

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

На правах рукописи



Рогачёв Антон Олегович

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

5.12.2. Междисциплинарные исследования мозга

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата психологических наук

Научный руководитель:  
кандидат психологических наук  
Сысоева Ольга Владимировна

федеральная территория «Сириус»

2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Психофизиологические механизмы рецептивной речи и их развитие в онтогенезе .....	13
1.2. Методические проблемы исследований психофизиологических механизмов рецептивной речи.....	16
1.3. Нейронное отслеживание и обработка различных компонентов естественной речи.....	18
1.4. Статистическое научение и его связь с развитием рецептивной речи на психологическом и нейрофизиологическом уровнях .....	20
1.5. Постановка проблемы исследования .....	23
<b>ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>	<b>24</b>
2.1. Эксперимент 1. Исследование особенностей зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет.....	24
2.1.1. Цели и задачи исследования .....	24
2.1.2. Участники исследования.....	25
2.1.3. Оценка уровня речевого развития.....	26
2.1.4. Процедура исследования.....	26
2.1.5. Анализ данных .....	28
2.2. Эксперимент 2. Исследование связи нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи со способностью к пониманию речи.....	30
2.2.1. Цели и задачи исследования .....	30
2.2.2. Участники исследования.....	31
2.2.3. Оценка уровня речевого развития.....	32
2.2.4. Процедура электроэнцефалографического исследования.....	33
2.2.5. Анализ электроэнцефалографических данных .....	34
<b>ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>39</b>
3.1. Особенности зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет .....	39
3.1.1. ИмPLICITные меры статистического научения: количество правильных ответов и ложных тревог .....	39

3.1.2. ИмPLICITНЫЕ меры статистического научения: время реакции .....	41
3.1.3. ЭкPLICITНЫЕ меры статистического научения .....	45
3.2. Связь нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи со способностью к пониманию устной речи...	46
3.2.1. Нейронное отслеживание естественной речи у детей на акустическом и семантическом уровнях .....	46
3.2.2. Связь нейронного отслеживания на акустическом и семантическом уровнях с возрастом и способностью к пониманию устной речи .....	48
3.2.3. Топографический анализ связи между коэффициентами прогнозирования и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5.....	50
3.3. Связь нейронного отслеживания естественной речи с параметрами зрительного статистического научения .....	52
<b>ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ .....</b>	<b>53</b>
4.1. Особенности статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет....	53
4.1.1. ИмPLICITНЫЕ меры зрительного статистического научения .....	53
4.1.2. ЭкPLICITНЫЕ меры статистического научения .....	55
4.2. Нейронное отслеживание акустического и семантического компонентов естественной речи у детей в возрасте от 3 до 9 лет.....	58
4.2.1. Нейронное отслеживание акустического компонента естественной речи .....	59
4.2.2. Нейронное отслеживание семантического компонента естественной речи.....	61
4.2.3. Связь нейронного отслеживания естественной речи с рецептивной речью детей.....	63
4.3. Вклад зрительного статистического научения и нейронного отслеживания естественной речи в развитие психофизиологических механизмов понимания устной речи .....	64
4.3.1. Нейронное отслеживание естественной речи как функциональная система .....	64
4.3.2. Интеграция данных зрительного статистического научения нейронного отслеживания естественной речи .....	67
4.3.3. Ограничения интерпретации .....	69
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>71</b>
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>73</b>

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>74</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>75</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Пары триплетов, использованные в эксплицитной фазе эксперимента 1 .....</b>	<b>90</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Тексты стимульных материалов для эксперимента 2 ....</b>	<b>95</b>
Приложение Б.1. Рассказ про вомбатов .....	95
Приложение Б.2. Рассказ про ежей .....	97
Приложение Б.3. Сказка «Кирпич и воск» .....	99
Приложение Б.4. Сказка «Золотая утка» .....	100
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты статистического анализа данных эксперимента 1 .....</b>	<b>104</b>
Приложение В.1. Результаты апостериорных тестов для эффектов взаимодействия Тип стимула:Экспериментальный блок .....	104

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 [1]. 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 [2, 3]. 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 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 [3–8]. Однако зачастую эти данные вступают в противоречия друг с другом [9, 10], 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 [11–14] — методология нейронного отслеживания. Несмотря на кратное увеличение количества исследований с применением такой методологии в последние годы, в том числе с участием детей [например, 4, 15, 16], 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. [17, 18]. Кроме того, статистическое научение и нейронное отслеживание естественной речи имеют общую нейрофизиологическую основу [19], 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 [20], или на детях младшего и среднего школьного возрастов [21, 22].

### **Цель и задачи исследования**

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 исследования:** рецептивная речь.

**Предмет исследования:** 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. Саффран, 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) [23].

3. Когнитивно-поведенческие методики (экспериментальная парадигма, направленная на оценку способности к зрительному статистическому научению).

### **Личный вклад автора**

Все представленные в работе результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор самостоятельно выполнил теоретическую и экспериментальную части исследования, провел обработку и анализ данных, а также подготовил тексты публикаций. Обсуждение дизайна экспериментов и результатов проходило с научным руководителем О. В. Сысоевой.

### **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 исследования**

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».

#### **Публикации по теме диссертации**

По результатам, представленным в диссертационном исследовании, было опубликовано 3 печатные работы, в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:

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.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка сокращений и списка литературы, включающего 148

наименований. Работа иллюстрирована двумя таблицами и 16 рисунками, имеет три приложения.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1. Психофизиологические механизмы рецептивной речи и их развитие в онтогенезе

Рецептивная речь — способность воспринимать, распознавать, декодировать и осмысливать устные или письменные речевые сообщения, исходя из их фонетической, лексической, грамматической или семантической структуры. Понятие рецептивной речи тесно связано с процессами понимания речи, которые также связаны с декодированием и осмыслением речевых сообщений, «реконструкцией структуры мысли, которая была заложена в сообщение его источником» [24].

Рецептивная речь, как и экспрессивная речь — способность к продуцированию речевых сообщений — является компонентом речи как психической функции. Согласно Л. С. Выготскому, речь — высшая психическая (психологическая) функция, имеющая центральный характер для человеческой деятельности, так как она опосредует взаимодействие человека с окружающим миром и с самим собой, опосредует мышление и прочие психические функции [25, 26]. В ходе раннего онтогенеза, охватывающего младенческий, преддошкольный, дошкольный и ранний школьный возрастные периоды, развитие речи в целом и рецептивной речи в частности носит нелинейный характер, проходя через ряд критических периодов, особенно важных для развития психических функций. В целом, развитие речи может быть охарактеризовано как постепенный переход речевой деятельности из внешнего, социального плана (речь для взаимодействия с окружающим миром) во внутренний, психический (речь для себя, для структуризации мыслительной и психической деятельности, придания ей сознательного и произвольного характера) в ходе интериоризации языка — социальной по происхождению системы знаков и значений, которые выступают в роли психической орудий человеческой деятельности [26].

Современные психофизиологические и нейрофизиологические исследования, использующие различные инвазивные и неинвазивные методы нейровизуализации, позволили идентифицировать ключевые нейронные сети и мозговые системы, которые обеспечивают восприятие речи и обработку различных ее компонентов (связанных с физической формой речевого сигнала, с фонетическими, лексическими и семантическими особенностями речи). Согласно современным доминирующим психофизиологическим моделям обработки речи [5, 27–29], она осуществляется по двум основным потокам. Вентральный поток, включающий передние и задние отделы височной коры (в том числе зону Вернике), височно-теменное соединение и нижнюю лобную извилину, преимущественно вовлечен в процессы доступа к лексико-семантической информации, извлечения значений слов и их интеграцию с воспринятыми словами, а также комбинацию слов в фразы, предложения и нарративы. Это может быть отнесено к рецептивной речи. Дорсальный поток связывает задние отделы верхней височной извилины с нижнетеменными областями и с премоторной корой (в том числе зону Брока). Он вовлечен в обеспечение сенсомоторной интеграции и реализацию речевых актов, что относится к экспрессивной речи.

Мозговые системы, связанные с рецептивной речью, начинают формироваться на ранних этапах онтогенеза. Так, исследования с участием детей младенческого возраста показывают, что их мозговая активность проявляет специфическую чувствительность именно к человеческой речи по сравнению с другими слуховыми стимулами: например, у трехмесячных довербальных младенцев активируются области коры головного мозга, гомологичные так называемым речевым центрам головного мозга взрослых людей [31]. В ходе индивидуального развития мозговые системы постепенно теряют «универсальность» восприятия звуков различных языков и настраиваются на фонетическую, просодическую и статистическую структуры родного языка, что выражается в снижении дискриминационной чувствительности к звучанию других языков. Развитие и специализация этих мозговых систем на звучании родной речи определяет сензитивные, или критические периоды речевого развития [3, 6].

Исследования также демонстрируют, что у детей дошкольного возраста речевые области коры головного мозга более чувствительны к изучению языка через социальное взаимодействие с другими людьми, а не через взаимодействие с техническими образовательными средствами [3].

Формирование и развитие словарного запаса сопровождается изменением параметров взаимосвязей между речевыми областями коры головного мозга. Так, исследователи выделяют два основных этапа развития речевых систем мозга. На первом этапе, от рождения до трех лет, в основном формируются системы вентрального потока, связанные с восходящими процессами обработки речи — например, с фонетической обработкой и доступом к лексической информации. На втором этапе, охватывающем возраст от трех лет до младшего школьного возраста (8–9 лет) и далее, увеличивается вклад нисходящих процессов, вовлекающих масштабные фронтально-теменные нейронные сети и связанных с расширяющимся словарным запасом, увеличением количества семантических репрезентаций языка и развитием абстрактно-логического мышления [32]. Таким образом, речевое развитие, особенно в период начала систематического освоения языка по школьной программе, находит отражение и в функциональной специализации и реструктуризации речевых систем головного мозга.

В совокупности современные психофизиологические исследования демонстрируют картину динамично развивающейся мозговой организации процессов, связанных с восприятием речи. Формирование речевых систем головного мозга напрямую связано с этапами речевого развития, выделяемых в психологических исследованиях. Понимание речи является результатом работы распределенной и иерархически организованной системы, функциональная архитектура которой закладывается в раннем онтогенезе и развивается под действием особенностей родного языка, социальных взаимодействий и расширением знаний об окружающем мире, которые выражаются в увеличении словарного запаса.

## 1.2. Методические проблемы исследований психофизиологических механизмов рецептивной речи

Одним из наиболее популярных подходов к изучению психофизиологических механизмов, лежащих в основе процессов рецептивной речи, является электроэнцефалография (ЭЭГ) — метод неинвазивной регистрации электрической активности головного мозга. Метод ЭЭГ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами нейровизуализации (например, по сравнению с томографическими методами). Так, ЭЭГ-данные имеют высокое временное разрешение (современное оборудование позволяет производить регистрацию сигнала с частотой дискретизации вплоть до 100 кГц), а проведение ЭЭГ-исследований имеет относительно низкую стоимость и простоту применения. Но, несмотря на указанные преимущества, метод ЭЭГ обладает рядом методических ограничений. Часто в исследованиях с использованием ЭЭГ производится регистрация вызванных потенциалов (ВП), или потенциалов, связанных с событиями, — усредненных ответов головного мозга на различные категории стимулов в разных модальностях. Метод ВП заключается в многократном предъявлении стимулов и последующем усреднении эпох записи ЭЭГ, связанных с предъявлением стимулов. В полученных ВП выделяют компоненты — относительно устойчивые паттерны сигнала, отражающие этапы сенсорной и когнитивной обработки стимула [33].

Для получения устойчивого вызванного ответа мозга эксперимент должен быть построен особым образом. Так, стимулы должны быть уравнены по множеству параметров (например, по длительности, громкости, смыслу, другим характеристикам) и предъявляться изолированно друг от друга (отдельные фонемы, слоги и слова на экране или аудиально через фиксированные временные интервалы [34–37]). Необходимо многократное предъявление однотипных стимулов (как минимум несколько десятков раз), чтобы получить достаточное количество усреднений ВП и увеличить соотношение сигнал-шум. В результате это

может привести к запоминанию стимулов или привыканию к ним, что может исказить результаты исследования [38].

В совокупности, перечисленные требования накладывают значительные ограничения на построение эксперимента и на возможности интерпретации результатов. Так, например, систематические обзоры выявляют противоречия в данных психофизиологических исследований процессов, лежащих в основе рецептивной речи (например, однотипные эксперименты дают различные результаты по амплитудам и латентности так называемых речевых компонентов ВП), и ставят вопросы о корректности связывания компонентов ВП с этапами обработки речевой информации [10, 37].

Кроме того, в обозначенных экспериментальных условиях возникает проблема низкой экологической валидности. Экологическая валидность — это вид валидности эксперимента, рассматривающий отношения между объектами реального мира и их репрезентациями в экспериментах [38]. Речевой стимульный материал в лабораторных исследованиях с применением метода ВП зачастую не похож на обычную, естественную речь, с которой люди сталкиваются ежедневно в ходе своей жизни. Это затрудняет получение данных о функционировании мозга в условиях реальной жизни и вносит ограничения в возможности экстраполяции результатов, получаемых в лабораторных условиях, на понимание механизмов работы мозга в естественных условиях. Решением указанных методических проблем может выступать использование натуралистических стимульных материалов, набирающих популярность в последние годы [11, 13], а также применение новых подходов к анализу мозговой активности в процессе восприятия устной речи.

### 1.3. Нейронное отслеживание и обработка различных компонентов естественной речи

Нейронное отслеживание (neural tracking) — эмпирический феномен и методический подход к регистрации и анализу ЭЭГ-данных, позволяющий сопоставлять ответы головного мозга с изменениями в различных компонентах натуралистических, естественных речевых стимулов [13, 41–43]. Такие стимулы, в отличие от «лабораторных», применяемых в исследованиях с ВП, повышают экологическую валидность исследований и, вероятно, позволяют делать более репрезентативные выводы о функционировании головного мозга в условиях, приближенных к естественным. Физически, нейронное отслеживание представляет собой синхронизацию между компонентом стимула и мозговой активностью при его восприятии. Эта синхронизация может быть измерена, например, при помощи метода фазовой когерентности, демонстрирующей фазовую синхронизацию двух сигналов (компонент речевого стимула и ЭЭГ), или при помощи специально разработанных методов — например, функции временного отклика (ФВО; temporal response function, TRF) [13, 44], реализующей линейную свертку двух сигналов.

Методология нейронного отслеживания имеет большое количество применений в психофизиологических исследованиях восприятия и обработки устной речи [11]. В области нейролингвистики, многие исследования используют данную методологию для изучения того, как головной мозг обрабатывает акустические [16, 41, 45, 46], фонетические и фонематические [4, 47–49], лингвистические, связанные с морфологическими и синтаксическими особенностями слов, и семантические характеристики естественной речи [50, 51]. Исследования показывают, что нейронное отслеживание акустического компонента естественной речи (например, огибающей речевого сигнала, которая отражает изменения интенсивности сигнала во времени) каузально связано с рецептивной речью, а при различных речевых нарушениях (например, при дислексии или постинсультной афазии) нейронное отслеживание акустического компонента также нарушается [48, 52–56]. Каузальность этой связи объясняет

гипотеза «акустических граней» (acoustic edges) — переходов в мощности и интенсивности акустического сигнала, которые в естественной речи связаны со сменой лингвистических единиц, таких как фонемы, слоги, слова и предложения [57]. «Достаточный» уровень нейронного отслеживания акустического компонента речи предполагает, что речевые системы мозга «успешно» (в контексте экспериментальной или жизненной задачи) реализуют отслеживание лингвистических единиц, декодирование смысла слов и интеграцию полученной информации в лингвистические единицы более высокого порядка. С рецептивной речью связано и нейронное отслеживание семантического компонента естественной речи — например, семантических несоответствий между словами в речи, отражающих относительные смысловые расстояния между словами [50, 51, 58].

В целом, современные исследования предполагают, что нейронное отслеживание является иерархическим процессом, вклад в который вносит отслеживание и акустических, и лингвистических, и семантических компонентов речи, которые находятся в сложных реципрокных взаимодействиях друг с другом [59–61]. Важно отметить и продолжающуюся дискуссию о природе нейронного отслеживания: является ли оно активным процессом, связанным с активным декодированием, обработкой и интеграцией получаемой речевой информации, или оно является пассивной настройкой ритмов головного мозга на ритмы внешнего стимула [59, 62–67]?

В основном исследования в методологии нейронного отслеживания проводятся с участием взрослых. В последние годы увеличивается и количество исследований с участием детей [4, 15, 16, 49, 52, 55, 68–70], однако исследования практически не рассматривают связь между нейронным отслеживанием естественной речи и развитием рецептивной речи у детей [кроме лонгитюдного исследования развития репрезентаций фонем у младенцев до года, см. 4]. Исследования в основном фокусируются на отдельных узких возрастных группах (например, младенцы, дети ясельного или раннего школьного возраста), тогда как возрастные диапазоны, покрывающие критические периоды речевого развития

(например, диапазон от 3 до 8 лет) остаются малоизученными. Также современные исследования не рассматривали мозговые механизмы обработки семантического компонента естественной речи у детей, фокусируясь на акустическом и фонетическом компонентах.

#### **1.4. Статистическое научение и его связь с развитием рецептивной речи на психологическом и нейрофизиологическом уровнях**

Статистическое научение (СН) — способность к имплицитному, неосознаваемому извлечению статистических закономерностей из сенсорного входа [20, 71, 72]. Исследования показывают, что СН возникает в раннем детстве: уже младенцы показывают способность к имплицитному извлечению статистических закономерностей в зрительной, слуховой и тактильной модальностях [20, 73, 74]. Текущая позиция заключается в том, что СН является общим, модально-неспецифическим механизмом научения [75], который лежит в основе таких когнитивных функций, как внимание [76] и память [73, 77]. Отдельным направлением исследований является связь между СН и освоением языка, так как оно требует освоения большого количества правил и закономерностей (например, звукобуквенных сочетаний, сочетаний звуков, грамматических правил), которые до систематического изучения ребенком родного языка в школе усваиваются имплицитно в ходе раннего онтогенеза [78].

Традиционно, СН изучается с применением различных экспериментальных парадигм, таких как задача на последовательное время реакции (*serial reaction time task*, задача, в которой нужно быстро реагировать на определенные стимулы в потоке стимулов), задача на усвоение несмежных зависимостей (*non-adjacent dependency learning task*, где целевые последовательности стимулов разделены нецелевыми), задачи на искусственную грамматику (*artificial grammar*, где требуется осваивать искусственный «язык»), и задача на зрительное СН (*visual statistical learning task*) с широким набором вариаций [18, 78–80]. В целом, все эти

экспериментальные парадигмы требуют имплицитного усвоения закономерностей предъявления стимулов в различных модальностях [72]. Примечательно, что в таких экспериментальных парадигмах участники не получают эксплицитную инструкцию для усвоения статистических закономерностей предъявления стимулов. Вместо такой инструкции, часто участникам предлагаются нерелевантные задачи (например, нажимать на кнопку при предъявлении конкретных стимулов). Также, в таких парадигмах стимулы сгруппированы таким образом, чтобы формировать группы стимулов на основании их статистической близости. Например, в эксперименте с предъявлением каких-либо стимулов А, В, С, D, E, F, G, H, I поток стимулов может быть сгруппирован в тройки, или триплеты (тогда стимулы будут предъявляться следующим образом: ABCGHIDEFABCGHI...). СН определяется через способность к извлечению той закономерности, что стимулы А, В, С; D, E, F и G, H, I сгруппированы в тройки.

Один из подходов к оценке СН основан на измерении времени реакции (ВР) на стимулы [22, 80, 81]. Предполагается, что сокращение ВР на стимулы по ходу эксперимента показывает имплицитное усвоение статистических закономерностей стимулов, основанное на механизмах антиципации и прогностического кодирования следующих стимулов [22, 80]. Меры, связанные с ВР, относят к имплицитным, или к так называемым онлайн-мерам СН, так как они позволяют оценить эффективность СН в динамике предъявления стимулов. Также эффективность СН может быть оценена после предъявления стимульного ряда, например, при помощи задач с вынужденным выбором, в которых участнику требуется выбрать ту совокупность стимулов, которую он усвоил в ходе фазы научения. Такой тип задач часто относят к эксплицитным, или к так называемым оффлайн-мерам СН, так как они оценивают результаты научения после воздействия стимульного потока [82].

В настоящее время зрительное СН активно изучается в контексте развития когнитивных функций и речи у детей [83]. Некоторые исследования предполагают, что способность к СН у детей связана с развитием речевых процессов [84] и может выступать в качестве когнитивного маркера нарушений речи и чтения, например,

дислексии — расстройства чтения [17, 18]. Однако, исследования СН в контексте развития у детей ограничены, что подчеркивает важность дальнейшей разработки темы. Так, существующие работы преимущественно сосредоточены на больших возрастных группах детей: например, младенцах [85] или детях младшего и среднего школьного возрастов (например, детей в возрасте от 5 до 12 лет [21, 86–89], от 5 до 8 лет [22, 82, 90], или от 8 до 12 лет [71, 78] и старше [91]). Возрастной период от 3 до 5 лет остается малоизученным, несмотря на его критический характер как для речевого, так и для общего когнитивного развития детей [2, 92].

На нейрофизиологическом уровнях СН и нейронное отслеживание речи имеют общие механизмы. И СН, и нейронное отслеживание подразумевают имплицитное извлечение статистических закономерностей из потока стимулов (как неречевых, так и речевых) и построение предсказаний о последующих стимулах. Одним из возможных коррелятов данного механизма является ритмическая активность мозга, или нейронные осцилляции [19, 93]. Так, предъявление потока стимулов, имеющих равные длительности и сменяющих друг друга с фиксированной частотой индуцируют ритмическую активность головного мозга на данной частоте, что предполагает механизм нейронного отслеживания потока стимулов. Кроме того, в спектрограмме ЭЭГ отражается не только частота предъявления отдельных стимулов, но и частота повторяющихся групп стимулов [19, 94, 95]: например, при предъявлении троек стимулов с частотой 1 Гц, в спектрограмме выделяются статистически значимые пики как на ~1 Гц, так и на ~3 Гц — частоте предъявления этих троек [95]. Аналогичные данные получены и для речевых стимулов: выявлено, что кора головного мозга настраивается на ритм отдельных лингвистических единиц (фонем, слогов, слов, словосочетаний и фраз) [94], что связывают с процессами сегментации речевого потока, интеграции единиц низкого уровня в более высокоуровневые, а также с антиципацией содержания речи [66, 67, 97, 98]. Таким образом, предполагается, что нейронное отслеживание играет ключевую роль для СН в различных модальностях, обеспечивая нейрофизиологический базис для сегментации сенсорного входа на отдельные

стимулы и для их группировки в единицы более высокого порядка — например, на основании статистических закономерностей [19].

### **1.5. Постановка проблемы исследования**

Анализ современной экспериментальной литературы показывает, что у детей в возрастной группе от 3 до 8 лет, покрывающей периоды активного речевого развития и развития мозговых систем, лежащих в основе рецептивной речи, не проводилось исследований в парадигме нейронного отслеживания различных компонентов естественной речи. Это обуславливает недостаток данных, касающихся мозговых механизмов обработки натуралистических стимулов в экспериментальных парадигмах с высокой экологической валидностью.

Анализ литературы по теме зрительного статистического научения также показывает отсутствие масштабных исследований данного процесса на выборках, охватывающих большие периоды речевого и психологического развития. Кроме того, имеющиеся данные демонстрируют противоречивые результаты о связи имплицитных и эксплицитных параметров зрительного СН с возрастом и о динамике их развития в раннем онтогенезе.

Наконец, несмотря на наличие общих нейрофизиологических и психологических механизмов СН и нейронного отслеживания, отсутствуют данные о связи этих процессов, а также о совместном вкладе этих процессов в развитие рецептивной речи у детей.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Эксперимент 1. Исследование особенностей зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет

#### 2.1.1. Цели и задачи исследования

В текущем эксперименте изучаются имплицитные и эксплицитные зрительного СН в группе детей в возрасте от 3 до 9 лет, включающей в себя достаточно хорошо исследованную группу детей в возрасте 5–9 лет и малоисследованную возрастную группу 3–5 лет. Целями исследования являются:

- 1) изучение особенностей имплицитных и эксплицитных зрительного СН;
- 2) изучение возрастной динамики этих параметров.

