

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

На правах рукописи



Маркевич Максим Олегович

**Влияние слуховой ритмической стимуляции на эффективность решения
когнитивных задач: психофизиологическое исследование**

Специальность: 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»

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЧТЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ РИТМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ	12
1.1. Процесс чтения	12
1.2. Теоретические основы влияния внешней ритмической стимуляции на процесс обработки языковой информации	17
1.2.1. Тонкая слуховая обработка	17
1.2.2. Синхронизация нейронных колебаний с колебаниями внешних ритмических стимулов	18
1.2.3. Сенсомоторная синхронизация	20
1.2.4. Обработка ритма в контексте зрительной модальности и процесса чтения	22
1.3. Современные исследования музыкально-ритмического воздействия на когнитивные и языковые процессы	25
1.3.1. Нейрофизиологические аспекты музыкально-ритмического воздействия	25
1.3.2. Воздействие ритмической стимуляции на общие когнитивные функции, связанные с временным аспектом внимания	27
1.3.3. Воздействие ритмической стимуляции на языковые процессы	29
Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАННИМИ КОМПОНЕНТАМИ ПОТЕНЦИАЛОВ, СВЯЗАННЫХ С СОБЫТИЕМ И СКОРОСТЬЮ ЧТЕНИЯ	36
2.1. Постановка проблемы и цели эмпирического исследования	36
2.2. Процедура и методы исследования	37
2.2.1. Выборка исследования 1	37
2.2.2. Задача Грамматических Суждений	37
2.2.3. Задание на скорость чтения	39
2.2.4. Регистрация и предварительная обработка ЭЭГ в исследовании 1	40
2.2.5. Анализ данных исследования 1	41
2.3. Результаты эмпирического исследования 1	42
2.3.1. Связь между скоростью чтения, точностью ответа и временем реакции	42
2.3.2. Влияние лексических и грамматических факторов на поведенческие уровни	43
2.3.3. Лексические и грамматические эффекты вызванных потенциалов	43
2.3.4. Взаимосвязь между скоростью чтения и ВП	45
2.4. Обсуждения результатов эмпирического исследования 1	47
2.4.1. Лексические и грамматические эффекты N170	47
2.4.3. Скорость чтения, амплитуда N170 и лексический эффект N170	49
2.4.4. Возрастные эффекты компонентов P100, N170	50
2.4.5. Корреляции поведенческих показателей	50
Выводы по главе 2	51
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ СЛУХОВОЙ РИТМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА РЕШЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ГРАММАТИЧЕСКИХ СУЖДЕНИЙ НА ПОВЕДЕНЧЕСКОМ И НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЯХ	52
3.1. Постановка проблемы и цели эмпирического исследования	52
3.2. Процедура и методы исследования	54

3.2.1. Выборка исследования 2	54
3.2.2. Задача Грамматических Суждений	54
3.2.3. Задача Восприятия Музыкального Метра	55
3.2.4. Регистрация и предварительная обработка ЭЭГ в исследовании 2	56
3.2.5. Анализ данных исследования 2	57
3.3. Результаты эмпирического исследования 2	58
3.3.1. Поведенческие данные	58
3.3.2. Нейрофизиологические данные	62
3.4. Обсуждения результатов эмпирического исследования 2	63
3.4.1. Отсутствие поведенческих доказательств эффекта ритмического прайминга на грамматическую обработку в кросс-модальном дизайне	64
3.4.2. Связи между грамматическими и ритмическими навыками	65
3.4.3. Эффект фасилитации на нейрофизиологическом уровне	68
Выводы по главе 3	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
ВЫВОДЫ	72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	74
ПРИЛОЖЕНИЯ	91
Приложение 1. Демографические характеристики и читательские привычки участников	91
Приложение 2. Языковая среда участников	93
Приложение 3. Примеры предложений для каждого экспериментального условия	94
Приложение 4. Порядок предъявления условий слуховой ритмической стимуляции	95
Приложение 5. Описательная статистика значений скорости чтения (слов/мин)	96
Приложение 6. Количество доступных эпох событийно-связанных потенциалов для каждого условия	97
Приложение 7. Топография событийно-связанных потенциалов	98
Приложение 8. Топография лексического эффекта	99
Приложение 9. Средние (N=32) событийно-связанные потенциалы по всем электродам	100
Приложение 10. Средние (N=32) событийно-связанные потенциалы по всем электродам	101
Приложение 11. Описательная статистика амплитуды и латентности P100 и N170 для каждого условия	102
Приложение 12. Анализ ковариации (ANCOVA) для амплитуды/латентности P100 и N170	104
Приложение 13. Регрессионные модели амплитуды/латентности P100 и латентности N170	105
Приложение 14. Регрессионная модель амплитуды N170 с бинарными предикторами	106
Приложение 15. Демографические характеристики и читательские привычки участников	108
Приложение 16. Языковая среда участников	109
Приложение 17. Музыкальный опыт участников	111
Приложение 18. Схема регулярно-согласованной последовательности	113
Приложение 19. Количество доступных эпох событийно-связанных потенциалов для каждого условия грамматичности × прайминга	114
Приложение 20. Анализ дисперсии (ANOVA) для RT, SD и коэффициента стабильности ритма чтения для целевых и предцелевых стимулов	115

Приложение 21. Описательная статистика выполнения задачи суждения о грамматичности по условиям прайминга	117
Приложение 22. Топография эффекта грамматичности для каждого условия прайминга	119
Приложение 23. Результаты модели линейной регрессии смешанных эффектов для чувствительности дискриминации (d')	120
Приложение 24. Результаты модели линейной регрессии смешанных эффектов для смещения ответа (c).	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В современном обществе навык чтения является одним из ключевых факторов успешной социальной адаптации и профессиональной реализации. Трудности с чтением, однако, наблюдаются сейчас у довольно большого процента населения (порядка 15-20% по данным международной ассоциации дислексии), и приводят к снижению академической успеваемости и качества жизни. До сих пор нет полного понимания психофизиологических механизмов, лежащих в основе навыка чтения, которые могут направить пути поиска эффективных подходов к выработке этого навыка.

Особенно следует отметить проблемы у подростков, которых в психофизиологических исследованиях практически не изучают. Они как раз и являются целевой группой данной работы. В международных мониторинговых исследованиях качества образования, таких как PIRLS и PISA, наблюдается значительный разрыв в успеваемости в чтении между младшим школьным и подростковым возрастом у российских детей. Российские дети младшего возраста традиционно показывают высокие результаты, тогда как подростки демонстрируют неудовлетворительные показатели грамотности по сравнению с молодежью из стран ОЭСР. Таким образом, актуальность данного исследования также обусловлена отсутствием решения проблемы разрыва в успеваемости в чтении между ранним школьным и подростковым возрастом у российских детей.

Кроме понимания механизмов чтения, в работе исследуется влияние ритмической музыкальной стимуляции на такой важный аспект чтения как понимание грамматической согласованности предложений. Ряд исследований продемонстрировал наличие связи между музыкальными навыками и навыками чтения, что указывает на потенциал использования музыки в коррекционной работе (см. обзор Ozernov-Palchik et al., 2018). Кроме того, многие исследования показали эффективность непосредственного воздействия ритмической стимуляции для улучшения навыков, связанных с чтением (см. обзор Fiveash et al., 2021). Однако есть и противоположные данные. Систематизация и экспериментальная проверка этих исследований на русскоязычной выборке подростков, с использованием психофизиологического подхода поможет продвинуться в понимании связи между ритмическими процессами и чтением, а также может иметь важное прикладное значение в продвижении эффективных подходов для улучшения навыка чтения.

Степень разработанности темы исследования

Эффект фасилитации когнитивных процессов — это явление, при котором определенные внешние стимулы, такие как ритмическая стимуляция, способствуют улучшению выполнения когнитивных задач, связанных с такими когнитивными процессами, как внимание, память и восприятие. Эффект фасилитации когнитивных процессов, возникающий после ритмической стимуляции, привлекает внимание исследователей из различных областей, включая психологию, нейронауку и лингвистику. Несмотря на наличие эмпирических доказательств эффекта фасилитации, в исследованиях наблюдается ряд ограничений и противоречий.

Большинство исследований фокусируется на изучении эффекта фасилитации у детей и молодых взрослых, что ограничивает возможность обобщения результатов на другие возрастные группы. Это указывает на необходимость расширения возрастного диапазона участников для получения более полного представления о механизмах эффекта фасилитации после воздействия ритмической стимуляции.

Исследования в рамках синтаксического направления демонстрируют, как подтверждения эффекта фасилитации в задаче по оценке грамматической согласованности после воздействия ритмической стимуляции, так и опровержения. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения и уточнения роли ритмической стимуляции в задаче по оценке грамматической согласованности. Кроме того, исследования в данном направлении сосредоточены преимущественно на изучении эффекта фасилитации в слуховой задаче по оценке грамматической согласованности, что ограничивает понимание эффекта фасилитации в других модальностях, например, при оценке грамматической согласованности предложений при чтении.

Таким образом, несмотря на наличие эмпирических доказательств эффекта фасилитации, возникающего после ритмической стимуляции, степень разработанности темы остается недостаточной. Существующие ограничения и противоречия в исследованиях указывают на необходимость дальнейшего изучения механизмов эффекта фасилитации, расширения возрастного диапазона участников, включения различных модальностей. Преодоление этих ограничений позволит получить более полное представление о роли ритмической стимуляции в улучшении языковых процессов и разработать эффективные терапевтические подходы к коррекции нарушений языковых процессов.

Чтение – это комплексный процесс, объединяющий множество когнитивных функций (Stein, 2022; Rayner et al., 2010). Он включает в себя несколько этапов обработки информации: зрительный анализ, фонологическая обработка (Rayner et al., 2010; Coltheart et al., 2001), где происходит процесс декодирования слов; лексическая и синтаксическая обработка, где происходит связывание слов с их значениями и анализ грамматической структуры предложений

(Rayner et al., 2010). Также выделяют семантическую обработку, где читатель интерпретирует смысл текста и связывает информацию с уже существующими знаниями (Rayner et al., 2010).

В недавнем теоретическом обзоре, проведённом А. Файвэш и коллегами (см. обзор Fiveash et al., 2021), была представлена концепция обработки ритма в речи и музыке (Processing Rhythm in Speech and Music, PRISM). Эта концепция основывается на положениях об обработке ритма, рассмотренных в нескольких предыдущих теориях, таких как:

1. Теория временной структуры (Temporal Sampling Framework, TSF; Goswami, 2011).
2. Более широкая гипотеза Перекрытие, Точность, Эмоции, Повторение и Внимание (Overlap, Precision, Emotion, Repetition, and Attention, OPERA, которая предполагает, что эти пять условий определяют влияние музыкального обучения на обработку речи (Patel, 2011, 2014)).
3. Динамическая теория внимания (ДТВ) (Jones, 1976, 2019).
4. Теория предсказательного кодирования (Friston, 2005, 2010).

Концепция обработки ритма в речи и музыке (см. обзор Fiveash et al., 2021) объединяет три основных механизма обработки ритма в музыке и речи:

1. Тонкая слуховая обработка.
2. Синхронизация нейронных колебаний с колебаниями внешних ритмических стимулов.
3. Сенсомоторная синхронизация.

Данные временные механизмы, представленные в модели обработки ритма в речи и музыке, не были рассмотрены в рамках зрительной модальности и непосредственно в контексте процесса чтения. Однако недавние исследования показали, что чтение задействует процесс временного внимания (temporal attention) и включает временной аспект обработки информации (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019), в основе которого лежит работа внутренней осцилляторной активности головного мозга (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Временную обработку информации также отражает такая внутренняя динамическая характеристика читателей, как скорость чтения (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019).

Цель и задачи

Целью данной работы является изучение связи внутренних и внешних ритмических процессов с характеристиками навыка чтения.

Цель конкретизируется в следующих задачах:

1. Изучить влияние слуховой ритмической стимуляции на выполнение задачи по оценке грамматической согласованности предложений.
2. Изучить влияние слуховой ритмической стимуляции на мозговую активность при выполнении задачи по оценке грамматической согласованности предложений.

3. Изучить связи между динамическими характеристиками читателей (скорость и стабильность чтения), нейрофизиологическими показателями, отражающими ранние этапы обработки слова, и показателями эффективности выполнения задачи по оценке грамматической согласованности предложений.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является связь ритмических процессов и чтения.

Предметом исследования является влияние внешней слуховой ритмической стимуляции и внутренних динамических характеристик подростка на эффективность выполнения задачи по оценке грамматической согласованности предложений.

Теоретические гипотезы исследования

1. Скорость чтения коррелирует с амплитудой и латентностью ранних компонентов вызванных потенциалов (ВП) P100 и N170.

2. Регулярная ритмическая стимуляция модулирует эффект фасилитации в задаче по оценке грамматической согласованности предложений.

3. Нерегулярная ритмическая стимуляция может ухудшать выполнение задачи по оценке грамматической согласованности предложений.

4. Эффективность выполнения задачи по оценке грамматической согласованности предложений коррелирует с внутренними динамическими характеристиками читателей (скорость, стабильность чтения и восприятием метрических структур).

5. Воздействие слуховой ритмической стимуляции проявляется на нейрофизиологическом уровне (исследовательская гипотеза).

Научная новизна

1. Впервые показана связь латентности ранних ответов мозга на слова и скорости чтения у русскоязычных подростков.

2. Впервые проведено исследование влияния слуховой ритмической стимуляции на процесс выполнения зрительной задачи по оценке грамматической согласованности предложений на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях у русскоязычных подростков.

3. Впервые обнаружено влияние нерегулярной ритмической стимуляции на поведенческом уровне при выполнении задачи по оценке грамматической согласованности предложений.

4. Впервые обнаружено влияние нерегулярной ритмической стимуляции на нейрофизиологическом уровне при выполнении задачи по оценке грамматической согласованности предложений.

Теоретическая значимость работы

1. Систематизация и анализ результатов исследований в области общих когнитивных и специфичных языковых функций позволяют углубить понимание роли ритмической стимуляции и внутренних динамических характеристик в формировании эффекта фасилитации (ЭФ).
2. Данное исследование вносит вклад в понимание внешних и внутренних динамических факторов, влияющих на развитие навыков чтения у подростков.
3. Данное исследование вносит вклад в понимание роли слуховой ритмической стимуляции, предъявляемой в процессе решения зрительной задачи по оценке грамматической согласованности предложений.
4. Данное исследование вносит вклад в понимание внутренних динамических характеристик читателей, связанных с эффективностью выполнения зрительной задачи по оценке грамматической согласованности предложений.
5. Данное исследование открывают новые перспективы для дальнейшего изучения механизмов, лежащих в основе взаимодействия ритмических навыков и процесса обработки грамматических структур текста, способствуя развитию теоретических моделей языковой обработки.

Практическая значимость работы

Результаты данного исследования имеют большой потенциал для применения в области образования и клинической практики. Понимание взаимосвязи между динамическими характеристиками читателей (скорость и стабильность чтения), нейрофизиологическими показателями чтения и показателями эффективности выполнения задачи по оценке грамматической согласованности предложений может способствовать разработке инновационных методов обучения и коррекции языковых нарушений.

Методология и методы исследования

Работа заключается в многоуровневом исследовании когнитивных процессов, которое включает поведенческий уровень оценки скорости чтения, понимания грамматических структур предложений, детектирования метрических структур ритмических последовательностей, а также исследование активности коры головного мозга во время выполнения зрительной задачи по оценке грамматической согласованности предложений с использованием метода электроэнцефалографии (ЭЭГ). В рамках данной диссертационной работы применялись теоретические (анализ, сравнение, обобщение результатов теоретических и эмпирических исследований) и эмпирические (лабораторный эксперимент, опросный, поведенческий) методы исследования.

Методы математической обработки включали:

1. Анализ ковариации с повторными измерениями (repeated measures ANCOVA)

2. Дисперсионный анализ с повторными измерениями (repeated measures ANOVA)
3. Линейная регрессия
4. Пермутационный тест
5. Коэффициент корреляции Пирсона

Положения, выносимые на защиту

1. Слуховая ритмическая стимуляция регулярного типа не оказывает влияния на выполнение задачи по оценке грамматической согласованности предложений при чтении.
2. Слуховая ритмическая стимуляция нерегулярного типа ухудшает выполнение задачи по оценке грамматической согласованности предложений при чтении.
3. Нерегулярная ритмическая стимуляция влияет на мозговую активность при выполнении задачи по оценке грамматической согласованности предложений при чтении.
4. Скорость чтения связана с нейрофизиологическими показателями, отражающими ранние этапы обработки слова, и показателями эффективности выполнения задачи по оценке грамматической согласованности предложений при чтении.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена применением комплекса методов исследования, адекватных поставленным целям и задачам, а также корректным использованием методов математической обработки данных и статистического анализа.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационного исследования обсуждались на научных семинарах Научного центра когнитивных исследований, Научно-технологического университета «Сириус». Основные положения работы были представлены на следующих российских и международных конференциях:

1. Балтийский форум: нейронаука, искусственный интеллект и сложные системы, г. Калининград. Доклад «Rhythmic structure of reading and cross-modal priming effect of rhythm on grammatical judgments» (16 сентября 2022).
2. VII Съезд РПО и Всероссийский форум психологов в Екатеринбурге, доклад «Ритмическая структура чтения и эффект кросс-модального ритмического прайминга на грамматические суждения» (29 сентября 2022).
3. Междисциплинарная научно-практическая конференция с международным участием «Речь. Грамотность. Дислексия». Пгт. Сириус. Доклад «Ритмическая структура чтения и эффект кросс-модального ритмического прайминга на грамматические суждения» (17 октября 2022).
4. Седьмая конференция «Когнитивная наука в Москве: новые исследования». Доклад «Влияние аудиальной ритмической стимуляции на грамматические процессы: кросс-модальное исследование» (21 июня 2023).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации с учетом приложений составляет 121 страницу. Библиографический список включает 200 наименований, из них 187 на иностранном языке, 13 рисунков, 19 таблиц и 24 приложения.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЧТЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ РИТМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

Основной целью текущей главы является проведение теоретического анализа основных концепций процесса чтения и обработки ритма. Исследовательские задачи текущей главы включают:

1. Рассмотрение процесса чтения и его компонентов на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях.
2. Рассмотрение основных теоретических моделей обработки ритма.
3. Рассмотрение современных исследований влияния внешней ритмической стимуляции на когнитивные и языковые процессы.

1.1. Процесс чтения

Чтение — это сложный навык, задействующий в себе множество фундаментальных когнитивных процессов, являющийся многофакторным; в частности, для процесса чтения требуется не только точная зрительная, но и слуховая обработка (Stein, 2022; см. обзор Rayner et al., 2010). Процесс чтения включает в себя несколько этапов обработки информации: зрительная, фонологическая, лексическая, синтаксическая и семантическая обработка (Rayner et al., 2010; Coltheart et al., 2001).

На этапе зрительной обработки текста происходит обработка зрительных параметров поступившей информации.

На фонологическом уровне происходит распознавание звуковых единиц (фонем) и их сочетаний, читатели декодируют слова, связывая буквы с соответствующими звуками, что особенно важно для начального этапа обучения чтению. Данный уровень описан в рамках моделей ранних этапов процесса чтения (например, модель каскадного двойного пути (Dual Route Cascaded - DRC), треугольные модели (triangle models)).

Модель «садового пути» (the garden-path models), модели, основанные на ограничениях (the constraint based models), и модель Льюиса и Вазишта (the model of Lewis and Vasishth) рассматривают в большей степени лексический и синтаксический уровни обработки информации (см. обзор Rayner et al., 2010). На лексическом и синтаксическом этапах читатели идентифицируют слова, связывают их с их значениями и анализируют грамматическую структуру предложений, понимая, как слова взаимодействуют друг с другом.

На этапе семантической обработки информации происходит интерпретация смысла текста, связывание информации с уже существующими знаниями субъекта. Это включает в себя

понимание подтекста и контекста. Семантический уровень обработки рассматривается в таких моделях чтения, как модель интеграции построений (Construction Integration - CI), модель пространства ситуаций (Situation-Space), модель ландшафта (Landscape), модель резонанса (Resonance) и модель распределенного пространства ситуаций (Distributed Situation Space) (см. обзор Rayner et al., 2010).

Каждый из уровней процесса чтения обладает специфичными нейрофизиологическими коррелятами (Ребрейкина и др., 2020; Molinaro et al., 2011)

Большинство исследований с использованием нейрофизиологических методов были сосредоточены на изучении динамики амплитуды и латентности различных компонентов потенциалов, связанных с событием (ПСС) в процессе овладения грамотностью или при нарушениях чтения. Латентность и амплитуда компонентов ПСС включают различные аспекты обработки; латентность до пикового компонента рассматривается как временной аспект, а изменение амплитуды обычно рассматривается как аспект мощности электрической активности головного мозга (Luck, 2014). Как амплитуда, так и латентность компонентов ПСС изучаются в контексте их взаимосвязи с различными навыками чтения, включая скорость чтения (Stekić et al., 2023).

Обработка слов начинается с декодирования соответствующей зрительной информации. Зрительная обработка слов традиционно связана с компонентами потенциалов, связанных с событием (ПСС) P100 и N170, регистрируемыми в задних областях мозга примерно через 100 и 170 мс после начала предъявления стимула (Assadollahi & Pulvermüller, 2003; Bentin et al., 1999; Hauk et al., 2006; Hauk & Pulvermüller, 2004; Maurer et al., 2005). Компонент P100 обычно связывают со зрительно-пространственным вниманием (Hillyard et al., 1998) и анализом физических характеристик стимула (Assadollahi & Pulvermüller, 2003; Dien, 2009; Hauk et al., 2006), а компонент N170 связывают с зрительной обработкой слова на более высоком уровне (Bentin et al., 1999; Dien, 2009; Maurer et al., 2005) и лексическим доступом (Araújo et al., 2015; Braun et al., 2009; Hauk et al., 2006; Kim & Lai, 2012).

Кроме того, есть некоторые свидетельства того, что ранние компоненты ПСС могут быть связаны с обработкой грамматики. Большинство предыдущих исследований изучали слуховые компоненты (см. обзор Kim, 2018), однако несколько исследований непосредственно изучали чувствительность зрительных компонентов P100/M100 и N170 к грамматическим ошибкам (Kim & Gilley, 2013; Dikker et al., 2009; Matar et al., 2019). Далее мы будем называть грамматическим эффектом зарегистрированные различия в амплитудах этих компонентов в ответ на грамматически правильные слова по сравнению с грамматически неправильными. В исследовании с использованием метода электроэнцефалограммы (ЭЭГ), проведенном А. Кимом и П. Гилли (Kim & Gilley, 2013) на англоговорящих взрослых, было обнаружено, что амплитуда

компонентов P100 и N170 была больше при наличии синтаксических аномалий. Этот грамматический эффект был более выражен в электродах затылочно-височной области. С. Диккер и коллеги (Dikker et al., 2009) также продемонстрировали с помощью метода магнитоэнцефалографии (МЭГ), что активность компонента M100 была больше в синтаксически неожиданных структурах по сравнению с синтаксически ожидаемыми у взрослых. Однако этот эффект наблюдался только при определенных синтаксических нарушениях (например, при наличии непредсказуемой свободной закрытой или связанной морфемы) и не наблюдался при других синтаксических нарушениях (например, при отсутствии необходимой связанной закрытой морфемы). Источник этого эффекта был прослежен до затылочной коры с помощью методов дипольного моделирования. Позже С. Матар и коллеги (Matar et al., 2019), используя МЭГ, также обнаружили увеличение раннего компонента M100 в первичной зрительной коре при предъявлении взрослым синтаксически неожиданных структур. Таким образом, хотя грамматическая обработка обычно связана с более поздними компонентами ПСС, такими как N400 и P600 (Molinaro et al., 2011), появляются свидетельства увеличения амплитуды ранних компонентов P100/M100 и N170 при синтаксических аномалиях. Эта чувствительность может быть объяснена нисходящим эффектом прогностических процессов, основанных на знании грамматических закономерностей языка и языковом опыте (Dikker et al., 2009).

Ряд предыдущих исследований показал, что ранний компонент N170 либо модулируется навыком чтения, либо отражает созревание/изменение мозговых систем, лежащих в основе читательской деятельности (Araújo et al., 2015; 2012; Fraga González et al., 2014; Hasko et al., 2013; Kast et al., 2010; Maurer et al., 2011; Rebreikina et al., 2020; Zhao et al., 2014; Zhao et al., 2019). В частности, хотя данные для детей противоречивы, большинство исследований с участием взрослых показали более отрицательные амплитуды N170 у типичных читателей, чем у слабых читателей (см. обзор Amora et al., 2022); размер эффекта варьировался от малого до сильного (Korinth et al., 2012; Korinth et al., 2014; Mahé et al., 2012; Savill & Thierry, 2011; van Setten et al., 2016; Waldie et al., 2012). Более того, у людей со средним или высоким уровнем чтения более выражены орфографические (т.е. предлексические или грубой настройки) или лексические (т.е. тонкой настройки) эффекты N170 по сравнению с людьми с плохими или недостаточными навыками чтения. Орфографические эффекты N170 характеризуются различиями между орфографическими строками и неорфографическими строками символов, отражающими перцептивный опыт в распознавании букв. Лексический эффект N170 отражает различия между словами и несловами (последовательностями, которые не произносятся и не соответствуют орфографическим правилам языка) и между реальными словами и псевдословами, особенно в случае опытных взрослых читателей (см. обзор. Amora et al., 2022).

Компонент P100 менее широко исследован в связи с обработкой слов. В. Чепе и коллеги (Csépe et al., 2003) выявили значительное увеличение амплитуды и латентности P100 у молодых взрослых с дислексией во время обработки слов и псевдослов. Кроме того, было высказано предположение, что люди с дислексией также демонстрируют нарушение ранней обработки нелингвистических зрительных стимулов. Например, у детей с дислексией наблюдалась меньшая амплитуда и большая латентность компонента P100, что авторы связывают с дисфункцией магноцеллюлярного дорсального зрительного пути (Meng et al., 2022). Д. Кан и коллеги (Kang et al., 2016) обнаружили большую амплитуду и латентность компонента P100 у детей с дислексией по сравнению с детьми без дислексии в задаче пространственной подсказки М. Познера.

