сильно зависят от возраста и для детей младшего возраста (до 5 лет) не позволяют в полной мере оценить результаты статистического научения. Кроме того, полученные результаты указывают, что статистическое научение является активным, а не полностью пассивным процессом, который вовлекает активное, селективное внимание и зависит от вида экспериментальной задачи.

Полученные данные по зрительному статистическому научению и нейронному отслеживанию естественной речи интегрированы в единую модель на основании общих психологических и нейрофизиологических механизмов. Так, на нейрофизиологическом уровне, оба процесса имеют общий механизм, заключающийся в настройке ритмической активности головного мозга на частоту предъявления отдельных стимулов (фоном, слогов,

слов или стимулов в парадигмах статистического научения) и единиц более высокого порядка (словосочетаний, предложений или статистических последовательностей стимулов). На психологическом уровне, статистические последовательности стимулов могут быть представлены как предпонятия в классификации Л. С. Выготского, тогда как нейронное отслеживание семантического компонента естественной речи затрагивает обработку расстояний между значениями слов в устной речи — понятиями.

Таким образом, СН и нейронное отслеживание вносят независимый вклад в развитие рецептивной речи. Так, СН обеспечивает общий механизм обработки статистических закономерностей окружающего мира, который лежит в основе восприятия, а нейронное отслеживание как нейрофизиологический маркер рецептивной речи отражает специфическую настройку мозговых систем на различные компоненты и закономерности устной речи.

Дальнейшая разработка темы может заключаться в сопоставлении данных статистического научения в слуховой модальности с нейронным отслеживанием естественной речи на разных уровнях. Также, исследование нейронного отслеживания других компонентов естественной речи (фонетического и лексического) могут дать новые данные о механизмах обработки языка в головном мозге. Наконец, нейронное отслеживание естественной речи имеет потенциал стать неинвазивным нейрофизиологическим маркером рецептивной речи, что требует дополнительной экспериментальной проверки на различных нейротипичных и клинических выборках.

ВЫВОДЫ

1. ИмPLICITные меры зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет (время реакции на целевые стимулы) не коррелируют с возрастом детей, что свидетельствует о том, что к дошкольному возрасту данная способность уже достаточно развита.
2. ЭкPLICITные меры зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет (количество правильных ответов при распознавании последовательностей стимулов) улучшаются с возрастом, что может опосредоваться общим когнитивным и психологическим развитием детей.
3. Зрительное статистическое научение у детей является активным, а не полностью пассивным имPLICITным процессом, вовлекающим селективное внимание и формирующим структуру деятельности в зависимости от экспериментальной задачи.
4. У детей в возрасте от 3 до 9 лет уровень нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи увеличивается с возрастом и с уровнем развития рецептивной речи.
5. Статистическое научение может быть представлено как натуральная психическая функция, на основе которой производится обучение языку в раннем онтогенезе, тогда как нейронное отслеживание может быть проинтерпретировано как физиологическая сторона рецептивной речи — компонента высшей психической функции — речи.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, опубликованные в изданиях, индексируемых международными базами данных:

1. **Rogachev A.**, Sysoeva O. Neural tracking of natural speech in children in relation to their receptive speech abilities. // *Cognitive Systems Research*. – 2024. – Т. 86. – С. 101236. – DOI: 10.1016/j.cogsys.2024.101236.
2. **Rogachev A.**, Sysoeva O. A functional systems view on neural tracking of natural speech. // *Frontiers in Systems Neuroscience*. – 2025. – Т. 19. – С. 1658243. – DOI: 10.3389/fnsys.2025.1658243.
3. **Rogachev A.**, Logvinenko T., Rebreikina A., Sysoeva O. Visual Statistical Learning in Children Aged 3–9 Years // *Cognitive Science*. – 2025. – Т. 49. – №. 10. – С. e70130. – DOI: 10.1111/cogs.70130.

Прочие публикации:

4. **Рогачёв А. О.**, Сысоева О. В. Функция временного отклика — новый метод исследования нейрофизиологических механизмов восприятия речи в экологически валидных условиях. // *Современная зарубежная психология*. – 2024. – Т. 13. – №1. – С 92–100. – DOI: 10.17759/jmfr.2024130108.
5. **Рогачёв А. О.**, Сысоева О. В. Отслеживание нейронной активности при прослушивании естественной речи у детей с применением функции временного отклика // *Гены и Клетки*. – 2023. – Т. 18. – №4. – С. 640–644. – DOI: 10.17816/gc623394.
6. **Rogachev A.**, Sysoeva O. Comparison of Acoustic and Syllable Neural Tracking of Natural Speech and Syllable Sequences in Children. // *2024 Sixth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN)*, Kaliningrad, Russian Federation, 2024. – 2024. – С. 164–166. – DOI: 10.1109/CNN63506.2024.10705874.
7. **Рогачёв А. О.**, Козлова Н. А., Логвиненко Т. И., Сысоева О. В. Характеристики зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 8 лет. // *Десятая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов*. Пятигорск, 26–30 июня 2024 г. В двух частях. Часть II / Отв. ред. Киреев М.В. – Пятигорск, 2024. – 428 с (с. 342–343).