Основываясь на предыдущих исследованиях СН, были выдвинуты три гипотезы. Во-первых, предполагается, что обработка предсказуемого стимула (см. п. 2.1.3) будет более эффективной, чем обработка непредсказуемого стимула, что будет выражено в сокращении ВР на предсказуемый стимул, а также в меньшем количестве ошибок при выполнении задачи в имплицитной фазе эксперимента. Во-вторых, предполагается, что количество правильных узнаваний триплетов в эксплицитной превзойдет случайный уровень, что подтвердит положительные результаты научения в ходе имплицитной фазы эксперимента. В-третьих, учитывая разнящиеся данные о связи имплицитных и эксплицитных параметров СН с возрастом детей — некоторые исследования демонстрируют эту связь [21, 86–88], другие ее отрицают [22, 89] — выдвигается ненаправленная эксплораторная гипотеза о связи имплицитных и эксплицитных параметров СН с возрастом детей.

### 2.1.2. Участники исследования

В исследовании приняли участие 96 детей (43 девочки, 53 мальчика) в возрасте от 3 до 9 лет (средний возраст  $6 \pm 1,38$  лет) (Рисунок 1, Таблица 1). В анализ включались участники – носители русского языка, с нормальным или скорректированным до нормального зрением в соответствии с данными, предоставленными их родителями в демографическом опроснике.

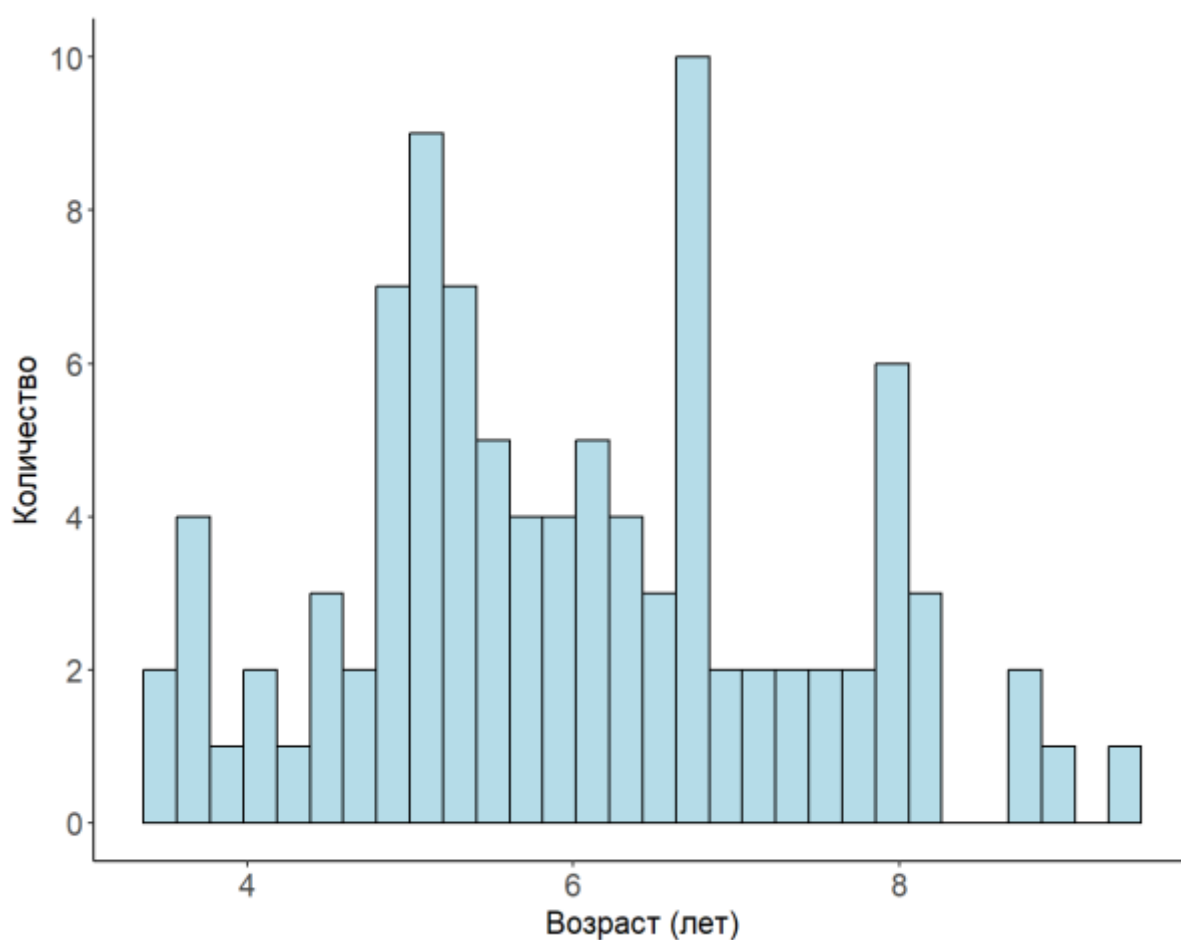


Рисунок 1 — Гистограмма распределения возрастов участников эксперимента 1

Таблица 1 — Распределение количества участников эксперимента 1 по возрастам.

Возрастной диапазон	3–4 года	4–5 лет	5–6 лет	6–7 лет	7–8 лет	8–9 лет
Количество участников	7	15	27	26	10	9

### *2.1.3. Оценка уровня речевого развития*

Уровень речевого развития участников исследования оценивался при помощи методики *Preschool Language Scales, Fifth Edition (PLS-5; Шкалы дошкольного языкового развития 5-й версии)*, переведенной и адаптированной на русский язык [23]. PLS-5 представляет собой интерактивную методику для оценки уровня развития процессов понимания речи (шкала слухового понимания, или шкала рецептивной речи), а также уровня развития способности к продукции речи (шкала экспрессивной речи).

### *2.1.4. Процедура исследования*

Процедура исследования соответствовала стандартам проведения исследований Хельсинкской декларации 1975 года и была одобрена Биоэтическим комитетом Университета «Сириус» (протокол от 13.07.2022). Перед началом исследования были получены информированные согласия от детей и от их законных представителей.

Процедура исследования включала в себя модифицированную экспериментальную парадигму, направленную на изучение зрительного статистического научения [22, 78]. Экспериментальная парадигма включала в себя две фазы.

*ИмPLICITная фаза статистического научения (онлайн-фаза).* В этой фазе изображения нарисованных инопланетян предъявлялись по одному в середине экрана ноутбука. Всего было 12 разных стимулов, далее для краткости обозначаемых А, В, С, D, E, F, G, H, I, J, K, L. Каждый стимул предъявлялся на экране на 1 с; следующий стимул предъявлялся с межстимульным интервалом, равным 200 мс. Стимулы были сгруппированы в триплеты (ABC, DEF, GHI, JKL, Рисунок 2) на основании переходных вероятностей между ними: внутри триплета переходная вероятность всегда равнялась 1, т. е. порядок следования троек изображений друг за другом 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. Для анализа стимул I был определен как предсказуемый, так как он всегда находился в конце триплета. Стимул D, напротив, был определен как непредсказуемый, т. к. он был в начале триплета и мог с равной вероятностью следовать после стимулов С, I или L.

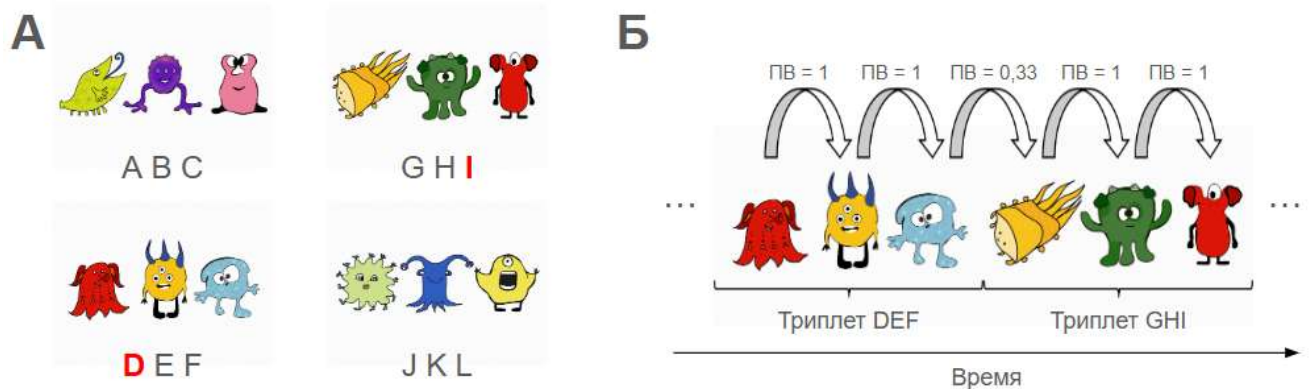


Рисунок 2 — Стимульные материалы и схема эксперимента. (А) Стимулы, использованные в эксперименте и сгруппированные в четыре триплета на основании переходных вероятностей.

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

ИмPLICITная фаза состояла из четырех экспериментальных блоков, содержащих по шесть повторений каждого триплета (24 повторения всего). В

сумме, в ходе всей процедуры эксперимента было 96 предъявлений каждого триплета и 288 предъявлений каждого стимула. Участники могли делать перерывы между экспериментальными блоками. Длительность имплицитной фазы составляла примерно 8 минут.

Детям давалась инструкция: «В этой игре инопланетяне выстраиваются в очередь на космический корабль. Все они хотят вернуться домой, и ваша задача помочь им. Все инопланетяне попадают на корабль сами, но двоим требуется ваше разрешение. Они представлены ниже. Чтобы разрешить им попасть на корабль, надо нажать пробел». После того, как экспериментатор убеждался в том, что участник понял инструкцию, следовала фаза ознакомления, в которой участник знакомился со стимулами и с тем, как выполнять экспериментальную задачу. При необходимости фаза ознакомления запускалась снова. Затем начиналась имплицитная фаза.

*Эксплицитная фаза статистического научения (оффлайн-фаза).* В эксплицитной фазе участникам одновременно на экране предъявлялись два триплета инопланетян: корректный и ложный (все пары триплетов в эксплицитной фазе представлены в Приложении А). Участникам ставилась задача при помощи клавиш выбрать ту группу инопланетян, которая действительно прошла на космический корабль. Всего было 16 пар триплетов.

Исследование проводилось в специальном лабораторном помещении, под присмотром экспериментатора. Экспериментальная парадигма была реализована при помощи программного обеспечения PsychoPy версии 2022.2.4 [99].

### *2.1.5. Анализ данных*

Был проведен статистический анализ данных имплицитной и эксплицитной фаз экспериментальной парадигмы. Перед проведением анализа данные были предобработаны. 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) в каждом экспериментальном блоке. Индивидуальные значения ВР в тех экспериментальных блоках, где количество ложных тревог превышало 8 (75% от количества целевых стимулов в блоке; порог выбран эмпирически, на основании распределения количества ложных тревог по всей выборке) были удалены из анализа и заменены пустыми значениями (в среднем, удалено 8,85% данных). Удаление выполнено исходя из предположения о том, что высокое количество ложных тревог свидетельствует о низком внимании к экспериментальному заданию либо о низкой результативности СН.

В качестве имплицитных мер зрительного СН были выбраны: количество правильных ответов на предсказуемый и непредсказуемый целевые стимулы, сырое ВР на целевые стимулы, а также стандартизованная разность ВР на предсказуемый и непредсказуемый стимулы (СРВР), вычисленная по формуле:

$$\text{СРВР} = \frac{\text{ВР}_D - \text{ВР}_I}{\text{ВР}_D + \text{ВР}_I}. \quad (1)$$

Увеличение СРВР отражает укороченное ВР на целевой предсказуемый стимул I в сравнении ВР на целевой непредсказуемый стимул D, отражая возрастание эффективности имплицитной фазы СН.

Для проверки надежности имплицитных мер СН для детей всех возрастов в диапазоне от 3 до 9 лет были вычислены корреляции между сырым временем реакции на целевые предсказуемый и непредсказуемый стимулы, а также СРВР между всеми экспериментальными блоками. В качестве эксплицитных мер зрительного СН 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 [100]. 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.

## **2.2. Эксперимент 2. Исследование связи нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи со способностью к пониманию речи**

### *2.2.1. Цели и задачи исследования*

Целью эксперимента является изучение связи между уровнем развития рецептивной речи (то есть, способностью к пониманию устной речи) и параметрами нейронного отслеживания естественной речи для выявления мозговых механизмов, лежащих в основе речевого развития у детей в возрасте от 3 до 8 лет.

Предполагается, что коэффициенты прогнозирования акустической и семантической моделей ФВО (п. 2.2.5), то есть выраженность нейронного отслеживания на данных уровнях, будут положительно коррелировать с уровнем развития рецептивной речи, измеренным при помощи методики *Preschool Language Scales 5-й версии (PLS-5)*, переведенной и адаптированной для русского языка [23]. Показатель рецептивной речи был выбран в связи с тем, что понимание устной речи играет критическую роль в речевом и общем когнитивном развитии детей. Коэффициенты прогнозирования моделей ФВО были выбраны потому, что они демонстрируют способность получаемой модели предсказывать мозговую активность, основываясь на характеристиках стимула, что отражает уровень «закодированности» компонента стимула в сигнале ЭЭГ, или уровень нейронного отслеживания этого компонента.

### 2.2.2. Участники исследования

В исследовании приняли участие 56 детей (33 мальчика, 23 девочки) в возрасте от 3 до 8 лет (средний возраст  $5,63 \pm 1,21$  лет) (Рисунок 3, Таблица 2). В анализ включались участники без истории неврологических или психиатрических заболеваний в соответствии с данными, предоставленными их родителями в демографическом опроснике. Также, в анализ включались только те участники, которые прошли электроэнцефалографическую часть исследования и оценку уровня речевого поведения (п. 2.2.2).

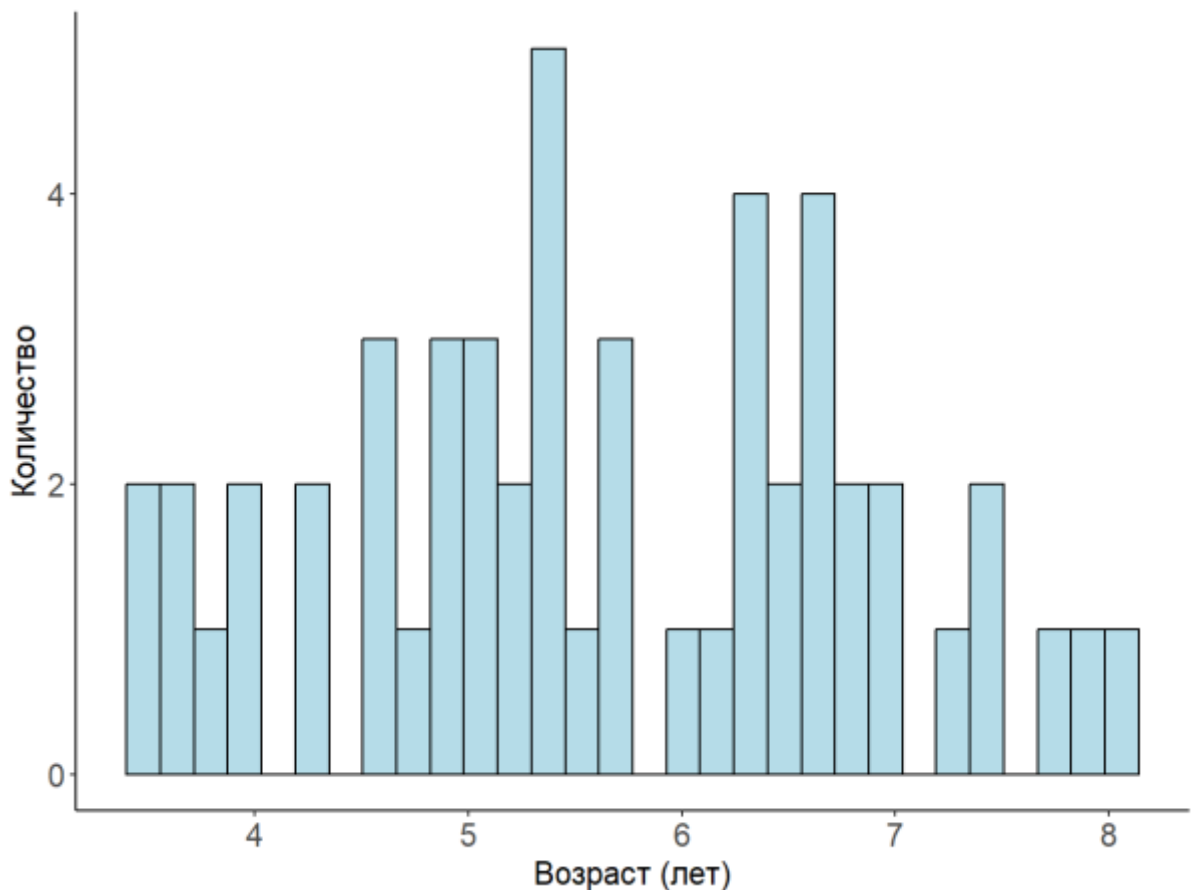


Рисунок 3 — Гистограмма распределения возрастов участников эксперимента 2

Таблица 2 — Распределение количества участников эксперимента 2 по возрастам.

Возрастной диапазон	3–4 года	4–5 лет	5–6 лет	6–7 лет	7–8 лет	8–9 лет
Количество участников	5	11	14	16	5	1

Процедура исследования соответствовала стандартам проведения исследований Хельсинкской декларации 1975 года и была одобрена Биоэтическим комитетом Университета «Сириус» (протокол от 13.07.2022). Перед началом исследования были получены информированные согласия от детей и от их законных представителей.

### *2.2.3. Оценка уровня речевого развития*

Уровень речевого развития участников исследования оценивался при помощи методики Preschool Language Scales, Fifth Edition (PLS-5; Шкалы дошкольного языкового развития 5-й версии), переведенной и адаптированной на русский язык [23]. PLS-5 представляет собой интерактивную методику для оценки уровня развития процессов понимания речи (шкала слухового понимания, или шкала рецептивной речи), а также уровня развития способности к продукции речи (шкала экспрессивной речи). Оценка уровня речевого развития производилась в отдельный от процедуры ЭЭГ-исследования день (медиана – 10 дней от дня проведения ЭЭГ-исследования).

#### *2.2.4. Процедура электроэнцефалографического исследования*

В ходе исследования проводилась регистрация 32-канальной ЭЭГ (система BrainProducts actiCHamp, Brain Products GmbH, Германия) с частотой дискретизации 500 Гц (и 50 кГц для части записей, для которых далее оффлайн частота дискретизации была понижена до 500 Гц). Сопротивление электродов не превышало 50 кОм и удерживалось на уровне 15 кОм. 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®) [13]. 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. Тексты стимульных материалов представлены в Приложении Б. 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; они не были исключены из выборки, т. к., во-первых, согласно методическим статьям, данного объема данных достаточно для проведения анализа [101], а во-вторых, анализ данных без включения этих участников показал те же эффекты.

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).

### *2.2.5. Анализ электроэнцефалографических данных*

Предобработка ЭЭГ-данных производилась при помощи библиотеки MNE Python версии 1.5 [102]. Предобработка данных включала в себя:

- фильтрацию данных (фильтр верхних частот на 1 Гц, фильтр нижних частот на 15 Гц); частотный диапазон от 1 до 15 Гц был выбран на основании методических рекомендаций для обработки данных [12, 13], а также с учетом данных о частотных диапазонах ритмов речи, которые находятся именно в этом диапазоне [57, 98];
- зрительный поиск плохих каналов (т. е. каналов, частотные и амплитудные характеристики которых значительно превышают средние по остальным каналам) и их последующую интерполяцию методом сплайновой интерполяции (в среднем было интерполировано 0,875 канала на запись; диапазон от 0 до 5 каналов);
- удаление глазодвигательных артефактов при помощи метода независимых компонент; в соответствии с методическими рекомендациями [13], удалялось минимальное количество компонент, топографически и морфологически

соответствующих глазодвигательным артефактам (были удалены от 1 до 3 компонентов).

Дальнейший анализ ЭЭГ-данных производился в среде MATLAB версии 2021b при помощи функций библиотеки mTRF Toolbox [12]. Производилось вычисление функции временного отклика (ФВО; temporal response function, TRF) — линейного фильтра, соотносящего изменения в компоненте стимула,  $S(t)$ , с изменениями в электрофизиологическом сигнале,  $R(t, n)$ , при помощи линейной свертки

$$R(t, n) = \text{ФВО} * S(t), \quad (2)$$

где  $S(t)$  и  $R(t, n)$  — временные ряды, которые преобразуются в матрицы временных лагов  $S$  и  $R$ , представляющие значения заданного компонента стимула и соответствующего по времени  $t$  сигнала ЭЭГ по каналу  $n$  соответственно. Компонент стимула может быть как непрерывным (например, огибающая или спектрограмма аудиосигнала), так и дискретным (например, временные точки начала предъявления каждого слова).

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:

$$\text{ФВО} = (S^T S + \lambda E)^{-1} S^T R, \quad (3)$$

где  $S$  и  $R$  — матрицы временных лагов для стимула и ЭЭГ, а  $\lambda$  — параметр регуляризации, оптимизируемый в ходе кросс-валидации. 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 [12].

Перед проведением анализа частота дискретизации стимула и ЭЭГ была снижена до 128 Гц. Для вычисления ФВО было выбрано временное окно от  $-200$  до 600 мс. В анализе использовались два компонента аудиостимулов. Первый,

акустический, представляет собой огибающую аудиосигнала, вычисленную при помощи преобразования Гильберта. Значения огибающей были логарифмированы для большего сходства огибающей с преобразованиями аудиосигнала в периферической слуховой системе [12]. Второй компонент, семантический, представляет собой семантические несоответствия между словами в тексте с учетом предшествующего контекста данного слова [50]. Для вычисления семантического несоответствия использовалась векторная семантическая модель `word2vec` [103], предобученная на корпусе текстов и интернет-ресурсов на русском языке [104]. На первом этапе была проведена лемматизация, т. е. приведение каждого из слов в текстах стимульных материалов в их начальной форме, при помощи библиотеки `ru morphology` для языка программирования Python. Далее, для каждого из слов был извлечен 300-мерный вектор из русскоязычной модели `word2vec`. Семантическое несоответствие вычислялось по формуле 1 минус коэффициент корреляции Пирсона между вектором данного слова и средним значением векторов всех предыдущих слов в предложении, что позволило учесть предшествующий контекст каждого слова. Для первого слова каждого предложения семантического несоответствия вычислялось по формуле 1 минус коэффициент корреляции Пирсона между вектором данного слова и средним векторов всех слов предыдущего предложения. Для самого первого слова в тексте было установлено значение 1 [50]. 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. Наглядное представление акустического и семантического компонентов стимулов, использованных в анализе, показано на Рисунке 4; иллюстрация анализа ЭЭГ-данных с применением функции временного отклика представлено на Рисунке 5.