Лексико-семантическая обработка отражается в компоненте ПСС N400, который представляет отрицательную волну с пиком около 400 миллисекунд после предъявления стимула. N400 чаще всего регистрируется в центрально-париетальных областях головного мозга, хотя его топография может варьироваться в зависимости от задания. N400 модулируется как различными типами отдельных слов, так и в контексте предложений и даже текста (Kutas & Federmeier, 2011). Например, N400 имеет большую амплитуду на псевдослова и не слова по сравнению со знакомыми словами, что указывает на его роль в лексической обработке. Кроме того, N400 модулируется сложностью интеграции слов в семантический контекст, например, конгруэнтностью слова в предложении (Kutas & Federmeier, 2011). N400 также чувствителен к грамматическим нарушениям. Например, Т. Мюнте и коллеги (Münte et al., 1998) показали, что семантические нарушения ассоциируются с N400, распределенным в центрально-теменной области, тогда как синтаксические нарушения вызывают меньшую амплитуду N400, имеющую фронтально-центральное распределение. Некоторые исследователи считают, что фронтально-центральную негативность на грамматические нарушения следует рассматривать как отдельный компонент — левостороннюю переднюю негативность (Left Anterior Negativity, LAN), связанную с синтаксической обработкой. Однако вопрос о том, имеет ли данный компонент ту же природу, что и N400, остается дискуссионным.

Временной интервал около 600 мс после предъявления стимула с морфосинтаксическим нарушением характеризуется положительной волной (P600) в центрально-теменных областях мозга. Эта волна также возникает при нарушениях согласования между подлежащим и сказуемым в предложении (Osterhout & Mobley, 1995; Balconi & Pozzoli, 2005) и при нарушениях в дальних синтаксических зависимостях (Gouvea et al., 2010). P600 связывают с синтаксической корректировкой после обнаружения грамматической ошибки (Kaan et al., 2000).

В том же временном интервале (500-800 мс), в котором регистрируют P600, также выделяют поздний позитивный комплекс (Late Positive Complex, LPC), который связывают с обновлением и реорганизацией информации в ментальной модели (Brouwer et al., 2012), с

формированием и сохранением следов памяти для вербальных стимулов, что является важным для последующего распознавания слов (Rugg & Curran, 2007; Bermúdez-Margaretto et al., 2015). Повторное предъявление псевдослов у взрослых приводит к увеличению амплитуды LPC, что связывают с формированием и усилением следов памяти (Bermúdez-Margaretto et al., 2015).

Несмотря на то, что анализ синтаксических зависимостей тесно связан с памятью, P600 и LPC по-разному реагируют на нарушения. P600 увеличивается при синтаксических аномалиях, в то время как амплитуда LPC уменьшается на лексические нарушения, амплитуда LPC ниже на псевдослова, чем на слова у детей 8-9 лет (Kemény et al., 2018; Hasko et al., 2013) и подростков 12-14 лет (Wang et al., 2017).

P600 эффект наблюдается не только при нарушении синтаксических структур, но также при нарушениях орфографии (Van de Meerendonk et al., 2010; Vissers et al., 2008; Münte et al., 1998) и различных семантических нарушениях в предложениях (Hoeks et al., 2004; Kim & Osterhout, 2005; Kuperberg et al., 2006; Van de Meerendonk et al., 2010). Т. Мюнте и коллеги (Münte et al., 1998) зафиксировали увеличение P600 при морфосинтаксических (ошибки склонения), семантических и орфографических (ошибки в написании слов) нарушениях в группе молодых немецких читателей. Ван де Меерендонк и коллеги (Van de Meerendonk et al., 2011) получили аналогичные результаты для синтаксических и орфографических нарушений.

Исходя из этих наблюдений, было выдвинуто предположение, что P600 может быть связан не только с синтаксическим анализом, но и с более общим процессом реанализа информации (Münte et al., 1998; Van de Meerendonk et al., 2010), с процессом мониторинга языкового восприятия при столкновении с неожиданным лингвистическим элементом (Vissers et al., 2006). Так, было показано, что эффект P600 на орфографические аномалии (например, на псевдоомофоны) выше при высокой предсказуемости (ожидаемости) слов в предложении и отсутствует при низкой предсказуемости слов (Vissers et al., 2006; van de Meerendonk et al., 2011).

Данная диссертационная работа сосредоточена на изучении синтаксического уровня чтения, в данном контексте важно подчеркнуть, что вопрос нейрофизиологических отражений синтаксической обработки остается дискуссионным, и нейрофизиологическими коррелятами могут являться как ранние, так и поздние ПСС, что было описано в текущем параграфе.

1.2. Теоретические основы влияния внешней ритмической стимуляции на процесс обработки языковой информации

В недавнем теоретическом обзоре, проведенном А. Файвэш и коллегами (см. обзор Fiveash et al., 2021), была представлена концепция обработки ритма в речи и музыке (Processing Rhythm in Speech and Music, PRISM). Эта концепция основывается на положениях об обработке ритма, рассмотренных в нескольких предыдущих теориях, таких как:

1. Теория временной структуры (Temporal Sampling Framework, TSF; Goswami, 2011).

2. Более широкая гипотеза Перекрытие, Точность, Эмоции, Повторение и Внимание (Overlap, Precision, Emotion, Repetition, and Attention, OPERA, которая предполагает, что эти пять условий определяют влияние музыкального обучения на обработку речи (Patel, 2011, 2014)).

3. Динамическая теория внимания (ДТВ) (Jones, 1976, 2019).

4. Теория предсказательного кодирования (Friston, 2005, 2010).

Концепция обработки ритма в речи и музыке (см. обзор Fiveash et al., 2021) объединяет три основных механизма обработки ритма в музыке и речи:

1. Тонкая слуховая обработка.

2. Синхронизация нейронных колебаний с колебаниями внешних ритмических стимулов.

3. Сенсомоторная синхронизация.

1.2.1. Тонкая слуховая обработка

Тонкая слуховая обработка относится к способности различать очень незначительные отклонения или изменения во времени (т.е. на уровне миллисекунд), высоте тона и тембре (Kraus & Chandrasekaran, 2010). Эта способность критически важна для точного восприятия акустических событий, таких как различение звуков /ba/ и /pa/ в речи, а также для обработки тонких временных отклонений и синхронизации различных инструментальных партий в восприятии и производстве музыки (Patel, 2011). Тонкая слуховая обработка также считается критически важной для кодирования звуков речи. В теории временной структуры У. Госвами (Goswami, 2011) предположила, что нарушенное восприятие времени нарастания слогов (например, происходящее примерно каждые 200 мс или каждые 500 мс для акцентированных слогов) может негативно сказаться на точности кодирования звуков речи, что потенциально приводит к дефицитам в фонологической обработке, сегментации и фонологической осведомленности, что, в свою очередь, может повлиять на навыки чтения (Di Liberto et al., 2018; Goswami, 2011, 2018). Теория временной структуры и сопутствующие исследования предполагают, что регулярность музыкального ритма может улучшить точность слуховой обработки и синхронизацию нейронных колебаний, что в свою очередь может способствовать развитию фонологических навыков за счет улучшения нейронного отслеживания звуков речи (Flaugnacco et al., 2015; Goswami, 2012).

Предполагается, что тонкая слуховая обработка является механизмом, лежащим в основе потенциального переноса между способностями обработки ритма музыки и речи (Fujii & Wan, 2014; Kraus & Chandrasekaran, 2010). В соответствии с гипотезой OPERA (Patel, 2011) было предложено, что музыкальная практика может улучшить обработку речи на основе перекрывающихся мозговых цепей, обрабатывающих акустический сигнал, и более точного времени, необходимого для обработки ритма музыки по сравнению с ритмом речи (Patel, 2011).

Тонкая слуховая обработка также рассматривается в рамках гипотезы синхронизации и вовлечения в ритм (Fujii & Wan, 2014) и гипотезы точного слухового времени (Tierney & Kraus, 2014). С. Фудзии и К. Уан (Fujii & Wan, 2014) предполагают, что обработка звуковых огибающих в музыке требует повышенной временной точности, что влияет на менее регулярную огибающую речи и нейронное кодирование звуков речи. Гипотеза точного слухового времени предполагает, что (а) точность на уровне миллисекунд, необходимая для вовлечения в музыку, может улучшать работу мозговых сетей, ответственных за обработку речи; (б) фонологическая обработка и сенсомоторное вовлечение зависят от точности временного восприятия в слуховой системе необходимого для генерации точных временных предсказаний.

1.2.2. Синхронизация нейронных колебаний с колебаниями внешних ритмических стимулов

Осцилляторная активность головного мозга — это регулярно повторяющиеся тормозящие (inhibitory) и возбуждающие (excitatory) паттерны электрической активности, создаваемые нейронами (Buzsáki, 2019; Buzsáki & Draguhn, 2004). Осцилляторная активность мозга связана с тонкой слуховой обработкой, сенсомоторными показателями, динамикой внимания во времени (Jones, 2019), прогнозированием будущих событий, иерархической обработкой информации, взаимодействием слуховой и моторной корой головного мозга; все приведенные процессы являются необходимыми для обработки таких акустических событий, как музыка и речь (Jones, 2019; см. обзор Fiveash et al., 2021). Нейронные колебания являются механизмом, лежащим в основе предсказательной обработки, динамического внимания и отслеживания внешних ритмических стимулов, и могут объяснять эффективность музыкально-ритмической тренировки для обработки речи. Фаза осцилляторной активности мозга адаптируется к внешнему ритмическому сигналу, вероятно, создавая у слушателя перцептивные ожидания относительно того, когда произойдет то или иное событие (Jones, 2019; см. обзор Fiveash et al., 2021, 2023).

Ключевая роль нейронных колебаний в динамическом внимании и предсказательной обработке, а также их применение в музыке и обработке речи изложены в динамической теории внимания (ДТВ), предложенной М. Джонс (1976, 2019). Центральный тезис ДТВ заключается в том, что эндогенные нейронные колебания синхронизируются с внешними ритмическими (или квази-ритмическими) сигналами, что позволяет направлять динамическое внимание на предсказанные моменты времени и улучшать предсказательную обработку, тем самым модулируя эффект фасилитации выполнения когнитивных задач.

Ключевой особенностью внимания является его избирательность, которая относится к способности человека сосредоточиться на одном событии и игнорировать другое (Jones, 2019). ДТВ предлагает два механизма избирательности внимания (Jones, 2019). Первый механизм заключается в синхронизации ведущего и ведомого ритмов, при котором совпадение фазы колебания внутреннего осциллятора с фазой колебания внешнего осциллятора увеличивает

вероятность обнаружения события. Второй механизм заключается в возможности увеличения амплитуды внутреннего осциллятора через его увлечение внешними событиями, обладающими высоким уровнем временной регулярности (например, музыка с ясной и повторяющейся метрической структурой). Более высокая амплитуда внутреннего осциллятора коррелирует с более высоким уровнем концентрации внимания.

Накопленные эмпирические данные свидетельствуют о том, что при воздействии внешнего ритмического стимула осцилляторная активность нейронов синхронизируется с частотой внешнего стимула (см. обзор Fiveash et al., 2021). Однако вопрос о том, является ли синхронизация осцилляторной активности головного мозга с частотами предъявляемых ритмов активным процессом, что подтвердило бы идею ДТВ о существовании внутреннего осциллятора с собственной активностью, или осцилляторная активность — это лишь реакция на частоты внешних событий, остается предметом дискуссии. Тем не менее, данные нескольких поведенческих и электрофизиологических исследований (см. обзор Fiveash et al., 2021; Naegens & Zion Golumbic, 2018; Zoefel et al., 2018; Notbohm, Kurths, & Herrmann, 2016), изучающих обработку музыки и речи, показали возможность восприятия и представления метрической структуры сигнала, которая не присутствует в акустическом сигнале, что предполагает нисходящую обработку иерархической структуры, управляемую осцилляторной активностью нейронов.

М. Генри с коллегами (Henry et al., 2017) предположили, что синхронизация осцилляторной активности должна различаться у разных групп, по-разному реагирующих на предъявленную ритмическую стимуляцию. Основываясь на предположении о нарушении осцилляторной активности нейронов у людей с дислексией в дельта- (1,5–4 Гц) и тета-диапазонах (4–10 Гц) (Goswami, 2018), А. Файвэш с коллегами (Fiveash et al., 2020) провели эксперимент, направленный на изучение синхронизации колебаний внутреннего осциллятора с слуховой ритмической стимуляцией в зависимости от типа группы: взрослые с дислексией и контрольная группа. Участники прослушивали регулярную и нерегулярную ритмическую стимуляцию. Была обнаружена синхронизация осцилляторной активности с частотами регулярных ритмов, не только с частотами явно присутствующими в слуховых ритмических сигналах, но и с частотой, наименее представленной в ритмических последовательностях. Также было обнаружено, что участники контрольной группы извлекали временные закономерности и на частотах нерегулярного ритмического сигнала, в отличие от участников с дислексией. Эти результаты согласуются с данными, полученными в предыдущем исследовании на участниках без дислексии, в котором также была показана синхронизация осцилляторной активности мозга с частотами нерегулярных ритмов (Falk et al., 2017). Стоит отметить, что уровень синхронизации осциллятора коррелировал с ритмическими способностями участников. Таким образом,

осцилляторная активность мозга представляет собой нечто большее, чем просто линейный ответ на частоты внешнего стимула, и дополнительно включает нисходящие ожидания, которые играют непосредственную роль в восприятии внешних событий.

Регулярность музыкального ритма также способствует улучшению предсказания и минимизации ошибок предсказания в соответствии с подходами предсказательного кодирования и предсказательной синхронизации (Friston, 2005, 2010). Предсказательное кодирование (т.е. предсказание того, что произойдет) и предсказательная синхронизация (т.е. предсказание времени возникновения события) основаны на гипотезе, что мозг постоянно генерирует предсказания о предстоящих событиях на основе поступающей сенсорной информации с целью минимизации ошибок предсказания (Friston & Kiebel, 2009; Jones, 2019). Если сенсорная информация не соответствует предсказанию, эта ошибка предсказания передается вверх по кортикальной иерархии, и последующие предсказания обновляются. Таким образом, сильно ритмическая и предсказуемая природа музыки может быть использована для тренировки общих предсказательных сетей, связанных с предсказаниями и ошибками предсказания, а также для повышения точности предсказаний в обработке речи.

1.2.3. Сенсомоторная синхронизация

Сенсомоторное (или аудиомоторное) взаимодействие относится к связи между слуховой и моторной корой и является центральным механизмом, лежащим в основе восприятия и производства музыкального и речевого ритма. Исследования показали, что простое прослушивание музыки или ритмических паттернов, или речи (см. обзор Fiveash et al., 2021) активирует области моторной коры, что свидетельствует о тесной связи между восприятием и производством в каждой из этих областей. В контексте музыки эта сенсомоторная связь проявляется в стремлении двигаться под музыкальный ритм, а движение в ритме усиливает последующее восприятие этого ритма. Сенсомоторное взаимодействие, похоже, имеет решающее значение для восприятия и производства речи, при этом моторная система также участвует в восприятии речи, а слуховая система — в ее производстве (см. обзор Fiveash et al., 2021). Производство речи по своей сути включает движение, а восприятие речи частично использует аналогичные сети в мозге (Fujii & Wan, 2014). По всей видимости, существует специфическая синхронизация между слуховой и моторной корой на уровне слога (4.5 Гц), что подчеркивает важность моторной коры для обработки речи (Assaneo & Poeppel, 2018).

Вовлеченность моторной системы в сенсомоторное взаимодействие способствует формированию точных сенсорных предсказаний для музыки и речи (см. обзор Fiveash et al., 2021). Хотя точный процесс, посредством которого это происходит, еще не полностью известен, одна из теорий, сосредоточенная на восприятии музыкального ритма, предполагает, что моторные области получают информацию от слуховой коры, используют эту информацию для

моторного планирования (даже в отсутствие движения), а затем отправляют предсказания о времени на основе моторного планирования обратно в слуховую кору (см. обзор Fiveash et al., 2021). Аналогично концепция активного восприятия предполагает, что нейронные колебания генерируются моторной системой и влияют на предсказательное время и кодирование (Morillon et al., 2015). Активное восприятие применимо как к речи, так и к музыке и предполагает роль нейронных колебаний в коммуникации между регионами и усилении сенсорного входа, поступающего в предсказанные моменты времени (Morillon et al., 2015). Сильная вовлеченность слуховых и моторных корковых областей как в обработку речи, так и в обработку музыки указывает на вклад сенсомоторного взаимодействия в обработку временных регулярностей.

Недавние корреляционные исследования также показали положительную связь между ритмическими способностями, включающими сенсомоторные показатели, и языковыми навыками (Kim et al., 2024; Kreidler et al., 2023; Lê et al., 2020; Sousa et al., 2022). Например, было показано, что чем лучше участники справлялись с задачами на восприятие и воспроизведение ритма, тем выше был их уровень фонологической осведомленности - способности распознавать, анализировать и манипулировать звуками в устной речи (Sousa et al., 2022).

Значительный объем предыдущих исследований также установил связи между музыкально-ритмическими навыками, включающими сенсомоторные показатели, и грамматическими способностями (Kim et al., 2024; Lee et al., 2020; Swaminathan et al., 2020; Gordon et al., 2015; Nitin et al., 2023), подчеркивая давно заявленное сходство между обработкой ритма и лингвистического синтаксиса. Эти исследования показали, что типично развивающиеся дети, демонстрирующие превосходную способность различать пары коротких музыкальных ритмов, также демонстрируют более высокий уровень владения как рецептивной грамматикой (Lee et al., 2020; Swaminathan et al., 2020), так и экспрессивной грамматикой (Gordon et al., 2015; Nitin et al., 2023). Кроме того, недавнее исследование Х. Ким и коллег (Kim et al., 2024) показало наличие связи между грамматическими и ритмическими навыками у взрослых. Это исследование продемонстрировало, что даже простой и повторяющийся моторный паттерн способен предсказать уровень развития грамматических навыков у взрослых: чем выше была стабильность моторного паттерна, тем выше была точность выполнения задачи грамматических суждений, предъявляемых в слуховой модальности.

Кроме того, в недавнем исследовании К. Крайдлер и коллег (Kreidler et al., 2023) было показано, что дети с нарушением речи демонстрировали более низкие результаты при выполнении ритмических заданий по сравнению с их типично развивающимися сверстниками.

Результаты исследований, предполагающие общие сенсомоторные механизмы для музыкальных и речевых материалов, приводят к прогнозу о том, что тренировка, сосредоточенная на обработке ритма и особенно на синхронизации с ритмом, способна укреплять

связь между слуховой и моторной корой. Таким образом, такая тренировка может быть полезна как для обработки музыки, так и для обработки речи, особенно в отношении временного внимания и предсказания.

1.2.4. Обработка ритма в контексте зрительной модальности и процесса чтения

Несмотря на значительные перспективы, которые открывает концепция обработки ритма в речи и музыке (Processing Rhythm in Speech and Music, PRISM) (см. обзор Fiveash et al., 2021) для дальнейших практических разработок терапевтических методов, основанных на временных закономерностях ритма, следует отметить, что данная концепция сосредоточена исключительно на акустических событиях. В данной концепции не рассматриваются временные механизмы в контексте зрительной модальности, в частности в процессе чтения. Однако недавние исследования показывают, что временные механизмы также активируются в работе зрительной модальности и влияют на процесс чтения.

В недавнем обзоре Р. Денисон (см. обзор Denison, 2024) приведены данные исследований нейрофизиологических механизмов временного аспекта внимания (temporal attention) и ожидания для зрительной модальности. В приведенных исследованиях были обнаружены нейрофизиологические корреляты временного ожидания целевого стимула, сформированного ритмической подсказкой. Более выраженные ПСС наблюдались уже через 100 мс после предъявления ожидаемого стимула. Нейрофизиологические корреляты были обнаружены как у людей с использованием сложной перцептивной задачи, так и в нижней части височной коры обезьян, когда обезьяну обучили ожидать изображения объекта в определенные интервалы времени.

Было показано изменение активности зрительной коры перед предъявлением ожидаемой цели. Мощность затылочного альфа-сигнала перед стимулом уменьшалась в соответствии со временем и местоположением пространственно-временного сигнала. Также было обнаружено, что альфа-фаза перед стимулом зависит от временной предсказуемости зрительного стимула. Предупреждающие сигналы о появлении целевого стимула изменяли активность зрительной коры и мощность затылочного альфа ритма.

В ряде исследований было показано, что пространственно-временной анализ зрительной информации может зависеть от осцилляторной нейронной активности среди групп активных клеток, обеспечивающих обработку информации и коммуникацию между различными областями мозга (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Такая ритмическая координация возбудимости, по-видимому, повсеместно распространена в мозге, но различается по своей мощности, фазе и частоте между областями мозга, а также между задачами. Помимо опосредования общего облегчения нейронной активности в одной области посредством нисходящего модулирующего выхода из другой области (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019),

осцилляторная природа активности может играть решающую роль в таких функциях, как зрительный поиск. Например, пространственное внимание в задаче последовательного поиска направляется префронтальной корой, при этом лобно-теменная синхрония последовательно активирует местоположения объектов в задне-теменной коре. Т. Видьясагар (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019) предположил, что фундаментальным дефицитом при дислексии развития может быть нарушение или замедление бета/низких гамма-колебаний в зрительной системе, которые опосредуют восприятие графем. Важным этапом в процессе чтения может быть плавный переход визуального внимания по буквам слова, при этом переходы контролируются каждым циклом осциллирующего обратного сигнала (см. обзор Vidyasagar, 2019). Также отмечается, что дефицит на более низких частотах (4-8 Гц) в диапазоне дельта/тета колебаний увеличивает трудности чтения (см. обзор Vidyasagar, 2019).

Согласно положениям, выдвинутым в динамической теории внимания (ДТВ) (Jones, 1976, 2016, 2018; Large & Jones, 1999), которая рассматривается в рамках PRISM, временные механизмы не обладают модальной специфичностью и вносят вклад как в слуховые, так и в зрительные процессы обработки информации. Первое положение ДТВ заключается в том, что физические характеристики внешнего события, такие как темп и регулярность, создают основу для успешной синхронизации внутренней осцилляторной активности с внешней осцилляторной активностью. Таким образом, успех синхронизации между внутренним и внешним ритмом определяется физическими свойствами последнего, что вводит понятие ведущего ритма (*driving rhythm*). Второе положение ДТВ состоит в том, что наблюдатель обладает собственной осцилляторной активностью (внутренний осциллятор, внутренний ритм внимания), который способен синхронизироваться с внешней осцилляторной активностью, что вводит понятие ведомого ритма (*driven rhythm*). Синхронизация между ведущим и ведомым ритмом образует диаду «ведущий-ведомый» (*driving-driven dyad*), являющуюся элементарной теоретической единицей, где ведомый ритм меняет свое фазовое соотношение с ведущим ритмом для реализации, фиксированной (стабильной) связи двух ритмов.

Роль внутренней осцилляторной активности в процессе чтения рассматривается и в теории временной структуры (TSF; Goswami, 2011), которая включается в PRISM. Согласно TSF осцилляторная активность участвует в предсказании и распознавании фонем, что критически важно для успешного чтения и понимания текста. Нейронные колебания могут поддерживать временную структуру языковой информации, что позволяет читателям более эффективно обрабатывать и интегрировать информацию.

В контексте изучения процесса чтения показателем темпа является скорость чтения - одна из динамических характеристик читателей, выраженная в количестве слов в минуту, и являющаяся важным показателем читательской успешности. Ряд предыдущих исследований

продемонстрировал связь между скоростью чтения и показателями временной обработки, например, увеличение скорости чтения было ассоциировано с более точным выполнением различных музыкально-ритмических заданий (David et al., 2006; Holliman et al., 2010; Bekius et al., 2016). Также была показана роль внутренней осцилляторной активности в скорости чтения (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Было обнаружено, что нисходящие сигналы от лобно-теменной сети, которая использует нейронную синхронию для переключения внимания, функционируют на низких гамма-частотах. Этот же механизм используется для последовательного сканирования отдельных букв во время чтения. Это объясняет тот факт, что скорость чтения графем в тексте также находится в том же гамма-диапазоне. Это согласуется с выводами о том, что при предъявлении акустических стимулов наблюдается снижение осцилляторной активности в низком гамма-диапазоне при дислексии (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Таким образом, скорость восприятия графем, определяемая гамма-частотными осцилляциями, может являться существенным фактором, ограничивающим скорость чтения.

В ряде предыдущих исследований подчеркивается важность зрительного анализа (Sigurdardottir et al., 2021; Kristjánsson, et al., 2023) и ранних этапов обработки слов для скорости чтения (Fraga González et al., 2014; Korinth et al., 2012). Однако взаимосвязь между ранней нейрофизиологической обработкой слов и чтением остается до конца неясной.

Некоторые исследования показали умеренные корреляции между скоростью чтения и амплитудой N170 у взрослых (Korinth et al., 2012; Korinth et al., 2014), между скоростью чтения и орфографическим эффектом N170 (различия в амплитуде компонента N170 в ответ на слова и несловами) у детей (Fraga González et al., 2014; Tong et al., 2016; Zhao et al., 2014), и слабую корреляцию между оценкой чтения и связанными с фиксацией потенциалами (FRPs) N170 у подростков 12-13 лет (Azaiez et al., 2022), в то время как другие исследования не выявили таких связей (Brem et al., 2009; Weber-Fox et al., 2003). Таким образом, неясно, сохраняется ли связь между эффектами N170 и уровнем чтения, если учитывать непрерывное распределение переменной, составляющей групповые различия (например, скорость чтения). Также было продемонстрировано, что скорость чтения коррелирует с латентностью компонента P100 на невербальные зрительные стимулы (Meng et al., 2022). Таким образом, вопрос о взаимосвязи между скоростью чтения и более ранней зрительной обработкой требует дальнейшего изучения в группе подростков.

В контексте данной диссертационной работы важно подчеркнуть возрастной аспект исследований скорости чтения. Существующие исследования в основном сосредоточены либо на начальных этапах овладения чтением (т.е. начальная школа; Coch & Meade, 2016; Tong et al., 2016; Zhao et al., 2014), либо на процессе чтения у молодых взрослых (т.е. лица в возрасте 18-25 лет, Coch & Meade, 2016; Korinth et al., 2012, 2014; Weber-Fox et al., 2003), в то время как

подростки остаются наименее изученной группой (Brem et al., 2009). В качестве иллюстрации в систематическом обзоре К. Амора и коллег (Amora et al., 2022) было выявлено только три исследования с выборками подростков (в возрасте от 11 до 18 лет). Также важно отметить, что, несмотря на то, что скорость чтения подростков близка к скорости чтения взрослых, созревание структур мозга все еще продолжается в подростковом возрасте (Graves et al., 2008; Gogtay et al., 2004; Juraska & Willing, 2017; Mills et al., 2016; 2021; Tamnes et al., 2017), и, таким образом, в этот возрастной период ожидается некоторая реорганизация механизмов обработки языка. Поэтому исследования нейрофизиологических особенностей чтения подростков важны для понимания гетерохронности созревания различных подпроцессов чтения.