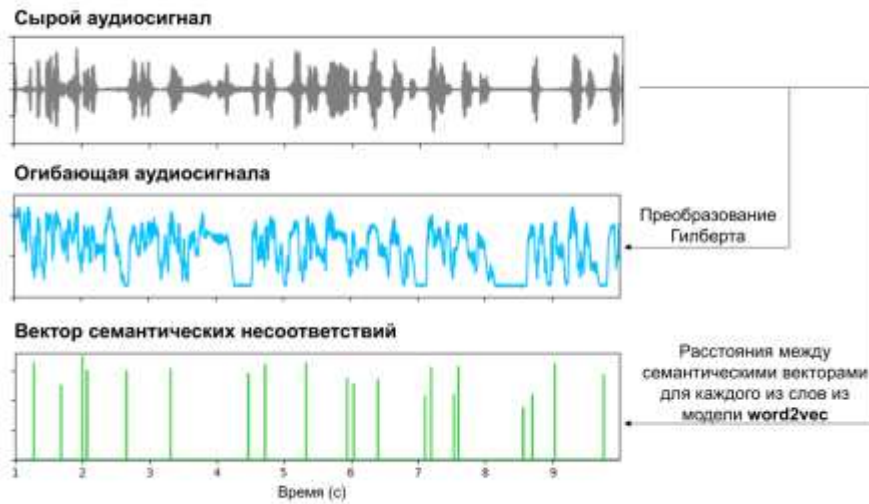


Рисунок 4 — Акустический (огибающая аудиосигнала) и семантический (семантическое несоответствие) компоненты речевых аудиостимулов, использованных в анализе. Для целей визуализации взяты только первые 10 с одного стимула, а частота дискретизации сырого аудиосигнала понижена до 500 Гц

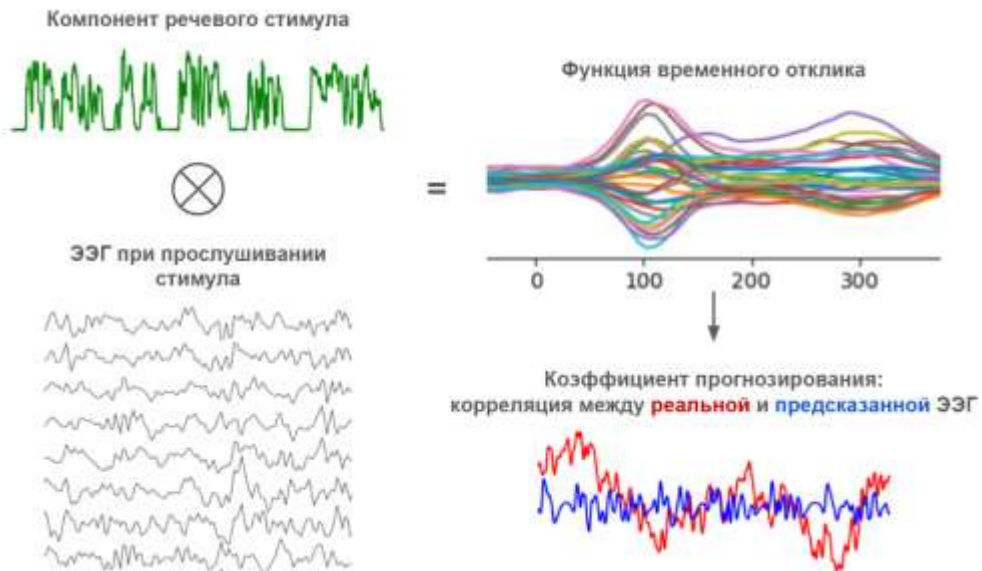


Рисунок 5 — Иллюстрация анализа ЭЭГ-данных с применением функции временного отклика. Для примера представлены акустический компонент речевого стимула (огибающая аудиосигнала), фрагмент ЭЭГ-записи при прослушивании аудиостимула, а также фрагменты реального сигнала ЭЭГ и сигнала, предсказанного ФВО. Символ умножения отображает линейную свертку

Статистический анализ производился в RStudio версии 2023.03.01 [100] с использованием функций стандартной библиотеки и библиотеки ggplot2 для визуализации данных. Критический уровень значимости  $\alpha = 0,05$  был установлен для двусторонних статистических тестов; с учетом односторонней гипотезы о положительной корреляции между коэффициентами прогнозирования и возрастом и уровнем развития рецептивной речи у детей,  $\alpha = 0,025$ . Для решения проблемы множественных сравнений, рассматривая корреляции с сигналом ЭЭГ по каждому электроду, значимыми признавались те кластеры, в которых статистически значимые значения были получены минимум для двух соседних каналов. Учитывая независимость измерений по каждому электроду [105], вероятность ошибки первого рода для каждого кластера была  $0,025^2 = 6,25 * 10^{-6}$ .

Для проверки статистической значимости моделей ФВО, в соответствии с методическими рекомендациями [12, 13], были рассчитаны «нулевые» модели ФВО, в которые на вход подавались те же стимульные материалы, но развернутые во времени («зеркальная речь»). Затем, на основании распределения коэффициентов прогнозирования для обычной и «зеркальной» речи был вычислен коэффициент  $d'$  (d-prime), отражающий меру чувствительности моделей с обычной речью:

$$d' = \frac{\mu_{\text{обычная речь}} - \mu_{\text{«зеркальная» речь}}}{\sqrt{\frac{\sigma_{\text{обычная речь}}^2 - \sigma_{\text{«зеркальная» речь}}^2}{2}}}, \quad (4)$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  — среднее значение и стандартное отклонение коэффициентов прогнозирования для обычной и «нулевой» моделей.

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. Особенности зрительного статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет

#### *3.1.1. ИмPLICITные меры статистического научения: количество правильных ответов и ложных тревог*

Статистический анализ показал, что количество ложных тревог в ответ на целевые стимулы в имPLICITной фазе экспериментальной парадигмы не изменяется статистически значимо между экспериментальными блоками (однофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями:  $F(3; 285) = 0,65$ ,  $p = 0,58$ ). Количество ложных тревог во всех экспериментальных блоках не имело статистически значимой корреляции с возрастом участников (коэффициент корреляции Пирсона, первый блок:  $R = 0,09$ ,  $p_{adj} = 1$ ; второй блок:  $R = -0,16$ ,  $p_{adj} = 0,48$ ; третий блок:  $R = -0,17$ ,  $p_{adj} = 0,41$ ; четвертый блок:  $R = -0,21$ ,  $p_{adj} = 0,15$ ) (Рисунок 6).

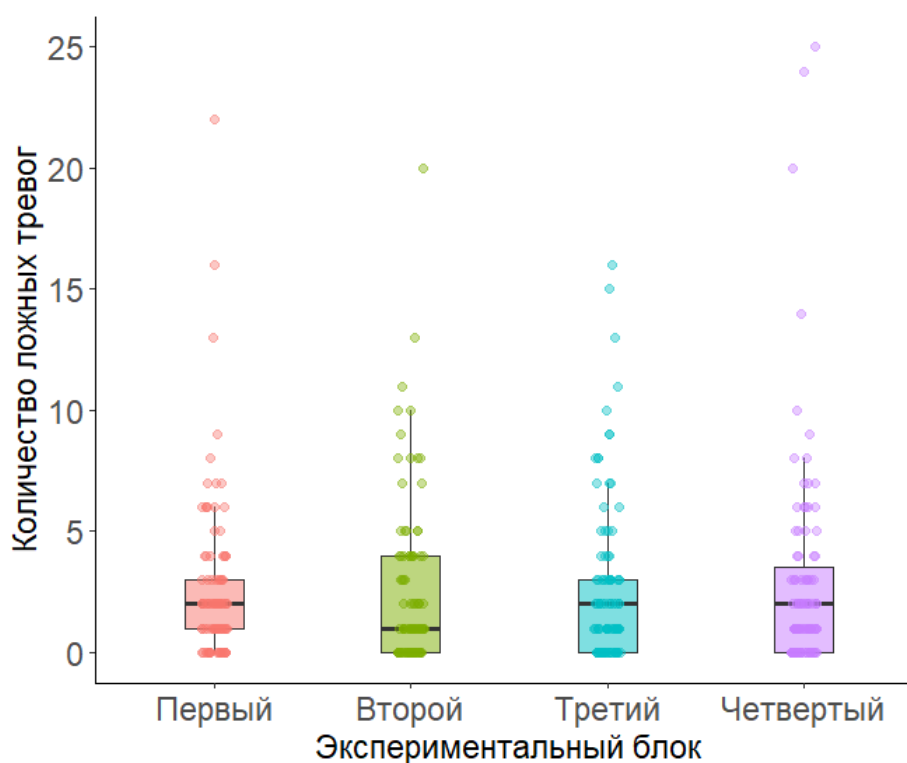


Рисунок 6 — Гистограмма количество ложных тревог для каждого экспериментального блока имплицитной фазы статистического научения

Далее было проанализировано количество правильных ответов на целевые предсказуемый и непредсказуемый стимулы (Рисунок 7). Были обнаружены статистически значимые эффекты факторов типа стимула ( $F(1; 96) = 22,227, p < 0,001, \eta^2 = 0.02$ ) и экспериментального блока ( $F(3; 285) = 6,982, p < 0,001, \eta^2 = 0.05$ ), а также взаимодействия этих факторов ( $F(3; 285) = 2,9, p = 0,035, \eta^2 = 0.01$ ) на количество правильных ответов. Апостериорные тесты показали, что количество правильных ответов на предсказуемый стимул I статистически значимо не различается между экспериментальными блоками, тогда как количество правильных ответов на предсказуемый стимул D снижалось от первого к третьему ( $t = 3,3, p_{adj} = 0,008$ ) и четвертому ( $t = 3,78, p_{adj} = 0,002$ ) блокам (полная таблица апостериорных тестов представлена в Приложении В). Также, среднее количество правильных ответов на предсказуемый стимул I было выше третьем ( $t = -4,46, p_{adj} < 0,001$ ) и четвертом ( $t = -3,5, p_{adj} < 0,001$ ) блоках по сравнению со стимулом D.

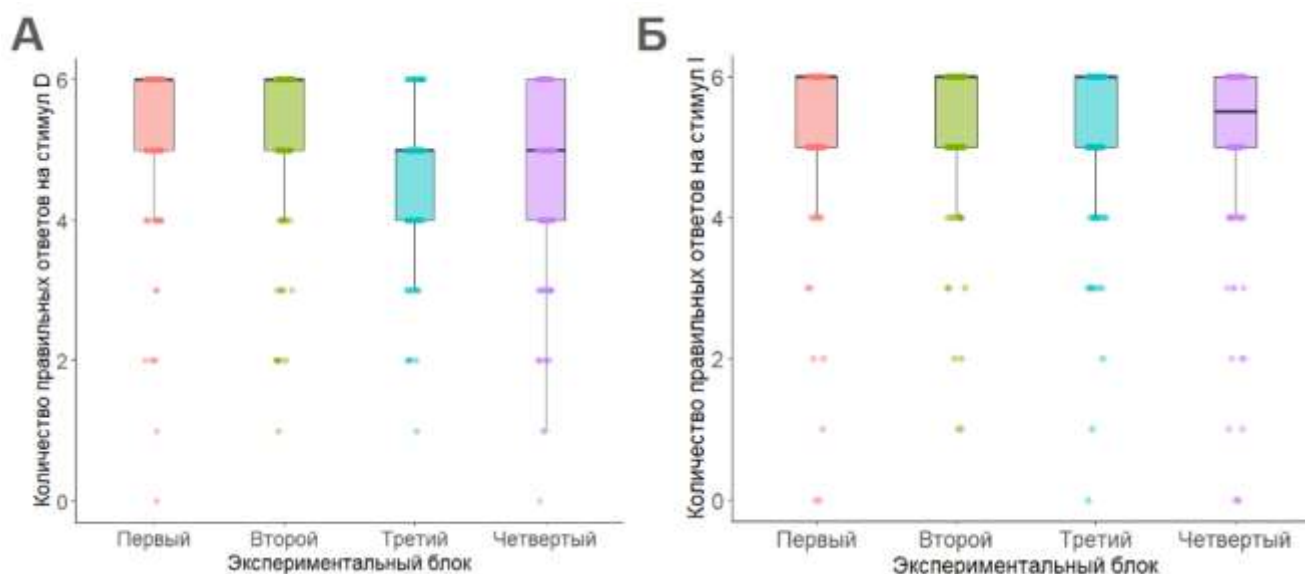


Рисунок 7 — Гистограммы количества правильных ответов на непредсказуемый стимул D (А) и правильных ответов на предсказуемый стимул I (Б) для каждого экспериментального блока имплицитной фазы статистического научения

Количество правильных ответов на непредсказуемый стимул D 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 I 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 ( $R = 0,37$ ,  $p_{adj} = 0,002$ ).

### 3.1.2. Имплицитные меры статистического научения: время реакции

На первом этапе был проведен статистический анализ сырого ВР на целевые предсказуемый и непредсказуемый стимулы. Двухфакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями показал статистически значимые эффекты факторов типа стимула ( $F(1; 90) = 35,701$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,08$ ), экспериментального блока ( $F(3; 242) = 3,992$ ,  $p = 0,01$ ,  $\eta^2 = 0,01$ ), а также взаимодействия этих факторов ( $F(3; 248) = 11,44$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,02$ ). Попарные

апостериорные сравнения показали, что сырое ВР на целевые стимулы не различалось статистически значимо в первом блоке ( $t = 1,64$ ,  $p_{adj} = 0,1$ ), но на предсказуемый стимул I ВР было меньше во втором ( $t = 6,86$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ), третьем ( $t = -6,76$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ) и четвертом блоках ( $t = 3,9$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ) по сравнению с ВР на непредсказуемый стимул D. ВР на непредсказуемый стимул D увеличилось с первого блока ко второму ( $t = -4,76$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ), третьему ( $t = -6,76$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ) и четвертому ( $t = -3,4$ ,  $p_{adj} = 0,006$ ) без статистически значимых изменений между вторым и третьим ( $t = -0,96$ ,  $p_{adj} = 1$ ), вторым и четвертым ( $t = 0,75$ ,  $p_{adj} = 1$ ) и третьим и четвертым блоками ( $t = 1,67$ ,  $p_{adj} = 0,6$ ). При этом, ВР на предсказуемый стимул I не изменялось статистически значимо между экспериментальными блоками (первый и второй:  $t = 1,23$ ,  $p_{adj} = 0,66$ ; первый и третий:  $t = 0,7$ ,  $p_{adj} = 1$ ; первый и четвертый:  $t = 0,1$ ,  $p_{adj} = 1$ ; второй и третий:  $t = -0,45$ ,  $p_{adj} = 1$ ; второй и четвертый:  $t = -0,81$ ,  $p_{adj} = 1$ ; третий и четвертый:  $t = -0,64$ ,  $p_{adj} = 1$ ) (Рисунок 8).

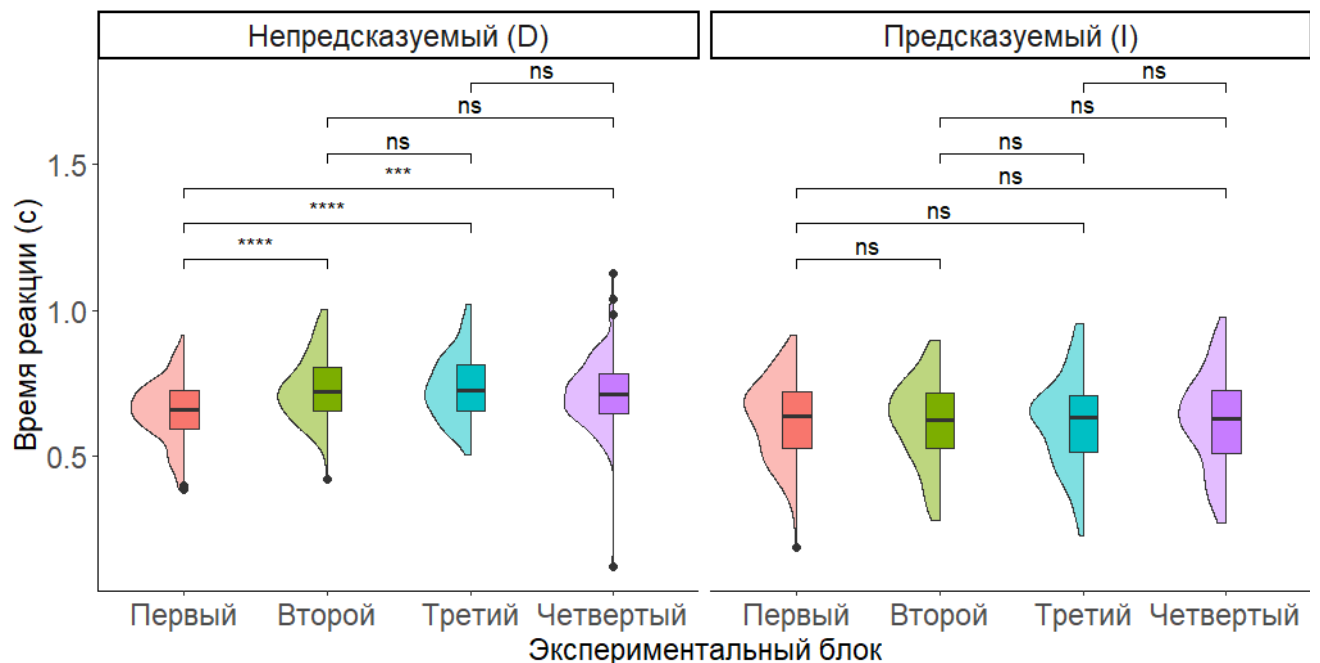


Рисунок 8 — Скрипичные графики среднего времени реакции на целевые предсказуемый (I) и непредсказуемый (D) стимулы в четырех экспериментальных блоках имплицитной фазы статистического научения. Обозначения: \*\*\* –  $p < 0,001$ , \*\*\*\* –  $p < 0,0001$ , ns – не значимо

Далее была рассмотрена динамика сырого ВР на целевые стимулы в ответ на каждое предъявление этих стимулов (Рисунок 9). Это раскрывает результаты по анализу средних значений сырого ВР по экспериментальным блокам и показывает возрастание ВР на непредсказуемый стимул D от его предъявлений в первом блоке к последующим предъявлениям, а также умеренное снижение ВР на предсказуемый стимул I от первого блока к последующим.

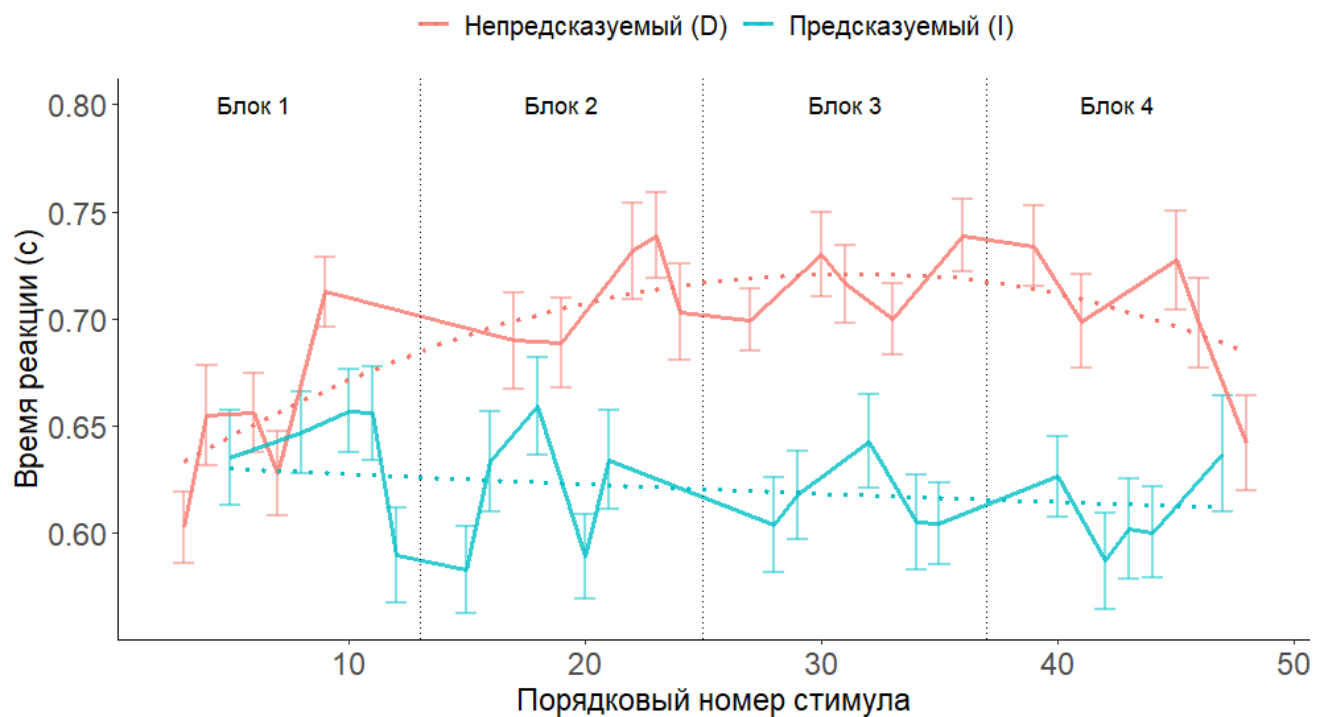


Рисунок 9 — График динамики сырого времени реакции на целевые предсказуемый (I) и непредсказуемый (D) стимулы в ответ на каждое предъявление стимулов. Показаны стандартные ошибки усредненных значений; пунктирный график демонстрирует линию тренда

Наконец, была проанализирована стандартизованная разность времени реакции между целевыми предсказуемым и непредсказуемым стимулами (СРВР) в каждом экспериментальном блоке. При помощи однофакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями был обнаружен статистически значимый эффект экспериментального блока ( $F(3; 233) = 8,9, p < 0,001, \eta^2 = 0,04$ ). Апостериорные попарные тесты показали увеличение СРВР от первого ко второму

( $t = -4,31$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ) и третьему ( $t = -4,75$ ,  $p_{adj} < 0,001$ ) блокам. Между первым и четвертым ( $t = 2,49$ ,  $p_{adj} = 0,09$ ), вторым и третьим ( $t = -0,46$ ,  $p_{adj} = 1$ ), вторым и четвертым ( $t = 1,03$ ,  $p_{adj} = 1$ ) и третьим и четвертым ( $t = 1,81$ ,  $p_{adj} = 0,44$ ) блоками статистически значимых различий не обнаружено (Рисунок 10). Не выявлено статистически значимой корреляции СВР 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 ВР 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:  $R = -0,13$ ,  $p = 0,26$ ).

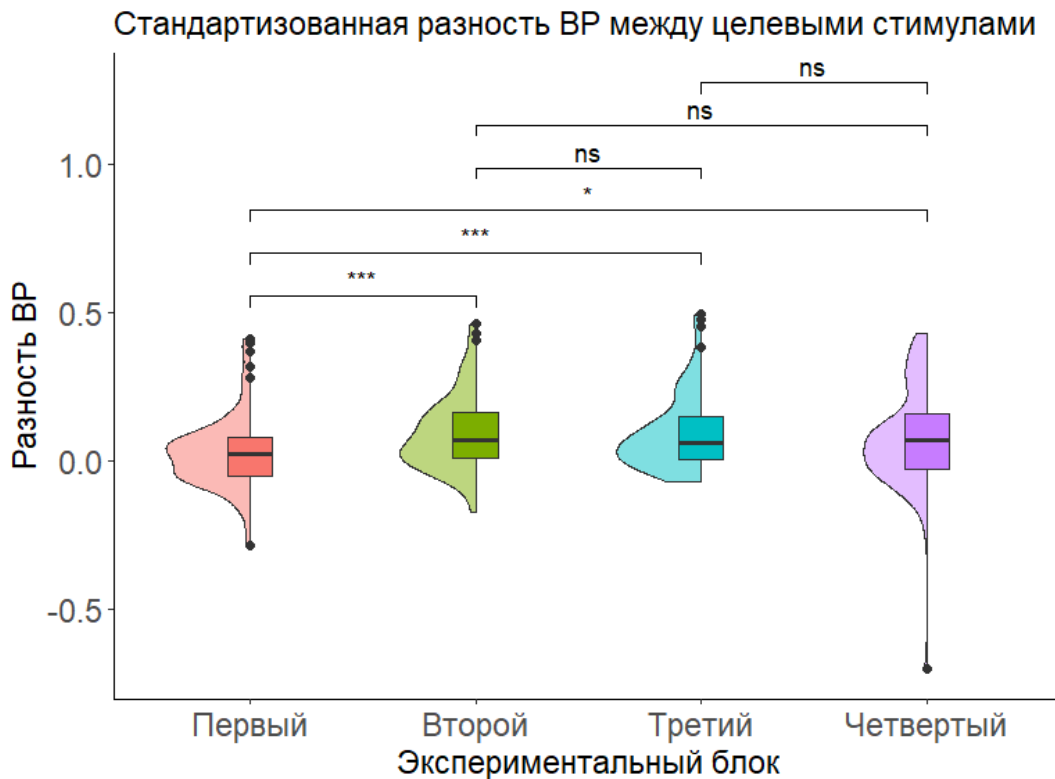


Рисунок 10 — Скрипичный график средней стандартизованной разности времени реакции между целевыми предсказуемым (I) и непредсказуемым (D) стимулами (СВР) в четырех экспериментальных блоках имплицитной фазы статистического научения. Обозначения: \* –  $p < 0,05$ , \*\*\* –  $p < 0,001$ , ns – не значимо

### 3.1.3. Эксплицитные меры статистического научения

Были проанализированы количество правильных ответов и количество правильных распознаваний отдельных триплетов в задаче на выбор из правильного триплета. Среднее количество правильных распознаваний триплетов было на уровне случайности в 50% (односторонний t-тест:  $t = 1,87$ ,  $p = 0,06$ ). Результаты показывают отсутствие значимых отличий от уровня случайности для триплетов ABC, DEF и JKL (среднее  $\pm$  стандартное отклонение и односторонний t-тест, ABC:  $49,47 \pm 28,55\%$ ,  $t = -0,18$ ,  $p = 0,86$ ; DEF:  $54,42 \pm 29,24\%$ ,  $t = 1,48$ ,  $p = 0,14$ ; JKL:  $45,31 \pm 27,9\%$ ,  $t = -1,64$ ,  $p = 0,1$ ). Уровень значимости был достигнут для триплета GHI ( $55,98 \pm 30\%$ ,  $t = 1,95$ ,  $p = 0,05$ ). 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 11).

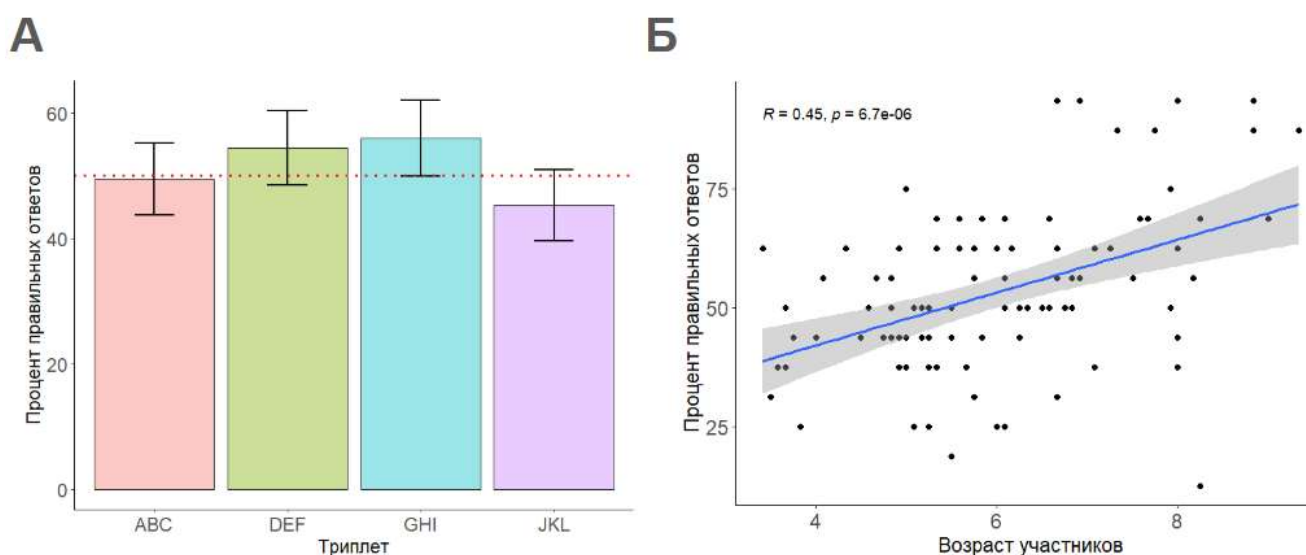


Рисунок 11 — (А) Гистограмма процентов правильных распознаваний отдельных триплетов в эксплицитной фазе эксперимента. Красная линия отражает случайный уровень в 50%, также показаны стандартные ошибки средних. (Б) График корреляции процентов правильных ответов с возрастом участников

## 3.2. Связь нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи со способностью к пониманию устной речи

### 3.2.1. Нейронное отслеживание естественной речи у детей на акустическом и семантическом уровнях

Были получены две модели ФВО, отражающие нейронное отслеживание акустического (огнибающая аудиосигнала) и семантического (семантические несоответствия между словами в текстах) компонентов естественной речи у детей (Рисунок 12).

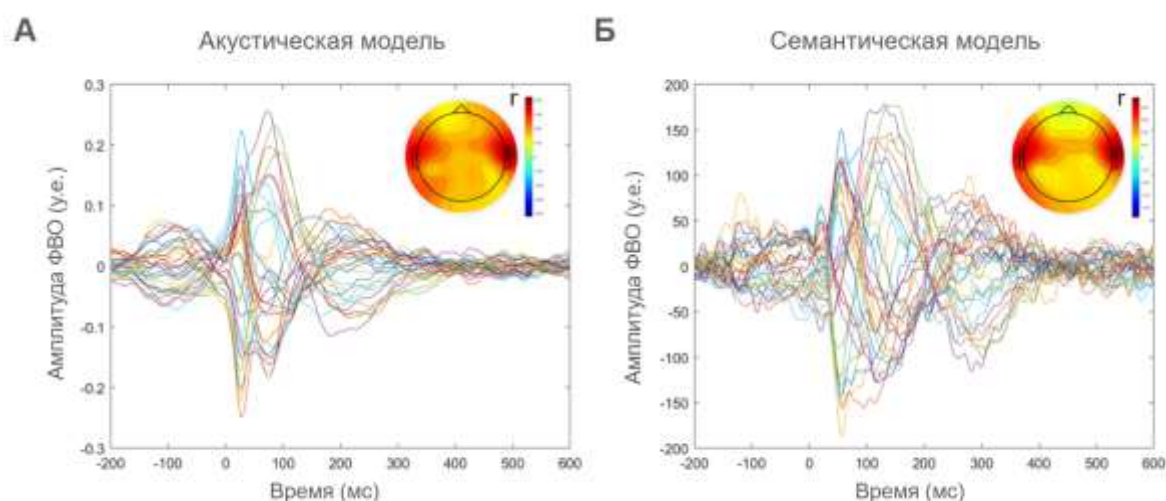


Рисунок 12 — Модели ФВО и топографическое распределение коэффициентов прогнозирования на акустический (А) и семантический (Б) компоненты естественной речи у детей

Акустическая модель ФВО демонстрирует два пика: первый на латентностях между 25 и 80 мс, и второй, менее выраженный, на латентностях 200–300 мс. В семантической модели ФВО выделяются два ранних пика (около 50 мс и на латентностях 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.

Для акустической модели ФВО среднее и стандартное отклонение коэффициентов прогнозирования составляет  $0,041 \pm 0,025$  (диапазон от 0,0084 до 0,103) для естественной речи, и  $-0,002 \pm 0,01$  (диапазон от  $-0,0213$  до 0,0287) для «зеркальной» речи. Среднее значение коэффициентов прогнозирования для обычной и «нулевой» моделей статистически значительно различались ( $t = 11,453$ ,  $p < 0,001$ ,  $d' = 2,27$ ). Таким образом, акустическая модель ФВО является статистически значимой.

Для семантической модели ФВО среднее и стандартное отклонение коэффициентов прогнозирования составляет  $0,022 \pm 0,015$  (диапазон от 0,0074 до 0,061) для естественной речи, и  $0,002 \pm 0,006$  (диапазон от  $-0,0153$  до 0,0127) для

«зеркальной» речи. Среднее значение коэффициентов прогнозирования для обычной и «нулевой» моделей статистически значимо различались ( $t = 10,894$ ,  $p < 0,001$ ,  $d' = 2,07$ ). Таким образом, семантическая модель ФВО также является статистически значимой.

### 3.2.2. Связь нейронного отслеживания на акустическом и семантическом уровнях с возрастом и способностью к пониманию устной речи

На данном этапе был проведен корреляционный анализ между усредненными по всем электродам коэффициентами прогнозирования, возрастом участников исследования и их способностью к пониманию устной речи, измеренную при помощи методики PLS-5 (шкала рецептивной речи). В целом по выборке сырые баллы по шкале рецептивной речи лежали в диапазоне от 18 до 65 баллов (среднее 54,81, стандартное отклонение 8,97) (Рисунок 13).

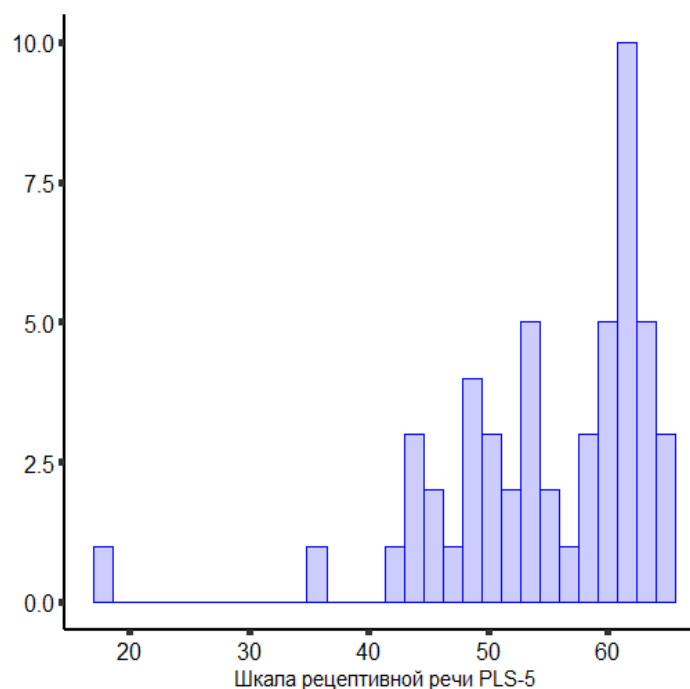


Рисунок 13 — Гистограмма распределения сырых баллов по шкале рецептивной речи PLS-5

Была выявлена статистически значимая корреляция между коэффициентами прогнозирования акустической модели ФВО и возрастом участников (коэффициент корреляции Пирсона:  $R = 0,38$ ,  $p = 0,005$ ) и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5 (коэффициент корреляции Спирмена:  $r = 0,4$ ,  $p = 0,003$ ) (Рисунок 14).

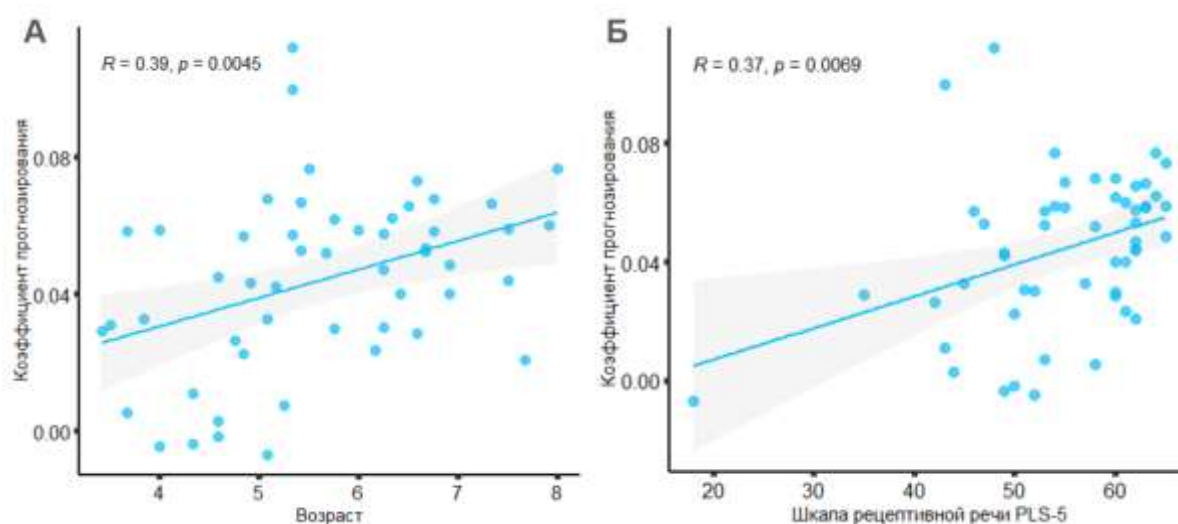


Рисунок 14 — График корреляции возраста участников (А) и баллами по шкале рецептивной речи (Б) методики PLS-5 с коэффициентами прогнозирования акустической модели ФВО

Для семантической модели ФВО также были выявлены статистически значимые положительные корреляции с возрастом участников ( $R = 0,53$ ,  $p < 0,001$ ) и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5 ( $r = 0,54$ ,  $p < 0,001$ ) (Рисунок 15).

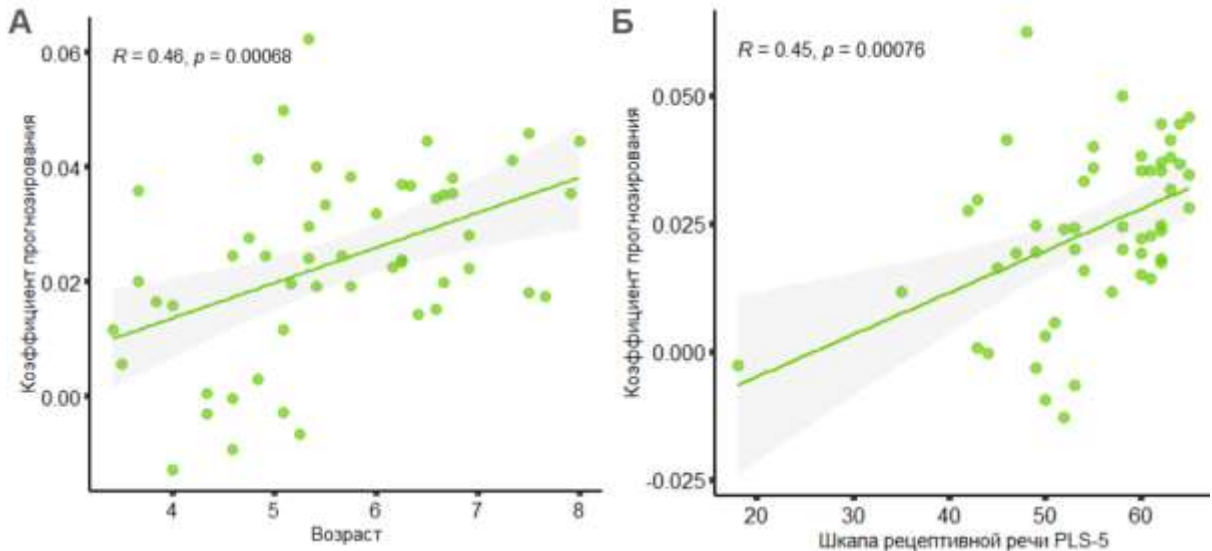


Рисунок 15 — График корреляции возраста участников (А) и баллами по шкале рецептивной речи (Б) методики PLS-5 с коэффициентами прогнозирования семантической модели ФВО

### 3.2.3. Топографический анализ связи между коэффициентами прогнозирования и баллами по шкале рецептивной речи PLS-5

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 (ТР9:  $R = 0,32$ ,  $p = 0,02$ ; О1:  $R(50) = 0,31$ ,  $p = 0,03$ ; Т8:  $R(50) = 0,3$ ,  $p = 0,03$ ; FC6:  $R(50) = 0,3$ ,  $p = 0,03$ ). Эти каналы сформировали один статистически значимый кластер каналов ТР9 и FC6 в правой височной области.

Для семантической модели ФВО также были обнаружены статистически значимые корреляции по нескольким каналам (Fr1:  $R = 0,33$ ,  $p = 0,02$ ; C3:  $R = 0,28$ ,

$p = 0,04$ ; Pz:  $R = -0,34$ ,  $p = 0,01$ ; O1:  $R = 0,31$ ,  $p = 0,03$ ; F4:  $R = 0,35$ ,  $p = 0,01$ ). Учитывая однонаправленный характер гипотезы о положительной связи между баллами по шкале рецептивной речи и коэффициентами прогнозирования, канал Pz был исключен из анализа по причине отрицательного коэффициента корреляции. 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; этот анализ также контролирует и фактор возраста, который отражен в положительной корреляции его с коэффициентами прогнозирования. Выявлены статистически значимые корреляции в нескольких каналах (Fr1:  $R = 0,43$ ,  $p = 0,001$ ; 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 16).



Рисунок 16 — 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

### 3.3. Связь нейронного отслеживания естественной речи с параметрами зрительного статистического обучения

Дополнительно был проведен статистический анализ, направленный на выявление взаимосвязей между параметрами нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи и имплицитными мерами зрительного СН. Для этого были вычислены коэффициенты корреляции Пирсона между стандартизированной разностью ВР 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:  $r = 0,14$ ,  $p = 0,42$ ).

## ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 4.1. Особенности статистического научения у детей в возрасте от 3 до 9 лет

В работе были исследованы особенности имплицитной и эксплицитной фаз зрительного СН у детей в возрасте от 3 до 9 лет. В имплицитных мерах выявлен эффект СН, заключающийся в более быстром ВР на предсказуемый, чем на непредсказуемый целевой стимул, а также большее количество правильных ответов на предсказуемый, чем на непредсказуемый стимул. В эксплицитных мерах обнаружено, что количество правильных распознаваний триплетов было на уровне случайности (50%), но с достаточно большой дисперсией, со значимыми отклонениями только для триплета, содержащего целевой предсказуемый стимул. Также не было найдено статистически значимых корреляций возраста участников с имплицитными мерами СН, однако значимая корреляция выявлена для эксплицитных мер. Дополнительно был проведен анализ надежности и стабильности ответов участников в имплицитной фазе, который показал высокие корреляции между блоками, что свидетельствует о достаточной надежности экспериментальной парадигмы для детей всех возрастов в выборке.

#### *4.1.1. Имплицитные меры зрительного статистического научения*

Имплицитные меры зрительного СН показали увеличение сырого ВР на непредсказуемый стимул и отсутствие статистически значимых изменений ВР на предсказуемый стимул в ходе имплицитной фазы экспериментальной парадигмы. Эта динамика наблюдается уже с первого экспериментального блока, с седьмого предъявления целевых стимулов. Подобный ранний эффект сокращения ВР на целевые стимулы наблюдался в нескольких предыдущих исследованиях [22, 80].

Обнаруженное стабильное ВР на предсказуемый стимул и увеличение ВР на непредсказуемый стимул отличаются от данных, представленных в исследованиях с участием детей в возрасте от 5 до 12 лет [22, 78], а также со взрослыми [80], где ВР как на предсказуемый, так и на непредсказуемый стимулы снижалось на протяжении всей длительности экспериментальной парадигмы. Обнаруженные в данной работе эффекты, демонстрирующие отсутствие общего снижения ВР в ходе эксперимента, могут быть в первую очередь объяснены различиями в экспериментальных задачах, которые ставились участникам. Задача, использованная в данной работе, по существу, представляет собой задачу по типу Go/No-Go, или задачу на бдительное внимание, в которой требуется постоянное селективное внимание к предъявляемым стимулам и подавление ответов на нерелевантные, нецелевые стимулы [106, 107]. Напротив, в исследованиях van Witteloostuijн и коллег [22, 78] была использована задача, в которой требовалось нажимать на кнопку при предъявлении каждого стимула (статистический анализ при этом также включал анализ ВР на целевые стимулы). Такой тип задачи может быть более легким для детей, т. к. он не требует вовлечения селективного внимания, а также когнитивного и ингибиторного контроля для подавления ответов на нерелевантные стимулы. Однако важно отметить, что такая задача не вызывает фасилитацию имплицитного извлечения статистических закономерностей в потоке стимулов. Задача, примененная в данной работе, хоть и требовала устойчивого внимания и могла вызывать усталость, усиливала освоение статистических закономерностей стимулов и антиципацию целевых стимулов, что в итоге, вероятно, могло положительно повлиять на результативность выполнения задачи. В целом, результаты имплицитной фазы можно проинтерпретировать через вклад утомления, вызванного постоянным бдительным вниманием к последовательности стимулов и антиципации целевых стимулов, и выраженного в снижении ВР на непредсказуемый стимул, что скомпенсировало ВР на предсказуемый стимул.

Имплицитные эффекты СН также поддерживаются данными по количеству правильных ответов, которое остаются относительно высоким во всех четырех экспериментальных блоках. При этом точность распознавания (количество

правильных ответов) для непредсказуемого стимула снижается от первого блока к последним. В совокупности с данными по ВР это также демонстрирует эффект СН, который проявляется в компенсации эффектов утомления при выполнении задачи.

Эксплораторный корреляционный анализ между имплицитными мерами СН и возрастом участников показал отсутствие статистически значимой корреляции. Некоторые предыдущие исследования предполагают, что СН не имеет связи с возрастом [22, 89], развиваясь в раннем младенческом возрасте и оставаясь стабильным в дальнейшем [20]. Основываясь на полученных данных, можно заключить, что имплицитное зрительное СН у детей из выборки является в достаточной мере сформированным уже к возрасту трех лет и остается стабильным по крайней мере до девяти лет.

#### *4.1.2. Эксплицитные меры статистического научения*

Результаты эксплицитной фазы экспериментальной парадигмы показывают, что среднее количество правильных распознаваний триплетов были на уровне случайности, за исключением триплета, содержащего целевой предсказуемый стимул. Также наблюдалась положительная статистически значимая корреляция количества правильных ответов с возрастом участников.

Эти результаты частично согласуются с предыдущими исследованиями. Так, в исследованиях зрительного СН у детей от 5 лет была выявлена положительная значимая корреляция возраста детей с общим количеством правильных ответов [21, 78, 86–88]. Данное исследование впервые показывает положительную значимую корреляцию возраста детей с количеством правильных ответов в эксплицитной фазе на расширенной выборке, включающей также детей в возрасте от 3 до 5 лет — недостаточно исследованный возрастной диапазон. Как и в части предыдущих исследований [87, 88], в данной работе показано, что количество ответов пятилетних детей было около уровня случайности в 50%, а младшие дети в среднем справлялись с задачей хуже. Это демонстрирует низкую надежность эксплицитных

мер СН для детей младшего и дошкольного возраста. Так, в исследованиях обсуждается, что эффективность выполнения эксплицитных задач связана с освоением языка и грамотности [108], развитием рабочей памяти [109], а также развитием селективного внимания и способности к вынесению эксплицитных суждений [22]. Эти когнитивные функции могут быть недостаточно развиты у детей дошкольного возраста. Кроме того, экспериментальная задача, использованная в настоящем исследовании (как и во многих предыдущих исследованиях СН), требует преобразования последовательного представления триплетов (по одному стимулу, как в имплицитной фазе) в одновременное представление (целыми триплетами, как в эксплицитной фазе). Такие ментальные операции требуют достаточного уровня развития абстрактного мышления и способностей к ментальным преобразованиям репрезентаций объектов, которые могут быть недостаточно развиты у детей дошкольного возраста. Таким образом, результаты эксплицитной фазы могут быть проинтерпретированы в контексте общего психологического и когнитивного развития детей.

Примечательным результатом эксплицитной фазы является то, что количество правильных распознаваний было выше для триплета, содержащего целевой предсказуемый стимул. Учитывая, что неправильные триплеты в эксплицитной фазе также содержали целевые стимулы (см. Приложение А), это свидетельствует о положительных результатах СН в экспериментальной задаче: дети интернализовали контекст вокруг целевых стимулов и могут его далее распознавать (но, важно отметить, с достаточно большим разбросом значений). Эти результаты позволяют предположить активную природу СН в противовес пассивной и исключительно имплицитной. Действительно, если СН не требует вовлечения активного внимания, то количество правильных распознаваний триплетов должно было быть примерно одинаковым для всех триплетов. Однако, такой паттерн ответов не наблюдается. Вероятно, специфика экспериментальной задачи («... инопланетяне идут на космический корабль друг за другом... двум инопланетянам требуется ваше специальное разрешение для прохода на корабль...») выстраивает деятельность в ходе имплицитной фазы СН таким

образом, что селективное внимание к целевому стимулу усиливает интернализацию предшествующего и последующего контекстов данного стимула.