Таким образом, можно утверждать, что на сегодняшний день имеется большое количество доказательств, подтверждающих существование внутреннего осциллятора, обладающего собственной ритмической активностью, играющего большую роль в процессе чтения и способного вступать в активное взаимодействие с внешними ритмическими событиями, что оказывает непосредственное влияние на обработку зрительных событий и при успешной синхронизации приводит к возникновению эффекта фасилитации (ЭФ) выполнения различных зрительных задач.

1.3. Современные исследования музыкально-ритмического воздействия на когнитивные и языковые процессы

1.3.1. Нейрофизиологические аспекты музыкально-ритмического воздействия

Можно отметить ряд исследований, результаты которых указывают на существование музыкально-ритмического воздействия на работу головного мозга (Масленникова, 2013; Меньшикова и др., 2010; Плетников, 1995; Панюшева, 2008, 2008b; Черниговская, 2016; Глозман & Павлов, 2007; Бирюков и др., 2018; см. обзор Besson et al., 2017). В диссертационной работе А.В. Масленниковой (Масленникова, 2013) было показано, что разные типы музыкальных стимулов вызывают специфические нейрофизиологические ответы мозга, которые отличаются в зависимости от музыкальных навыков участников. В работе Е.В. Меньшиковой и коллег (Меньшикова и др., 2010) было показано специфическое влияние музыкальных ритмов на активность головного мозга. Музыкальный ритм с размером 4/4 оказывал наиболее выраженное воздействие на структуры головного мозга, увеличивая электрическую активность головного мозга. В работе М.В. Плетникова (Плетников, 1995) приводятся убедительные доказательства музыкально-ритмического воздействия на работу головного мозга. В ходе исследования было выявлено, что музыкальная деятельность способствует активизации развития альфа-ритма, а также усилению межцентрального и межполушарного взаимодействия в головном мозге. Помимо интеграции мозговых структур, у музыкантов наблюдается увеличение количества зон мозга, вовлеченных в процесс восприятия музыки. В частности, у пианистов площадь слуховых

зон, активирующихся при прослушивании фортепианной игры, оказалась на 25% больше по сравнению с немусыкантами. Эти данные свидетельствуют о том, что занятия музыкой способствуют развитию и реорганизации мозговых структур, что может иметь значительное влияние на когнитивные процессы и восприятие музыки. М.В. Плетников (Плетников, 1995) также отмечает существование полушарной специализации для восприятия разных компонентов музыки. Отмечается, что левое полушарие в большей степени связано с восприятием ритма, а правое связано с восприятием мелодико-гармонического аспекта. В обзорной работе Т.Д. Панюшевой (Панюшева, 2008) рассматривается вопрос о влиянии музыкальных тренировок на различные области когнитивной деятельности, такие как язык, математика и пространственные функции. Несмотря на наличие дискуссий в научном сообществе, некоторые исследования указывают на положительное воздействие музыки на эти сферы. Особое внимание уделяется влиянию музыкальных занятий на развитие речевой памяти, что подтверждается результатами лонгитюдных исследований с участием детей, занимающихся музыкой. Данная гипотеза основывается на наблюдаемой тенденции к увеличению размера задней части левой верхней височной извилины у музыкантов, поскольку именно левая височная доля отвечает за речевую память, в то время как зрительная память обеспечивается преимущественно правой височной областью. Кроме того, некоторые данные свидетельствуют о том, что молодые люди, имеющие опыт занятий музыкой не менее 6 лет, демонстрируют лучшие показатели вербальной, но не зрительной памяти по сравнению с людьми без такого опыта. В одной из своих трудов Т.В. Черниговская (Черниговская, 2016) приводит доказательства того, что музыкальное воздействие способно изменять структуру головного мозга, увеличивая количество серого вещества, а также активировать гены, от которых зависит дофаминергическая нейротрансмиссия, моторная активность, обучение и память. В работе Г.В. Портновой и коллег (Портнова и др., 2010) было показано, что медленная слуховая ритмическая стимуляция приводит к уменьшению мощности альфа-ритма и увеличению амплитуды компонента P300 в правых лобных, центральных и теменных областях.

В следующих параграфах мы подробнее рассмотрим влияние ритма на общие когнитивные функции, связанные с временным вниманием (*temporal attention*), такие как восприятие и память, а также рассмотрим воздействие ритмической стимуляции на различные уровни языковой обработки информации, описанные нами выше.

1.3.2. Воздействие ритмической стимуляции на общие когнитивные функции, связанные с временным аспектом внимания

1.3.2.1. Восприятие

Динамика внимания во времени, способствующая усилению внимания к определенному моменту во времени, далее называемая временным вниманием (*temporal attention*), является

ключевым когнитивным процессом, изучаемым в рамках ДТВ (Jones, 2019). Во многих исследованиях был продемонстрирован ЭФ для перцептивной обработки в разных экспериментальных дизайнах для ожидаемых целевых стимулов и для стимулов, соответствующих структуре предшествующей ритмической последовательности. Время реакции было быстрее, а точность выше для ожидаемых целевых стимулов в сравнении с неожиданными целевыми стимулами (Seibold et al., 2023). Однако несмотря на накапливающиеся доказательства влияния ритмической стимуляции на перцептивную обработку, следует отметить, что некоторые исследования не выявили такого эффекта. В частности, в задаче суждения об ориентации замаскированной зрительной цели, предъявленной в конце ритмической или аритмичной слуховой последовательности, А. Эльбаз и Я. Ешурун (Elbaz & Yeshurun, 2020) не обнаружили более высокой точности для ожидаемых целей, предъявленных в фазе с ритмическим сигналом, по сравнению с целями, предъявленными вне фазы ритма. Вместо этого авторы наблюдали более низкую скорость ответа в ритмическом состоянии по сравнению с аритмическим, независимо от фазы предъявления цели. Аналогично при измерении эффекта пространственных и ритмических временных сигналов в кросс-модальных условиях, А. Вильш с коллегами (Wilsch et al., 2020) не обнаружили более высокой точности для целей, следующих за регулярным ритмическим контекстом, по сравнению с целями, следующими за случайным контекстом. Точные причины, по которым перцептивные эффекты временного внимания наблюдаются в одних исследованиях, но отсутствуют в других, до сих пор остаются не до конца ясными (Seibold et al., 2023).

1.3.2.2. Восприятие и память

Отдельным направлением являются исследования, изучающие влияние ЭФ не только на перцептивные эффекты временного внимания, но и на процесс запоминания объектов (см. обзор Fiveash et al., 2021; Seibold et al., 2023). Классический вариант парадигмы в рамках изучения ЭФ одновременно на восприятие и память заключается в том, что участникам предлагается сначала выполнить задание на восприятие объектов, где необходимо оценить предъявляемые стимулы (например, живое/неживое, мужчина/женщина). Стимулы могут предъявляться в условии синхронности (on-beat) или асинхронности (off-beat) с фоновым слуховым ритмом. После завершения задания на восприятие участники выполняют задание на узнавание, где им необходимо указать, предъявлялся ли текущий стимул ранее.

В исследовании Х. Джондро и коллег (Johndro et al., 2019) было обнаружено улучшение восприятия (ВР было короче) и узнавание невербальных стимулов (лиц), которые были предъявлены синхронно с ритмичным звуковым фоном во время кодирования информации. В дальнейшем эти результаты были также показаны в эксперименте П. Хики и коллег (Hickey et al., 2020), более короткое ВР и более высокая точность ответов для целевых стимулов наблюдалась в синхронном условии. В другом эксперименте П. Хики и коллег (Hickey et al., 2020) было

обнаружено, что участники быстрее реагировали на стимулы в синхронном условии, однако точность выполнения задания на узнавание объектов не отличалась между ритмическими условиями. В недавнем исследовании А. Джонс и коллег (Jones et al., 2023) не удалось воспроизвести данные эффекты, обнаруженные в предыдущих работах: ВР при выполнении перцептивной задачи и выполнении задачи на узнавание объектов не различалось между ритмическими условиями.

На нейрофизиологическом уровне было обнаружено, что стимулы, предъявляемые с регулярной временной структурой во время перцептивной задачи, оказывают влияние на сенсорные процессы на нейрональном уровне (Fiveash et al., 2023; Seibold et al., 2023). Было показано, что ПСС ранних компонентов N1 и N2 показали большую амплитуду и меньшую латентность для ожидаемых целевых стимулов (Seibold et al., 2023). А. Джонс и Э. Уорд (Jones & Ward, 2019) обнаружили меньшую амплитуду N1 для стимулов, предъявляемых в регулярном ритмическом условии по сравнению с нерегулярным предъявлением. М. Сюй с коллегами (Xu et al., 2021) наблюдали снижение амплитуды N1 и усиление амплитуды N2 для ожидаемых во времени стимулов и предположили, что это может отражать парадокс перцептивного предсказания, когда предсказуемые события могут приводить как к усиленным, так и к подавленным эффектам восприятия (Press & Yon, 2020).

П. Хики с коллегами обнаружили положительную корреляцию между разницей амплитуд компонента N2 между ожидаемым и неожиданным условием и точностью узнавания целевых объектов, что подтверждает связь между ранними сенсорными процессами и последующей эффективностью извлечения информации из памяти (Hickey et al., 2020). Это указывает на то, что синхронизация с фоновым ритмом не только облегчает начальные этапы обработки информации, но и способствует более точному и эффективному запоминанию.

Рассмотренные результаты исследований свидетельствуют о том, что временная структура стимулов играет важную роль в процессе кодирования информации. Регулярность и синхронность предъявления стимулов способствуют более эффективной обработке сенсорной информации на ранних этапах, что находит отражение в изменениях амплитуды компонентов ПСС. Более негативные амплитуды ранних компонентов N1 и N2 в условии синхронности могут указывать на усиление внимания и более глубокую обработку стимулов, что, в свою очередь, приводит к лучшему запоминанию и узнаванию.

1.3.3. Воздействие ритмической стимуляции на языковые процессы

1.3.3.1. Фонологический и лексический уровень

В исследованиях влияния ритма на обработку фонологической и лексической информации широко используется парадигма короткого ритмического праймирования. В широком значении прайминг обозначает влияние предшествующего стимула на последующие осознаваемые

реакции (Тимошенко, 2015; Спиридонов, 2017). В этой парадигме участникам предъявляется короткий ритмический прайм, за которым сразу следует целевой стимул (слово или псевдослово). Целевой стимул может быть в условии метрической конгруэнтности (Metrical Match), когда слабые и сильные доли фонем согласуются с метрической структурой предшествующего ритмического сигнала, или в условии метрической неконгруэнтности (Metrical Mismatch), когда такого согласования нет. Задача участников могла заключаться в классификации целевых стимулов: слов и псевдослов (Fotidzis et al., 2018); либо в принятии решения о том, была ли целевая фонема в целевом стимуле (Cason et al., 2012, 2015), или в принятии решения о метрической конгруэнтности или неконгруэнтности метрической структуры прайма и целевого стимула (Yu et al., 2024).

Исследования, проведенные в рамках данного подхода, обнаружили ЭФ для обработки фонем при условии метрической конгруэнтности как для слуховой, так и для зрительной модальности (Cason et al., 2012, 2015; Fotidzis et al., 2018). Время реакции было короче, а точность ответа выше при конгруэнтном условии по сравнению с неконгруэнтным (Cason et al., 2012, 2015; Fotidzis et al., 2018; Yu et al., 2024). ЭФ был обнаружен для нескольких языков, включая английский (Fotidzis et al., 2018), французский (Cason et al., 2012, 2015) и китайский (Yu et al., 2024). Стоит отметить, что только в исследовании Х. Ю и коллег удалось воспроизвести ЭФ и для ВР и для точности ответов (Yu et al., 2024), а в других работах влияние было лишь на один из этих параметров.

На нейрофизиологическом уровне была обнаружена большая амплитуда раннего компонента N100 для условия метрической неконгруэнтности, что может отражать нарушение ритмических ожиданий. В. Юй с коллегами (Yu et al., 2024) обнаружили большую амплитуду раннего компонента P2 для условия метрической неконгруэнтности. Эти результаты могут отражать нарушение ритмических ожиданий и увеличении когнитивной сложности фонологической обработки.

Н. Кейсон с коллегами (Cason et al., 2012, 2015) также, варьируя расположение целевой фонемы в псевдословах: расположение на сильной доле (on-beat) и расположение на слабой доле (off-beat), обнаружили увеличение амплитуды и латентности компонента P300 при расположении на слабой доле, что также отражает нарушение ожидания цели и необходимость большего времени для оценки предъявляемого стимула. Т. Фотидзи с коллегами (Fotidzis et al., 2018) обнаружили нейрофизиологический коррелят нарушения временных ожиданий для зрительной модальности, где целевые стимулы, предъявляемые в условии метрической неконгруэнтности, вызывали больший отрицательный компонент N400 во временном окне от 300 до 708 мс, с лобно-центральным распределением. К. Хилтон и М. Голдуотер (Hilton & Goldwater, 2021) получили аналогичные результаты, используя предложения в качестве целевых стимулов. В. Юй с

коллегами (Yu et al., 2024) обнаружили увеличение амплитуды позднего позитивного комплекса (LPC) для условия метрической неконгруэнтности.

1.3.3.2. Синтаксический уровень

Влияние ритмической стимуляции на грамматическую обработку является предметом активных исследований в когнитивной психологии и нейронауке (см. обзор Fiveash et al., 2021). Большинство исследований в этой области использовали парадигму прайминга в сочетании с задачей грамматических суждений. В этой парадигме участникам сначала предъявляется музыкальный отрывок с различной ритмической структурой, а затем участники выполняют задачу на грамматические суждения, оценивая предложения на наличие грамматических ошибок (например, Chern et al., 2018; Canette et al., 2019, 2020; Fiveash et al., 2020, 2022).

ЭФ для синтаксической обработки после предъявления регулярного ритмического прайминга (ритма с ясной метрической структурой) был первоначально обнаружен у франкоязычных детей в возрасте от 6 до 12 лет (Canette et al., 2020; Fiveash et al., 2020, Przybylski et al., 2013). Впоследствии этот эффект был воспроизведен у франкоязычных взрослых (Canette et al., 2019), англоязычных детей (Chern et al., 2018) и венгероязычных детей (Ladányi et al., 2021). Важно отметить, что ЭФ не наблюдался при использовании неграмматических задач, таких как называние изображений (Picture naming task), невербальная задача Струпа (Non-verbal Stroop task) и арифметические операции (Chern et al., 2018, Ladányi et al., 2021), что указывает на специфичность ЭФ для синтаксической обработки. Л. Канетт с коллегами (Canette et al., 2020) также продемонстрировали специфичность ЭФ для синтаксической задачи (грамматических суждений) по сравнению с семантической задачей. А. Файвэш с коллегами (Fiveash et al., 2023) обнаружили ЭФ синтаксической обработки также и на задаче повторения предложений: участники точнее повторяли предложения после прослушивания регулярной ритмической последовательности.

Однако не все исследования обнаружили ЭФ на поведенческом уровне (Canette et al., 2020; Fiveash et al., 2022; Kim et al., 2024; György et al., 2024). Так, Х. Ким с коллегами (Kim et al., 2024) не обнаружили ЭФ у англоязычных детей в возрасте 7-11 лет. А. Файвэш с коллегами (Fiveash et al., 2022) варьировали модальность ритмической стимуляции, добавив зрительную стимуляцию к слуховой, и не обнаружили ЭФ в кросс-модальном условии. Кроме того, было показано, что менее продолжительные регулярные ритмы (8 и 16 сек) не вызывали ЭФ, в отличие от более длительных ритмов (32 сек) (Fiveash et al., 2020). Д. Дьёрдь и коллеги (György et al., 2024) не обнаружили ЭФ в слуховой задаче грамматических суждений с использованием псевдослов у франкоязычных взрослых после воздействия слуховой ритмической стимуляции, учитывая в анализе все экспериментальные блоки. Однако был обнаружен обратный ЭФ только для первых

трех блоков в задаче грамматических суждений, где нерегулярная ритмическая стимуляция снижала эффективность выполнения задачи грамматических суждений.

Лишь несколько исследований изучали нейрофизиологические изменения в процессе решения задачи грамматических суждений после слуховой ритмической стимуляции (Kotz et al., 2005; Canette et al., 2020). С. Коц и коллеги (Kotz et al., 2005) сообщили об увеличении амплитуды компонента P600 после прослушивания регулярных ритмических последовательностей у участников с поражениями базальных ганглиев во время выполнения слуховой задачи грамматических суждений, хотя та же исследовательская группа ранее показала, что этот нейрофизиологический коррелят отсутствовал у таких пациентов (Kotz et al., 2003).

Позднее Л. Канетт и коллеги (Canette et al., 2020) зарегистрировали увеличение амплитуды компонента P600 во время слуховой задачи грамматических суждений у взрослых участников с дислексией и контрольной группы после предъявления регулярного ритмического условия по сравнению с нерегулярным ритмическим условием. Также было показано, что латентность пиковой амплитуды была короче после регулярного ритмического условия по сравнению с нерегулярным ритмическим условием. Однако эти нейрофизиологические результаты не были статистически значимыми для выбранной зоны интереса, которые включали электроды из лобной, центральной и задней областей. Этот нейрофизиологический маркер ЭФ был статистически значимым только для электродов средней линии (Fz, Cz, Pz).

1.3.3.2.1. Ограничения предыдущих исследований влияния ритмической стимуляции на синтаксический уровень обработки информации

Как уже было отмечено, в рамках текущей диссертационной работы синтаксический уровень обработки информации является ключевым. Поэтому важно отметить ограничения предыдущих исследований в рамках изучения влияния ритмической стимуляции на синтаксическую обработку.

1. В ряде недавних исследований было показано участие общих временных механизмов в зрительной модальности (см. обзор Denison, 2024; см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Однако в существующих исследованиях влияния ритмической стимуляции на решение задачи грамматических суждений, основная задача предъявлялась только в слуховой модальности (Canette et al., 2020; Fiveash et al., 2020, Przybylski et al., 2013; Chern et al., 2018; Ladányi et al., 2021; Canette et al., 2019; Kim et al., 2024; György et al., 2024). Сама модальность ритмической стимуляции варьировалась только в одном исследовании (Fiveash et al., 2022).

2. Кроме того, только в нескольких предыдущих исследованиях было включено контрольное условие (аудиозапись окружающей среды) (Canette et al., 2020; Ladányi et al., 2021; Bedoin et al., 2016). И только в одном предыдущем исследовании было использовано контрольное условие тишины (György et al., 2024).

3. Большинство предыдущих исследований проводилось на франкоговорящих выборках детей и взрослых.

4. А также только два предыдущих исследования использовали нейрофизиологический метод для изучения нейрофизиологических коррелятов ЭФ в задаче грамматических суждений (Kotz et al., 2005; Canette et al., 2020).

1.3.3.3. Семантический уровень

Для семантического уровня обработки информации были показаны потенциально общие механизмы обработки музыки и языка. Например, продолжительность музыкального обучения предсказывала объем словарного запаса у детей (т. е. способность объяснять значение слов) (Forgeard et al., 2008). Было показано, что словарный запас у детей, проходивших музыкальное обучение, был больше по сравнению с детьми из контрольной группы (Linnavalli et al., 2018; Moreno et al., 2011). Исследования с использованием прайминг-парадигмы у взрослых показали, что прослушивание музыки может активировать семантические концепции. Музыкальное произведение (штрих) может влиять на семантическую обработку предъявляемого слова, семантически связанного или несвязанного с музыкальным произведением. Использование данного экспериментального дизайна основано на гипотезе о том, что музыка может передавать смысл.

С. Кельш и коллеги (Koelsch et al., 2004) продемонстрировали, что прослушивание музыкальных отрывков вызывало эффекты семантического прайминга (что было также отражено в ПСС N400) аналогично прослушиванию предложений (Kutas & Hillyard, 1980). Пулен-Шарроннат (Poulin-Charronnat et al., 2006) также показали, что семантическая согласованность предъявляемых слов и музыкальных отрывков влияла на время реакции участников, а эффект N400 наблюдался не только при предъявлении продолжительных музыкальных отрывков (например, 10,5 с в среднем у Koelsch et al., 2004), но и при предъявлении коротких музыкальных отрывков (не дольше 1 секунды) (Daltrozzo & Schön, 2009a, 2009b). Семантический эффект N400 также наблюдался, когда порядок предъявления был изменен на обратный, что приводило к тому, что музыкальные отрывки выступали в качестве целей, которые были связаны или не связаны со словами (Daltrozzo & Schön, 2009a, 2009b).

Другие исследования в качестве прайминга использовали не музыкальные отрывки, а конкретные музыкальные параметры, с целью выяснить, передают ли отдельные музыкальные элементы смысл. Б. Золльбергер и коллеги (Sollberger et al., 2003) манипулировали созвучием/диссонансом аккордов, стремясь вызвать положительные/отрицательные эмоции, и исследовали их влияние на аффективно (не)связанные целевые слова. Время ответа на целевые слова в задаче оценки слов (т. е. для определения того, было ли каждое слово положительным или отрицательным) было дольше после аффективно неконгруэнтного аккорда (например,

благозвучный аккорд, за которым следует отрицательное слово), чем после аффективно конгруэнтного аккорда (например, благозвучный аккорд, за которым следует положительное слово). Н. Штайнбайс и С. Кёльш (Steinbeis & Koelsch, 2011) манипулировали тремя музыкальными параметрами: консонансом/диссонансом, ладом (мажорным/минорным) и тембром. Эффект N400, был обнаружен для аффективно неконгруэнтных пар по сравнению с аффективно конгруэнтными парами.

Воздействие на семантический уровень обработки информации в большей степени оказывали мелодико-гармонические компоненты музыкальных стимулов и в меньшей степени ритмический компонент. Например, Л. Канетт и коллеги (Canette et al., 2020) показали, что регулярная ритмическая стимуляция не влияла на семантическую задачу, связанную с генерированием рассказа, в сравнении с воздействием стимулов с мелодико-гармоническим наполнением.

Выводы по главе 1

В текущей главе мы рассмотрели процесс чтения и его компоненты на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях, а также рассмотрели основные теоретические модели обработки ритма и современные исследования влияния внешней ритмической стимуляции на когнитивные и языковые процессы.

В рамках концепции обработки ритма в речи и музыке мы рассмотрели понятие внутреннего осциллятора, и вклад временного аспекта внимания в обработку речи. Однако недавние исследования показывают вклад общих временных механизмов и в процессе чтения. Было показано, что скорость чтения и показатели музыкально-ритмических навыков отражают работу внутреннего осциллятора и особенностей временной обработки информации (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Увеличение показателей скорости чтения было ассоциировано с более точным выполнением различных музыкально-ритмических заданий (David et al., 2006; Holliman et al., 2010; Vekius et al., 2016); в свою очередь, отмечается положительная корреляция ритмических и языковых способностей (Kim et al., 2024; Kreidler et al., 2023; Lê et al., 2020; Sousa et al., 2022). В рамках процесса чтения была показана роль осцилляторной активности мозга, так, при дислексии было обнаружено снижение осцилляторной активности в низком гамма-диапазоне (см. обзор Vidyasagar, 2013, 2019). Также до конца не известна взаимосвязь между скоростью чтения и более ранней зрительной обработкой в группе подростков. Таким образом, можно предполагать существование временного компонента, участвующего не только в процессе обработки ритма музыки и речи, но и в процессе чтения.

В текущей главе мы также рассмотрели результаты эмпирических исследований, показавшие, что временные закономерности ритмической стимуляции предоставляют

преимущества для зрительной и слуховой обработки целевой информации (Jones, 2019; см. обзор Fiveash et al., 2021, 2023; Seibold et al., 2023).

Эффект фасилитации был обнаружен как в исследованиях общих когнитивных функций, таких как восприятие или сочетание восприятия и памяти, так и в специализированных исследованиях языка и речи, затрагивающих фонологический, синтаксический и семантический уровни (см. обзор Fiveash et al., 2021; Seibold et al., 2023). Тем не менее были выявлены некоторые противоречия. Несмотря на то, что данные корреляционных исследований предоставили убедительные доказательства о связи ритмических способностей и когнитивно-языковых навыков, а в исследованиях с использованием ритмической стимуляции эффект фасилитации был обнаружен для общих когнитивных функций, недавние исследования эффекта фасилитации для синтаксиса показали специфику данного эффекта для синтаксического процесса (Canette et al., 2020; Chern et al., 2018; Ladányi et al., 2021) в сравнении с различными когнитивными задачами и заданием на семантику. Кроме того, вопреки утверждению динамической теории внимания об амодальности эффекта фасилитации (Jones, 2019), большинство предыдущих исследований влияния ритмической стимуляции на выполнение задачи грамматических суждений проводились только в условиях слуховой модальности (Canette et al., 2020; Fiveash et al., 2020, Przybylski et al., 2013; Chern et al., 2018; Ladányi et al., 2021; Canette et al., 2019; Kim et al., 2024; György et al., 2024). А в недавнем исследовании А. Файвэш и коллег в области синтаксиса не было обнаружено эффекта фасилитации в задаче грамматических суждений при добавлении зрительной ритмической стимуляции (Fiveash et al., 2022). Нейрофизиологические механизмы эффекта фасилитации также остаются неизвестными.

Важно отметить, что в каждом направлении исследований эффекта фасилитации существуют как эмпирические данные, подтверждающие его существование, так и опровергающие его. Причины подобных противоречивых результатов до сих пор остаются неизвестными. Мы предполагаем, что это может свидетельствовать о значительной зависимости эффекта фасилитации от различных внешних факторов, таких как возрастная и языковая группа участников, клинический статус участников, экспериментальный дизайн, тип ритмической стимуляции, модальность ритмической стимуляции основной задачи

Дальнейшие главы будут посвящены эмпирическим исследованиям, основанным на теоретическом материале, приведенном в данной главе.

Вторая глава диссертационной работы посвящена изучению скорости чтения и ее ранних нейрофизиологических коррелятов. Как было описано в текущей главе, некоторые исследования обнаружили связь между амплитудой/латентностью ранних компонентов ПСС P100 и N170 и скоростью чтения (например, Csépe et al., 2003, Korinth et al., 2012; Korinth et al., 2014) другие наоборот не показали наличие данной связи (Brem et al., 2009; Weber-Fox et al., 2003). Таким

образом, взаимосвязь между ранней нейрофизиологической обработкой слов и чтением остается до конца неясной.

Третья глава диссертационной работы посвящена изучению непосредственно слуховой ритмической стимуляции на выполнение задачи грамматических суждений. Как было показано в текущей главе предыдущие исследования ритмической стимуляции на задачу грамматических суждений проводились только для зрительной задачи (например, Chern et al., 2018; Canette et al., 2019, 2020; Fiveash et al., 2020, 2022), однако эффект фасилитации не обладает модальной специфичностью согласно динамической теории внимания (Jones, 2019). Также предыдущие исследования не проводились на русскоязычной выборке подростков. Также в третьей главе будет рассмотрена связь между скоростью, стабильностью чтения, ритмическими навыками и обработкой грамматики.

ГЛАВА 2. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАННИМИ КОМПОНЕНТАМИ ПОТЕНЦИАЛОВ, СВЯЗАННЫХ С СОБЫТИЕМ И СКОРОСТЬЮ ЧТЕНИЯ

2.1. Постановка проблемы и цели эмпирического исследования

Задачей исследования, представленного в данной главе, является изучение ранних этапов обработки слов и их связи со скоростью чтения у подростков в возрасте 13-17 лет.

Были сформулированы следующие операциональные гипотезы и исследовательские вопросы:

1. Предыдущие исследования показали лексический эффект N170, операционализированный как разница в амплитуде N170 в ответ на слова по сравнению с псевдословами только у взрослых, но не у детей. Мы ожидаем, что лексический эффект N170 также будет присутствовать у подростков. Если это так, это будет свидетельствовать о том, что их обработка слов аналогична обработке у взрослых.

2. Грамматические эффекты P100 и N170, операционализированные как различия в амплитуде этих компонентов в ответ на грамматически правильные слова по сравнению с неправильными, были показаны у взрослых. Однако эти эффекты не были исследованы у подростков. Неизвестно, достаточна ли зрелость процесса чтения в подростковом возрасте для проявления таких ранних грамматических эффектов. В этом исследовании мы изучаем, присутствуют ли грамматические эффекты P100 и N170 у подростков (исследовательская гипотеза). В дополнение к словесным стимулам, использованным в предыдущих исследованиях, мы также ввели грамматически правильные и неправильные псевдослова в качестве стимулов. Это позволит нам выяснить, существует ли чистый грамматический эффект, свободный от потенциального загрязнения эффектами словесных признаков, таких как частота и конкретность/абстрактность. Различия в амплитуде или латентности компонентов P100 и N170 в ответ на эти стимулы будут указывать на то, что у подростков эти компоненты также связаны с обработкой грамматики.

3. Поскольку читатели с более высокой скоростью чтения обычно больше читают, это приводит к формированию системы раннего узнавания слова и накоплению зрительных образов слов, мы ожидаем, что размер лексического эффекта N170 будет положительно коррелировать со скоростью чтения.

4. Основываясь на ранее показанных различиях в компонентах P100 и N170 между группами хорошо и плохо читающих участников, а также на наличие связей между этими компонентами и скоростью чтения у взрослых, мы ожидаем обнаружить аналогичные связи у подростков. Мы ожидаем, что скорость чтения будет коррелировать с амплитудой и латентностью компонентов ПСС P100 и N170.

2.2. Процедура и методы исследования

Протокол исследования был одобрен Комитетом по биоэтике при Научно-технологическом университете «Сириус» (выписка из протокола заседания комитета по биоэтике НТУ «Сириус» от 31.08.2021). Перед началом исследования были получены информированные согласия как от детей, так и от их законных представителей.

2.2.1. Выборка исследования 1

Мы рекрутировали 34 участника; 2 участника отказались от психофизиологической части исследования, поэтому они не были включены в окончательную выборку. Выборка составила 32 участника в возрасте от 13 до 17 лет (средний возраст = 15,36 лет, стандартное отклонение = 1,58, 25 девочек). Все участники посещали государственные школы в разных регионах России. На момент проведения исследования семь участников из разных регионов России проходили обучение по образовательной программе «Литература» в образовательном центре для одаренных детей «Сириус», где они и были рекрутированы. Двадцать пять участников были рекрутированы локально либо через школы, либо через социальные сети и листовки. Участники имели нормальное или скорректированное до нормального зрение; у них не было истории психических заболеваний, нарушений речи, злоупотребления наркотиками или неврологических травм; один участник сообщил о трудностях с чтением. Демографические характеристики участников, читательские привычки и языковая среда представлены в Таблице 1 (см. Приложение 1) и Таблице 2 (см. Приложение 2).

Проведенный с помощью G*Power 3.1 (Faul et al., 2009) апостериорный анализ чувствительности показал, что при мощности 0,80 и нашем размере выборки ($N = 32$) анализ был достаточно чувствительным для обнаружения среднего размера эффекта (Slope $H1$) 0,46 для линейной двумерной регрессии.

2.2.2. Задача Грамматических Суждений

2.2.2.1. Стимульный материал исследования 1 и 2

Стимульный материал включал 96 предложений в исследовании 1 и 144 предложения в исследовании 2. Все предложения были на русском языке и имели одинаковую структуру: обстоятельство места + простое глагольное сказуемое (в прошедшем времени) + деепричастный оборот + подлежащее (целевое слово). Существительные были разделены на три рода: женский, средний и мужской. Подлежащее выражалось словом или псевдословом, либо грамматически согласованным, либо не согласованным по роду с глагольным сказуемым в предложении. Среди целевых слов в исследовании 1 было 48 реальных существительных (24 мужского рода и 24 женского рода) и 48 псевдослов (24 мужского рода и 24 женского рода), в исследовании 2 было 72 реальных (36 мужского рода и 36 женского рода) слова и 72 псевдослова (36 мужского рода и

36 женского рода). Таким образом, было четыре условия в соответствии с типом целевого слова: грамматически согласованное слово, грамматически согласованное псевдослово, грамматически несогласованное слово и грамматически несогласованное псевдослово (см. Таблицу 3 (Приложение 3)). В исследовании 1 было 24 предъявления для каждого условия, а в исследовании 2 для каждого условия прайминга и контрольного условия было предъявлено 18 грамматических и 18 неграмматических предложений.

Реальные существительные и псевдослова состояли из трех слогов и были уравнены по количеству букв во всех условиях (комбинации от шести до восьми букв). Реальные существительные были высокочастотными и среднечастотными словами (Ляшевская и Шаров, 2009). Псевдослова были созданы путем перестановки слогов в этих словах. Чтобы избежать ассоциаций с реальными понятиями, некоторые звуки в новообразованных псевдословах были заменены другими гласными или согласными. Псевдослова мужского и женского рода были созданы с использованием реальных аффиксов существительных мужского и женского рода. Три эксперта, обладающие знаниями в области русской лингвистики, оценили уровень ограничения контекста предложений, и на основе этой оценки предложения были уравнены по всем условиям. Деепричастный оборот использовался для создания синтаксической дистанции между глаголом и подлежащим.

2.2.2.2. Экспериментальная процедура исследования 1 и 2

Участники эксперимента находились на расстоянии одного метра от экрана компьютера в звуко- и светоизолированной комнате. Эксперимент проводился с использованием программного обеспечения Psychopy 2022.1.1 (Peirce et al., 2019) и был представлен на экране Lenovo Legion. Предложения были представлены в 8 блоках в исследовании 1 (см. Рисунок 1 (А)) и 12 блоках в исследовании 2 (см. Рисунок 1 (В)), и каждый блок включал 12 предложений с 4 равномерно распределенными условиями. Предложения предъявлялись в случайном порядке. Предложения предъявлялись по одному слову в режиме самостоятельного темпа (self-paced), инициируемого нажатием кнопки на панели ответов RB-740 (Cedrus) (см. Рисунок 1). Пустой экран предъявлялся в течение 400 мс перед целевым словом после нажатия кнопки на предшествующем слове. Слова были черного цвета и предъявлялись в центре экрана на сером фоне, экран (27") имел разрешение 1920x1080, размер шрифта Arial составлял 28 пт. Целевое слово оставалось на экране до момента ответа. Участников просили определить, является ли последнее слово в предложении грамматически правильным или неправильным, нажимая соответствующие кнопки на панели ответов. Следующее предложение предъявлялось через 500 мс после ответа.

В исследовании 2 перед началом каждого блока участники подвергались воздействию слуховой ритмической стимуляции, которая предъявлялась через наушники Panasonic RP-NS46E-K с громкостью 50 дБ (уровень звукового давления (Sound Pressure Level, SPL)) в

псевдослучайной последовательности. Псевдорандомизация гарантировала, что два последовательных слуховых стимула не принадлежали к одному и тому же условию. Каждый участник был случайным образом распределен в одну из четырех последовательностей слуховой ритмической стимуляции (см. Таблицу 4 (Приложение 4)).

Перед началом экспериментального задания участники выполняли короткую тренировочную сессию, которая не была включена в дальнейший анализ.

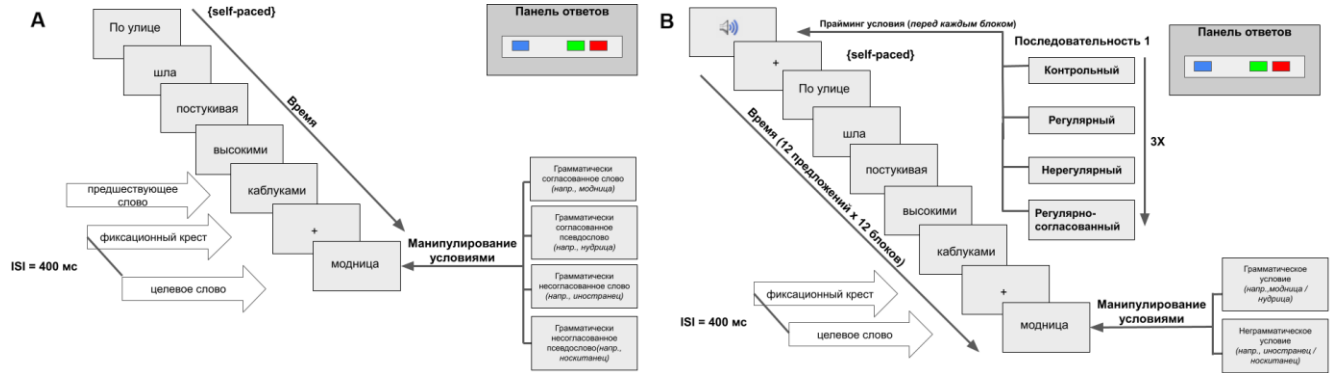


Рисунок 1 — Схема экспериментального дизайна исследования 1 (А) и исследования 2 (В). Синяя кнопка на панели ответов нажималась для перехода к следующему слову, красная кнопка нажималась для указания на грамматическую ошибку, а зеленая кнопка нажималась для указания на отсутствие грамматической ошибки.

2.2.3. Задание на скорость чтения

2.2.3.1. Материалы

Для оценки скорости чтения использовались два повествовательных текста. Тексты были частью батареи оценки грамотности на русском языке (еще не стандартизированной, но апробированной; Логвиненко и др., 2021). Первый текст состоял из 215 слов, второй - из 272 слов. На синтаксическом уровне Текст 1 отличался использованием сложносочиненных и сложноподчиненных предложений. Лексика была представлена словами средней частотности, которые чаще встречаются в письменной, чем в устной речи. Текст 2 также отличался использованием сложносочиненных и сложноподчиненных предложений, включая бессоюзные предложения. На лексическом уровне он содержал редко употребляемые слова, термины и устойчивые лексические единицы, относящиеся к специализированным темам и областям знаний.

2.2.3.2. Процедура

Участники проходили индивидуальное тестирование в светлом и тихом помещении. Их просили читать текст вслух как можно быстрее и точнее, и на чтение каждого текста им давалась одна минута. Каждый текст был предъявлен на белом листе бумаги. Экспериментатор отслеживал ошибки и отмечал одноминутный период чтения. По истечении одной минуты

участники продолжали читать текст в своем собственном темпе. С целью проконтролировать включенность участников в процесс чтения после каждого текста следовал один краткий вопрос на понимание с выбором одного правильного ответа (из трех возможных вариантов): Какое название лучше всего подходит к этому тексту? (25% участников совершили ошибку при ответе на вопрос для первого и второго текста).

2.2.2.3. Анализ

Значения скорости чтения (слов/мин) усреднялись между двумя текстами и преобразовывались в z-оценки (1,71% ошибок при чтении) (см. Таблицу 5 (Приложение 5)).

2.2.4. Регистрация и предварительная обработка ЭЭГ в исследовании 1

Сигнал ЭЭГ регистрировался с помощью 128 активных электродов Ag/AgCl (ActiCAP, Brain Products GmbH), сконфигурированных в соответствии с международной системой 10-5 и частотой дискретизации 500 Гц. Импеданс поддерживался на уровне менее 10 кОм. Электрод FCz был референтным, а центральный лобный электрод был заземляющим.

Сигналы ЭЭГ анализировались с помощью программного обеспечения Brain Vision Analyzer (BVA) версия 2.2 (Sauer, 2021). Записи ЭЭГ фильтровались с нижней границей среза 0,1 Гц, верхней границей среза 70 Гц и режекторным фильтром 50 Гц. Плохие электроды интерполировались. Сегменты с плохими записями, превышающими ± 400 мкВ, были исключены из анализа.

Для коррекции окулографических артефактов использовался метод независимого компонентного анализа (Independent Component Analysis, ICA). Отбор компонентов для удаления осуществлялся визуально, основываясь на характерных паттернах, соответствующих движениям глаз. Компоненты, отражающие пики, связанные с глазными движениями, были удалены $M(SD) = 4,13(1,74)$.

Данные были повторно отнесены к среднему референтному значению и сегментированы на сегменты от -200 до 1500 мс относительно целевого слова. Была выполнена коррекция базовой линии (-200 мс) и удаление сегментов с артефактами (± 100 мкВ). Вызванные потенциалы (ВП) усреднялись отдельно для каждого условия независимо от правильности ответа (85,77%); среднее количество эпох на условие составило $M(SD) = 20,43(3,60)$ (описательная статистика эпох для каждого условия представлена в Таблице 6 (см. Приложение 6)).

На основе наблюдаемых топографий скальпа амплитуда и латентность компонентов P100 и N170 анализировалась в задних областях левого и правого полушарий, включая электроды в трех регионах: затылочном, височном и теменном (топографические карты компонентов и эффектов см. на Рисунке 2 (Приложение 7); топографические карты эффектов см. на Рисунке 3 (Приложение 8)). Амплитуда компонентов определялась как среднее значение ± 10 мс вокруг пика (максимального значения) в интервале от 90 до 150 мс для P100 и от 130 до 230 мс для N170.

Область интереса включала 28 электродов задних областей. Левая область включала электроды P1, P3, P5, O1, O9, O11h, PO3, PO7, PO9, PPO1h, PPO5h, PPO9h, POO9h и POO1. Правая область включала электроды P2, P4, P6, O2, O10, O12h, PO4, PO8, PO10, PPO2h, PPO6h, PPO10h, POO10h и POO2.

2.2.5. Анализ данных исследования 1

Статистический анализ проводился в программном обеспечении R (R Core Team, 2020; версия 2023.03.01).

2.2.5.1. Поведенческие данные

Точность ответов в задаче грамматических суждений рассчитывалась как сумма правильных ответов для каждого условия. Также оценивалось время реакции в ответ на целевые слова. Поскольку распределение времени реакции было смещено вправо, значения были логарифмически преобразованы, а значения, выходящие за пределы области 2,5 сигма, были удалены (2,28%). Мы ожидали, что поведенческие переменные, такие как скорость чтения, точность ответов и время реакции, усредненные по всем экспериментальным условиям, будут взаимосвязаны, поэтому мы рассчитали корреляции Пирсона между этими поведенческими переменными. Для изучения влияния лексического и грамматического условий на точность ответа и время реакции был проведен анализ ковариации с повторными измерениями (ANCOVA): 2 (лексический фактор: слова vs. псевдослова) \times 2 (грамматический фактор: грамматически согласованные vs. грамматически несогласованные) с учетом возраста участников.

2.2.5.2. Нейрофизиологические данные

Для изучения лексических и грамматических эффектов P100 и N170 на целевое слово был проведен анализ ковариации с повторными измерениями (ANCOVA) с учетом возраста участников отдельно для амплитуды и латентности каждого компонента (всего четыре модели). Фиксированными факторами были: 2 (лексический фактор: слова vs. псевдослова) \times 2 (грамматический фактор: грамматически согласованные vs. грамматически несогласованные) \times 2 (фактор полушария: левое vs. правое).

Для проверки гипотез 1 и 2 мы интерпретировали основные эффекты лексичности и грамматичности, полученные с помощью ANCOVA. Таким образом, основные эффекты представляли собой средние значения двух отдельных условий, которые включали максимум 48 испытаний. Взаимодействия между лексическим, грамматическим факторами и фактором полушария были включены в ANCOVA эксплуататорно и интерпретируются с осторожностью, поскольку для каждого отдельного условия (т.е. грамматически согласованное слово,

грамматически согласованное псевдослово, грамматически несогласованное слово и грамматически несогласованное псевдослово) было максимум только 24 испытания.

2.2.5.3. Взаимосвязь мозга и поведения

Мы провели четыре основные модели линейной регрессии, по одной для свойств каждого компонента ПСС:

Регрессионная модель для амплитуды P100: Зависимой переменной была амплитуда P100, усредненная по всем электродам области интереса всех экспериментальных условий. Предикторами были скорость чтения и возраст участников.

Регрессионная модель для амплитуды N170: Поскольку мы обнаружили основной лексический эффект для амплитуды N170 (см. Результаты), зависимыми переменными были амплитуды N170 по всем электродам области интереса, а лексический и грамматический факторы и их взаимодействие были добавлены в качестве предикторов. Скорость чтения и возраст участников также были предикторами.

Регрессионная модель для латентности P100: Зависимой переменной была латентность P100, усредненная по всем электродам области интереса всех экспериментальных условий. Предикторами были скорость чтения и возраст участников.

Регрессионная модель для латентности N170: Зависимой переменной была латентность N170, усредненная по всем электродам области интереса всех экспериментальных условий. Предикторами были скорость чтения и возраст участников.

Таким образом, модели линейной регрессии 1, 3 и 4 включали средние значения по всем 96 испытаниям. Мы не включали экспериментальные условия в качестве предикторов, поскольку на предыдущих этапах анализа не было статистически значимых основных эффектов или эффектов взаимодействия в моделях ANCOVA (см. Результаты). Это позволило нам уменьшить количество факторов и, следовательно, увеличить статистическую мощность. В модели линейной регрессии номер 2 с лексическим и грамматическим факторами, включенными в качестве предикторов, каждый отдельный основной эффект включал средние значения по 48 испытаниям, а их взаимодействие учитывало 24 испытания на каждое условие.

2.3. Результаты эмпирического исследования 1

2.3.1. Связь между скоростью чтения, точностью ответа и временем реакции

Была обнаружена статистически значимая положительная корреляция между скоростью чтения и точностью ответа в задаче грамматических суждений, усредненной по всем экспериментальным условиям, $r(30) = 0,709$, $p < 0,001$; чем выше скорость чтения, тем выше точность грамматических суждений. Также была обнаружена значимая отрицательная корреляция между скоростью чтения и временем реакции, усредненным по всем экспериментальным условиям, $r(30) = -0,778$, $p < 0,001$; чем выше скорость чтения, тем короче

время реакции. Также была обнаружена значимая отрицательная корреляция между точностью ответа и временем реакции, усредненными по всем экспериментальным условиям, $r(30) = -0,756$, $p < 0,001$; чем выше точность грамматических суждений, тем короче время реакции.

2.3.2. Влияние лексических и грамматических факторов на поведенческие уровни

ANCOVA точности ответов в задаче грамматических суждений выявила основной эффект лексического фактора: для слов было сделано меньше ошибок, чем для псевдослов, $F(1,31) = 31,08$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,501$. Статистически значимых эффектов не было обнаружено для основного эффекта грамматического фактора, $F(1,31) = 2,49$, $p = 0,124$, $\eta^2 = 0,074$, взаимодействия лексического и грамматического факторов, $F(1,31) = 2,00$, $p = 0,167$, $\eta^2 = 0,060$ или ковариаты возраста участников, $F(1,30) = 4,03$, $p = 0,054$, $\eta^2 = 0,118$. Мы также зарегистрировали статистически значимые основные эффекты лексического и грамматического факторов для времени реакции на целевые слова/псевдослова. Более быстрые ответы были зарегистрированы для слов, чем для псевдослов, $F(1,31) = 120,80$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,796$, для грамматически правильных стимулов, чем для неграмматических, $F(1,31) = 17,54$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,361$. Статистически значимого взаимодействия лексического и грамматического факторов не было обнаружено, $F(1,31) = 0,03$, $p = 0,855$, $\eta^2 = 0,001$. Ковариата возраста не была статистически значимой, $F(1,30) = 2,17$, $p = 0,151$, $\eta^2 = 0,067$.

2.3.3. Лексические и грамматические эффекты вызванных потенциалов

Вызванные потенциалы (ВП) задних областей можно увидеть на Рисунке 4 (ВП для всех электродов области интереса см. на Рисунке 5 (Приложение 9) и Рисунке 6 (Приложение 10); описательную статистику амплитуд и латентностей для каждого условия см. в Таблице 7 (Приложение 11)).

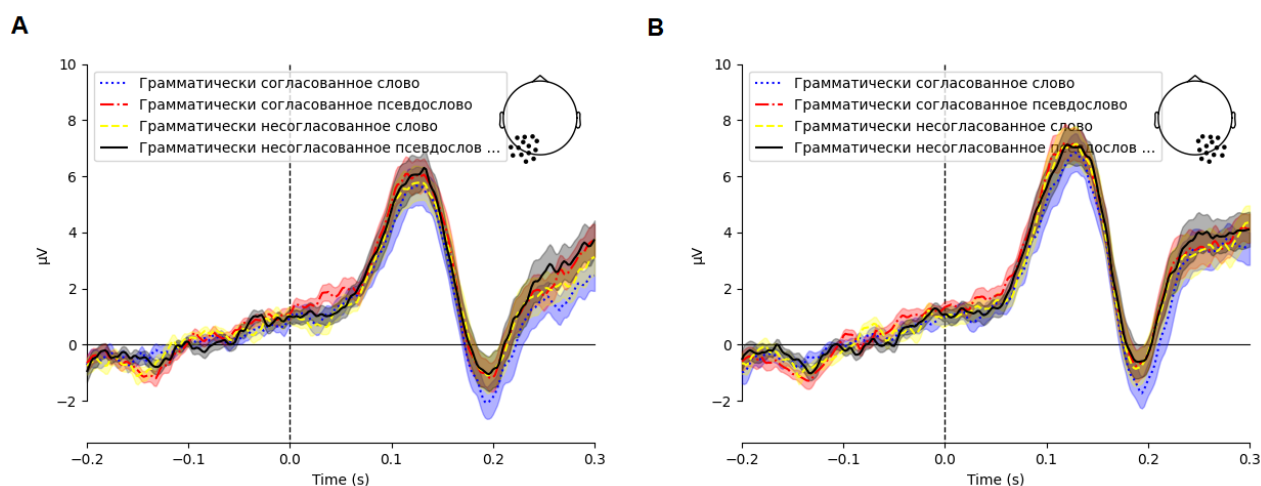


Рисунок 4 — Усредненные по группе ($N = 32$) вызванные потенциалы (ВП) для левого (А) и правого (В) полушарий. Вертикальная пунктирная линия соответствует началу

предъявления стимулов. Синяя (пунктирная), красная (штрихпунктирная), желтая (пунктирная) и черная (сплошная) линии соответствуют условиям: грамматически согласованное слово, грамматически согласованное псевдослово, грамматически несогласованное слово и грамматически несогласованное псевдослово, соответственно. Полупрозрачные синие, красные, желтые и черные области иллюстрируют стандартную ошибку среднего. На топограммах головы точками обозначены все электроды областей интереса для левого полушария: P1, P3, P5, O1, O9, O11h, PO3, PO7, PO9, PPO1h, PPO5h, PPO9h, POO9h, POO1 и правого полушария: P2, P4, P6, O2, O10, O12h, PO4, PO8, PO10, PPO2h, PPO6h, PPO10h, POO10h, POO2.

2.3.3.1. Компонент P100

Не было выявлено статистически значимых основных эффектов лексичности, грамматичности или взаимодействий лексичность \times грамматичность, лексичность \times полушарие, грамматичность \times полушарие и лексичность \times грамматичность \times полушарие для амплитуды и латентности компонента P100 (см. Таблицу 8 (Приложение 12)). Однако эффекты ковариаты возраста для амплитуды P100 были статистически значимыми, $F(1,30) = 6,82$, $p = 0,014$, $\eta^2 = 0,185$. Основной эффект фактора полушария для амплитуды P100 был статистически значимым, $F(1,31) = 10,79$, $p = 0,003$, $\eta^2 = 0,258$; амплитуда была выше в правом полушарии. Основной эффект фактора полушария для латентности P100 не был статистически значимым, $F(1,31) = 0,15$, $p = 0,700$, $\eta^2 = 0,005$.

2.3.3.2. Компонент N170

Для амплитуды компонента N170 был выявлен статистически значимый основной эффект лексического фактора. Как показано на Рисунке 7 (А), амплитуда N170 была более отрицательной для слов, чем для псевдослов, $F(1,31) = 7,49$, $p = 0,010$, $\eta^2 = 0,194$, независимо от их грамматичности. Основной эффект грамматичности не был статистически значимым (см. Рисунок 7 (В)), $F(1,31) = 1,13$, $p = 0,296$, $\eta^2 = 0,035$. Основной эффект фактора полушария не был статистически значимым, $F(1,31) = 0,71$, $p = 0,405$, $\eta^2 = 0,023$. Взаимодействие лексичность \times грамматичность (см. Таблицу 8 (Приложение 12)), $F(1,31) = 3,21$, $p = 0,083$, $\eta^2 = 0,094$, не было статистически значимым. Взаимодействия лексичность \times полушарие и грамматичность \times полушарие не были статистически значимыми (см. Таблицу 8 (Приложение 12)). Взаимодействие лексичность \times грамматичность \times полушарие, $F(1,31) = 0,00$, $p = 0,980$, $\eta^2 = 0,000$, не было статистически значимым. Ковариата возраста не была статистически значимой, $F(1,30) = 0,95$, $p = 0,337$, $\eta^2 = 0,031$.