Триплеты можно рассмотреть в качестве предпонятий по классификации понятий Л. С. Выготского. Предпонятия как особый тип понятий «тем и характеризуются... что они не содержат в себе ни малейшего обобщения при переходе к другим, более высоко стоящим областям. А значит, что оно не может быть осознано» [25]. В случае СН объединение стимулов в триплеты производится на основании переходных вероятностей между ними, т. е. на основании статистических закономерностей предъявления стимулов. Получается, что тройки стимулов, сгруппированные в триплеты, являются предпонятиями, сформированными на основании их временной и статистической близости. (Необходимо отметить, что триплеты сами по себе не являются абстракциями и обобщениями объектов внешнего мира, а только сгруппированными объектами, поэтому их нельзя рассматривать как настоящие понятия с заданным семантическим содержанием.)

Важным является и имплицитная, неосознаваемая природа как предпонятий, так и триплетов в парадигмах СН: в инструкции к эксперименту не говорится о том, что инопланетяне следуют в группах по три. Следовательно, правильное распознавание триплетов возможно только в том случае, если статистическая структура стимульного ряда интериоризирована и в ней имплицитно, при помощи вышеуказанных ментальных преобразований из отдельного временного в последовательное представления, выделены отдельные блоки — триплеты.

Таким образом, СН может быть рассмотрено как активный процесс интериоризации статистических закономерностей последовательностей стимулов и активный процесс формирования предпонятий на основании временной и статистической близости стимулов. СН, вероятно, зависит от специфики экспериментальной задачи, которая может модулировать селективное внимание к определенным стимулам, которое, в свою очередь, определяет эффективность СН — сформированность ментальных репрезентаций предпонятий-триплетов и способность к различению истинных триплетов от ложных.

В литературе продолжается дискуссия о надежности и применимости имплицитных и эксплицитных мер СН, в частности о конструктах и процессах, которые они измеряют [110]. Имплицитные меры были разработаны для косвенной оценки способности к имплицитному извлечению статистических закономерностей предъявления стимулов [83] (к интериоризации этих закономерностей во время эксперимента). Результаты данной работы позволяют заключить, что имплицитные меры чувствительны и применимы к изучению СН у детей. Однако, их чувствительность может зависеть от специфики экспериментальной задачи, которая может повлиять на распределение внимания к стимулам и, как следствие, на особенности интериоризации статистических закономерностей. Эксплицитные меры, напротив, имеют меньшую применимость для изучения СН у детей, т. к. они требуют вовлечения многих процессов и функций, таких как рабочая память, внимание, способность к вынесению эксплицитных суждений, которые у детей находятся в активном развитии.

#### **4.2. Нейронное отслеживание акустического и семантического компонентов естественной речи у детей в возрасте от 3 до 9 лет**

В данной работе были рассмотрены особенности нейронного отслеживания акустического и семантического компонентов естественной речи у детей в возрасте от 3 до 9 лет. Результаты показывают связь между параметрами нейронного отслеживания естественной речи, возрастом детей и их уровнем развития рецептивной речи, измеренной при помощи методики PLS-5. 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 [4, 15, 16, 68, 69, 111, 112] или на младшем школьном возрасте [49, 52, 55, 70, 113–115]. 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.

#### *4.2.1. Нейронное отслеживание акустического компонента естественной речи*

Для акустической модели ФВО, сопоставляющей изменения в огибающей аудиосигнала с изменениями в ЭЭГ-сигнале, обнаружены статистически значимые корреляции с возрастом и уровнем развития рецептивной речи в правом височном кластере каналов ЭЭГ. Предыдущие исследования нейронного отслеживания естественной речи у детей показывают сходную топографию распределения коэффициентов прогнозирования по скальпу [16, 116, 117]. Исследования с участием взрослых показывают, что нейронное отслеживание в височных областях правого полушария связано с обработкой акустических и фонетических характеристик естественной речи [58, 113, 118]. (Важно отметить, что приведенные данные не позволяют делать выводов о локализации источников мозговой активности, но, учитывая сходную методологию в предыдущих исследованиях, можно осторожно связать полученные данные с указанными областями коры.) Исследование с участием группы детей в возрасте от 6 до 12 лет также поддерживает связь правой височной области с обработкой фонологических характеристик естественной речи [49], что показано и для младенцев в возрасте до 1 года [4]. Важно отметить, что процессы обработки фонологических характеристик речи (например, декодирование фонем из акустического потока)

более специализированы, чем обработка исключительно акустического сигнала, эти процессы имеют сходные основания [47, 119], что позволяет сопоставить полученные результаты с литературными данными.

Нейронное отслеживание акустического компонента естественной речи связывают с отслеживанием «акустических граней» (acoustic edges), представляющих собой переходы в мощности и интенсивности акустического сигнала, которые в естественной речи связаны со сменой лингвистических единиц, таких как фонемы, слоги, слова и предложения [57]. Исследователи выделяют так называемые речевые ритмы, которые соответствуют частоте сменяемости лингвистических единиц и вместе с этим — ритмам ЭЭГ (например, дельта-ритм (1–4 Гц) связывают с частотой слов и словосочетаний, а тета-ритм (4–8 Гц) — с частотой слогов и отдельных фонем) [98]. Предполагается, что на этапе обработки акустической информации осуществляется сегментация речевого потока на лингвистические единицы по акустическим граням; далее происходит декодирование смысла каждой единицы и их интеграция в единицы более высокого порядка — например, фонемы интегрируются в слова, слова в словосочетания, словосочетания в предложения и т.д. [62, 63, 65–67]. Таким образом, эти данные показывают прямую (но неоднозначную [см. критику 62]) связь между нейронным отслеживанием акустического компонента естественной речи и процессами, связанными с пониманием речи. Показанная в данной работе возрастная динамика нейронного отслеживания демонстрирует, что с возрастом детей и с увеличением их уровня рецептивной речи на нейрофизиологическом уровне улучшается функционирование систем, направленных на выделение акустических граней, сегментацию речевых единиц и их интеграцию в единицы более высокого порядка. Можно предположить, что этот процесс является не только настройкой мозговых систем (или системогенезом) на восприятие и обработку родной речи, но и, с другой стороны, маркером нисходящих процессов. Так, исследования показывают, что лингвистическая и семантическая информация оказывают влияние на нейронное отслеживание акустического компонента речи [58, 60, 113]. С развитием знаний о мире, увеличением словарного запаса и расширением семантических

категорий, у детей может возрастать вклад не только восходящих (идущих от акустической обработки), но и нисходящих (от прошлого опыта и предсказаний относительно содержания речи) процессов восприятия речи.

#### *4.2.2. Нейронное отслеживание семантического компонента естественной речи*

Модель ФВО, учитывающая обработку семантических несоответствий между словами, может быть функционально сопоставлена с аналогичными исследованиями семантических эффектов в методологии регистрации ВП [50]. В работе были обнаружены два кластера ЭЭГ-каналов, имеющие статистически значимые корреляции с возрастом детей и их уровнем развития рецептивной речи — в левой фронто-центральной и правой теменно-затылочной областях. Предыдущие исследования показывают преимущественно левополушарную латерализацию компонентов ВП, связанных с обработкой семантических различий (в особенности компонента N400, регистрируемого в ответ на семантические изменения между вербальными и невербальными стимулами) [9, 120–122]. В исследованиях с участием детей также были показаны левополушарные семантические эффекты ВП [8, 124]. Морфология моделей ФВО, похожая на эффект N400, была продемонстрирована в исследованиях нейронного отслеживания естественной речи на взрослых участниках [50, 51, 58, 125, 126]. Основываясь на проведенном статистическом анализе (где при помощи частной корреляции влияние возраста участников и обработки акустической информации было проконтролировано), можно заключить, что активность мозговых систем, локализованных в левополушарных фронто-центральных областях и связанных с обработкой семантических несоответствий в речи, отражает как уровень развития семантической обработки (сопоставления акустических форм слов с их значениями, различение семантических категорий и т.д.), так и общий уровень развития способности к пониманию устной речи.

Также был обнаружен кластер ЭЭГ-каналов со статистически значимыми корреляциями в правой теменно-затылочной области. Согласно литературным данным, задние отделы коры головного мозга связаны с компонентом ВП Р600 (положительный компонент с максимальной амплитудой на латентности около 600 мс после предъявления речевого стимула). Р600 связывают с грамматическими суждениями, семантической обработкой, а также с уровнем понимания прослушанной речи [127–129]. Несмотря на то, что в полученной семантической модели ФВО не выявлено выраженной положительной активности около 600 мс, можно предположить, что теменно-затылочный кластер также отражает развитие мозговых систем, связанных с пониманием речи, потенциально отражая процессы, которые в парадигмах с применением ВП отражаются в компоненте Р600.

Ограничением исследования является подход к вычислению семантических несоответствий между словами в текстах для последующего вычисления семантической модели ФВО. Предыдущие исследования были проведены на взрослых участниках, которые уже освоили речь и имеют обширные знания об окружающем мире. Модель word2vec [103, 104], из которой были извлечены семантические векторные репрезентации слов для вычисления семантического несоответствия, может демонстрировать условно «взрослый» языковой опыт, так как она обучалась на больших корпусах литературных текстов и материалах из интернета. Дети, в особенности дошкольного возраста, находятся в процессе освоения языка и получения знаний об окружающем мире. Поэтому применение семантических метрик, как в исследованиях со взрослыми участниками, в исследованиях с участием детей, может быть ограничено. Однако использованные стимульные материалы являются экологически валидными для детей, так как в обычной жизни дети часто слушают сказки или рассказы про животных. Поэтому, несмотря на указанные ограничения, такой вариант анализа данных может быть валидным.

#### *4.2.3. Связь нейронного отслеживания естественной речи с рецептивной речью детей*

Были обнаружены статистически значимые корреляции между коэффициентами прогнозирования (т. е. показателем «выраженности» нейронного отслеживания) в акустической и семантической моделях ФВО, возрастом и баллами по шкале рецептивной речи. Эти корреляции можно интерпретировать как нейрофизиологический маркер развития мозговых систем, специализирующихся на восприятии и обработке акустических и семантических характеристик речи, т. к. именно возрастной диапазон от 3 до 8 лет является ключевым для развития специфических для речи мозговых систем [2]. Таким образом, данная работа делает шаг к потенциальным практическим и клиническим применениям методологии нейронного отслеживания [130], интегрируя нейрофизиологические и психологические данные для углубления понимания психофизиологических механизмов, лежащих в основе развития процессов понимания речи [41]. Так, ФВО может быть неинвазивным нейрофизиологическим маркером развития рецептивной речи, который может применяться как у нейротипичных детей, так и у детей с различными особенностями развития, в том числе с нарушениями коммуникации. Традиционные когнитивно-поведенческие методы диагностики речевого развития требуют непосредственной коммуникации с ребенком; экспериментальные парадигмы, направленные на изучение нейронного отслеживания естественной речи, предполагают лишь прослушивание записей устной речи.

В данной работе полученные результаты рассматриваются в контексте речевого развития и возрастной динамики. Однако нейронное отслеживание у детей может быть связано и с другими факторами (например, с развитием слухового восприятия в целом, памяти, мышления и в особенности внимания, важного компонента нейронного отслеживания [12, 131]). В ходе развития эти функции развиваются в сложном и реципрокном взаимодействии, и их вклад в общее когнитивное развитие меняется на разных этапах онтогенеза [132]. Исходя

из этого, достаточно затруднительно разделить вклад разных процессов, что также является ограничением исследования.

### **4.3. Вклад зрительного статистического научения и нейронного отслеживания естественной речи в развитие психофизиологических механизмов понимания устной речи**

#### *4.3.1. Нейронное отслеживание естественной речи как функциональная система*

В данном параграфе нейронное отслеживание естественной речи будет рассмотрено с позиций теории функциональных систем, что позволит углубить психологическую интерпретацию полученных данных, а также интегрировать данные нейронного отслеживания с данными статистического научения.

Теория функциональных систем — теория, разработанная российским и советским физиологом П. К. Анохиным, описывающая психологические и физиологические механизмы взаимодействия между живыми организмами и средой через концепцию функциональных систем (ФС) [133–141]. ФС представляют собой динамическую интеграцию широкого спектра физиологических систем, направленную на достижение полезного, адаптивного приспособительного результата. Согласно теории ФС, любой живой организм является активным субъектом, чье поведение определяется адаптивной поведенческой целью и ожидаемым результатов действия в будущем, а не совокупностью стимулов в окружающей среде.

Типичная структура ФС включает в себя четыре блока, которые соединены петлями обратных связей. Первый блок, блок афферентного синтеза, синтезирует информацию, которая предшествует текущему поведенческому акту (мотивационная составляющая, предыдущий опыт, состояние окружающей среды, особенности экспериментальной задачи и т. д.). На основании цели формируется образ ожидаемого результата, который сохраняется в акцептор результата

действия. На основании образа результата в акцепторе результата действия и данных афферентного синтеза принимается решение о реализации поведенческого акта. Это результируется в эфферентный синтез, который представляет собой организацию и координацию психологических и физиологических систем на реализацию поведенческого акта. В ходе реализации поведенческого акта происходит постоянное сличение наличного результата с акцептором результата действия. При возникновении отклонений либо изменениях внешней среды возможны либо корректировка образа ожидаемого результата, либо действий и компонентов поведенческого акта. Примечательно, что ФС являются «безразмерными»: ФС могут участвовать в реализации поведенческих актов различных длительностей и целей, а также могут вкладываться друг в друга.

Теория ФС оперирует достаточно абстрактными концепциями, описывающими поведение как целостный процесс, без его редукции к психологическим или физиологическим процессам, но интегрирующими и психологические, и физиологические процессы в единое целое. Согласно теории, компоненты ФС не могут быть локализованы в конкретных областях коры головного мозга или в других органах, но физиологические системы динамически организуются в ходе реализации поведенческого акта, основываясь на функциональных предрасположенностях органов и областей коры.

Можно провести параллели между теорией ФС и иными современными «активными» нейрокогнитивными теориями. Например, теория прогностического кодирования К. Фристана также объясняет связь поведения и мозговой активности через постоянную генерацию гипотез о событиях окружающего мира и их последующую верификацию [142–144]. Примечательно, что теория прогностического кодирования также не редуцирует психологические процессы к физиологическим, объясняя их связь через математические модели [145].

Важно отметить, что теория ФС является высокоуровневой теорией, которая описывает целостные процессы. Нейронное отслеживание, напротив, является конкретным эмпирическим феноменом синхронизации нескольких сигналов. Тем не менее, нейронное отслеживание естественной речи может быть рассмотрено как

компонент активного процесса понимания устной речи. Обычно исследования применяют активные задачи для участников (например, «пожалуйста, прослушайте аудио, чтобы далее ответить на вопросы»). В таких условиях человек получает задачу, конечной целью которой являются ответы на вопросы; чтобы достичь этой цели, необходимо понять текст, который будет предложен для прослушивания. Таким образом, поведение человека в ходе выполнения экспериментальной задачи будет выстраиваться для достижения цели понимания прослушанной речи. Это поддерживается исследованиями нейронного отслеживания в условиях дихотического слушания, в котором наблюдается отслеживание только того стимула, на который было направлено внимание [12, 50]. Задача, заключающаяся в прослушивании только одного из двух каналов, определяет специфическую настройку физиологических систем, которая в свою очередь определяет то, куда будет обращено внимание.

Таким образом, нейронное отслеживание может быть представлено как физиологический компонент специфичной для экспериментальной задачи ФС, направленной на понимание устной речи. Можно предположить, что для достижения цели понимания устной речи формируются восходящие компоненты ФС, необходимые для декодирования лингвистической информации из акустического компонента речи, их сегментации и интеграции в единицы более высокого порядка, а также для их соотнесения со смыслом слов и предложений [94]. Важно, что на этом этапе формируется и личное отношение человека к прослушиваемой речи. Это можно атрибутировать к блоку афферентного синтеза и реализации действия (в данном случае, вероятно, имеющего имплицитный характер) для восприятия лингвистических единиц, находящихся в данный момент в фокусе внимания.

Также известно, что восприятие речи базируется на принципе прогностического кодирования будущего содержания речи [146, 147], что может быть отнесено к деятельности акцептора результата действия. Эффекты семантического несоответствия, выражаемые в том числе в ВП (эффект N400), могут быть проинтерпретированы как коррекция акцептора результата действия

через петли обратной афферентации. В этом случае, нисходящая регуляция нейронного отслеживания акустического компонента естественной речи возникает на основании семантического содержания речи, что подтверждается рядом исследований [50, 113].

Таким образом, рассмотрение нейронного отслеживания различных компонентов естественной речи на разных уровнях с точки зрения теории ФС позволяет интегрировать психологические и физиологические данные, фиксируемые в ходе или в результате выполнения задачи на понимание устной речи, в единую модель, позволяющую описать психофизиологические механизмы развития рецептивной речи.

#### *4.3.2. Интеграция данных зрительного статистического научения нейронного отслеживания естественной речи*

Как было показано выше, зрительное СН может быть представлено как процесс формирования и обработки предпонятий, являющихся предшественниками истинных понятий — значений знаков, обобщающих объектов внешнего мира. Нейронное отслеживание акустического и семантического компонентов естественной речи отражает процессы сегментации сенсорного входа на отдельные лингвистические единицы, их интеграцию в единицы более высокого порядка, а также присвоение им семантических значений и обработку семантических (смысловых) расстояний между лингвистическими единицами. Кроме того, нейронное отслеживание естественной речи и СН имеют общую нейрофизиологическую основу, которая заключается в настройке ритмов головного мозга на фазовые и частотные характеристики сенсорного входа, полностью структурированного в экспериментальных парадигмах статистического научения [19] и постоянно изменяющегося в устной речи.

Зрительное СН и нейронное отслеживание можно рассматривать как активные, а не полностью пассивные процессы, в ходе которых формируется

особая структура деятельности, связанная с активным прогнозированием сенсорного входа. И СН, и нейронное отслеживание включают в себя имплицитное предсказание будущих стимулов на основании их предшествующего контекста и статистической структуры. Оба этих процесса требуют вовлечения селективного внимания и исполнительных функций.

Учитывая полученные данные об отсутствии статистически значимой взаимосвязи между имплицитными параметрами зрительного СН и возрастом участников, литературные данные о раннем развитии способности к СН как одному из способов научения [20, 71, 72], а также о наличии взаимосвязи между показателями нейронного отслеживания естественной речи и возрастом участников, можно предположить различный характер вклада этих процессов в формирование общих механизмов развития рецептивной речи. Так, зрительное СН на изученной выборке уже сформировано к возрасту трех лет. Можно предположить, что оно является натуральной психической функцией [26, 148] — врожденной способностью к извлечению статистических закономерностей в окружающем мире, необходимая для ориентировки в окружающем мире. Нейронное отслеживание, как эмпирический феномен и физиологическая сторона рецептивной речи, представима как компонент речевой высшей психической функции, формируемой в ходе онтогенеза, связанной с интериоризацией языка и развитием словарного запаса и расширением знаний об окружающем мире. При этом, учитывая общие нейрофизиологические механизмы, лежащие в основе нейронного отслеживания естественной речи и СН, возможно предположить и реципрокные отношения между этими процессами как натуральной и высшей психическими функциями. На раннем этапе онтогенеза (в возрасте до 1 года) формируется способность к усвоению статистических закономерностей в сенсорном потоке, для чего требуется его сегментация на отдельные единицы и дальнейшая интеграция в единицы более высокого порядка. При дальнейшем развитии (в периоды дошкольного и младшего школьного возрастов), на основании СН постепенно формируется рецептивная речь, опосредованная языком.

Важно отметить, что в настоящем исследовании не было выявлено взаимосвязи между параметрами нейронного отслеживания естественной речи и зрительным статистическим научением. Несмотря на теоретическое сходство этих процессов, полученные данные могут свидетельствовать о том, что у детей в возрасте от 3 до 9 лет эти процессы функционируют на разных уровнях, зависящих от модальности обрабатываемой информации (зрительная или слуховая, речевая) и ее содержания (степени осмысленности), а также находятся на разных этапах развития. Кроме того, обработка устной речи является многоуровневым процессом, включающим акустический анализ, лингвистическую и семантическую обработку, что также может объяснять отсутствие прямой взаимосвязи между изучаемыми параметрами.

Таким образом, зрительное СН может отражать общие способности к обнаружению статистических закономерностей, которая необходима, но недостаточна для развития речи как высшей психической функции. Нейронное отслеживание может являться специфическим нейрофизиологическим маркером обработки различных компонентов речи, интегрирующим как общие способности, связанные в том числе с прогнозированием и обработкой статистических закономерностей, так и специализированные способности, связанные с обработкой языка, имеющие внешнее, социальное происхождение.

#### *4.3.3. Ограничения интерпретации*

Ограничением полученных выводов является отсутствие ясности в понимании природы и сути нейронного отслеживания: действительно ли оно может рассматриваться как активный процесс, сопровождающий понимание устной речи, или настройка коры головного мозга на слуховой стимул не является обязательным условием для этого? Возможно ли понимание устной речи при отсутствии ее нейронного отслеживания? Связана ли ритмическая активность головного мозга с внутренними ритмами речи, отражает ли она процессы

сегментации и интеграции сенсорного входа, или она является суммой активности, вызванной сенсорными характеристиками речи [62–66]? В данной работе выносятся предположение о возможном активном характере этих процессов, однако это предположение требует дальнейшей эмпирической проверки.

Другим важным ограничением подобной интерпретации является разница в модальности проведенных экспериментов. Так, несмотря на литературные данные о том, что СН является модально-неспецифическим механизмом научения, требуется дополнительная проверка того, как взаимосвязана обработка статистических закономерностей стимулов в зрительной и слуховой модальностях. Кроме того, необходимы также исследования и нейронного отслеживания речи в зрительной модальности, что может помочь в сопоставлении и интеграции получаемых данных.

Вероятно, предполагаемая связь между СН и нейронным отслеживанием естественной речи носит динамический характер в ходе развития, меняясь на разных этапах онтогенеза. Эта связь может быть сильнее на ранних этапах речевого и общего психологического развития, но ослабевает по мере становления высших психических функций, для чего требуются дополнительные эмпирические исследования. Также, возможно влияние ограничений использованных методик для регистрации имплицитных и эксплицитных мер СН, нейронного отслеживания естественной речи и оценки уровня речевого развития, которые могут быть недостаточно чувствительными к изучаемым переменным на выборке исследования.

## 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,

закрывающийся в настройке ритмической активности головного мозга на частоту предъявления отдельных стимулов (фонем, 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. 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ВП — вызванный потенциал

ВР — время реакции

Гц — Герц

СН — статистическое научение

ФВО — функция временного отклика (temporal response function)

ФС — функциональная система

ЭЭГ — электроэнцефалография

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Dubois P., St-Pierre M.-C., Desmarais C., Guay F. Young Adults With Developmental Language Disorder: A Systematic Review of Education, Employment, and Independent Living Outcomes // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. – 2020. – Vol. 63, № 11. – P. 3786–3800.
2. Castles A., Rastle K., Nation K. Ending the Reading Wars: Reading Acquisition From Novice to Expert // *Psychological Science in the Public Interest*. – 2018. – Vol. 19, № 1. – P. 5–51.
3. Kuhl P.K. Early language acquisition: cracking the speech code // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2004. – Vol. 5, № 11. – P. 831–843.
4. Di Liberto G.M., Attaheri A., Cantisani G., Reilly R.B., Ní Choisdealbha Á., Rocha S., Brusini P., Goswami U. Emergence of the cortical encoding of phonetic features in the first year of life // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14, № 1. – P. 7789.
5. Hickok G., Poeppel D. The cortical organization of speech processing // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2007. – Vol. 8, № 5. – P. 393–402.
6. Kuhl P.K. Brain Mechanisms in Early Language Acquisition // *Neuron*. – 2010. – Vol. 67, № 5. – P. 713–727.
7. От слова - к репрезентации: Нейрокогнитивные основы вербального научения: Коллективная монография / Ю. Ю. Штыров, О. В. Щербакова, Е. И. Перикова [и др.]. – Санкт-Петербург: ООО 'Скифия-принт', 2022. – 358 с. – ISBN 978-5-98620-573-1.
8. Ахутина Т.В. Нейролингвистический анализ лексики, семантики и прагматики. — М.: Языки славянской культуры, 2014. — 424 с.
9. Junge C., Boumeester M., Mills D.L., Paul M., Cosper S.H. Development of the N400 for Word Learning in the First 2 Years of Life: A Systematic Review // *Frontiers in Psychology*. – 2021. – Vol. 12. – P. 689534.