Не было выявлено статистически значимых основных эффектов лексичности, грамматичности или их взаимодействий для латентности N170 или эффектов ковариаты возраста (см. Таблицу 8 (Приложение 12)). Основным эффектом фактора полушария был статистически значимым, $F(1,31) = 4,29$, $p = 0,047$, $\eta^2 = 0,122$; латентность была выше в левом полушарии. Взаимодействия лексичность \times полушарие, грамматичность \times полушарие и лексичность \times грамматичность \times полушарие не были статистически значимыми (см. Таблицу 8 (Приложение 12)).

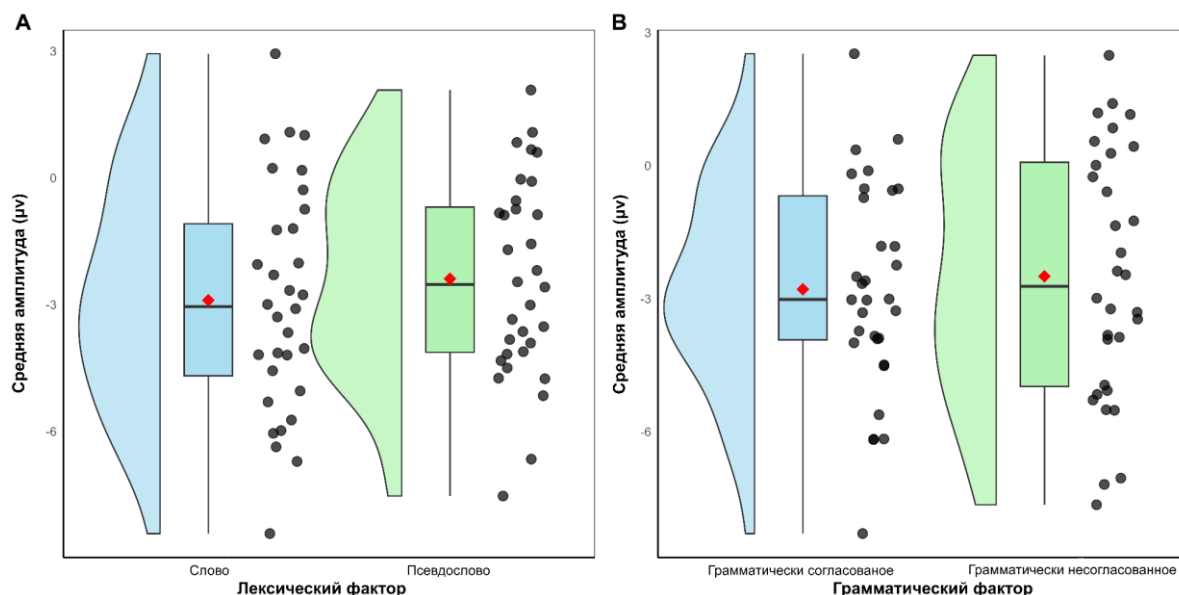


Рисунок 7 — Половинные скрипичные диаграммы и диаграммы размаха амплитуды N170 в зависимости от усредненного лексического фактора (А): слово ($M = -2,90$, $SD = 2,78$) / псевдослово ($M = -2,49$, $SD = 2,36$), грамматический фактор (В): грамматически согласованное ($M = -2,89$, $SD = 2,35$) / грамматически несогласованное ($M = -2,49$, $SD = 2,81$). Горизонтальные черные линии указывают медиану значений. Красные ромбы указывают среднее значение.

Каждая точка соответствует отдельному участнику.

2.3.4. Взаимосвязь между скоростью чтения и ВП

Регрессионная модель амплитуды P100: Мы не обнаружили статистически значимого эффекта скорости чтения для амплитуды P100, $b = 0,534$, 95% ДИ $[-0,621, 1,688]$, $SE = 0,564$, $\beta = 0,157$, $t(29) = 0,946$, $p = 0,352$ (см. Таблицу 9 (приложение 13)). Однако эффект возраста был статистически значимым, $b = -1,515$, $SE = 0,564$, $\beta = -0,445$, $t(29) = -2,685$, $p = 0,012$, ДИ 95% $[-2,670, -0,361]$, чем старше участники, тем меньше амплитуда P100. Модель была статистически значимой, $F(2,29) = 3,85$, $p = 0,033$, $Multiple R^2 = 0,210$, $Adjusted R^2 = 0,155$.

Регрессионная модель амплитуды N170: Мы не обнаружили статистически значимого эффекта скорости чтения для амплитуды N170, $b = -0,268$, 95% ДИ $[-0,747, 0,211]$, $SE = 0,242$, β

= -0,098, $t(122) = -1,108$, $p = 0,270$. Не было статистически значимых эффектов возраста, лексического и грамматического факторов, а также их взаимодействий (см. Таблицу 10 (приложение 14)). Модель не была статистически значимой, $F(5,122) = 1,33$, $p = 0,257$, $\text{Multiple } R^2 = 0,052$, $\text{Adjusted } R^2 = 0,013$.

Регрессионная модель латентности P100: Для латентности P100 мы обнаружили статистически значимый эффект скорости чтения, $b = -9,378$, 95% ДИ [-14,209, -4,546], $SE = 2,362$, $\beta = -0,574$, $t(29) = -3,970$, $p < 0,001$. Как показано на Рисунке 8 (А), увеличение скорости чтения сопровождалось уменьшением латентности P100. Эффект возраста также был статистически значимым, $b = 5,315$, 95% ДИ [0,484, 10,147], $SE = 2,362$, $\beta = 0,325$, $t(29) = 2,250$, $p = 0,032$. Модель была статистически значимой, $F(2,29) = 9,66$, $p = 0,001$, $\text{Multiple } R^2 = 0,400$, $\text{Adjusted } R^2 = 0,358$ (см. Таблицу 9 (приложение 13)).

Регрессионная модель латентности N170: Для латентности N170 мы обнаружили статистически значимый эффект скорости чтения, $b = -10,704$, ДИ 95% [-14,970, -6,438], $SE = 2,086$, $\beta = -0,691$, $t(29) = -5,131$, $p < 0,001$. Как показано на Рисунке 8 (В), увеличение скорости чтения сопровождалось уменьшением латентности N170. Не было статистически значимого эффекта возраста участников, $b = 1,989$, 95% ДИ [-2,277, 6,256], $SE = 2,086$, $\beta = 0,129$, $t(29) = 0,954$, $p = 0,348$. Модель была статистически значимой, $F(2,29) = 13,28$, $p < 0,001$, $\text{Multiple } R^2 = 0,478$, $\text{Adjusted } R^2 = 0,442$.

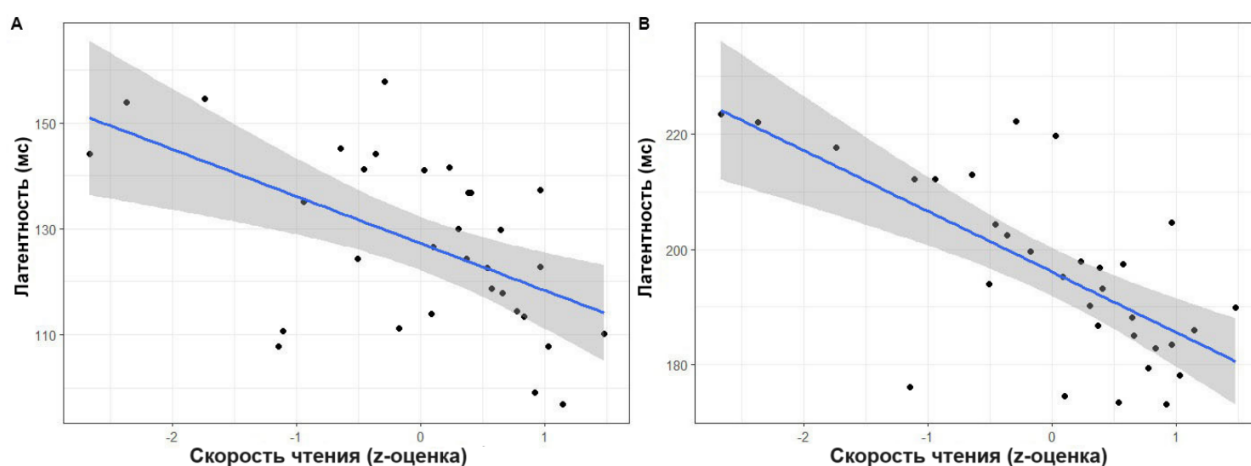


Рисунок 8 — Взаимосвязь латентности компонента P100 (А) и латентности компонента N170 (В) со скоростью чтения (z-оценка). Каждая точка соответствует отдельному участнику. Затененные планки погрешностей представляют одну стандартную ошибку среднего.

2.4. Обсуждения результатов эмпирического исследования 1

В настоящем исследовании изучалась нейрофизиология обработки текста в подростковом возрасте, относительно малоизученном периоде развития. Мы зарегистрировали лексический эффект N170; амплитуда N170 на слова была больше, чем на псевдослова, хотя эффектов грамматичности ни для P100, ни для N170 обнаружено не было. Не было обнаружено связи между скоростью чтения и амплитудой этих компонентов, а также величиной лексического эффекта N170. Однако латентности компонентов P100 и N170 существенно коррелировали со скоростью чтения в нашей подростковой выборке. Значимость этих результатов и их связь с предыдущими данными у взрослых и детей обсуждаются ниже.

2.4.1. Лексические и грамматические эффекты N170

Компонент ВП N170 связан со специализированной обработкой текста и активностью зрительной словоформы (Bentin et al., 1999; Brem et al., 2006; Гарах и др., 2019; Maurer et al., 2005). Некоторые исследования выявили лексический эффект N170 у взрослых; в частности, были получены данные о различиях N170 между словами и псевдословами (Araújo et al., 2015; Braun et al., 2009; Coch & Meade, 2016; Hauk et al., 2006; Kim & Lai, 2012; Kim & Strakova, 2012), высоко- и низкочастотными словами (Hauk & Pulvermüller, 2004), а также между знакомыми высокочастотными словами и незнакомыми участникам низкочастотными словами (Rebreikina & Strelets, 2014). Этот лексический эффект компонента N170 объясняется наличием в памяти зрительных представлений слов и отсутствием или слабостью таких зрительных словоформ для псевдослов и низкочастотных слов. Однако данные о лексических эффектах N170 противоречивы; так, в ряде исследований эти эффекты отсутствовали или имели противоположное направление (см. обзор Amora et al., 2022). У взрослых наличие лексического эффекта N170 зависит от взаимодействия многих факторов, таких как экспериментальные условия, частота стимулов (Bulkes et al., 2020; Maurer et al., 2005), контекст и предсказуемость слов (Bulkes et al., 2020; Kim & Lai, 2012; Kim & Strakova, 2012; Penolazzi et al., 2007). Н. Булкес и коллеги (Bulkes et al., 2020) продемонстрировали орфографические и лексические эффекты N170 ($p < 0,01$) в условиях самостоятельного предъявления и только орфографический эффект N170 в условиях быстрого последовательного зрительного предъявления. Эти результаты, по мнению авторов, могут указывать на то, что зрительная обработка более детализирована, когда участники могут контролировать процесс чтения. В нескольких исследованиях с участием взрослых сообщалось о большей амплитуде N170 для слов, чем для псевдослов (Coch & Meade, 2016; Eberhard-Moscicka et al., 2016; Faisca et al., 2019; Mahé et al., 2012, 2013). В нашем исследовании мы обнаружили тот же эффект у подростков, тогда как, по-видимому, у детей лексический эффект N170 не выражен (Araújo et al., 2012; Coch & Meade, 2016; Eberhard-Moscicka, 2016).

В настоящем исследовании не было обнаружено ранних грамматических эффектов, в то время как они были показаны у взрослых в некоторых предыдущих работах (Dikker et al., 2009; Kim & Gilley, 2013; Matar et al., 2019). Возможно, что более «высокоуровневые» эффекты еще не наблюдаются на таком раннем этапе анализа слова в подростковом возрасте. Однако нельзя исключать, что они могут зависеть от типа грамматических нарушений или других экспериментальных факторов.

2.4.2. Скорость чтения и латентность P100 и N170

Мы продемонстрировали согласованные изменения латентности ранних компонентов со скоростью чтения в группе подростков-читателей: чем быстрее читали участники, тем раньше появлялись компоненты P100 и N170.

Наш вывод об отрицательной корреляции между латентностью P100 и скоростью чтения подтверждает нашу гипотезу о том, что ранний зрительный анализ вносит вклад в способность к чтению. Наш вывод согласуется с другими немногочисленными исследованиями на эту тему. Ранее было показано, что у молодых людей с дислексией наблюдается увеличение латентности P100 на слова и псевдослова (Csépe et al., 2003). У детей с дислексией было отмечено, что латентность компонента P100 задерживается в ответ на стимулы, обработка которых в первую очередь связана с активностью магноцеллюлярного/дорсального зрительного пути (Kang et al., 2016; Meng et al., 2022; Shandiz et al., 2017). Также было показано, что скорость чтения у детей 10-12 лет отрицательно коррелирует с латентностью компонента P100 (Meng et al., 2022). Однако С. Коринт и коллеги (Korinth et al., 2012) не зарегистрировали связи между латентностью P100 и скоростью чтения слов у взрослых читателей. Таким образом, для получения более ясной картины взаимосвязей между ранним зрительным анализом и навыками чтения необходимы дальнейшие исследования в разных возрастах с использованием как вербальных, так и невербальных зрительных стимулов.

Совершенно новым результатом является корреляция между скоростью чтения и латентностью N170, которая ранее не была продемонстрирована. Тем не менее сравнения между хорошими и плохими читателями показали, что у молодых людей с нарушениями чтения латентность N170 на словесные стимулы была больше, чем у типичных читателей (Waldie et al., 2012), тогда как для учащихся начальной школы различий в латентности N170 между типичными читателями и читателями с дислексией не было (Hasko et al., 2013; Kast et al., 2010; Maurer et al., 2011; Zhao et al., 2014). Компонент N170 отражает более высокий уровень зрительного анализа целого слова, возникающий из опыта восприятия слова (Dien, 2009; Simon et al., 2007). Похоже, что опыт чтения влияет на латентность компонента N170. Это может объяснить выводы о том, что латентность N170 была короче у пятиклассников, чем у второклассников (Maurer et al., 2011), и у взрослых, чем у подростков (Brem et al., 2006). Кроме того, способности к чтению влияют на

то, как часто человек читает, и в то же время, чем больше человек читает, тем лучше становятся его навыки чтения (Erbeli et al., 2020). Можно предположить, что дети с лучшими навыками чтения читают чаще и к подростковому возрасту накапливают больше зрительных словоформ, что способствует более эффективной зрительной обработке, отражающейся в более короткой латентности N170 у подростков с более высокой скоростью чтения. Таким образом, связь между скоростью зрительной обработкой слов и скоростью чтения наблюдается в подростковом возрасте. Следует отметить, что скорость обработки может определяться скоростью зрительной обработки на более раннем этапе. Компонент P100 часто упускается из виду в исследованиях чтения, и для проверки этой гипотезы необходимы дальнейшие исследования латентности P100 в разном возрасте.

2.4.3. Скорость чтения, амплитуда N170 и лексический эффект N170

Взаимосвязи между скоростью чтения и амплитудой N170, ранее показанные у взрослых (Korinth et al., 2012, 2014), не были обнаружены в настоящем исследовании. Следует отметить, что в исследовании К. Вебер-Фох и коллег (Weber-Fox et al., 2003) также не сообщалось о различиях в амплитуде N170 в ответ на слова, представленные в виде предложений, между группами с «нормальными» и «высокими» языковыми способностями, классифицированными на основе данных о баллах по словарному запасу/грамматике при аудировании и словарному запасу/грамматике при говорении. Возможно, этот эффект связан с экспериментальной парадигмой, используемой в каждом исследовании. Так, в исследовании Коринт и коллег (Korinth et al., 2012) участники выполняли задачу лексического решения при дизайне с предъявлением одного слова, в то время как в нашем исследовании требовалось суждение о грамматической правильности предложений, а слова предъявлялись в режиме самостоятельного темпа (self-paced). С. Брем и коллеги (Brem et al., 2009) продемонстрировали уменьшение амплитуды N170 и величины орфографического эффекта N170 с возрастом, сравнивая группы детей, подростков и взрослых. Парциальный регрессионный анализ показал уменьшение N170 для слов с возрастом при контроле различий в скорости чтения. Однако амплитуда N170 для слов не коррелировала со скоростью чтения при контроле возраста (Brem et al., 2009). Это согласуется с нашими результатами, указывающими на отсутствие связи между скоростью чтения и амплитудой N170 в подростковом возрасте.

Мы предположили, что величина лексического эффекта N170 может быть связана со скоростью чтения, поскольку этот эффект явно появляется с увеличением читательского опыта. Однако наше предположение не подтвердилось; мы не обнаружили никакой связи между величиной лексического эффекта и скоростью чтения. Можно предположить, что читательские навыки подростков в возрасте 13-17 лет уже достаточно зрелые, и, независимо от скорости

чтения, они накопили достаточно много зрительных представлений слов, необходимых для ранней дифференциации слов и псевдослов.

2.4.4. Возрастные эффекты компонентов P100, N170

Амплитуда P100 в нашем исследовании отрицательно коррелировала с возрастом, что согласуется с предыдущими исследованиями (Brem et al., 2006). Примечательно, что мы обнаружили парадоксальный эффект в регрессионной модели для латентности P100 со скоростью чтения и возрастом в качестве предикторов: латентность была больше с увеличением возраста, и латентность была больше с уменьшением скорости чтения. Однако связи между скоростью чтения и возрастом не было. С. Брем и коллеги (Brem et al., 2006) выявили более короткую латентность P100 у взрослых, чем у подростков, но данных об изменениях латентности P100 в детском и подростковом возрасте нет. Наши данные свидетельствуют о сложной взаимосвязи между возрастом, латентностью и навыками чтения, а также о необходимости дальнейших исследований на более крупной выборке детей.

В настоящем исследовании не было обнаружено связи между амплитудой или латентностью N170 и возрастом. Это, возможно, указывает на то, что выявленная в нашем исследовании взаимосвязь, скорее всего, отражает не возрастные изменения, а взаимосвязь между скоростью чтения и скоростью зрительной обработки.

Скорость чтения и показатели выполнения задания не были связаны с возрастом участников, что может быть связано с размером нашей выборки, но также возможно, что эти параметры уже стабильны у подростков.

2.4.5. Корреляции поведенческих показателей

В настоящем исследовании точность ответов была выше для слов, чем для псевдослов, и более быстрые ответы регистрировались для слов, чем для псевдослов, и для грамматически правильных стимулов, чем для грамматически неправильных стимулов. Это указывает на то, что грамматическая обработка слов и грамматически правильных стимулов легче, чем нетипичных стимулов, что соответствует предыдущим данным (Kast et al., 2010; Taroyan & Nicolson, 2009). Положительные корреляции между скоростью чтения и выполнением задания на грамматическое суждение (более высокая точность и скорость), по-видимому, очевидно подтверждают связь между этими связанными процессами (поскольку более быстрая скорость чтения может вызвать лучшее выполнение грамматического суждения, а также лучшее грамматическое суждение может ускорить чтение). Мы предполагаем, что корреляции между скоростью чтения, точностью ответов и временем реакции могут указывать на общий фактор скорости, опосредующий эти взаимосвязи.

Тем не менее необходимо отметить, что точность грамматических суждений улучшалась с возрастом, в то время как скорость чтения и время реакции (т.е. скорость грамматического

суждения) не коррелировали с возрастом в исследуемой выборке. Рикеттс и коллеги (Ricketts et al., 2020) показали, что навыки чтения очень вариабельны внутри возрастных групп в подростковом возрасте. Учитывая небольшой размер нашей выборки, вероятно, что вариабельность внутри возраста была больше, чем межвозрастная вариабельность.

Выводы по главе 2

В данной главе мы рассмотрели результаты исследования нейрофизиологических коррелятов скорости чтения. Чтение – это многофакторный процесс, включающий разные уровни обработки информации. В данной главе мы рассмотрели связь раннего этапа анализа слов со скоростью чтения. В контексте данной диссертационной работы параметр скорости чтения был выбран как один из показателей динамических характеристик участников, отражающий работу внутреннего осциллятора. На поведенческом уровне мы обнаружили, что большие скоростные показатели чтения связаны с более точным выполнением задачи грамматических суждений. А на нейрофизиологическом уровне скорость чтения отражается в латентности ранних компонентов обработки слов - P100 и N170.

Таким образом, эти результаты дают основания полагать, что внутренние временные характеристики участников, выраженные в скорости чтения, могут предсказывать точность выполнения грамматических задач. Ранее было показано, что маркером эффективности воздействия ритмической стимуляции может являться поздний компонент P600 (Kotz et al., 2005; Canette et al., 2020). Наши результаты показывают, что латентность ранних компонентов P100 и N170 могут быть потенциальными маркерами для оценки эффективности воздействия ритмической стимуляции с целью модулирования эффекта фасилитации в задаче грамматических суждений.

Также данное исследование имеет большое методологическое значение в контексте текущей диссертационной работы. На данном этапе была апробирована экспериментальная парадигма с использованием задачи грамматических суждений, представленной в зрительной модальности без добавления слуховой ритмической стимуляции. В следующей главе мы опишем результаты второго эмпирического исследования с добавлением слуховой ритмической стимуляции.

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ СЛУХОВОЙ РИТМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ НА РЕШЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ГРАММАТИЧЕСКИХ СУЖДЕНИЙ НА ПОВЕДЕНЧЕСКОМ И НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЯХ

3.1. Постановка проблемы и цели эмпирического исследования

В рамках 1 главы диссертационной работы нами были рассмотрены исследования, изучающие влияние ритмической стимуляции на модуляцию эффекта фасилитации (ЭФ) в процессе решения задачи грамматических суждений. Были выявлены исследовательских пробелов (см. Главу 1), которые мы попытались разрешить в рамках второго эмпирического исследования, описанного в текущей главе.

В текущем исследовании мы ожидали обнаружить ЭФ в процессе решения задачи грамматических суждений, предъявляемой в зрительной модальности в условии самостоятельного темпа (*self-paced*). Мы использовали ритмические последовательности с различными уровнями вовлечения временных ожиданий: регулярно-согласованные ритмические последовательности (наивысший уровень), регулярные ритмические последовательности (высокий уровень) и нерегулярные ритмические последовательности (нарушение временных ожиданий).

Задачей исследования, представленного в данной главе, является изучение влияния слуховой ритмической стимуляции на решение задачи грамматических суждений, предъявленной в зрительной модальности на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях, на примере подростковой выборки 13-17 лет.

В данном исследовании, основываясь на предыдущих работах (Canette et al., 2020; Fiveash et al., 2020; Przybylski et al., 2013; Bedoin et al., 2016), в качестве показателей эффективности выполнения задачи грамматических суждений были выбраны чувствительность дискриминации (d') и смещение ответа c (c), а также время реакции (ВР), основываясь на исследовании А. Файвэш и коллег (Fiveash et al., 2020).

Были сформулированы следующие операциональные гипотезы и исследовательские вопросы:

1. Регулярно-согласованная ритмическая последовательность, которая была разработана в соответствии с лингвистической структурой предложений в зрительной задаче грамматических суждений (более подробно см. в разделе Музыкальные стимулы), будет вызывать наиболее сильный ЭФ (т.е. увеличивать эффективность выполнения задачи грамматических суждений, уменьшать время реакции и вариабельность ответов). Это связано с тем, что регулярно-согласованная ритмическая последовательность одновременно согласуется с обоими механизмами избирательности внимания, описанными в главе 1, что может в большей степени усилить синхронизацию внутренних колебаний с внешними ритмическими событиями.

2. Мы также ожидали обнаружить ЭФ в задаче грамматических суждений после регулярных ритмических последовательностей (т.е. увеличение эффективности выполнения задачи грамматических суждений, уменьшение время реакции и вариабельности ответов), воспроизводя эффект, обнаруженный в предыдущих исследованиях для задачи грамматических суждений в слуховой модальности.

3. Мы предположили, что нерегулярные ритмические последовательности будут вызывать обратный ЭФ (т.е. снижать эффективность выполнения задачи грамматических суждений, увеличивать время реакции и вариабельность ответов). Дополнительно мы ввели контрольное условие тишины, относительно которого анализировали увеличение или уменьшение ЭФ.

4. Кроме того, мы рассчитали коэффициент стабильности ритма чтения, который был неразрывно связан с чтением предложений в задаче грамматических суждений, представленных в зрительной модальности в самостоятельном темпе (*self-paced*). Этот коэффициент служит дополнительной мерой оценки ритмических навыков. Мы ожидали, что коэффициент стабильности ритма чтения участников будет зависеть от условий ритмической стимуляции. Регулярные условия прайминга будут приводить к более стабильному чтению, а нерегулярные к менее стабильному.

5. Мы ожидали, что эффективность выполнения задачи грамматических суждений (d' , c) будет связана с ритмическими навыками участников, измеряемыми как эффективность выполнения задачи на восприятие музыкального метра (музыкальный d' и музыкальный c).

6. Мы ожидали обнаружить связи между коэффициентом стабильности ритма чтения целевых и предцелевых стимулов и эффективностью выполнения задачи грамматических суждений (d' , c).

7. Мы ожидали обнаружить связь между коэффициентом стабильности ритма чтения целевых и предцелевых стимулов и эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра (музыкальный d' и музыкальный c).

В данном исследовании мы также изучили нейрофизиологические корреляты ЭФ в задаче грамматических суждений, предъявляемой в зрительной модальности. Поскольку данное исследование фокусируется на кросс-модальном эффекте, а точные пространственные и временные окна, в которых может проявляться ЭФ, остаются неизвестными, мы решили не использовать определенные зоны интереса. Вместо этого мы исследовали влияние слуховой ритмической стимуляции на грамматическую обработку с помощью подхода, основанного на перестановке кластеров. Этот непараметрический метод позволяет выявлять статистически значимые различия между условиями как в пространственной, так и во временной областях без необходимости априорных предположений о местоположении или времени эффекта. Таким

образом, этот подход устраняет необходимость в предопределенных диапазонах латентности или конкретных областей мозга. Кроме того, он решает проблему множественных сравнений (Maris, 2007). Таким образом, сформулированный нами исследовательский вопрос звучит следующим образом:

8. Исследовательская гипотеза: Возможно ли обнаружить проявления ЭФ в зрительной задаче грамматических суждений после воздействия слуховой ритмической стимуляции на нейрофизиологическом уровне у русскоязычных подростков?

3.2. Процедура и методы исследования

Протокол исследования был одобрен Комитетом по биоэтике при Научно-технологическом университете «Сириус» (выписка из протокола заседания комитета по биоэтике НТУ «Сириус» от 31.08.2021). Перед началом исследования были получены информированные согласия как от детей, так и от их законных представителей.

3.2.1. Выборка исследования 2

Выборка состояла из 41 подростка в возрасте от 13 до 17 лет (средний возраст = 15,73 года, стандартное отклонение = 1,45, 31 девочка). Данные 5 участников по задаче восприятия музыкального метра были потеряны по техническим причинам; также 5 участников не смогли пройти протокол ЭЭГ по техническим причинам. Все участники имели нормальное или скорректированное до нормального зрение и не имели в анамнезе психических заболеваний, нарушений речи, злоупотребления наркотиками или неврологических травм. Демографические характеристики участников, читательские привычки, языковая среда и музыкальный опыт представлены в Таблицах 11, 12, 13 (см. Приложения 15, 16, 17).

Чтобы определить соответствующий размер выборки для данного исследования, мы обратились к предыдущим исследованиям ритмического прайминга, которые продемонстрировали значительные преимущества регулярных праймов по сравнению с нерегулярными праймами и контрольными условиями. В данных исследованиях участвовали типично развивающиеся дети и взрослые, а размеры выборок варьировались от 16 до 35 участников, что позволило выявить размеры эффектов от малых до средних (Canette et al., 2019, 2020b; Chern et al., 2018; Fiveash et al., 2020; Ladányi et al., 2021).

3.2.2. Задача Грамматических Суждений

3.2.2.1. Музыкальные стимулы

Две регулярные и две нерегулярные 32-секундные ритмические последовательности, использованные в данном эксперименте, применялись в нескольких предыдущих исследованиях (Canette et al., 2019; Fiveash et al., 2020; 2022). Регулярные последовательности были созданы в

размере 4/4 с темпом 120 ударов в минуту и состояли из различных ударных инструментов и электронных звуков (например, тарелок, том-томов, малого барабана, бас-барабана). Нерегулярные ритмы были составлены из тех же сэмплов ударных инструментов, что и регулярные ритмы, но были рандомизированы таким образом, что было невозможно перцептивно извлечь основной бит или регулярную метрическую структуру (Canette et al., 2019). Мы также сгенерировали собственную 32-секундную регулярно-согласованную последовательность с темпом 120 ударов в минуту (2 Гц). Подобно лингвистическим стимулам, которые включали 6 слов, каждая музыкальная фраза в регулярно-согласованной последовательности содержала 6 ударных звуков, сгруппированных в размере 2/4. Чтобы направить временное внимание на ключевые области задачи грамматических суждений, второй удар в музыкальной последовательности, соответствующий лингвистической структуре простого глагольного сказуемого, был выделен добавлением высокочастотного спектрального звука. Кроме того, шестой удар, соответствующий целевому слову и расположенный на сильной доле четвертого такта, был подчеркнут добавлением к нему звукового крещендо, с целью усилить предвосхищение целевого удара (см. Рисунок 9 (Приложение 18)). Эта звуковая последовательность была создана с использованием цифровой звуковой рабочей станции FL Studio версии 21. В качестве контрольного условия мы использовали 32-секундный интервал тишины. Частота дискретизации ритмических последовательностей составляла 48 кГц. Всем ритмические последовательности были выровнены по громкости; средний уровень интегральной громкости звукового сигнала по всем последовательностям звуковых ритмов составил $M (SD) = -22,54 (0,79)$ единиц громкости относительно полной шкалы (Loudness Units relative to Full Scale, LUFS).

3.2.3. Задача Восприятия Музыкального Метра

3.2.3.1. Музыкальные стимулы

Слуховые ритмические последовательности были созданы на основе стимулов, использованных в предыдущем исследовании М. Хус и коллег (Huss et al., 2011). Задание включало 30 проб с различными метрическими аранжировками серии нот в темпе 120 ударов в минуту. В 13 пробах одна и та же серия нот проигрывалась дважды («одинаковые» пробы), в то время как в 17 пробах предъявлялись две разные серии нот («различающиеся» пробы), созданные путем удлинения акцентированной ноты с добавлением ферматы. Звуковые файлы были созданы с помощью программы Sibelius 2021.9 с использованием инструмента вибрафон. Высота музыкальных нот составляла 392 Гц. Частота дискретизации слуховых последовательностей составляла 44,1 кГц. Средний уровень интегральной громкости звукового сигнала по всем

последовательностям звуковых ритмов составил $M (SD) = -37,05 (0,49)$ единиц громкости относительно полной шкалы (Loudness Units relative to Full Scale, LUFS).

3.2.3.2. Процедура

Участники проходили тестирование индивидуально в светлой и тихой комнате. Им предлагалось прослушать два ритмических фрагмента, представленных последовательно, а затем ответить на вопрос: «Одинаковы ли эти два ритмических фрагмента или они различаются?». Если ритмы были одинаковыми, участники должны были нажать левую клавишу со стрелкой на клавиатуре; если ритмы различались, они должны были нажать правую клавишу со стрелкой. Стимулы предъявлялись через наушники Philips SBC HLI 45 с громкостью 60 дБ (уровень звукового давления (Sound Pressure Level, SPL)) в псевдослучайном порядке.

3.2.4. Регистрация и предварительная обработка ЭЭГ в исследовании 2

Запись сигналов ЭЭГ проводилась с помощью 128 активных электродов Ag/AgCl (ActiCAP, Brain Products GmbH), расположенных в соответствии с международной системой 10-5, с частотой дискретизации 500 Гц и импедансом, поддерживаемым на уровне менее 10 кОм. Электрод FCz использовался в качестве референтного, а центральный лобный электрод был заземляющим.

Предварительная обработка ЭЭГ выполнялась с использованием программного обеспечения Brain Vision Analyzer (BVA) версия 2.2 (Sauer, 2021) и включала:

1. Фильтрацию записей ЭЭГ с нижней границей среза 0,1 Гц, верхней границей 70 Гц и режекторным фильтром 50 Гц.
2. Интерполяцию плохих электродов и удаление из анализа сегментов с записями, превышающими ± 400 мкВ.
3. Коррекцию окулографических артефактов с использованием метода независимого компонентного анализа (Independent Component Analysis, ICA). Отбор компонентов для удаления осуществлялся визуально, основываясь на характерных паттернах, соответствующих движениям глаз. Компоненты, отражающие пики, связанные с глазными движениями, были удалены $M (SD) = 4,5 (1,31)$.
4. Повторное реферирование данных к усредненному референту и сегментацию на сегменты от -200 до 1100 мс относительно целевых стимулов.
5. Выполнение коррекции базовой линии (-200 мс) и удаление сегментов с артефактами (± 100 мкВ).
6. Усреднение вызванных потенциалов (ВП) для каждого условия грамматичности и ритмического прайминга независимо от правильности ответа (93,07%). Среднее количество эпох, усредненных по всем условиям грамматичности и ритмического прайминга, составило $M(SD) =$

13,83 (0,18) (описательная статистика эпох для каждого условия грамматичности и ритмического прайминга см. в Таблице 14 (Приложение 19)).

3.2.5. Анализ данных исследования 2

Статистический анализ был выполнен в программном обеспечении R (R Core Team, 2020; версия 2023.03.01) и MNE Python 1.5 (Gramfort et al., 2013).

3.2.5.1 Поведенческие данные

Эффективность выполнения задачи грамматических суждений и задачи на восприятие музыкального метра оценивалась с помощью теории обнаружения сигналов путем оценки чувствительности дискриминации (d' ; музыкальный d') и смещения ответа (c ; музыкальный c) для каждого участника. Расчеты основывались на попаданиях и ложных тревогах, при этом d' и музыкальный d' вычислялись как $z(\text{hit rate}) - z(\text{false alarm rate})$, а смещение ответа c и смещение ответа музыкального c вычислялись как $-0.5 \times (z(\text{hit rate}) + z(\text{false alarm rate}))$ (Macmillan and Creelman, 1991).

В качестве дополнительной характеристики эффективности выполнения задачи грамматических суждений также оценивалось ВР и вариабельность ответов во ВР на целевые и предцелевые стимулы. Поскольку распределение ВР было смещено вправо, значения были логарифмически преобразованы, а значения, выходящие за пределы области 3.0 сигмы, были удалены (1.93% для целевых и 1.42% для предцелевых стимулов). Вариабельность ответов вычислялась как стандартное отклонения ВР отдельно для предцелевых и целевых стимулов после логарифмического преобразования и удаления выбросов для каждого участника в соответствующих условиях грамматичности и прайминга. Мы вычислили коэффициент стабильности ритма чтения для каждого участника отдельно для целевых и предцелевых стимулов как отношение индивидуальных стандартных отклонений ВР, усредненных по всем условиям, к индивидуальному среднему ВР, усредненному по всем условиям.

Для изучения влияния условий прайминга на данные о чувствительности дискриминации d' и смещении ответа c был проведен однофакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями (ANOVA) 4 (регулярный vs. нерегулярный vs. регулярно-согласованный vs. контрольный).

Для изучения влияния условий грамматичности и прайминга на время реакции, вариабельность ответов и коэффициент стабильности ритма чтения для целевых стимулов были проведены двухфакторные дисперсионные анализы с повторными измерениями (ANOVA) 2 (грамматический vs. неграмматический) \times 4 (регулярный vs. нерегулярный vs. регулярно-согласованный vs. контрольный).

Для изучения влияния условий прайминга на время реакции, вариабельность ответов и коэффициент стабильности ритма чтения для предцелевых стимулов были проведены однофакторные дисперсионные анализы с повторными измерениями (ANOVA), где также было четыре уровня фактора прайминга: регулярный vs. нерегулярный vs. регулярно-согласованный vs. контрольный.

Мы использовали парциальные корреляции Пирсона для изучения взаимосвязей между поведенческими переменными при контроле возраста участников.

3.2.5.2 Нейрофизиологические данные

Для изучения эффекта грамматичности в зависимости от условий прайминга был проведен непараметрический парный t-тест на уровне кластеров с использованием 1000 перестановок для контраста условий грамматический vs. неграмматический для каждого условия прайминга. Предварительные интервалы (зоны интереса) не выбиралась и поиск кластеров производился на интервалах от 0 до 1100 мс.

3.3. Результаты эмпирического исследования 2

3.3.1. Поведенческие данные

3.3.1.1. Эффект фасилитации

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) не выявил основного эффекта условий прайминга, для d' , $F(3,120) = 1,15$, $p = 0,334$, $\eta^2 = 0,028$ (см. панель (A) на Рисунке 10) и c , $F(3,120) = 1,68$, $p = 0,255$, $\eta^2 = 0,040$ (см. панель (B) на Рисунке 10).

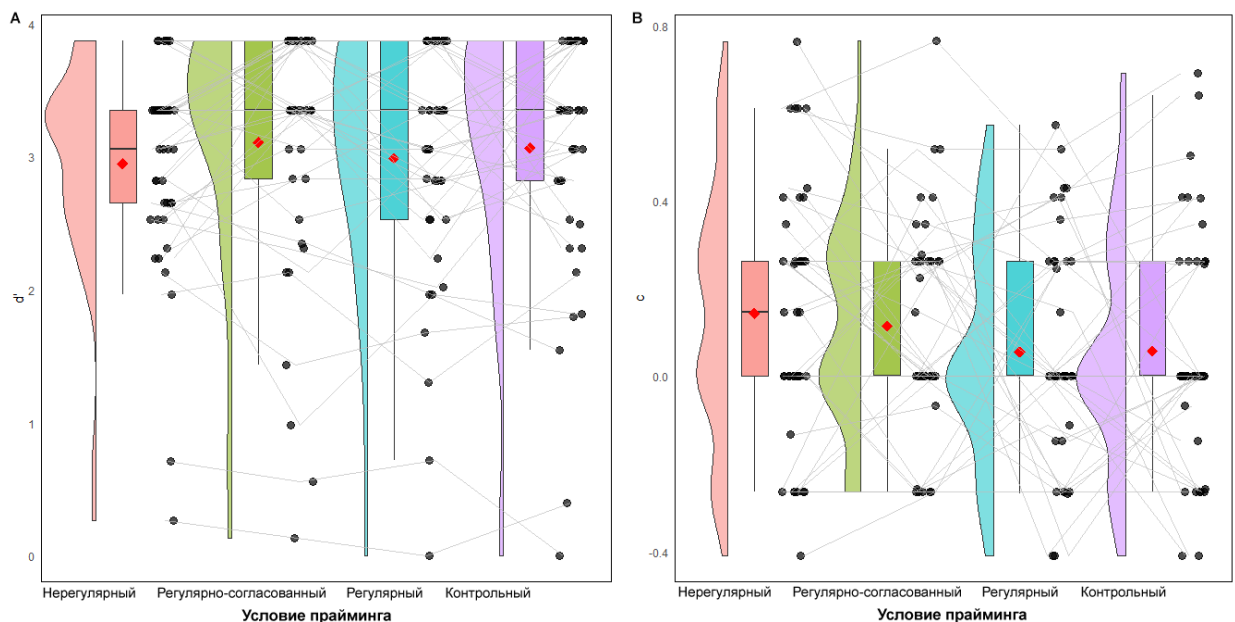


Рисунок 10 — Половинные скрипичные диаграммы и диаграммы размаха отображают распределения эффективности выполнения задачи грамматических суждений в зависимости от

условий прайминга. По оси Y обозначены показатели эффективности выполнения задачи грамматических суждений: (A) d' (чувствительность дискриминации), (B) c (смещение ответа). По оси X обозначены условия прайминга: нерегулярный = ритмическая последовательность без временных закономерностей, регулярный = ритмическая последовательность с ясной метрической структурой, регулярно-согласованный = ритмическая последовательность с ясной метрической структурой, соответствующей лингвистическим предложениям, контрольный = условие тишины. Горизонтальные черные линии указывают медиану значений. Красные ромбы указывают среднее значение. Точки и серые линии представляют значения отдельных участников.

Двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) 2×4 для ВР на целевые стимулы не выявил основного эффекта условий прайминга, $F(3,120) = 2,02$, $p = 0,115$, $\eta^2 = 0,048$. Мы обнаружили статистически значимый основной эффект грамматичности для ВР для целевых стимулов. Более быстрые ответы были зарегистрированы для грамматического условия по сравнению с неграмматическим условием $F(1,40) = 10,49$, $p = 0,002$, $\eta^2 = 0,208$. Взаимодействие грамматичности и прайминга не было статистически значимым, $F(3,120) = 1,61$, $p = 0,19$, $\eta^2 = 0,039$. Двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) 2×4 для вариабельности ответов для целевых стимулов не выявил основного эффекта условия прайминга, $F(3,120) = 1,05$, $p = 0,373$, $\eta^2 = .026$. Основной эффект грамматичности также не был статистически значимым, $F(3,120) = 0,122$, $p = 0,729$, $\eta^2 = 0,003$. Взаимодействие грамматичности и прайминга не было статистически значимым, $F(3,120) = 1,486$, $p = 0,222$, $\eta^2 = 0,036$. Коэффициенты стабильности ритма чтения для целевых стимулов также не отличались в зависимости от условий прайминга, $F(3,120) = 0,919$, $p = 0,434$, $\eta^2 = 0,022$, грамматичности $F(3,120) = 1,016$, $p = 0,32$, $\eta^2 = 0,025$. Взаимодействие грамматичности и прайминга не было статистически значимым, $F(3,120) = 0,587$, $p = 0,625$, $\eta^2 = 0,37$.

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для времени реакции, вариабельности ответов и коэффициента стабильности ритма чтения на целевые и предцелевые стимулы не показал статистически значимых эффектов условия прайминга (см. Таблицу 15 (Приложение 20)). Все описательные статистики эффективности выполнения задачи грамматических суждений в зависимости от условия прайминга представлены в Таблице 16 (Приложение 21).

3.3.1.2. Связь между ритмическими и грамматическими навыками

Исследуемые поведенческие переменные коррелировали с возрастом (см. Таблицу 17); поэтому мы контролировали возраст с помощью парциальных корреляций Пирсона.

Мы не обнаружили статистически значимых корреляций между эффективностью выполнения задачи грамматических суждений (d' , c) и эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра (музыкальный d' и музыкальный c) (см. Таблицу 17).

Мы не обнаружили статистически значимых связей между коэффициентом стабильности ритма чтения целевых стимулов и эффективностью выполнения задачи грамматических суждений (d' , c) или эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра (музыкальный d' и музыкальный c) (см. Таблицу 17). Однако была обнаружена положительная статистически значимая корреляция между коэффициентом стабильности ритма чтения предцелевых стимулов и d' , $r(39) = 0,544$, $p < 0,001$. Как показано на Рисунке 11, чем выше коэффициент стабильности ритма чтения предцелевых стимулов, тем эффективнее участники решали задачу грамматических суждений (d'). Мы не обнаружили статистически значимой связи между коэффициентом стабильности ритма чтения предцелевых стимулов и c , $r(39) = -0,157$, $p = 0,333$.

Коэффициент стабильности ритма чтения предцелевых стимулов не был статистически значимо связан ни с музыкальным d' , $r(34) = 0,206$, $p = 0,235$, ни с музыкальным c , $r(34) = 0,116$, $p = 0,509$. Мы не наблюдали никаких других статистически значимых корреляций между поведенческими переменными, представляющими интерес (см. Таблицу 17).

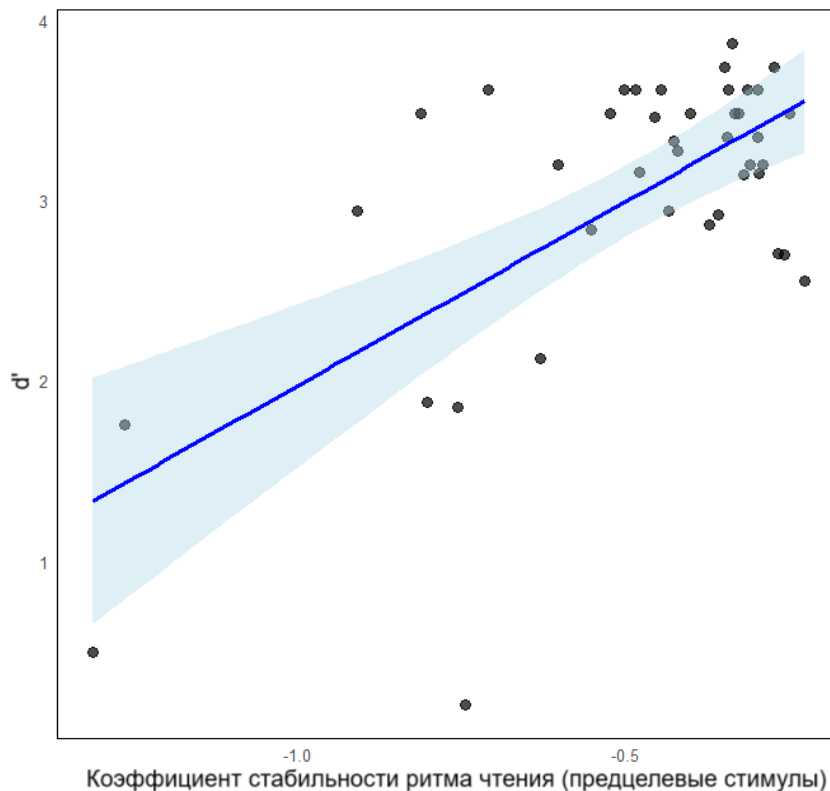


Рисунок 11 — График корреляции коэффициента стабильности ритма чтения (предцелевые стимулы) и d' . Коэффициент стабильности ритма чтения = отношение

индивидуального стандартного отклонения среднего времени реакции, усредненного по всем условиям, к среднему времени реакции, усредненному по всем условиям, d' = чувствительность дискриминации в задаче на определение грамматичности. Затемненная полоса представляет одну стандартную ошибку линии наилучшего соответствия (линии тренда). Каждая точка соответствует отдельному участнику.

Таблица 17 — Средние значения, стандартные отклонения, минимальные и максимальные значения и парциальные корреляции Пирсона для переменных, представляющих интерес

Переменная	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	1	2	3	4	5	6	7
1. Коэффициент стабильности ритма чтения (целевые стимулы)	-0,000	6,229	-18,01	25,07	1						
2. Коэффициент стабильности ритма чтения (предцелевые стимулы)	-0,483	0,254	-1,31	-0,23	-0,252	1					
3. d'	3,029	0,808	0,20	3,88	0,057	0,544** *	1				
4. <i>c</i>	0,093	0,184	-0,20	0,61	-0,119	-0,157	-0,263	1			
5. Музыкальный d'	2,004	0,912	-5,36	2,40	-0,192	0,206	0,246	0,226	1		
6. Музыкальный <i>c</i>	0,017	0,209	-3,59	0,27	0,229	0,116	0,272	0,112	0,211	1	
7. Возраст	15,73	1,45	13,16	17,89	0,113	0,423**	0,535 ***	- 0,393 *	0,451 **	-0,204	1

Примечание — M = среднее, SD = стандартное отклонение, Min = минимум, Max = максимум. Коэффициент стабильности ритма чтения = отношение индивидуального стандартного отклонения среднего времени реакции, усредненного по всем условиям, к среднему времени реакции, усредненному по всем условиям, d' = чувствительность дискриминации в задаче грамматических суждений, c = смещение ответа в задаче грамматических суждений, музыкальный d' = чувствительность дискриминации в задаче на восприятие метра, музыкальный c = смещение ответа в задаче на восприятие музыкального метра. * $p < 0,05$. $p < 0,01$. * $p < 0,001$.

3.3.2. Нейрофизиологические данные

Непараметрический парный t-тест на уровне кластеров выявил один статистически значимый кластер между контрастами грамматического и неграмматического условия только для нерегулярных ритмических последовательностей, $p = 0,036$. Как показано на Рисунке 12, грамматическое и неграмматическое условия после нерегулярных ритмических последовательностей различались во временном окне от 758 до 1076 мс для электродов, расположенных в лобно-центральной области: Fp1, AF3, AFz, AF4, AFF6h, F6, FFT8h, FFC6h, F4, FFC4h, F2, FFC2h, Fz, FFC1h, F1, FFC3h, F3, FFC5h, F5, FFT7h, FFT9h, AFF5h, AFF1h, AFF2h, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FTT7h, FCC5h, FCC3h, FCC1h, FCC2h, T7, C5, C3, C1, Cz, CCP5h, CCP3h, CCP2h. Все топографические карты скальпа разностных волн между грамматическими и неграмматическими условиями по всем электродам для каждого прайминг-условия см. на Рисунке 13 (Приложение 22).

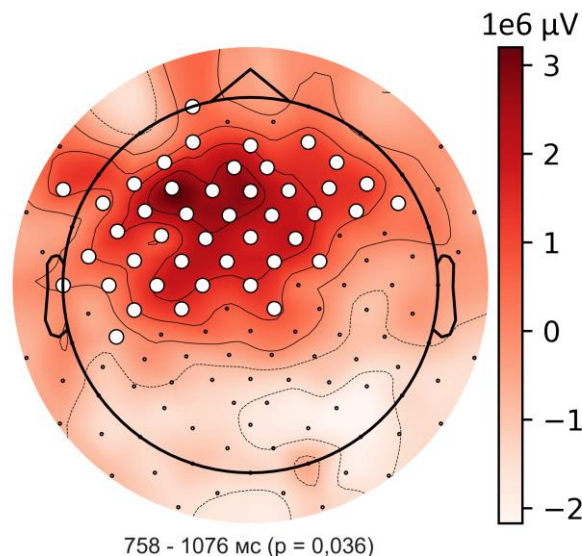


Рисунок 12 — Топография скальпа статистически значимого кластера для условия нерегулярной ритмической стимуляции. Электроды, принадлежащие кластеру, обозначены белой точкой.

Как показано на Рисунке 14 (А), амплитуда после нерегулярных ритмических последовательностей была более отрицательной для неграмматического условия по сравнению с грамматическим условием во временном окне от 758 до 1076 мс. В то же время такой разницы не наблюдалось в других прайминг-условиях (см. Рисунок 14 (В, С) или в контрольном условии (см. Рисунок 14 (D)).