10. Seyednozadi Z., Pishghadam R., Pishghadam M. Functional Role of the N400 and P600 in Language-Related ERP Studies with Respect to Semantic Anomalies: An Overview // *Archives of Neuropsychiatry*. – 2021. – Vol. 58, № 3. – P. 249–252.
11. Alday P.M. M/EEG analysis of naturalistic stories: a review from speech to language processing // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2019. – Vol. 34, № 4. – P. 457–473.
12. Crosse M.J., Di Liberto G.M., Bednar A., Lalor E.C. The Multivariate Temporal Response Function (mTRF) Toolbox: A MATLAB Toolbox for Relating Neural Signals to Continuous Stimuli // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2016. – Vol. 10. – P. 604.
13. Crosse M.J., Zuk N.J., Di Liberto G.M., Nidiffer A.R., Molholm S., Lalor E.C. Linear Modeling of Neurophysiological Responses to Speech and Other Continuous Stimuli: Methodological Considerations for Applied Research // *Frontiers in Neuroscience*. – 2021. – Vol. 15. – P. 705621.
14. Hamilton L.S., Huth A.G. The revolution will not be controlled: natural stimuli in speech neuroscience // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2020. – Vol. 35, № 5. – P. 573–582.
15. Kalashnikova M., Peter V., Di Liberto G.M., Lalor E.C., Burnham D. Infant-directed speech facilitates seven-month-old infants' cortical tracking of speech // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8, № 1. – P. 13745.
16. Van Hirtum T., Somers B., Verschueren E., Dieudonné B., Francart T. Delta-band neural envelope tracking predicts speech intelligibility in noise in preschoolers // *Hearing Research*. – 2023. – Vol. 434. – P. 108785.
17. Schmalz X., Altoè G., Mulatti C. Statistical learning and dyslexia: a systematic review // *Annals of Dyslexia*. – 2017. – Vol. 67, № 2. – P. 147–162.
18. Schmalz X., Treccani B., Mulatti C. Developmental Dyslexia, Reading Acquisition, and Statistical Learning: A Sceptic's Guide // *Brain Sciences*. – 2021. – Vol. 11, № 9. – P. 1143.

19. Sjuls G.S., Harvei N.N., Vulchanova M.D. The relationship between neural phase entrainment and statistical word-learning: A scoping review // *Psychonomic Bulletin & Review*. – 2023. – Published online.
20. Saffran J.R., Aslin R.N., Newport E.L. Statistical Learning by 8-Month-Old Infants // *Science*. – 1996. – Vol. 274, № 5294. – P. 1926–1928.
21. Arciuli J., Simpson I.C. Statistical learning in typically developing children: the role of age and speed of stimulus presentation // *Developmental Science*. – 2011. – Vol. 14, № 3. – P. 464–473.
22. Witteloostuijn M. van, Lammertink I., Boersma P., Wijnen F., Rispens J. Assessing Visual Statistical Learning in Early-School-Aged Children: The Usefulness of an Online Reaction Time Measure // *Frontiers in Psychology*. – 2019. – Vol. 10. – P. 2051.
23. Talantseva O., An I., Zhukova M., Trubitsyna A., Teedemaa A., Grigorenko E. Psychometric Properties of the Preschool Language Scales, Fifth Edition (PLS-5) in Russian-Speaking Children: A Classical and Item Response Theory Study // *Clinical Psychology and Special Education*. – 2022. – Vol. 11, № 2. – P. 174–195.
24. Лурия А. Р. Язык и сознание. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. – 320 с.
25. Выготский Л. С. Собрание сочинений / под ред. М. Г. Ярошевского. – М.: Педагогика, 1984. – 400 с.
26. Выготский Л. С. Мышление и речь. – СПб.: Питер, 2018. – 652 с.
27. Fedorenko E., Ivanova A.A., Regev T.I. The language network as a natural kind within the broader landscape of the human brain // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2024. – Vol. 25, № 5. – P. 289–312.
28. Fedorenko E., Piantadosi S.T., Gibson E.A.F. Language is primarily a tool for communication rather than thought // *Nature*. – 2024. – Vol. 630, № 8017. – P. 575–586.
29. Friederici A.D. The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function // *Physiological Reviews*. – 2011. – Vol. 91, № 4. – P. 1357–1392.
30. Friederici A.D. *Language in Our Brain: The Origins of a Uniquely Human Capacity*. – Cambridge, MA: The MIT Press, 2017. – 304 p.

31. Dehaene-Lambertz G., Dehaene S., Hertz-Pannier L. Functional Neuroimaging of Speech Perception in Infants // *Science*. – 2002. – Vol. 298, № 5600. – P. 2013–2015.
32. Skeide M.A., Friederici A.D. The ontogeny of the cortical language network // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2016. – Vol. 17, № 5. – P. 323–332.
33. Luck S.J., Kappenman E.S. *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. – New York: Oxford University Press, 2011. – 664 p.
34. Dehaene-Lambertz G., Gliga T. Common Neural Basis for Phoneme Processing in Infants and Adults // *Journal of Cognitive Neuroscience*. – 2004. – Vol. 16, № 8. – P. 1375–1387.
35. Kutas M., Federmeier K.D. Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential (ERP) // *Annual Review of Psychology*. – 2011. – Vol. 62, № 1. – P. 621–647.
36. Lau E.F., Phillips C., Poeppel D. A cortical network for semantics: (de)constructing the N400 // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2008. – Vol. 9, № 12. – P. 920–933.
37. Overath T., Kumar S., von Kriegstein K., Griffiths T.D. Encoding of Spectral Correlation over Time in Auditory Cortex // *Journal of Neuroscience*. – 2008. – Vol. 28, № 49. – P. 13268–13273.
38. Marie D., Golestani N. Brain structural imaging of receptive speech and beyond: a review of current methods // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2017. – Vol. 32, № 7. – P. 870–890.
39. Van Petten C., Luka B.J. Prediction during language comprehension: Benefits, costs, and ERP components // *International Journal of Psychophysiology*. – 2012. – Vol. 83, № 2. – P. 176–190.
40. Fahmie T.A., Rodriguez N.M., Luczynski K.C., Rahaman J.A., Charles B.M., Zangrillo A.N. Toward an explicit technology of ecological validity // *Journal of Applied Behavior Analysis*. – 2023. – Vol. 56, № 2. – P. 302–322.
41. Ding N., Simon J.Z. Cortical entrainment to continuous speech: functional roles and interpretations // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2014. – Vol. 8. – P. 311.

42. Lalor E.C., Foxe J.J. Neural responses to uninterrupted natural speech can be extracted with precise temporal resolution // *European Journal of Neuroscience*. – 2010. – Vol. 31, № 1. – P. 189–193.
43. Obleser J., Kayser C. Neural Entrainment and Attentional Selection in the Listening Brain // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2019. – Vol. 23, № 11. – P. 913–926.
44. Brodbeck C., Das P., Gillis M., Kulasingham J.P., Bhattasali S., Gaston P., Resnik P., Simon J.Z. Eelbrain, a Python toolkit for time-continuous analysis with temporal response functions // *eLife*. – 2023. – Vol. 12. – P. e85012.
45. Ghitza O., Giraud A.-L., Poeppel D. Neuronal oscillations and speech perception: critical-band temporal envelopes are the essence // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2013. – Vol. 6. – P. 340.
46. Kösem A., Dai B., McQueen J.M., Hagoort P. Neural tracking of speech envelope does not unequivocally reflect intelligibility // *NeuroImage*. – 2023. – Vol. 272. – P. 120040.
47. Daube C., Ince R.A.A., Gross J. Simple Acoustic Features Can Explain Phoneme-Based Predictions of Cortical Responses to Speech // *Current Biology*. – 2019. – Vol. 29, № 12. – P. 1924–1937.e9.
48. Di Liberto G.M., O’Sullivan J.A., Lalor E.C. Low-Frequency Cortical Entrainment to Speech Reflects Phoneme-Level Processing // *Current Biology*. – 2015. – Vol. 25, № 19. – P. 2457–2465.
49. Di Liberto G.M., Peter V., Kalashnikova M., Goswami U., Burnham D., Lalor E.C. Atypical cortical entrainment to speech in the right hemisphere underpins phonemic deficits in dyslexia // *NeuroImage*. – 2018. – Vol. 175. – P. 70–79.
50. Broderick M.P., Anderson A.J., Di Liberto G.M., Crosse M.J., Lalor E.C. Electrophysiological Correlates of Semantic Dissimilarity Reflect the Comprehension of Natural, Narrative Speech // *Current Biology*. – 2018. – Vol. 28, № 5. – P. 803–809.e3.
51. Broderick M.P., Zuk N.J., Anderson A.J., Lalor E.C. More than words: Neurophysiological correlates of semantic dissimilarity depend on comprehension

- of the speech narrative // *European Journal of Neuroscience*. – 2022. – Vol. 56, № 8. – P. 5201–5214.
52. Araújo J., Simons B.D., Peter V., Mandke K., Kalashnikova M., Macfarlane A., Gabrielczyk F., Wilson A., Di Liberto G.M., Burnham D., Goswami U. Atypical low-frequency cortical encoding of speech identifies children with developmental dyslexia // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2024. – Vol. 18. – P. 142.
53. De Clercq P., Kries J., Mehraram R., Vanthornhout J., Francart T., Vandermosten M. Neural tracking of natural speech: an effective marker for post-stroke aphasia // *Brain Communications*. – 2025. – Vol. 7, № 2. – P. fcdf095.
54. Goswami U., Thomson J., Richardson U., Stainthorp R., Hughes D., Rosen S., Scott S.K. Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2002. – Vol. 99, № 16. – P. 10911–10916.
55. Keshavarzi M., Mandke K., Macfarlane A., Parvez L., Gabrielczyk F., Wilson A., Flanagan S., Goswami U. Decoding of speech information using EEG in children with dyslexia: Less accurate low-frequency representations of speech, not “Noisy” representations // *Brain and Language*. – 2022. – Vol. 235. – P. 105198.
56. Kries J., De Clercq P., Gillis M., Vanthornhout J., Lemmens R., Francart T., Vandermosten M. Exploring neural tracking of acoustic and linguistic speech representations in individuals with post-stroke aphasia // *Human Brain Mapping*. – 2024. – Vol. 45, № 8. – P. e26676.
57. Giraud A.-L., Kleinschmidt A., Poeppel D., Lund T.E., Frackowiak R.S.J., Laufs H. Endogenous Cortical Rhythms Determine Cerebral Specialization for Speech Perception and Production // *Neuron*. – 2007. – Vol. 56, № 6. – P. 1127–1134.
58. Broderick M.P., Anderson A.J., Lalor E.C. Semantic Context Enhances the Early Auditory Encoding of Natural Speech // *Journal of Neuroscience*. – 2019. – Vol. 39, № 38. – P. 7564–7575.
59. Gwilliams L. Hierarchical oscillators in speech comprehension: a commentary on Meyer, Sun, and Martin (2019) // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2020. – Vol. 35, № 9. – P. 1114–1118.

60. Gwilliams L., Marantz A., Poeppel D., King J.-R. Top-down information shapes lexical processing when listening to continuous speech // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2023. – P. 1–14.
61. Karunathilake I.M.D., Kulasingham J.P., Simon J.Z. Neural tracking measures of speech intelligibility: Manipulating intelligibility while keeping acoustics unchanged // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2023. – Vol. 120, № 49. – P. e2309166120.
62. Kazanina N., Tavano A. What neural oscillations can and cannot do for syntactic structure building // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2023. – Vol. 24, № 2. – P. 113–128.
63. Kazanina N., Tavano A. Reply to ‘What oscillations can do for syntax depends on your theory of structure building’ // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2023. – Vol. 24, № 11. – P. 724.
64. Klimovich-Gray A., Molinaro N. Synchronising internal and external information: a commentary on Meyer, Sun & Martin (2020) // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2020. – Vol. 35, № 9. – P. 1129–1132.
65. Meyer L. The neural oscillations of speech processing and language comprehension: state of the art and emerging mechanisms // *European Journal of Neuroscience*. – 2018. – Vol. 48, № 7. – P. 2609–2621.
66. Meyer L., Sun Y., Martin A.E. “Entraining” to speech, generating language? // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2020. – Vol. 35, № 9. – P. 1138–1148.
67. Meyer L., Sun Y., Martin A.E. Synchronous, but not entrained: exogenous and endogenous cortical rhythms of speech and language processing // *Language, Cognition and Neuroscience*. – 2020. – Vol. 35, № 9. – P. 1089–1099.
68. Jessen S., Fiedler L., Münte T.F., Obleser J. Quantifying the individual auditory and visual brain response in 7-month-old infants watching a brief cartoon movie // *NeuroImage*. – 2019. – Vol. 202. – P. 116060.
69. Jessen S., Obleser J., Tune S. Neural tracking in infants – An analytical tool for multisensory social processing in development // *Developmental Cognitive Neuroscience*. – 2021. – Vol. 52. – P. 101034.

70. Keshavarzi M., Richards S., Feltham G., Parvez L., Goswami U. Neural processing of rhythmic speech by children with developmental language disorder (DLD): An EEG study // *Imaging Neuroscience*. – 2024. – Vol. 2. – P. 1–20.
71. Bertels J., Boursain E., Destrebecqz A., Gaillard V. Visual statistical learning in children and young adults: how implicit? // *Frontiers in Psychology*. – 2015. – Vol. 5. – P. 1541.
72. Perruchet P., Pacton S. Implicit learning and statistical learning: one phenomenon, two approaches // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2006. – Vol. 10, № 5. – P. 233–238.
73. Gómez R.L. Do infants retain the statistics of a statistical learning experience? Insights from a developmental cognitive neuroscience perspective // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2017. – Vol. 372, № 1711. – P. 20160054.
74. Kirkham N.Z., Slemmer J.A., Johnson S.P. Visual statistical learning in infancy: evidence for a domain general learning mechanism // *Cognition*. – 2002. – Vol. 83, № 2. – P. B35–B42.
75. Frost R., Armstrong B.C., Siegelman N., Christiansen M.H. Domain generality versus modality specificity: the paradox of statistical learning // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2015. – Vol. 19, № 3. – P. 117–125.
76. Lengyel G., Nagy M., Fiser J. Statistically defined visual chunks engage object-based attention // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 272.
77. Gómez R.L., Edgin J.O. The extended trajectory of hippocampal development: Implications for early memory development and disorder // *Developmental Cognitive Neuroscience*. – 2016. – Vol. 18. – P. 57–69.
78. van Witteloostuijn M., Boersma P., Wijnen F., Rispens J. Statistical learning abilities of children with dyslexia across three experimental paradigms // *PLOS ONE*. – 2019. – Vol. 14, № 8. – P. e0220041.
79. Lukács Á., Dobó D., Szöllösi Á., Németh K., Lukics K.S. Reading fluency and statistical learning across modalities and domains: Online and offline measures // *PLOS ONE*. – 2023. – Vol. 18, № 3. – P. e0281788.

80. Siegelman N., Bogaerts L., Kronenfeld O., Frost R. Redefining “Learning” in Statistical Learning: What Does an Online Measure Reveal About the Assimilation of Visual Regularities? // *Cognitive Science*. – 2018. – Vol. 42, № S3. – P. 692–727.
81. Nissen M.J., Bullemer P. Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures // *Cognitive Psychology*. – 1987. – Vol. 19, № 1. – P. 1–32.
82. Lammertink I., van Witteloostuijn M., Boersma P., Wijnen F., Rispens J. Auditory statistical learning in children: Novel insights from an online measure // *Applied Psycholinguistics*. – 2019. – Vol. 40, № 2. – P. 279–302.
83. Forest T.A., Schlichting M.L., Duncan K.D., Finn A.S. Changes in statistical learning across development // *Nature Reviews Psychology*. – 2023. – Vol. 2, № 4. – P. 205–219.
84. Ren J., Wang M., Arciuli J. A meta-analysis on the correlations between statistical learning, language, and reading outcomes // *Developmental Psychology*. – 2023. – Vol. 59, № 9. – P. 1626–1644.
85. Smith L.B., Jayaraman S., Clerkin E., Yu C. The Developing Infant Creates a Curriculum for Statistical Learning // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2018. – Vol. 22, № 4. – P. 325–336.
86. Arciuli J., Simpson I.C. Statistical Learning Is Related to Reading Ability in Children and Adults // *Cognitive Science*. – 2012. – Vol. 36, № 2. – P. 286–304.
87. Raviv L., Arnon I. The developmental trajectory of children’s auditory and visual statistical learning abilities: modality-based differences in the effect of age // *Developmental Science*. – 2018. – Vol. 21, № 4. – P. e12593.
88. Shufaniya A., Arnon I. Statistical Learning Is Not Age-Invariant During Childhood: Performance Improves With Age Across Modality // *Cognitive Science*. – 2018. – Vol. 42, № 8. – P. 3100–3115.
89. Tóth-Fáber E. Longitudinal evidence for decreasing statistical learning abilities across childhood // *Developmental Science*. – 2024. – Published online.

90. Pavlidou E.V., Bogaerts L. Implicit Statistical Learning Across Modalities and Its Relationship With Reading in Childhood // *Frontiers in Psychology*. – 2019. – Vol. 10. – P. 1507.
91. Mok X.T.J., Goh S.L., Saddy J.D., Varley R., Zimmerer V. Language production and implicit statistical learning in typical development and children with acquired language disorders: an exploratory study // *Speech, Language and Hearing*. – 2022. – Vol. 25, № 3. – P. 349–363.
92. Thompson A., Steinbeis N. Sensitive periods in executive function development // *Current Opinion in Behavioral Sciences*. – 2020. – Vol. 36. – P. 98–105.
93. Arnal L.H., Giraud A.-L. Cortical oscillations and sensory predictions // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2012. – Vol. 16, № 7. – P. 390–398.
94. Batterink L.J., Paller K.A. Online neural monitoring of statistical learning // *Cortex*. – 2017. – Vol. 90. – P. 31–45.
95. Zhang Z., Kong L. Neural Tracking to Auditory Statistical Structures in Children // *PsyCh Journal*. – 2024. – Published online. – P. pchj.814.
96. Ding N., Melloni L., Zhang H., Tian X., Poeppel D. Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech // *Nature Neuroscience*. – 2016. – Vol. 19, № 1. – P. 158–164.
97. Bánki A., Brzozowska A., Hoehl S., Köster M. Neural Entrainment vs. Stimulus-Tracking: A Conceptual Challenge for Rhythmic Perceptual Stimulation in Developmental Neuroscience // *Frontiers in Psychology*. – 2022. – Vol. 13. – P. 846818.
98. Poeppel D., Assaneo M.F. Speech rhythms and their neural foundations // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2020. – Vol. 21, № 6. – P. 322–334.
99. Peirce J., Gray J.R., Simpson S., MacAskill M., Höchenberger R., Sogo H., Kastman E., Lindeløv J.K. PsychoPy2: Experiments in behavior made easy // *Behavior Research Methods*. – 2019. – Vol. 51, № 1. – P. 195–203.
100. RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R [Электронный ресурс]. – Boston, MA: RStudio, PBC, 2020.

101. Mesik J., Wojtczak M. The effects of data quantity on performance of temporal response function analyses of natural speech processing // *Frontiers in Neuroscience*. – 2023. – Vol. 16. – P. 954044.
102. Gramfort A., Luessi M., Larson E., Engemann D., Strohmeier D., Brodbeck C., Goj R., Jas M., Brooks T., Parkkonen L., Hämäläinen M. MEG and EEG data analysis with MNE-Python // *Frontiers in Neuroscience*. – 2013. – Vol. 7. – P. 267.
103. Mikolov T., Sutskever I., Chen K., Corrado G., Dean J. Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2013. – Vol. 26. – P. 3111–3119.
104. Mikolov T. *Advances in Pre-Training Distributed Word Representations* // arXiv preprint. – 2017. – arXiv:1712.09405.
105. Guthrie D., Buchwald J.S. Significance Testing of Difference Potentials // *Psychophysiology*. – 1991. – Vol. 28, № 2. – P. 240–244.
106. Маракшина Ю. А., Вартанов А. В., Беспалов Б. И. Роль латеральной асимметрии в задаче подавления ответа по компонентам вызванных потенциалов // *Психология. Журнал Высшей школы экономики*. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 679–697.
107. Gomez P., Ratcliff R., Perea M. A model of the go/no-go task // *Journal of Experimental Psychology: General*. – 2007. – Vol. 136, № 3. – P. 389–413.
108. Spencer M., Kaschak M.P., Jones J.L., Lonigan C.J. Statistical learning is related to early literacy-related skills // *Reading and Writing*. – 2015. – Vol. 28, № 4. – P. 467–490.
109. Janacsek K., Nemeth D. Implicit sequence learning and working memory: Correlated or complicated? // *Cortex*. – 2013. – Vol. 49, № 8. – P. 2001–2006.
110. Jenkins H.E., Leung P., Smith F., Riches N., Wilson B. Assessing processing-based measures of implicit statistical learning: Three serial reaction time experiments do not reveal artificial grammar learning // *PLOS ONE*. – 2024. – Vol. 19, № 9. – P. e0308653.
111. Attaheri A., Ní Choisdealbha Á., Di Liberto G.M., Rocha S., Brusini P., Mead N., Olawole-Scott H., Boutris P., Gibbon S., Williams I., Grey C., Flanagan

- S., Goswami U. Delta- and theta-band cortical tracking and phase-amplitude coupling to sung speech by infants // *NeuroImage*. – 2022. – Vol. 247. – P. 118698.
112. Attaheri A., Ní Choisdealbha Á., Rocha S., Brusini P., Di Liberto G.M., Mead N., Olawole-Scott H., Boutris P., Gibbon S., Williams I., Grey C., Oliveira M.A.E., Brough C., Flanagan S., Goswami U. Infant low-frequency EEG cortical power, cortical tracking and phase-amplitude coupling predicts language a year later // *PLOS ONE*. – 2024. – Vol. 19, № 12. – P. e0313274.
113. Klimovich-Gray A., Di Liberto G., Amoruso L., Barrena A., Agirre E., Molinaro N. Increased top-down semantic processing in natural speech linked to better reading in dyslexia // *NeuroImage*. – 2023. – P. 120072.
114. Luo C., Gao Y., Fan J., Liu Y., Yu Y., Zhang X. Compromised word-level neural tracking in the high-gamma band for children with attention deficit hyperactivity disorder // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2023. – Vol. 17. – P. 1170388.
115. Pérez-Navarro J., Klimovich-Gray A., Lizarazu M., Piazza G., Molinaro N., Lallier M. Early language experience modulates the tradeoff between acoustic-temporal and lexico-semantic cortical tracking of speech // *iScience*. – 2024. – P. 110247.
116. Van Ghinst M., Bourguignon M., Niesen M., Wens V., Hassid S., Choufani G., Jousmäki V., Hari R., Goldman S., De Tiège X. Cortical Tracking of Speech-in-Noise Develops from Childhood to Adulthood // *Journal of Neuroscience*. – 2019. – Vol. 39, № 15. – P. 2938–2950.
117. Ríos-López P., Molinaro N., Bourguignon M., Lallier M. Development of neural oscillatory activity in response to speech in children from 4 to 6 years old // *Developmental Science*. – 2020. – Vol. 23, № 6. – P. e12947.
118. Gillis M., Vanthornhout J., Simon J.Z., Francart T., Brodbeck C. Neural Markers of Speech Comprehension: Measuring EEG Tracking of Linguistic Speech Representations, Controlling the Speech Acoustics // *Journal of Neuroscience*. – 2021. – Vol. 41, № 50. – P. 10316–10329.