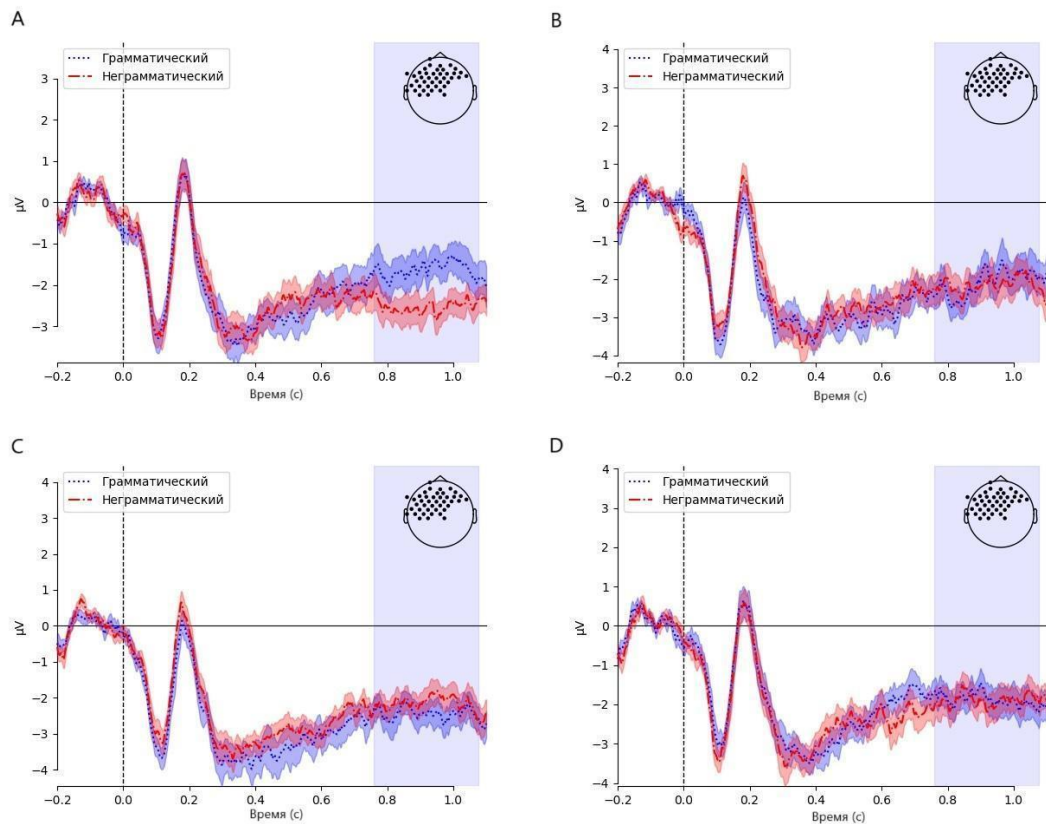


Рисунок 14 — Усредненные по группе ($N = 36$) вызванные потенциалы (ВП) для условий (А) Нерегулярный, (В) Регулярный, (С) Регулярно-Согласованный, (D) Контрольный. Синие (пунктирные) и красные (штрихпунктирные) линии обозначают ВП для грамматического и неграмматического условия. Полупрозрачные синие и красные области иллюстрируют стандартную ошибку среднего. Вертикальная пунктирная линия соответствует началу стимулов. Диапазон латентности статистически значимого кластера обозначен вертикальной синей полосой. Карты головы с точками указывают на все электроды статистически значимого кластера для условия нерегулярной ритмической стимуляции, которые были усреднены для построения ВП.

3.4. Обсуждения результатов эмпирического исследования 2

В текущем исследовании, рассмотренном в данной главе, мы изучали влияние слуховой ритмической стимуляции на эффект фасилитации выполнения задачи грамматических суждений,

предъявленной в зрительной модальности у русскоязычных подростков 13-17 лет. Мы не обнаружили поведенческого эффекта фасилитации: эффективность выполнения задачи грамматических суждений, измеренная как чувствительность дискриминации d' , смещение ответа c , время реакции, вариабельность ответов и коэффициент стабильности ритма чтения, не различалась в зависимости от условий прайминга и контрольного условия.

Кроме того, мы не обнаружили корреляции между эффективностью выполнения задачи грамматических суждений (d' , c) и эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра (музыкальный d' , музыкальный c). Коэффициент стабильности ритма чтения целевых стимулов не был связан с эффективностью выполнения задачи грамматических суждений (d' , c) или с эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра (музыкальный d' , музыкальный c). Однако мы обнаружили, что коэффициент стабильности ритма чтения предцелевых стимулов был связан с эффективностью выполнения задачи грамматических суждений: участники с более стабильным ритмом чтения продемонстрировали более высокую чувствительность дискриминации (d') в задаче грамматических суждений.

В настоящем исследовании мы также изучали нейрофизиологический уровень влияния слуховой ритмической стимуляции на эффект фасилитации выполнения задачи грамматических суждений у русскоязычных подростков 13-17 лет, измеряя вызванные потенциалы (ВП) во время выполнения задачи грамматических суждений, предъявленной в зрительной модальности. Несмотря на то что, несколько предыдущих исследований сообщили об увеличении амплитуды компонента P600 для неграмматического условия по сравнению с грамматическим после прослушивания регулярных ритмических последовательностей (Kotz et al., 2005; Canette et al., 2020), мы не обнаружили различий в ВП между грамматическим и неграмматическим условием ни для регулярно-согласованных, ни для регулярных ритмических последовательностей или контрольного условия. Тем не менее мы зарегистрировали специфическое влияние нерегулярной ритмической стимуляции, которое выразилось в увеличении поздней негативности в ответ на неграмматическое условие по сравнению с грамматическим во временном окне от 758 мс до 1076 мс для электродов, расположенных в лобно-центральной области.

3.4.1. Отсутствие поведенческих доказательств эффекта ритмического прайминга на грамматическую обработку в кросс-модальном дизайне

В настоящем исследовании мы не обнаружили эффекта фасилитации в задаче грамматических суждений, предъявляемой в зрительной модальности, что противоречит некоторым предыдущим исследованиям, которые обнаружили эффект фасилитации при решении задачи грамматических суждений в слуховой модальности (см. обзор Fiveash et al., 2021), а также

утверждению теории динамического внимания об амодальной природе эффекта фасилитации (Jones, 2019).

Ряд предыдущих исследований не смогли воспроизвести ранее обнаруженный эффект фасилитации после воздействия слуховой ритмической стимуляции при решении задачи грамматических суждений, предъявленной в слуховой модальности. Это позволяет предположить, что эффект фасилитации может быть не легко воспроизводимым и что следует учитывать дополнительные факторы (например, возраст и язык участников). Эффект фасилитации был обнаружен в нескольких исследованиях для французского языка на детских выборках (Canette et al., 2020; Fiveash et al., 2020; Przybylski et al., 2013; Bedoin et al., 2016), и одно исследование воспроизвело эффект фасилитации на взрослой выборке (Canette et al., 2019). В двух исследованиях эффект фасилитации не был обнаружен на поведенческом уровне у взрослых (Canette et al., 2020; György et al., 2024). Д. Дьёрдь и коллеги (György et al., 2024) обнаружили эффект нерегулярной ритмической стимуляции, после которой эффективность решения задачи грамматических суждений снижалась. Стоит отметить, что основной эффект прайминга не наблюдался при анализе всех предложений, входящих в экспериментальные блоки ($n=6$), эффект прайминга (нерегулярное условие) был обнаружен только для первых трех предложений после прослушивания слухового стимула (György et al., 2024).

Эффект фасилитации для английского языка был обнаружен только в одном исследовании с участием детской выборки (5-8 лет) (Chern et al., 2018) и не был воспроизведен Х. Кимом и коллегами (Kim et al., 2024) на более старшей выборке детей (7-12 лет). Поскольку эффект фасилитации впервые исследуется для русского языка и на подростковой выборке в возрасте 13-17 лет, трудно сделать выводы о том, в какой степени эти факторы влияют на обнаружение эффекта фасилитации в текущем исследовании.

В большей степени мы склонны приписывать отсутствие эффекта фасилитации на поведенческом уровне использованию кросс-модального дизайна. А. Файвэш и коллеги (Fiveash et al., 2022) провели кросс-модальное исследование с варьированием модальности ритмической стимуляции, где эффект фасилитации также не был обнаружен. А. Файвэш и коллеги (Fiveash et al., 2022) пришли к выводу, что добавление зрительной ритмической стимуляции снижает эффект фасилитации. В текущем эксперименте сами предложения задачи грамматических суждений активировали зрительную систему, в то время как ритмическая стимуляция активировала слуховую систему.

3.4.2. Связи между грамматическими и ритмическими навыками

Несмотря на то что несколько предыдущих исследований показали положительную связь между способностью различать пары коротких музыкальных ритмов и уровнем рецептивной

грамматики (Lee et al., 2020; Swaminathan et al., 2020) и экспрессивной грамматики (Gordon et al., 2015; Nitin et al., 2023), мы не обнаружили корреляций между эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра и эффективностью в задаче грамматических суждений. Мы также не обнаружили статистически значимой связи между стабильностью чтения и эффективностью выполнения задачи на восприятие музыкального метра. Мы можем предположить, что мы не смогли обнаружить данную связь из-за высокого уровня эффективности выполнения и небольшого распределения нашей выборки в грамматической (d' $M (SD) = 3,029 (0,808)$, c $M (SD) = 0,093 (0,184)$) и ритмической (музыкальный d' $M (SD) = 2,004 (0,912)$, музыкальный c $M (SD) = 0,017 (0,209)$) задаче. Корреляционная часть исследования также проводится впервые на подростковой выборке в возрасте 13-17 лет, и мы не можем исключить влияние возрастного фактора на отсутствие связей между эффективностью в грамматической и ритмической задаче.

Однако мы обнаружили, что коэффициент стабильности ритма чтения предцелевых слов, представленных в режиме самостоятельного темпа (self-paced), был связан с более высокой эффективностью выполнения задачи грамматических суждений. Этот результат согласуется с результатами недавнего исследования Х. Ким и коллег (Kim et al., 2024), которые обнаружили, что более стабильные моторные паттерны были связаны с более высокой эффективностью выполнения задачи грамматических суждений, предъявленной в слуховой модальности у взрослых. Показатель стабильности чтения отражает обработку зрительных стимулов во времени, таким образом может отражать работу внутреннего осциллятора. Согласно динамической теории внимания регулярная и стабильная осцилляторная активность отражает более высокий уровень временного внимания и может приводить к более эффективному решению когнитивных задач, что согласуется с полученным результатом.

Однако мы не обнаружили ожидаемой связи между коэффициентом стабильности ритма чтения целевых слов, отражающим процесс принятия решения о грамматичности предложений. Мы предполагаем, что чтение предцелевых слов и принятие решения о грамматичности предложений имеют разную природу, и данные о стабильности ритма чтения предцелевых слов в большей степени отражают непосредственный процесс чтения, в то время как этап чтения целевых слов предполагает и принятие решения о грамматичности предложения.

3.4.2.1 Эксплораторный анализ

При визуализации связи между коэффициентом стабильности ритма чтения (предцелевые стимулы) и d' (см. Рисунок 11) мы обнаружили статистически значимую связь; однако большинство участников сосредоточены в одной зоне по выполнению задачи грамматических суждений и стабильности чтения предцелевых слов. Лишь два участника оказались в

противоположной зоне по данным показателям. Чтобы исключить влияние выбросов, мы провели непараметрический тест Кендалла. Результаты теста показали отсутствие статистически значимой связи между коэффициентом стабильности ритма чтения (предцелевые стимулы) и d' , $r(39) = 0,123$, $p = 0,265$. Таким образом, в условиях высокой гомогенности нашей выборки мы не можем сделать однозначный вывод о наличии связи между этими переменными.

В нашем исследовании мы не обнаружили эффекта ритмического прайминга на поведенческом уровне, что затрудняет интерпретацию эффекта нерегулярного ритма, выявленного на нейрофизиологическом уровне. Мы предположили, что эффект ритмического прайминга мог быть не обнаружен в связи с наличием большого количества предложений в каждом блоке после каждого условия прайминга ($n = 12$). В предыдущих исследованиях эффект ритмического прайминга (как для регулярного, так и для нерегулярного условия) был зафиксирован при предъявлении не более чем шести (Przybylski et al., 2013; Chern et al., 2018; György et al., 2024) или десяти предложений (Ladányi et al., 2021).

В недавнем исследовании Д. Дьёрдь и коллег (György et al., 2024) эффект ритмического прайминга не был обнаружен при анализе d' для каждых 6 предложений после каждого ритмического условия. Однако при использовании линейного смешанного моделирования (LMER) с включением в модель фактора порядка предложений и его взаимодействия с фактором прайминга ритмический прайминг эффект был обнаружен для первой части предложений (первые три) и отсутствовал для второй части предложений.

С целью более детального анализа мы также выбрали метод линейного смешанного моделирования (LMER), который позволяет провести более углубленный анализ фиксированных эффектов. Мы ввели фактор порядка предложений (первые 6/вторые 6 предложений) в модель. Фактор прайминга и фактор порядка предложений и их взаимодействия были включены в качестве фиксированных эффектов. Зависимыми переменными являлись показатели эффективности выполнения задачи грамматических суждений (оценка чувствительности дискриминации (d'), смещения ответа (c)). Случайный перехват был включен для участников (1| участники) для учета индивидуальных различий. В качестве интерсепта было установлено контрольное условие тишины, а также первые 6 предложений.

Модели линейной регрессии смешанных эффектов были построены в программном обеспечении R (R Core Team, 2020; версия 2023.03.01), используя пакет lme4 (Bates et al., 2015).

Модель для чувствительности дискриминации (d') была реализована с помощью функции lmer:

$$\text{lmer}(d' \sim \text{Фактор прайминга} * \text{Порядок предложений} + (1 | \text{участники}), \text{data} = \text{data}).$$

Модель для смещения ответа (c) была реализована с помощью функции lmer:

$$\text{lmer}(c \sim \text{Фактор прайминга} * \text{Порядок предложений} + (1 | \text{участники}), \text{data} = \text{data}).$$

Мы обнаружили, что участники хуже справлялись с задачей грамматических суждений после прослушивания нерегулярного ритма относительно контрольного условия, $b = -0,191$, $SE = 0,096$, $t(280) = -1,985$, $p = 0,0481$. Для других условий прайминга, фактора порядка предложений или взаимодействия фактора прайминга и фактора порядка предложений не было обнаружено значимых фиксированных эффектов (см. Таблицу 18 (Приложение 23)). Мы также не обнаружили значимых фиксированных эффектов для смещения ответа (c) ни для одного из факторов или их взаимодействия (см. Таблицу 19 (Приложении 24)).

3.4.3. Эффект фасилитации на нейрофизиологическом уровне

В текущем исследовании мы обнаружили, что нерегулярная ритмическая стимуляция увеличивает негативность амплитуды в лобно-центральных областях мозга на неграмматическое условие по сравнению с грамматическим условием во временном окне от 758 до 1076 мс. Мы предполагаем, что этот нейрофизиологический ответ связан с тем, что нерегулярная ритмическая стимуляция приводит к нарушению временных ожиданий участников (Jones, 2019; Seibold et al., 2023). Так, Т. Фотидзис и коллеги (Fotidzis et al., 2018) обнаружили нейрофизиологический коррелят N400 для короткого ритмического прайминга с нарушенной временной структурой в условиях кросс-модального дизайна для процесса фонологической обработки, где слова предъявлялись в зрительной модальности, а короткий ритмический прайминг - в слуховой. Более выраженный негативный компонент N400 был обнаружен во временном окне от 300 до 708 мс с лобно-центральным распределением для условий с нарушениями временных ожиданий при фонологической обработке.

В ряде исследований, использующих музыкальные задачи для изучения тонального восприятия (Itoh et al., 2005; Koelsch et al., 2003) и лингвистические задачи для изучения синтаксических или семантических процессов (Cummings et al., 2006; Cheng et al., 2016; Zhou et al., 2010), был обнаружен компонент ВП, подобный наблюдаемому в данном исследовании, и обозначен как N600 или эффект поздней негативности; предполагается, что он связан с большими требованиями к общим когнитивным функциям, таким как рабочая память и внимание.

К. Ито и коллеги (Itoh et al., 2005) сообщили о поздней фронтальной негативности во временном окне 500-900 мс при выполнении двух когнитивных задач, таких как называние высоты тона и слуховой тест Струпа. Этот компонент ВП был более выражен у участников с низкими баллами по тесту на абсолютный слух, что, предположительно, отражало большую нагрузку на рабочую память в группе участников с низким абсолютным слухом по сравнению с группой с высоким абсолютным слухом. С. Кёльш и коллеги (Koelsch et al., 2003) предъявляли участникам последовательности аккордов в двух условиях: без модуляции (ожидаемое условие) и с модуляцией (неожиданное условие). В условии с модуляцией наблюдалась поздняя

негативность в фронтальной области электродов, которая была максимальной во временном окне от 500 до 1500 мс после начала модуляции. Исследователи интерпретировали данный эффект в контексте большего вовлечения процессов рабочей памяти в неожиданном условии.

А. Каммингс и коллеги (Cummings et al., 2006) зарегистрировали компонент N600 в фронтальной области электродов в задаче, включающей определение семантического соответствия между слуховыми и зрительными стимулами. Амплитуда N600 была больше при условии с семантическим нарушением по сравнению с условием без семантического нарушения. П. Ченг и коллеги (Cheng et al., 2016) сообщили о компоненте N600, выраженном преимущественно в фронтальной области электродов, во временном окне 500-900 мс во время выполнения задачи на понимание прочитанного. Амплитуда N600 была более негативной у участников, которые совершали больше ошибок в задаче на понимание прочитанного. Этот ВП был более выражен, когда участники испытывали неуверенность в правильном ответе, что приводило к более высокой вероятности совершения ошибок в их ответах. Х. Чжоу и коллеги (Zhou et al., 2010) также зарегистрировали позднюю негативность во временном окне 550-800 мс, наиболее выраженную в фронтальной области электродов. Задача участников состояла в обнаружении семантических и синтаксических несоответствий в условиях зрительной модальности, где предложения, как и в текущем исследовании, предъявлялись слово за словом в режиме самостоятельного темпа (self-paced). Авторы связали увеличение поздней негативности с большей нагрузкой на рабочую память, предложения, содержащие большее количество несоответствий, могли давать большую нагрузку на рабочую память. В частности, Х. Чжоу и коллеги (Zhou et al., 2010) сообщили, что размер негативного эффекта увеличивался с увеличением количества несоответствий в предложениях.

Таким образом, существуют убедительные доказательства того, что поздняя лобно-центральная негативность связана с большим вовлечением общих когнитивных функций, таких как рабочая память и временное внимание, при решении различных когнитивных задач (например, музыкальных или лингвистических). В настоящем исследовании мы наблюдали большую позднюю негативность для неграмматического условия по сравнению с грамматическим условием, но только после предъявления нерегулярного ритмического прайминга. Мы предполагаем, что нерегулярная ритмическая стимуляция, которая может нарушать временные ожидания (Jones, 2019; Seibold et al., 2023), приводит к увеличению когнитивных требований из-за сложности, связанной с одновременным выполнением задачи грамматических суждений и ритмической интерференции.

Выводы по главе 3

В текущем исследовании не было обнаружено эффекта фасилитации выполнения задачи грамматических суждений, предъявляемой в зрительной модальности после воздействия слуховой ритмической стимуляции. Мы предполагаем, что условия кросс-модального исследовательского дизайна снижают преимущества регулярной ритмической стимуляции. Поскольку данное исследование является первым, в котором изучается эффект фасилитации в задаче грамматических суждений после воздействия слуховой ритмической стимуляции с использованием русскоязычной выборки подростков в возрасте 13-17 лет, мы не исключаем влияния языкового и возрастного факторов, снижающих преимущество регулярной ритмической стимуляции.

Также в данном исследовании было обнаружено, что нерегулярная ритмическая стимуляция модулирует увеличение негативности амплитуды вызванных потенциалов в лобно-центральных областях примерно через 700 мс после начала предъявления неграмматического целевого стимула по сравнению с грамматическим целевым стимулом, что соответствует позднему компоненту N600. В рассмотренных предыдущих исследованиях данный компонент был ассоциирован с большей когнитивной нагрузкой на рабочую память и временное внимание. В результате эксплораторного анализа с включением фактора порядка предложений в смешанную линейную модель мы обнаружили, что эффективность выполнения задачи грамматических суждений после прослушивания нерегулярного ритма была ниже по сравнению с контрольным условием, что не наблюдалось в других условиях прайминга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой главе текущей диссертационной работы был рассмотрен процесс чтения и его компоненты на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях, а также мы рассмотрели основные теоретические модели обработки ритма и современные исследования влияния внешней ритмической стимуляции на когнитивные и языковые процессы.

Было показано, что большую роль в процессе временной обработки играет осцилляторная активность головного мозга. Внутренний осциллятор способен синхронизироваться с внешними ритмическими событиями (внешний осциллятор), что влияет на последующее выполнение когнитивных задач. На поведенческом уровне работа внутреннего осциллятора может быть определена через выполнение музыкально-ритмических задач или через показатель скорости чтения.

Несмотря на общую тенденцию подтверждения эффекта фасилитации, были выявлены некоторые противоречия, касающиеся специфичности эффекта фасилитации для процесса обработки грамматических структур, а также модальной специфичности эффекта фасилитации для процесса обработки грамматических структур. Было показано, что только часть исследований воспроизводит эффект фасилитации в задаче понимания грамматичности суждений.

Проведенный анализ позволил предположить, что противоречивые результаты могут быть связаны с зависимостью эффекта фасилитации от различных внешних факторов, таких как языковая и возрастная специфика выборки участников, которые не были учтены в концепции обработки ритма в речи и музыке (Processing Rhythm in Speech and Music, PRISM).

Во второй главе было рассмотрено эмпирическое исследование о изучении ранних этапов обработки слов и нейрофизиологических коррелятов скорости чтения на русскоязычной выборке подростков в возрасте 13-17 лет. Мы показали, что скорость чтения способна предсказывать эффективность выполнения задачи грамматических суждений. А на нейрофизиологическом уровне показатель скорости чтения отражается в латентности ранних компонентов P100 и N170 на целевые слова. Это подчеркивает значимость раннего этапа анализа информации в развитии скоростного компонента чтения. Эти результаты вносят вклад в понимание природы временного аспекта в процессе чтения. В данной главе было показано, что решение задачи грамматических суждений определяется не только внешней ритмической стимуляцией, которая способна модулировать эффект фасилитации, но и зависит от внутренних ритмических характеристик участников, в частности от скорости чтения.

В третьей главе было рассмотрено эмпирическое исследование о влиянии слуховой ритмической стимуляции на выполнение задачи грамматических суждений, предъявляемой в

зрительной модальности в режиме самостоятельного темпа (self-paced), на русскоязычной выборке подростков в возрасте 13-17 лет. В данной главе мы описали результаты на поведенческом и нейрофизиологическом уровнях. На поведенческом уровне, как и в нескольких предыдущих исследованиях, мы не обнаружили эффекта фасилитации в задаче грамматических суждений после предъявления слуховой ритмической стимуляции регулярного типа, что может свидетельствовать о модальной, языковой и возрастной специфичности эффекта. В результате проведения эксплораторного анализа мы обнаружили наличие нерегулярного ритмического эффекта (ухудшение выполнения задачи грамматических суждений).

На нейрофизиологическом уровне мы обнаружили, что нерегулярная ритмическая стимуляция, обладающая нарушением временных закономерностей, приводит к увеличению негативности амплитуды потенциала, связанного с событием в лобно-центральных областях мозга на неграмматическое условие по сравнению с грамматическим во временном окне от 758 до 1076 мс. В ряде предыдущих исследований данный компонент был связан с увеличением когнитивной сложности.

Таким образом, результаты диссертационного исследования расширяют понимание эффекта фасилитации и его зависимости от внешних и внутренних факторов, подчеркивают важность учета индивидуальных особенностей участников при изучении процессов обработки грамматических структур и развития навыков чтения, а также указывают на необходимость дальнейших исследований в этой области с использованием нейрофизиологических методов и учетом различных факторов.

ВЫВОДЫ

1. Временной аспект чтения, отраженный в показателях скорости чтения, связан с точностью выполнения задачи понимания грамматичности предложений: более быстрые читатели лучше справляются с задачей грамматических суждений. А на нейрофизиологическом уровне скорость чтения отражается в латентности ранних компонентов P100 и N170. Этот результат согласуется с данными о том, что временные механизмы активируются не только при обработке ритма в музыке и речи, что предполагает концепция PRISM (см. обзор Fiveash et al., 2021), но и участвуют в процессе чтения.

2. Эффект фасилитации в задаче грамматических суждений в зрительной модальности не был обнаружен, что предположительно связано с модальной, языковой или возрастной специфичностью эффекта.

3. В результате проведения эксплораторного анализа был обнаружен нерегулярный ритмический эффект. Эффективность выполнения задачи грамматических суждений снижалась относительно контрольного условия тишины, что указывает на увеличение когнитивных требований к задаче грамматических суждений после прослушивания ритмической стимуляции нерегулярного типа. Данный эффект отражался на нейрофизиологическом уровне в виде поздней негативности с лобно-центральной локализацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков, М. В. Морфологические особенности строения отделов головного мозга у лиц, занимающихся музыкальной деятельностью / М. В. Бирюков, А. С. Укустов, В. В. Черницына // Актуальная медицина. — 2018. — С. 875–880.
2. Гарах, Ж. В. Нейрофизиологические механизмы чтения / Ж. В. Гарах, А. Б. Ребрейкина, В. Б. Стрелец, А. В. Голикова, Ю. С. Зайцева // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. — 2019. — Т. 69. — № 3. — С. 294–313.
3. Глозман, Ж. М. Влияние занятий музыкой на развитие пространственных и кинетических функций у детей младшего школьного возраста / Ж. М. Глозман, А. Е. Павлов // Психологическая наука и образование. — 2007. — № 3. — С. 35–46.
4. Логвиненко, Т. И. Стандартизированная оценка навыков грамотности у детей от 5 до 15 лет "ИТОГ" / Т. И. Логвиненко, А. И. Стрельцова, Т. Долгорукова, О. Титова, Н. Рахлин, Е. Григоренко // Неопубликованный отчет.
5. Масленникова, А. В. Влияние консонансных и диссонансных аккордов на биопотенциалы мозга: дис. ... канд. биол. наук: 03.03.01 / Масленникова Анна Владимировна. — Москва, 2013. — 120 с.
6. Меньшикова, Е. В. Влияние музыкальных ритмов на активность структур головного мозга / Е. В. Меньшикова, Д. В. Рубанова, А. И. Савватеева, А. Н. Тертичная, В. П. Дегтярев // Сборник научных тезисов и статей "Здоровье и образование в XXI веке". — 2010. — Т. 12. — № 3. — С. 266.
7. Панюшева, Т. Д. Музыка и функциональная пластичность мозга в слуховой сфере: потенциал для восстановительного обучения / Т. Д. Панюшева // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. — 2008. — № 80. — С. 472–477.
8. Панюшева, Т. Д. Музыкальный мозг: обзор отечественных и зарубежных исследований / Т. Д. Панюшева // Асимметрия. — 2008. — Т. 2. — № 2. — С. 41–54.
9. Плетников, М. В. Структурная асимметрия мозга у музыкантов / М. В. Плетников // Science. — 1995. — Vol. 268. — № 5198. — С. 699–701.
10. Портнова, Г. В. Психофизиологическое исследование влияния звуковой ритмической стимуляции на субъективный отсчет времени и скорость выполнения когнитивных заданий / Г. В. Портнова, О. В. Сысоева, А. М. Иваницкий // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. — 2010. — Т. 60. — № 4. — С. 419–429.