119. Tezcan F., Weissbart H., Martin A.E. A tradeoff between acoustic and linguistic feature encoding in spoken language comprehension // *eLife*. – 2023. – Vol. 12. – P. e82386.
120. Ильюченко И. Р., Сысоева О. В., Иваницкий А. М. Две семантические системы мозга для быстрого и медленного различения абстрактных и конкретных слов // *Журнал Высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*. – 2007. – Т. 57, № 5. – С. 566–575.
121. Соколов Е. Н. Очерки по психофизиологии сознания // *Вестник Московского университета. Серия 14. Психология*. – 2009. – № 1. – С. 3–31.
122. Bermúdez-Margaretto B., Gallo F., Novitskiy N., Myachykov A., Petrova A., Shtyrov Y. Ultra-rapid and automatic interplay between L1 and L2 semantics in late bilinguals: EEG evidence // *Cortex*. – 2022. – Vol. 151. – P. 147–161.
123. Curran T., Tucker D.M., Kutas M., Posner M.I. Topography of the N400: brain electrical activity reflecting semantic expectancy // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*. – 1993. – Vol. 88, № 3. – P. 188–209.
124. Henderson L.M., Baseler H.A., Clarke P.J., Watson S., Snowling M.J. The N400 effect in children: Relationships with comprehension, vocabulary and decoding // *Brain and Language*. – 2011. – Vol. 117, № 2. – P. 88–99.
125. Mesik J., Ray L., Wojtczak M. Effects of Age on Cortical Tracking of Word-Level Features of Continuous Competing Speech // *Frontiers in Neuroscience*. – 2021. – Vol. 15. – P. 703423.
126. Zhou D., Zhang G., Dang J., Unoki M., Liu X. Detection of Brain Network Communities During Natural Speech Comprehension From Functionally Aligned EEG Sources // *Frontiers in Computational Neuroscience*. – 2022. – Vol. 16. – P. 832375.
127. Delogu F., Brouwer H., Crocker M.W. Event-related potentials index lexical retrieval (N400) and integration (P600) during language comprehension // *Brain and Cognition*. – 2019. – Vol. 135. – P. 103569.

128. Leckey M., Federmeier K.D. The P3b and P600(s): Positive contributions to language comprehension // *Psychophysiology*. – 2020. – Vol. 57, № 7. – P. e13351.
129. van Herten M., Kolk H.H.J., Chwilla D.J. An ERP study of P600 effects elicited by semantic anomalies // *Cognitive Brain Research*. – 2005. – Vol. 22, № 2. – P. 241–255.
130. Di Liberto G.M., Hjortkjær J., Mesgarani N. Editorial: Neural Tracking: Closing the Gap Between Neurophysiology and Translational Medicine // *Frontiers in Neuroscience*. – 2022. – Vol. 16. – P. 862507.
131. Debener S., Adiloğlu K., Straetmans-Oehme L. Neural speech tracking and auditory attention decoding in everyday life // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2024. – Vol. 18. – P. 1342145.
132. Vygotsky L.S. *The Collected Works of L. S. Vygotsky: Scientific Legacy*. – Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012. – 529 p.
133. Анохин П. К. *Очерки по физиологии функциональных систем*. – М.: Медицина, 1975. – 447 с.
134. Анохин П. К. *Философские аспекты теории функциональной системы*. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
135. Egiazaryan G.G., Sudakov K.V. Theory of Functional Systems in the Scientific School of P.K. Anokhin // *Journal of the History of the Neurosciences*. – 2007. – Vol. 16, № 1–2. – P. 194–205.
136. Rusalov V. Functional systems theory and the activity-specific approach in psychological taxonomies // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2018. – Vol. 373, № 1744. – P. 20170166.
137. Shadrikov V. The Activity Theory: The Activity Psychological Functional System and Abilities as a Mechanism of Activity Implementation // *Psychology Journal of the Higher School of Economics*. – 2019. – Vol. 16, № 4. – P. 593–607.
138. Vityaev E.E., Demin A.V. Cognitive architecture based on the functional systems theory // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 145. – P. 623–628.

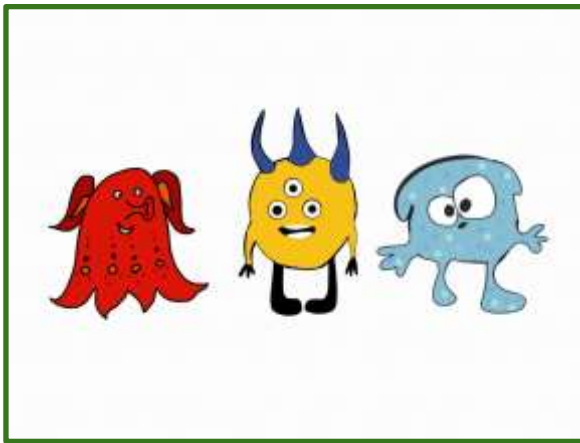
139. Alexandrov Y. I. Cognition as systemogenesis // Anticipation: learning from the past: The Russian/Soviet contributions to the science of anticipation. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – С. 193-220.
140. Александров Ю. И., Крылов А. К. Системная методология в психофизиологии: от нейронов до сознания // Идея системности в современной психологии. – 2005. – С. 119-157.
141. Александров Ю. И. Теория функциональных систем и системная психофизиология // Системные аспекты психической деятельности / Под общей редакцией К.В. Судакова; Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина. – Москва : УРСС, 1999. – С. 96-152.
142. Гришаев А. В., Сазонов В. Ф. Нейробиологическая теория Карла Фристана: критический обзор // Интеллектуальные системы. Теории и приложения. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 5–94.
143. Friston K., Kiebel S. Predictive coding under the free-energy principle // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2009. – Vol. 364, № 1521. – P. 1211–1221.
144. Shipp S. Neural Elements for Predictive Coding // Frontiers in Psychology. – 2016. – Vol. 7. – P. 1792.
145. Солмс М. Скрытый источник сознания: В поисках природы субъективного опыта. – М.: Альпина нон-фикшн, 2025. – 547 с.
146. Heilbron M., Armeni K., Schoffelen J.-M., Hagoort P., de Lange F.P. A hierarchy of linguistic predictions during natural language comprehension // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 119, № 32. – P. e2201968119.
147. Hovsepyan S., Olasagasti I., Giraud A.-L. Combining predictive coding and neural oscillations enables online syllable recognition in natural speech // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11, № 1. – P. 3117.
148. Выготский Л. С. История развития высших психических функций. – М.: Litres, 2016. – 360 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

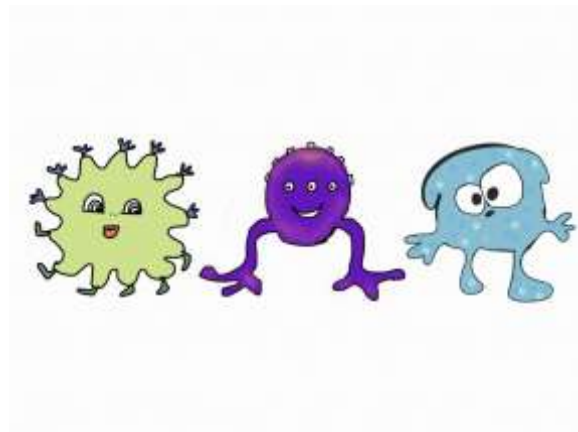
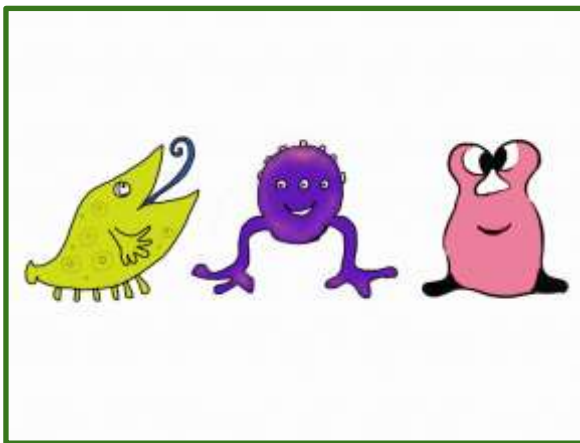
ПРИЛОЖЕНИЕ А.

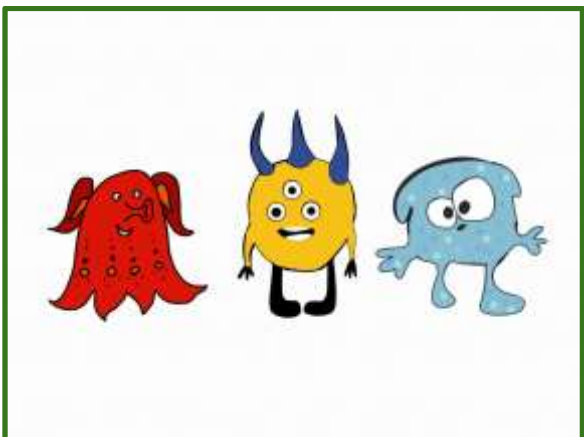
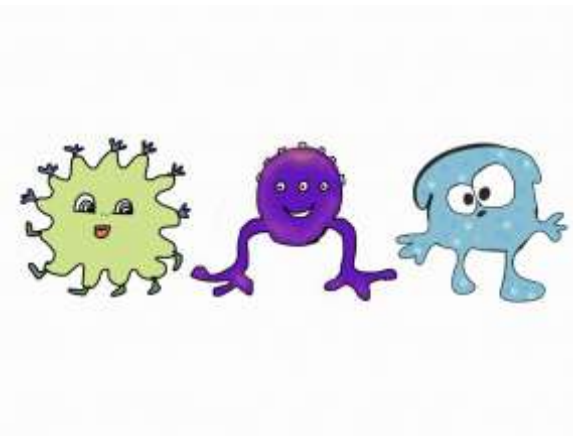
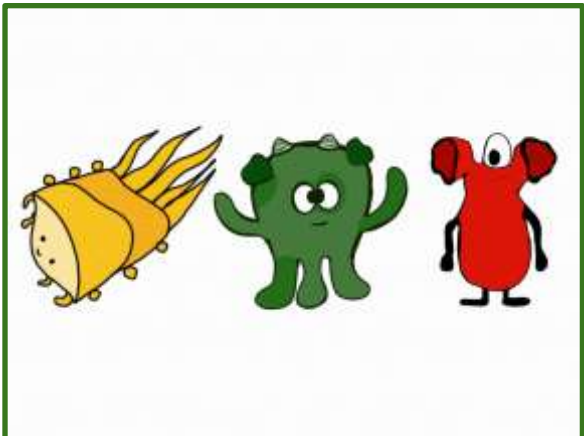
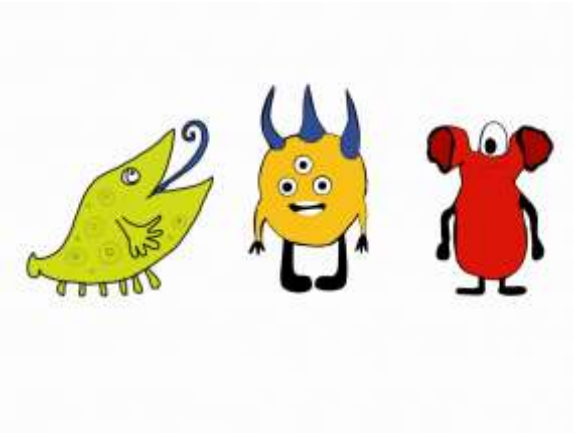
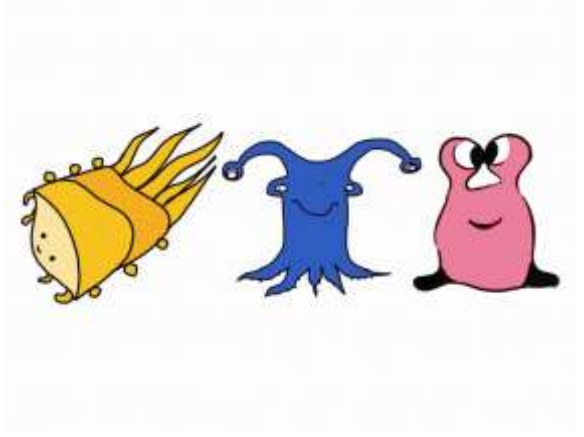
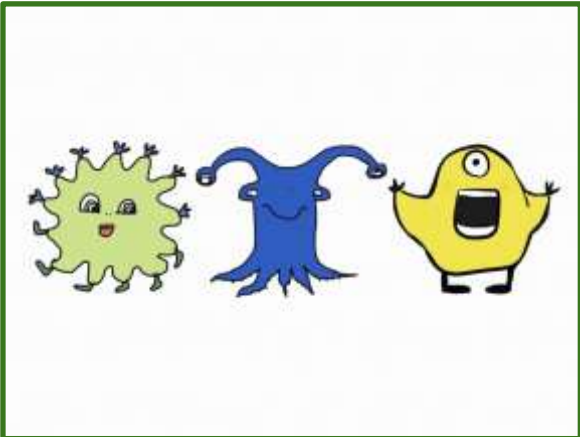
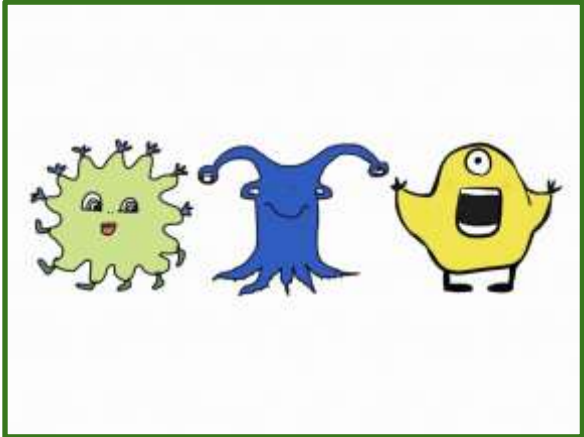
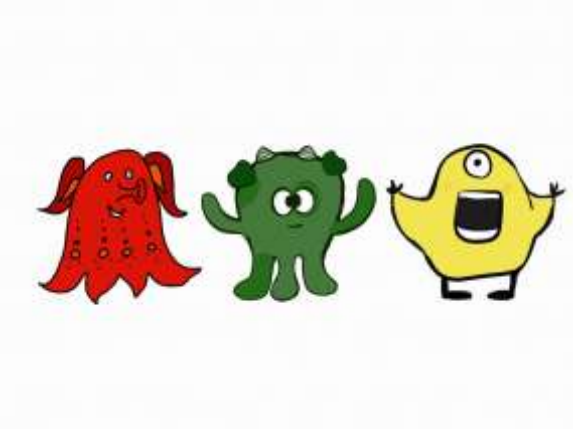
Пары триплетов, использованные в эксплицитной фазе эксперимента 1

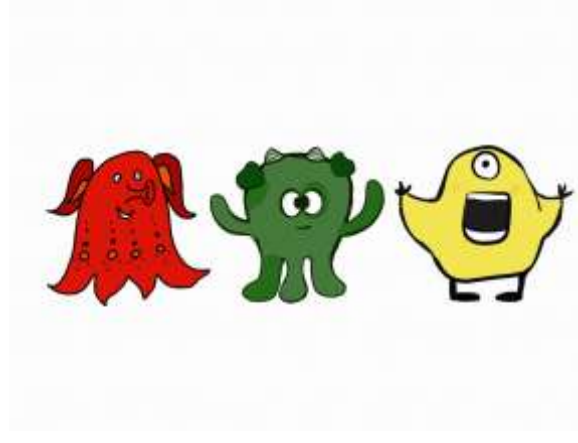
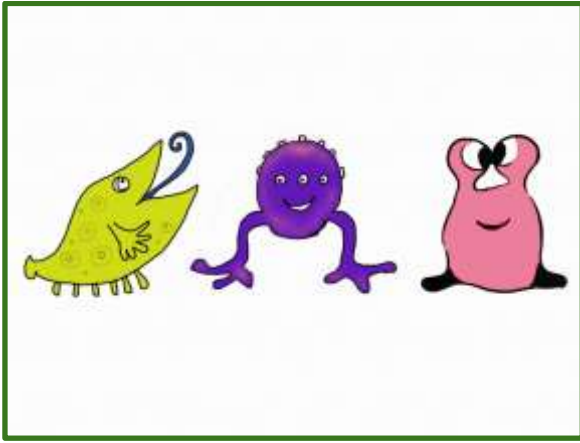
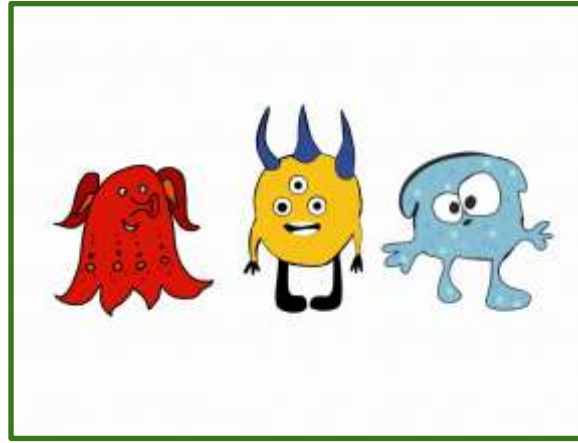
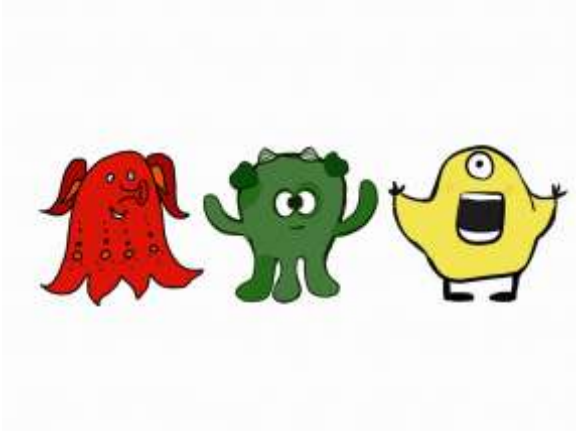
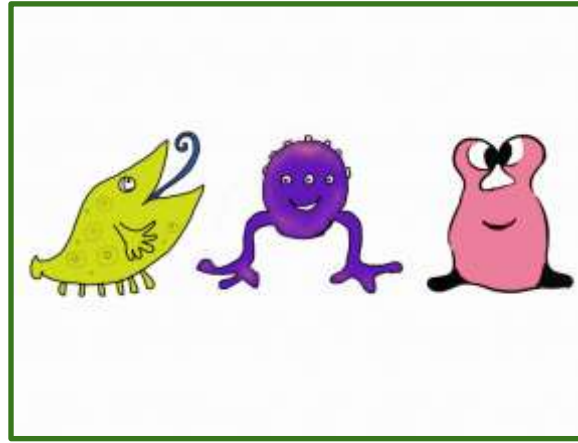
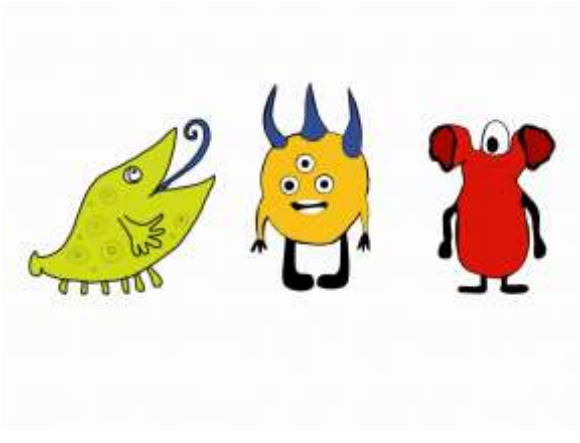
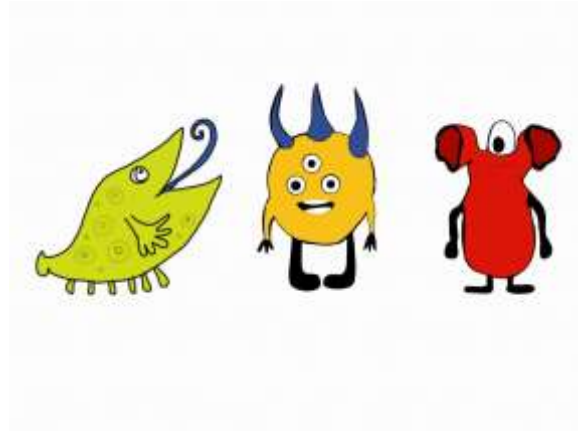
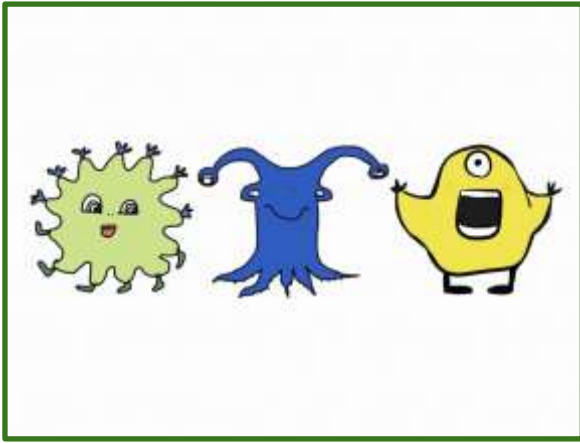
Триплет 1

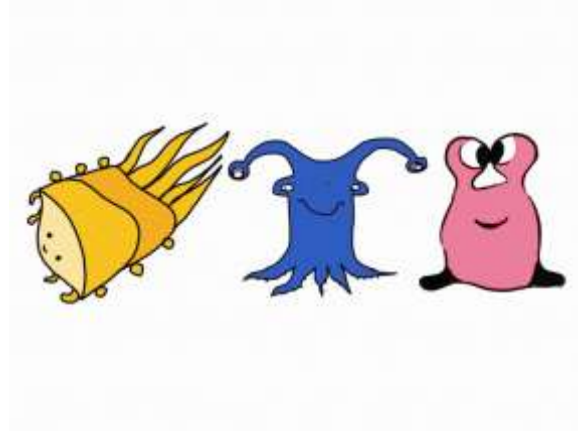
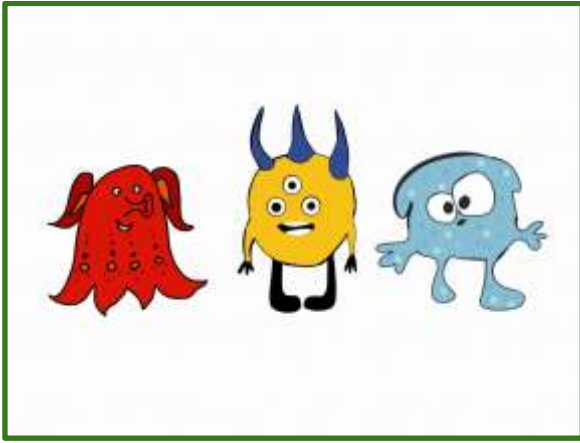
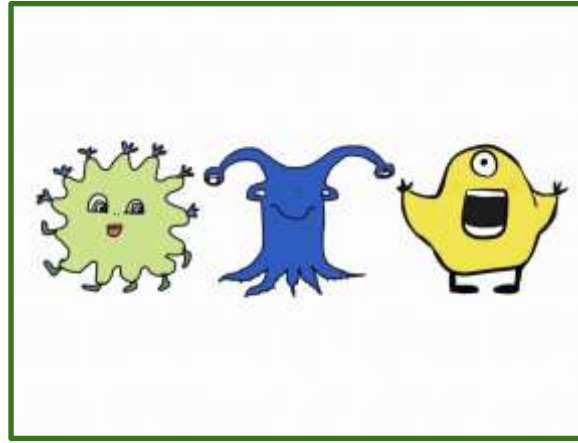
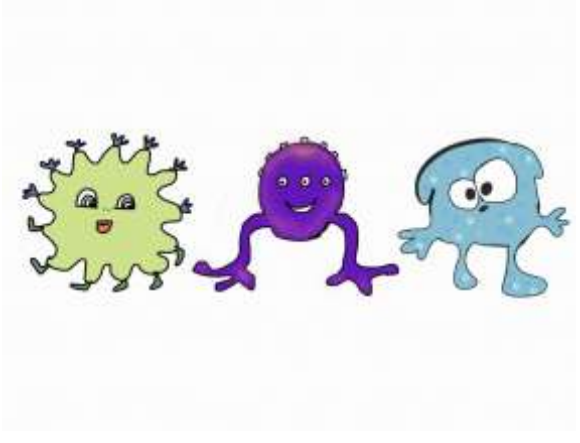
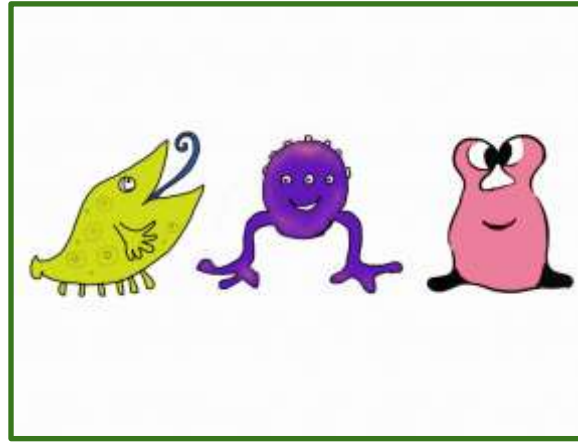
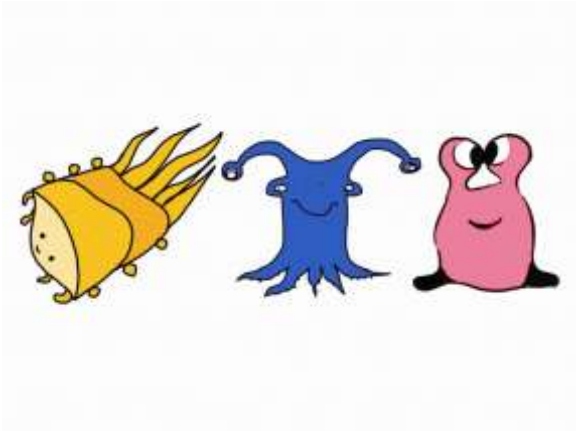
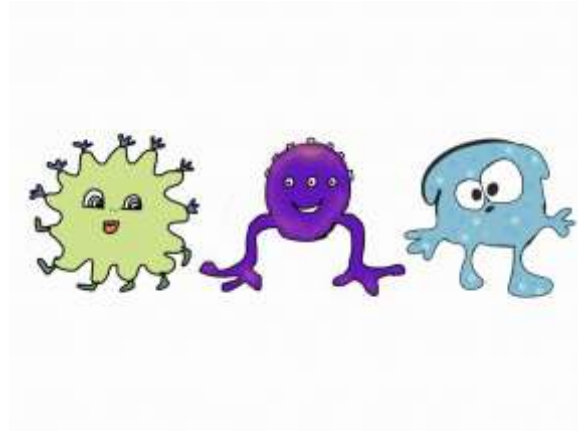
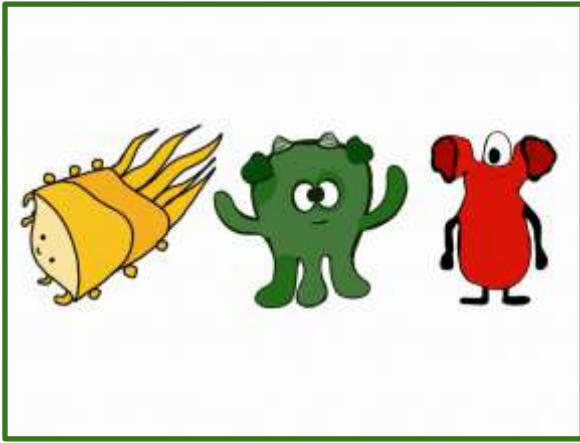


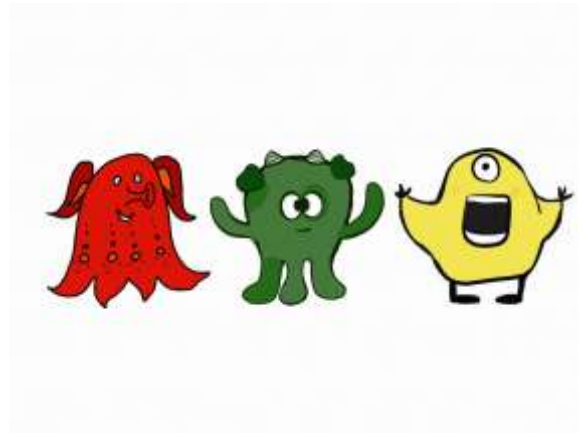
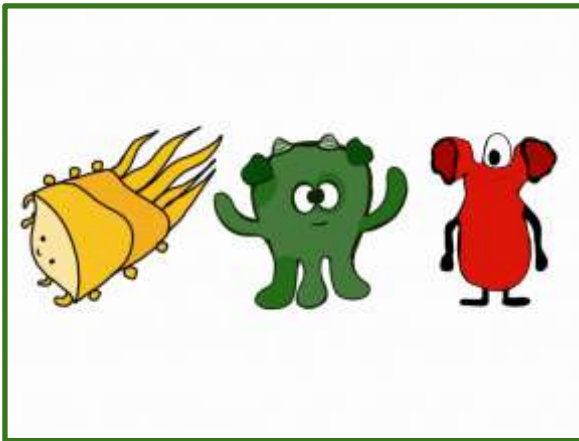
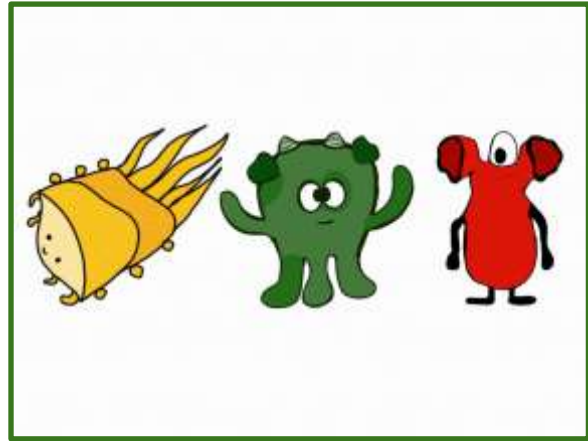
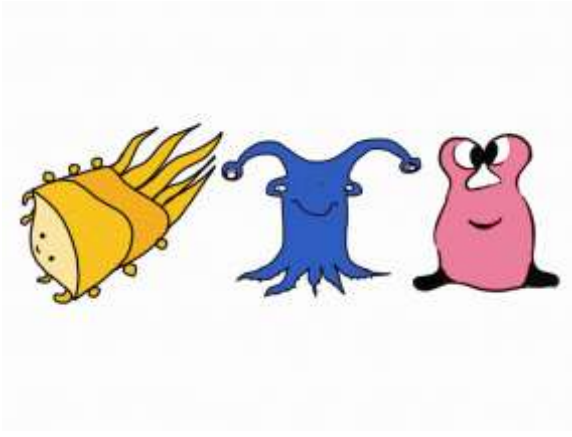
Триплет 2











*Примечания: зеленой рамкой выделены правильные триплеты; пары триплетов предъявлялись участникам в случайном порядке.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

### Тексты стимульных материалов для эксперимента 2

#### Приложение Б.1.

#### Рассказ про вомбатов

Вомбаты самые большие в мире существа, которые живут в норах. И вообще они самые крупные в мире млекопитающие из тех, которые большую часть времени проводят под землёй. Возможно, раньше они побольше находились на земле, но, с тех пор как там появилось столько недобрых существ предпочитают сидеть в уютной норе, чтобы их не было видно. Они живут только в Австралии, но иногда вомбатов привозят гастролировать в зоопарки. Живут эти звери довольно долго — самому старому в мире вомбату недавно исполнилось тридцать лет, и живёт он тоже в Австралии.

Раньше вомбаты были огромными, размером с носорога, но потом им пришлось уменьшиться в размерах. Сейчас их средняя длина около метра, а вес до сорока килограммов.

Вомбаты очень пушисты. У них толстый, серо-бурый, иногда рыжеватый мех. Довольно мягкий, кстати. Они легко переносят холод, хотя в Австралии температура редко опускается ниже нуля.

Больше всего они любят, когда их чешут. В специальных заповедниках разрешается общаться с вомбатами и даже кормить из рук. Вомбатам не нравится, когда кто-то при них отвлекается от чесания и восхищения ими. Они тогда напрыгивают и бодаются. Когда же вомбатов опять начинаешь правильно чесать, они ложатся на спинку, раскидывают лапы и наслаждаются. Тогда можно увидеть хвост вомбата, который кожистый и страшно милый.

У них очень сильные лапы, а на лапах большие твёрдые и очень острые когти. Обычно вомбаты используют их для рытья и ещё для расчёсывания шёрстки — они же всё время роются в земле, а это не самая чистая работёнка.

Вомбат исключительно умное животное. Австралийцы считают, что вомбат умнее собаки, и правильно считают. Поэтому у него такие печальные глазки. Он так смотрит, что почти разговаривает. Звуки, впрочем, вомбаты тоже умеют издавать. Они прихрюкивают когда едят и припискивают когда бегут. Зрение у вомбата не очень хорошее, ведь большую часть времени он проводит под землёй. Зато у него прекрасный слух и очень сильно развито обоняние.

Вомбаты довольно медлительные, но при этом очень быстрые. Медлительные они днём потому, что ведут ночной и сумеречный образ жизни, а днём либо спят, либо разгуливают по своим просторным норам. Норами они обычно не дружат, хотя есть вид вомбатов, которые ходят друг к другу в гости. Иногда вомбаты могут бежать со скоростью сорок километров в час, правда не очень долго, потому что быстро устают.

Вомбаты любят морковь, потому что их основная пища вкусные корни, а морковь как раз принадлежит к этому типу еды. Ещё они любят репу, кабачки и зелёные побеги. Мяса они не едят. Зато любят грибы, ягоды и сочный сладкий мох.

Средняя глубина норы вомбата три с половиной метра, а длина подземных коридоров может составлять двадцать пять метров. Они часто строят очень много сложных и разных тоннелей. Они всегда делают несколько выходов из лабиринтов на всякий случай. Среди тоннелей есть комнатки, где вомбаты устраивают себе гнёзда из сухой коры и травы. В лабиринтах прекрасная вентиляция и всегда тепло. Перед входами в норы устроены специальные места для отдыха — вомбаты любят полежать на солнышке.

Вомбаты сумчатые животные. Это животные, у которых спереди есть сумка для хранения детёныша, чтобы он не вылезал пока не вырастет. Новорождённый вомбатёнок весит всего полграмма, как несколько горошин, так что носить его совсем не тяжело. Обычно на волю его выпускают через полгода. И как бы вомбатёнок ни просился наружу, говоря, что он уже большой и самостоятельный, мамы-вомбаты неумолимы. Сумка у вомбачьей самки открывается очень хитрым способом — задом наперёд. Это сделано для того, чтобы при рытье в сумку не залетала земля. Иначе вомбатёнок испачкается. В сумке обычно сидит один

вомбатёнок, иногда двое.

Вомбаты добрые деликатные животные. Они любят поиграть с австралийскими детьми. Когда они забираются в кладовую австралийского дома и лакомятся там морковкой, это считается огромной удачей. Хозяева радуются, пускаются в пляс. Вомбаты смотрят на них снисходительно и издают вомбачьи звуки.

## **Приложение Б.2.**

### **Рассказ про ежей**

Ежи, которые живут в России, называются «обыкновенными». Их родственники рассеяны по всему свету и живут в лесах, но только светлых, где много густой травы и никаких болот, на опушках, в человеческих садах, рядом с фермой и в парках. А вот белобрюхие ежи живут в Африке, но только там, где растут леса и есть влага. Китайские ежи живут в степи и ходят охотиться днём, а не ночью, как обыкновенные.

Когда ёж рождается, он очень маленький, голый, розовый и совсем без иголок. В длину ёжик с ладошку младенца, а весит как несколько желудей. Ежата питаются маминым молоком и греются её теплом. Спустя две недели после рождения у ежат открываются глазки, они начинают видеть. У них растут и крепнут иголки. И так, день за днём, маленький ежик вырастает в большого ежа.

Летом ежи спят совсем недолго, всего три-четыре часа, потому что на улице тепло. А вот когда наступит зима, они уснут на четыре месяца и будут спать всё время, пока на земле лежит снег.

У ежей на мордочке и животе есть шерсть, а сверху, на спине — иголки. Иголки защищают ежей от врага и опасностей. Внутри иголки пустые, но всё равно очень крепкие! Если ёж свернётся в клубок, даже падать с высоты ему будет не страшно: его убержёт жёсткий игольчатый шар. Иголки помогают ежам переносить полезные для жизни вещи. Только не красные круглые яблоки и грибы,

как на картинках, а мох, траву, которые нужны ежам, когда они строят норку.

У ежей всего 35 зубов — верхние очень острые, чтобы откусывать, а нижние потолще, чтобы жевать. Ещё у ежей есть хвостик, он совсем незаметный и маленький. Когти у ежей твёрдые и прочные, их, как и у людей, пять — по одному на каждый палец. А ещё ежи умеют топтать своими лапами!

Ежи способны очень быстро бегать. За секунду они могут пробежать три метра — это очень быстро. Поэтому, если враг ежа рядом, то он не будет сворачиваться в клубок, а убежит от него. Догнать ежа очень сложно. Кроме того, у ежей хорошее обоняние и тонкий слух, поэтому они чувствуют приближение врага издали.

Врагов у ежей много — лисы, волки, хорьки и собаки. Но есть ещё и опасные птицы. Есть птицы, которые просто поют и стучат клювом по дереву. Они не опасны. Но есть и те, кто летают высоко, глядят далеко и бросаются вниз как камни. Это филины. Они так же, как и ежи, просыпаются ночью и охотятся на всех ночных пешеходов. Спасенье от филина только одно — сжаться в комок.

Ёж может съесть очень много — за одну ночь он может съесть еды на треть от своего веса. Ежи питаются различной едой: червяками, насекомыми, орехами, грибами и ягодами.

Есть легенда, что в давние-предавние времена в Италии жил огромный ёж — в пять раз больше нынешних. Иголок у него не было, зато был длинный хвост, узкая мордочка и маленькие ушки. Он был размером с ребёнка.

Ещё, оказалось, что иголки у ёжиков — это не самое главное. Есть ежи совсем без иголок. У них густой мех, длинный хвост, равный примерно половине длины тела. От врагов они защищаются запахом. Пахнут зверьки луком и чесноком. А ещё они очень милые.

А ещё есть очень милые ежи, они называются ушастыми. У них действительно большие уши — почти в половину длины головы.

Иногда люди заводят домашних ежей. Они не топают и не сильно пахнут, не впадают в зимнюю спячку, а колючки у них не слишком колючие, а окрасов великое множество. Но выпускают их в лес нельзя, иначе домашнему ежу будет

очень плохо.

Весной, летом и осенью люди с вертолётов и самолётов разбрасывают над лесами кусочки вкусной еды со спрятанными внутри лекарствами — это специально для ёжиков, чтобы они не заразились опасными болезнями. Но и сами ежи умеют лечиться. Они катаются в кислых осенних яблоках, чтобы их сок попал в кожу под иголками и выгнал клещей и блох. Иногда после такого лечения кусочки яблок застревают между иголками, и люди думают, что ежи носят яблоки в свои гнёзда. Но это не так. Ежи не умеют носить ничего тяжёлого.

И многие люди считают, что ежи такие милые, как котята. И очень их любят, потому что они еще и полезны тем, что едят вредных жуков.

### Приложение Б.3.

#### Сказка «Кирпич и воск»

Лежали рядом на кухонной полке кирпич и кусок воска. Кирпичу так и полагалось здесь находиться — ведь на нём хозяйка точила ножи. И острые они становились после этого! А вот как воск попал на эту полку, никто не знал. Давным-давно кто-то положил его там, да и забыл.

По ночам, когда в кухне никого не было, воск и кирпич вели между собой длинные разговоры. Однажды воск спросил у кирпича:

— Скажи, сосед, почему ты такой твёрдый? Кирпич ответил:

— Я не всегда был таким твёрдым. Я и мои братья сделаны из мягкой глины. Глину замесили водой, долго мяли, наготовили кирпичей, а потом сунули в огонь. Там-то мы и стали звонкими и твёрдыми.

— Ах, как бы мне хотелось походить на тебя! — вздохнул воск. — Когда ты принимаешься точить ножи, приятно смотреть. Вжиг-вжиг! Только во все стороны искры летят. А попробуй я подставить ножу спину, он меня мигом изрежет на куски. Нет, нет, не уговаривай меня, быть мягким очень плохо.

Утром хозяйка растопила очаг. Пламя так и плясало по поленьям.

Тут воск вспомнил, что кирпич сделался твёрдым, побывав в огне. Он пододвинулся к самому краю полки и скатился вниз на железный лист перед очагом. У, как жарко ему стало! Он весь обмяк и начал подтаивать. Верно, он растаял бы совсем, если бы в эту минуту в кухню не вошёл хозяин. А надо сказать, что хозяин был кукольник. Он ходил по дворам и давал со своими куклами весёлые представления.

Хозяин нагнулся, чтобы разжечь трубку угольком из очага, и вдруг увидел воск, который хотел стать твёрдым, как кирпич, но вместо этого чуть не растаял.

— Вот замечательно, — вскрикнул хозяин, — из этого воска я вылеплю новую куклу!

Так он и сделал — вылепил куклу и назвал её Пульчинелло.

Кукла получилась такая смешная, что кто ни взглянет на её вздёрнутый нос, рот до ушей и лукавые глаза, непременно рассмеётся.

Когда кончалось представление, хозяин высовывал из-за ширмы Пульчинелло. Пульчинелло раскланивался во все стороны, а хозяин говорил за него тоненьким голосом:

— Уважаемые сеньоры! Было время, когда я завидовал кирпичу только за то, что он твёрдый. Из кирпича, закалённого в огне, можно построить дом, но из него нельзя сделать Пульчинелло. Из меня, конечно, дом не построишь, да и от огня меня следует держать подальше. Но зато я весел и веселю вас. Так что вы видите, старые, молодые и даже маленькие сеньоры, что всяк хорош на своём месте.

Потом Пульчинелло прятался за ширму, и зрители, довольные, расходились по домам.

#### **Приложение Б.4.**

#### **Сказка «Золотая утка»**

Давным-давно, когда Варшава еще не была столицей Польши, а только крепостью, жил в этом городе ученик сапожника по имени Ясько. Паренек он был

лихой, смелый, и страшно любил всякие приключения. А поскольку кошелек у него был пустой, то частенько подумывал Ясько, как бы его немного наполнить честным способом. Ходила в то время легенда, будто бы в подземелье старого замка было маленькое озерцо. По этому озерцу плавает золотая утка. Эта утка — прежняя хозяйка старого замка. Жадной и скупой она была при жизни, и теперь живет в подземелье, стережет свои богатства. Говорили также, что эта хозяйка огромным богатством одарит смельчака, который спустится в подземелье и найдет озеро. Однажды решил Ясько испытать свое счастье. Решил он отыскать утку и честным способом немного разбогатеть.

Надел он самое лучшее, что у него было, и отправился к замку. Долго блуждал он по тёмным переходам, подземным коридорам, наощупь водя рукой по влажным стенам, и спускался по каменным ступеням все глубже и глубже.

Наконец оказался он в огромной пещере, освещённой каким-то дивным светом, бьющим не то с потолка, не то с каменных стен. В этом бледном свете плескалась серебристо-темная вода озерца.

Остановился Ясько у самой воды и подумал: правду люди говорили, что есть в подземелье озеро. Только где же искать эту утку и попросить у нее сокровища?

Только он подумал об этом, как из воды вынырнула утка с золотыми перышками, от которых в пещере стало еще светлее.

Подплыла она к самому берегу и так ответила человеческим голосом:

— Смелый ты, должно быть, парень, раз не побоялся сюда прийти. Положена тебе награда. Но чтобы получить мои богатства, нужно иметь не только смелое, но и твёрдое сердце. Потому что тот, у кого мягкое сердце, очень быстро богатства потратит. Так вот, прежде чем я открою тебе мои сокровища, тебе придётся пройти еще одно испытание. Вот тебе сто монет. Потратить их ты должен только на себя в течение одного дня. Если хоть монетку потратишь на других, не получишь ничего.

Молча выслушал Ясько все это, потом нагнулся, поднял тяжёлый кошелёк, который со звоном упал у его ног. Поклонился утке и пошел обратно.

Взвешивая в руке тяжелый кошелёк, усмехнулся про себя Ясько и начал думать, на что деньги потратить.

— Приоденусь красиво, наемся досыта, позабавлюсь вволю. Легко потрачу эти деньги, а завтра за новыми сокровищами пойду.

В центре города купил он себе красивую одежду, выбирая самые дорогие вещи, но хотя он и приоделся, с ног до головы, кошелёк его еще был довольно тяжёл. Тогда зашёл Ясько в наилучший трактир, велел принести себе самые изысканные блюда, сладкого мёду. Когда же пришлось расплачиваться, то он очень удивился: у него взяли одну монету.

Наступал вечер. Где же потратить оставшиеся деньги? Ясько бродил по улицам, заходил в лавки, покупал разные ненужные мелочи. Пришел он наконец на площадь, где стояла большая палатка, в которой давали представление жонглеры и фокусники. Уселся Ясько на почётном месте, дорого его оплатив, до слёз насмеялся от представления, но когда вышел, снова вспомнил о своих хлопотах. В кошельке оставалось ещё десять монет.

Стоял так Ясько задумавшись, как вдруг подошёл к нему седой сгорбленный старичок и попросил милостыню. Вытянул руку и просит:

— Помоги старику, красивый юноша...

Доброе сердце было у Ясько, чуткое ко всякой людской беде. Не задумываясь, положил он золотую монету в протянутую ладонь.

Вдруг что-то как треснет около него, как будто молния ударила. И услышал вдруг Ясько за собой голос золотой утки, не сладкий уже, как в подземелье, а суровый и гневный:

— Не сдержал уговора, сжалился над убогим! Слишком чувствительное у тебя сердце, чтобы наследовать мои сокровища. Не пытайся даже спускаться в подземелье, потому что тебя там только смерть встретит.

Оглянулся Ясько, но никого не увидел. Исчез седой старичок. Наверное, незаметно ушел, пока Ясько слушал голос утки.

Пожал Ясько плечами и усмехнулся про себя:

— Не нужно мне таких богатств, которых я не смогу употребить для добра другим.

Весело посвистывая, он пошёл домой. Красивую одежду, что купил на

золотые монеты, спрятал в сундук, а наутро оделся во всё старое. С тех пор жил Ясько как прежде.

А поскольку был он парень добрый, работать любил, то везло ему в жизни не меньше. Вскоре стал Ясько подмастерьем и открыл свою мастерскую. Никогда не жалел он об утраченных сокровищах.

— Дороже золота для меня людское уважение, — говорил Ясько, привычно ударяя молотком по колодке. — И приятнее мне те деньги, что я заработаю собственным трудом, чем те подземные сокровища.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В.

### Результаты статистического анализа данных эксперимента 1

#### Приложение В.1.

#### Результаты апостериорных тестов для эффектов взаимодействия Тип стимула: Экспериментальный блок

Стимул	Переменная 1 (среднее кол-во правильных ответов)	Переменная 2 (среднее кол-во правильных ответов)	t	p	p <sub>adj</sub>
D	Б1 (5,17)	Б2 (5,15)	0,137	0,891	1
D	Б1 (5,17)	Б3 (4,71)	3,3	0,01	0,008
D	Б1 (5,17)	Б4 (4,52)	3,78	0,0003	0,002
D	Б2 (5,15)	Б3 (4,71)	3,59	0,0005	0,003
D	Б2 (5,15)	Б4 (4,52)	4,11	0,0001	0,0004
D	Б3 (4,71)	Б4 (4,52)	1,27	0,207	1
I	Б1 (5,3)	Б2 (5,24)	0,47	0,64	1
I	Б1 (5,3)	Б3 (5,15)	1,22	0,227	1
I	Б1 (5,3)	Б4 (4,97)	1,9	0,061	0,364
I	Б2 (5,24)	Б3 (5,15)	0,721	0,473	1
I	Б2 (5,24)	Б4 (4,97)	1,72	0,088	0,527
I	Б3 (5,15)	Б4 (4,97)	1,24	0,218	1

*Примечания: D — целевой непредсказуемый стимул, I — целевой предсказуемый стимул; Б1 — первый экспериментальный блок, Б2 — второй блок, Б3 — третий блок, Б4 — четвертый блок.*