11. Ребрейкина, А. Б. Динамика вызванных потенциалов в процессе становления грамотности / А. Б. Ребрейкина, Е. В. Ларионова, О. В. Мартынова // Современная зарубежная психология. — 2020. — Т. 9. — № 2. — С. 21–33.
12. Тимошенко, Е. А. Теоретические и экспериментальные истоки прайминг-эффектов / Е. А. Тимошенко // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2-8. — С. 1779–1783.
13. Черниговская, Т. В. Языки человека: мозг и культура / Т. В. Черниговская // Психофизиологические и нейролингвистические аспекты процесса распознавания вербальных и невербальных паттернов коммуникации. — 2016. — С. 11–16.
14. Amora, K. K. Typical and atypical development of visual expertise for print as indexed by the visual word N1 (N170w): A systematic review / K. K. Amora, A. Tretow, C. Verwimp, J. Tijms, P. H. T. Leppänen, V. Csépe // *Frontiers in Neuroscience*. — 2022. — Vol. 16. — Article 898800.
15. Araújo, S. Electrophysiological correlates of impaired reading in dyslexic pre-adolescent children / S. Araújo, I. Bramão, L. Faísca, A. Petersson, A. Reis // *Brain and Cognition*. — 2012. — Vol. 79. — № 2. — P. 79–88.
16. Araújo, S. Lexical and sublexical orthographic processing: An ERP study with skilled and dyslexic adult readers / S. Araújo, L. Faísca, I. Bramão, A. Reis, K. M. Petersson // *Brain and Language*. — 2015. — Vol. 141. — P. 16–27.
17. Assadollahi, R. Early influences of word length and frequency: A group study using MEG / R. Assadollahi, F. Pulvermüller // *NeuroReport*. — 2003. — Vol. 14. — № 8. — P. 1183–1187.
18. Assaneo, M. F. The coupling between auditory and motor cortices is rate-restricted: Evidence for an intrinsic speech-motor rhythm / M. F. Assaneo, D. Poeppel // *Science Advances*. — 2018. — Vol. 4. — № 2. — Article eaao3842.
19. Azaiez, N. Brain source correlates of speech perception and reading processes in children with and without reading difficulties / N. Azaiez, O. Loberg, J. A. Hämäläinen, P. H. T. Leppänen // *Frontiers in Neuroscience*. — 2022. — Vol. 16. — Article 921977.
20. Balconi, M. Comprehending semantic and grammatical violations in Italian: N400 and P600 comparison with visual and auditory stimuli / M. Balconi, U. Pozzoli // *Journal of Psycholinguistic Research*. — 2005. — Vol. 34. — № 1. — P. 71–98.
21. Bates, D. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using Lme4 / D. Bates, M. Mächler, B. Bolker, S. Walker // *Journal of Statistical Software*. — 2015. — Vol. 67. — № 1. — P. 1–48.
22. Bedoin, N. Temporally regular musical primes facilitate subsequent syntax processing in children with specific language impairment / N. Bedoin, L. Brisseau, P. Molinier, D. Roch, B. Tillmann // *Frontiers in Neuroscience*. — 2016. — Vol. 10. — Article 245.

23. Bekius, A. The beat to read: A cross-lingual link between rhythmic regularity perception and reading skill / A. Bekius, T. E. Cope, M. Grube // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2016. — Vol. 10. — Article 425.
24. Bentin, S. ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: Time course and scalp distribution / S. Bentin, Y. Mouchetant-Rostaing, M.-H. Giard, J.-F. Echallier, J. Pernier // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 1999. — Vol. 11. — № 3. — P. 235–260.
25. Bermúdez-Margaretto, B. Repeated exposure to “meaningless” pseudowords modulates LPC but not N(FN)400 / B. Bermúdez-Margaretto, D. Beltrán, A. Domínguez, F. Cuetos // *Brain Topography*. — 2015. — Vol. 28. — № 6. — P. 838–851.
26. Besson, M. Music in the brain: Music and language processing / M. Besson, M. Barbaroux, E. Dittinger // In: *The Routledge Companion to Music Cognition* (pp. 37–48).
27. Braun, M. Pseudohomophone effects provide evidence of early lexico-phonological processing in visual word recognition / M. Braun, F. Hutzler, J.C Ziegler, M.Dambacher, A.M.Jacobs // *Human Brain Mapping*. — 2009. — Vol. 30. — №7. — P. 1977–1989.
28. Brem, S. Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence / S. Brem, K. Bucher, P. Halder, P. Summers, T. Dietrich, E. Martin, D. Brandeis // *NeuroImage*. — 2006. — Vol. 29. — №3. — P. 822–837.
29. Brem, S. Tuning of the visual word processing system: Distinct developmental ERP and fMRI effects / S. Brem, P. Halder, K. Bucher, P. Summers, E. Martin, D. Brandeis // *Human Brain Mapping*. — 2009. — Vol. 30. — № 6. — P. 1833–1844.
30. Brouwer, H. Getting real about semantic illusions: Rethinking the functional role of the P600 in language comprehension / H. Brouwer, H. Fitz, J. Hoeks // *Brain Research*. — 2012. — Vol. 1446. — P. 127–143.
31. Bulkes, N. Z. Semantic constraint, reading control, and the granularity of form-based expectations during semantic processing: Evidence from ERPs / N. Z. Bulkes, K. Christianson, D. Tanner // *Neuropsychologia*. — 2020. — Vol. 137. — Article 107294.
32. Buzsáki, G. *The brain from inside out* / G. Buzsáki // Oxford University Press, 2019.
33. Buzsáki, G. Neuronal oscillations in cortical networks / G. Buzsáki, A. Draguhn // *Science*. — 2004. — Vol. 304, № 5679. — P. 1926–1929.
34. Canette, L.-H. Regular rhythmic primes boost P600 in grammatical error processing in dyslexic adults and matched controls / L.-H. Canette, N. Bedoin, P. Lalitte, E. Bigand, B. Tillmann // *Neuropsychologia*. — 2020. — Vol. 138. — Article 107324.
35. Canette, L.-H. Rhythmic and textural musical sequences differently influence syntax and semantic processing in children / L.-H. Canette, A. Fiveash, J. Krzonowski, P. Lalitte, D. Thompson, L.

Trainor, N. Bedoin, B. Tillmann // *Journal of Experimental Child Psychology*. — 2020. — Vol. 191. — Article 104711.

36. Canette, L.-H. The regularity of rhythmic primes influences syntax processing in adults / L.-H. Canette, P. Lalitte, N. Bedoin, M. Pineau, E. Bigand, B. Tillmann // *Auditory Perception Cognition*. — 2019. — Vol. 2, № 3. — P. 163–179.

37. Cason, N. Bridging music and speech rhythm: Rhythmic priming and audio–motor training affect speech perception / N. Cason, C. Astésano, D. Schön // *Acta Psychologica*. — 2015. — Vol. 155. — P. 43–50.

38. Cason, N. Rhythmic priming enhances the phonological processing of speech / N. Cason, D. Schön // *Neuropsychologia*. — 2012. — Vol. 50, № 11. — P. 2652–2658.

39. Cheng, P.-W. The relationship between brain reaction and English reading tests for non-native English speakers / P.-W. Cheng, Y.-J. Tian, T.-H. Kuo, K.-T. Sun // *Brain Research*. — 2016. — Vol. 1642. — P. 384–388.

40. Chern, A. New evidence of a rhythmic priming effect that enhances grammaticality judgments in children / A. Chern, B. Tillmann, C. Vaughan, R. L. Gordon // *Journal of Experimental Child Psychology*. — 2018. — Vol. 173. — P. 371–379.

41. Coch, D. N1 and P2 to words and wordlike stimuli in late elementary school children and adults / D. Coch, G. Meade // *Psychophysiology*. — 2016. — Vol. 53. — № 2. — P. 115–128.

42. Coltheart, M. DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud / M. Coltheart, K. Rastle, C. Perry, R. Langdon, J. Ziegler // *Psychological Review*. — 2001. — Vol. 108. — № 1. — P. 204–256.

43. Csépe, V. Number-word reading as challenging task in dyslexia? An ERP study / V. Csépe, D. Szücs, F. Honbolygó // *International Journal of Psychophysiology*. — 2003. — Vol. 51. — № 1. — P. 69–83.

44. Cummings, A. Auditory semantic networks for words and natural sounds / A. Cummings, R. Čeponienė, A. Koyama, A. P. Saygin, J. Townsend, F. Dick // *Brain Research*. — 2006. — Vol. 1115. — № 1. — P. 92–107.

45. Daltrozzo, J. Conceptual processing in music as revealed by N400 effects on words and musical targets / J. Daltrozzo, D. Schön // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2009a. — Vol. 21. — № 10. — P. 1882–1892.

46. Daltrozzo, J. Is conceptual processing in music automatic? An electrophysiological approach / J. Daltrozzo, D. Schön // *Brain Research*. — 2009b. — Vol. 1270. — P. 88–94.

47. David, D. Rhythm and reading development in school-age children: a longitudinal study / D. David, L. Wade-Woolley, J. R. Kirby, K. Smithrim // *Journal of Research in Reading*. — 2007. — Vol. 30. — № 2. — P. 169–183.

48. Degé, F. Music lessons and cognitive abilities in children: How far transfer could be possible / F. Degé // *Frontiers in Psychology*. — 2021. — Vol. 11. — Article 557807.
49. Denison, R. N. Visual temporal attention from perception to computation / R. N. Denison // *Nature Reviews Psychology*. — 2024. — Vol. 1. — P. 1–14.
50. Dien, J. The neurocognitive basis of reading single words as seen through early latency ERPs: A model of converging pathways / J. Dien // *Biological Psychology*. — 2009. — Vol. 80. — № 1. — P. 10–22.
51. Dikker, S. Sensitivity to syntax in visual cortex / S. Dikker, H. Rabagliati, L. Pyykkänen // *Cognition*. — 2009. — Vol. 110. — № 3. — P. 293–321.
52. Eberhard-Moscicka, A. K. Temporal dynamics of early visual word processing – Early versus late N1 sensitivity in children and adults / A. K. Eberhard-Moscicka, L. B. Jost, L. V. Fehlbaum, S. E. Pfenninger, U. Maurer // *Neuropsychologia*. — 2016. — Vol. 91. — P. 509–518.
53. Elbaz, A. Can rhythm-induced attention improve the perceptual representation? / A. Elbaz, Y. Yeshurun // *PLoS ONE* / ed. Grahn, J.A. — 2020. — Vol. 15. — № 4. — P. e0231200.
54. Erbeli, F. Unraveling the relation between reading comprehension and print exposure / F. Erbeli, E. Van Bergen, S. A. Hart // *Child Development*. — 2020. — Vol. 91. — № 5. — P. 1548–1562.
55. Faisca, L. Early brain sensitivity to word frequency and lexicality during reading aloud and implicit reading / L. Faisca, A. Reis, S. Araújo // *Frontiers in Psychology*. — 2019. — Vol. 10. — P. 830.
56. Falk, S. Tuning neural phase entrainment to speech / S. Falk, C. Lanzilotti, D. Schön // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2017. — Vol. 29. — № 8. — P. 1378–1389.
57. Faul, F. Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses / F. Faul, E. Erdfelder, A. Buchner, A.-G. Lang // *Behavior Research Methods*. — 2009. — Vol. 41. — № 4. — P. 1149–1160.
58. Fiveash, A. Processing rhythm in speech and music: Shared mechanisms and implications for developmental speech and language disorders / A. Fiveash, N. Bedoin, R.L. Gordon, B. Tillmann // *Neuropsychology*. — 2021. — Vol. 35. — № 8. — P. 771–791.
59. Fiveash, A. Rhythmic priming of grammaticality judgments in children: Duration matters / A. Fiveash, N. Bedoin, P. Lalitte, B. Tillmann // *Journal of Experimental Child Psychology*. — 2020. — Vol. 197. — P. 104885.
60. Fiveash, A. When Visual Cues Do not Help the Beat: Evidence for a Detrimental Effect of Moving Point-Light Figures on Rhythmic Priming / A. Fiveash, B. Burger, L.-H. Canette, N. Bedoin, B. Tillmann // *Frontiers in Psychology*. — 2022. — Vol. 13. — Article 807987.

61. Fiveash, A. Can rhythm-mediated reward boost learning, memory, and social connection? Perspectives for future research / A. Fiveash, L. Ferreri, F. L. Bouwer, A. Kösem, S. Moghimi, A. Ravignani, P. E. Keller, B. Tillmann // *Neuroscience Biobehavioral Reviews*. — 2023. — Vol. 149. — P. 105153.
62. Fiveash, A. Regular rhythmic primes improve sentence repetition in children with developmental language disorder / A. Fiveash, E. Ladányi, J. Camici, K. Chidiac, C. T. Bush, L.-H. Canette, N. Bedoin, R. L. Gordon, B. Tillmann // *NPJ Science of Learning*. — 2023. — Vol. 8. — № 1. — P. 1–8.
63. Fiveash, A. A stimulus-brain coupling analysis of regular and irregular rhythms in adults with dyslexia and controls / A. Fiveash, D. Schön, L.-H. Canette, B. Morillon, N. Bedoin, B. Tillmann // *Brain and Cognition*. — 2020. — Vol. 140. — P. 105531.
64. Flaunacco, E. Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial / E. Flaunacco, L. Lopez, C. Terribili, M. Montico, S. Zoia, D. Schön // *PLOS ONE*. — 2015. — Vol. 10. — № 9. — P. e0138715.
65. Forgeard, M. Practicing a Musical Instrument in Childhood is Associated with Enhanced Verbal Ability and Nonverbal Reasoning / M. Forgeard, E. Winner, A. Norton, G. Schlaug // *PLoS ONE*. — 2008. — Vol. 3. — № 10. — P. e3566.
66. Fotidzis, T. Cross-Modal Priming Effect of Rhythm on Visual Word Recognition and Its Relationships to Music Aptitude and Reading Achievement / T. Fotidzis, H. Moon, J. Steele, C. Magne // *Brain Sciences*. — 2018. — Vol. 8. — № 12. — P. 210.
67. Fraga González, G. Brain-potential analysis of visual word recognition in dyslexics and typically reading children / G. Fraga González, G. Žarić, M. Tijms, L. Bonte, M.W. Blomert, M.W. van der Molen // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2014. — Vol. 8. — Article 474.
68. Frischen, U. The relation between rhythm processing and cognitive abilities during child development: The role of prediction / U. Frischen, F. Degé, G. Schwarzer // *Frontiers in Psychology*. — 2022. — Vol. 13. — Article 920513.
69. Friston, K. A theory of cortical responses / K. Friston // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. — 2005. — Vol. 360. — № 1456. — P. 815–836.
70. Friston, K. The free-energy principle: a unified brain theory? / K. Friston // *Nature Reviews Neuroscience*. — 2010. — Vol. 11. — № 2. — P. 127–138.
71. Friston, K. Predictive coding under the free-energy principle / K. Friston, S. Kiebel // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. — 2009. — Vol. 364. — № 1521. — P. 1211–1221.
72. Fujii, S. The Role of Rhythm in Speech and Language Rehabilitation: The SEP Hypothesis / S. Fujii, C.Y. Wan // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2014. — Vol. 8. — Article 777.

73. Gogtay, N. Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood / N. Gogtay, J.N. Giedd, L. Lusk, K.M. Hayashi, D. Greenstein, A.C. Vaituzis, T.F. Nugent III, D.H. Herman, L.S. Clasen, A.W. Toga, J.L. Rapoport, P.M. Thompson // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2004. — Vol. 101. — № 21. — P. 8174–8179.
74. Gordon, R.L. Musical rhythm discrimination explains individual differences in grammar skills in children / R.L. Gordon, M.S. Jacobs, C.M. Schuele, J.D. McAuley // *Developmental Science*. — 2015. — Vol. 18. — № 4. — P. 635–644.
75. Goswami, U. A Neural Basis for Phonological Awareness? An Oscillatory “Temporal Sampling” Perspective / U. Goswami // *Cambridge Repository*. — 2018.
76. Goswami, U. A temporal sampling framework for developmental dyslexia / U. Goswami // *Trends in Cognitive Sciences*. — 2011. — Vol. 15. — № 1. — P. 3–10.
77. Goswami, U. Entraining the Brain: Applications to Language Research and Links to Musical Entrainment / U. Goswami // *Empirical Musicology Review*. — 2012. — Vol. 7. — № 1–2. — P. 57–63.
78. Gouvea, A.C. The linguistic processes underlying the P600 / A.C. Gouvea, C. Phillips, N. Kazanina, D. Poeppel // *Language and Cognitive Processes*. — 2010. — Vol. 25. — № 2. — P. 149–188.
79. Gramfort, A. MEG and EEG data analysis with MNE-Python / A. Gramfort, M. Luessi, E. Larson, D.A. Engemann, D. Strohmeier, C. Brodbeck, R. Goj, M. Jas, T. Brooks, L. Parkkonen, M.S. Hämäläinen // *Frontiers in Neuroscience*. — 2013. — Vol. 7. — Article 267.
80. Graves, W. W. The Left Posterior Superior Temporal Gyrus Participates Specifically in Accessing Lexical Phonology / W. W. Graves, T. J. Grabowski, S. Mehta, P. Gupta // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2008. — Vol. 20. — № 9. — P. 1698–1710.
81. György, D. Rhythmic priming of syntactic processing in Jabberwocky: a short-lived effect / D. György, D. Saddy, S. A. Kotz, J. Franck // *Language, Cognition and Neuroscience*. — 2024. — P. 1–20.
82. Haegens, S. Rhythmic facilitation of sensory processing: A critical review / S. Haegens, E. Zion Golumbic // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. — 2018. — Vol. 86. — P. 150–165.
83. Harris, A. Rapid Face-Selective Adaptation of an Early Extrastriate Component in MEG / A. Harris, K. Nakayama // *Cerebral Cortex*. — 2006. — Vol. 17. — № 1. — P. 63–70.
84. Hasko, S. The time course of reading processes in children with and without dyslexia: an ERP study / S. Hasko, K. Groth, J. Bruder, J. Bartling, G. Schulte-Körne // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2013. — Vol. 7. — Article 570.
85. Hauk, O. Effects of word length and frequency on the human event-related potential / O. Hauk, F. Pulvermüller // *Clinical Neurophysiology*. — 2004. — Vol. 115. — № 5. — P. 1090–1103.

86. Hauk, O. The time course of visual word recognition as revealed by linear regression analysis of ERP data / O. Hauk, M. H. Davis, M. Ford, F. Pulvermüller, W. D. Marslen-Wilson // *NeuroImage*. — 2006. — Vol. 30. — № 4. — P. 1383–1400.
87. Henry, M.J. Low-Frequency Neural Oscillations Support Dynamic Attending in Temporal Context / M.J. Henry, B. Herrmann // *Timing Time Perception*. — 2014. — Vol. 2. — № 1. — P. 62–86.
88. Henry, M.J. What can we learn about beat perception by comparing brain signals and stimulus envelopes? / M.J. Henry, B. Herrmann, J.A. Grahn // *PLoS ONE*. — 2017. — Vol. 12. — № 2. — Article e0172454.
89. Hickey, P. Environmental rhythms orchestrate neural activity at multiple stages of processing during memory encoding: Evidence from event-related potentials / P. Hickey, A. Barnett-Young, A.D. Patel, E. Race // *PLoS ONE*. — 2020. — Vol. 15. — № 11. — Article e0234668.
90. Hickey, P. Memory in time: Neural tracking of low-frequency rhythm dynamically modulates memory formation / P. Hickey, H. Merseal, A. D. Patel, E. Race // *NeuroImage*. — 2020. — Vol. 213. — P. 116693.
91. Hillyard, S. A. Sensory gain control (amplification) as a mechanism of selective attention: electrophysiological and neuroimaging evidence / S. A. Hillyard, E. K. Vogel, S. J. Luck // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. — 1998. — Vol. 353. — № 1373. — P. 1257–1270.
92. Hilton, C. B. Linguistic syncopation: Meter-syntax alignment affects sentence comprehension and sensorimotor synchronization / C. B. Hilton, M. B. Goldwater // *Cognition*. — 2021. — Vol. 217. — P. 104880.
93. Hoeks, J. C. J. Seeing words in context: the interaction of lexical and sentence level information during reading / J. C. J. Hoeks, L. A. Stowe, G. Doedens // *Cognitive Brain Research*. — 2004. — Vol. 19. — № 1. — P. 59–73.
94. Holliman, A. J. Does speech rhythm sensitivity predict children's reading ability 1 year later? / A. J. Holliman, C. Wood, K. Sheehy // *Journal of Educational Psychology*. — 2010. — Vol. 102. — № 2. — P. 356–366.
95. Huss, M. Music, rhythm, rise time perception and developmental dyslexia: Perception of musical meter predicts reading and phonology / M. Huss, J. P. Verney, T. Fosker, N. Mead, U. Goswami // *Cortex*. — 2011. — Vol. 47. — № 6. — P. 674–689.
96. Itoh, K. Electrophysiological correlates of absolute pitch and relative pitch / K. Itoh, S. Suwazono, H. Arao, K. Miyazaki, T. Nakada // *Cerebral Cortex*. — 2005. — Vol. 15. — № 6. — P. 760–769.

97. Jensen, K. M. Towards thoughtful planning of ERP studies: How participants, trials, and effect magnitude interact to influence statistical power across seven ERP components / K. M. Jensen, J.A MacDonald // *Psychophysiology*. — 2023. — Vol. 60. — № 7. — P.e14245.
98. Johndro, H. Temporal predictions provided by musical rhythm influence visual memory encoding / H.Johndro, L.Jacobs, A.D.Patel, E.Race // *Acta Psychologica*.—2019.—Vol..200.—P..102923.
99. Jones, A. Rhythmic Temporal Structure at Encoding Enhances Recognition Memory / A.Jones, E.V.Ward // *Journal of Cognitive Neuroscience*.—2019.—Vol..31.—№10.—P..1549–1562.
100. Jones, M.R. Time Will Tell: A Theory of Dynamic Attending / M.R.Jones // Oxford University Press; 1st ed., 2019.
101. Jones, M. R. Time, our lost dimension: Toward a new theory of perception, attention, and memory / M. R. Jones // *Psychological Review*. — 1976. — Vol. 83. — № 5. — P. 323–355.
102. Jones, A. Null effects of temporal prediction on recognition memory but evidence for differential neural activity at encoding: A registered report / A. Jones, J. Silas, W. Anderson, E.V. Ward // *Cortex*. — 2023. — Vol. 169. — P. 130–145.
103. Juraska, J.M. Pubertal onset as a critical transition for neural development and cognition / J.M. Juraska, J. Willing // *Brain Research*. — 2017. — Vol. 1654. — P. 87–94.
104. Kaan, E. The P600 as an index of syntactic integration difficulty / E. Kaan, A. Harris, E. Gibson, P. Holcomb // *Language and Cognitive Processes*. — 2000. — Vol. 15. — № 2. — P. 159–201.
105. Kang, J.-G. Event-related potential patterns reflect reversed hemispheric activity during visual attention processing in children with dyslexia: A preliminary study / J.-G. Kang, S.-H. Lee, E.-J. Park, H.-S. Leem // *Clinical Psychopharmacology and Neuroscience*. — 2016. — Vol. 14. — № 1. — P. 33–42.
106. Kast, M. ERP differences of pre-lexical processing between dyslexic and non-dyslexic children / M. Kast, S. Elmer, L. Jäncke, M. Meyer // *International Journal of Psychophysiology*. — 2010. — Vol. 77. — № 1. — P. 59–69.
107. Kaya, E. Reliable estimation of internal oscillator properties from a novel, fast-paced tapping paradigm / E. Kaya, M.J. Henry // *Scientific Reports*. — 2022. — Vol. 12. — № 1. — Article 20466.
108. Kemény, F. Print-, sublexical and lexical processing in children with reading and/or spelling deficits: An ERP study / F. Kemény et al. // *International Journal of Psychophysiology*. — 2018. — Vol. 130. — P. 53–62.
109. Kim, H.-W. No influence of regular rhythmic priming on grammaticality judgment and sentence comprehension in English-speaking children / H.-W. Kim, K.E. McLaren, Y.S. Lee // *Journal of Experimental Child Psychology*. — 2024. — Vol. 237. — P. 105760.

110. Kim, A. E. Sentence Processing // *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience* / ed. J. T. Wixted. — 1st ed. — Wiley, 2018. — P. 1–37.
111. Kim, A.E. Neural mechanisms of rapid sensitivity to syntactic anomaly / A.E. Kim, P.M. Gilley // *Frontiers in Psychology*. — 2013. — Vol. 4. — Article 104.
112. Kim, A.E. Concurrent effects of lexical status and letter-rotation during early stage visual word recognition: Evidence from ERPs / A.E. Kim, J. Straková // *Brain Research*. — 2012. — Vol. 1468. — P. 10–18.
113. Kim, A. Rapid interactions between lexical semantic and word form analysis during word recognition in context: Evidence from ERPs / A. Kim, V. Lai // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2012. — Vol. 24. — № 5. — P. 1104–1112.
114. Kim, A. The independence of combinatory semantic processing: Evidence from event-related potentials / A. Kim, L. Osterhout // *Journal of Memory and Language*. — 2005. — Vol. 52. — № 2. — P. 205–225.
115. Kim, H.-W. Rhythmic motor behavior explains individual differences in grammar skills in adults / H.-W. Kim et al. // *Scientific Reports*. — 2024. — Vol. 14. — № 1. — P. 3710.
116. Koelsch, S. Processing Tonal Modulations: An ERP Study / S. Koelsch, T. Gunter, E. Schröger, A.D. Friederici // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2003. — Vol. 15. — № 8. — P. 1149–1159.
117. Koelsch, S. Music, language and meaning: brain signatures of semantic processing / S. Koelsch, E. Kasper, D. Sammler, K. Schulze, T. Gunter, A.D. Friederici // *Nature Neuroscience*. — 2004. — Vol. 7. — № 3. — P. 302–307.
118. Korinth, S.P. Fast and Slow Readers of the Hebrew Language Show Divergence in Brain Response ~200 ms Post Stimulus: An ERP Study / S.P. Korinth, Z. Breznitz // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9. — № 7. — Article e103139.
119. Korinth, S.P. Does silent reading speed in normal adult readers depend on early visual processes? Evidence from event-related brain potentials / S.P. Korinth, W. Sommer, Z. Breznitz // *Brain and Language*. — 2012. — Vol. 120. — № 1. — P. 15–26.
120. Kotz, S.A. The basal ganglia are receptive to rhythmic compensation during auditory syntactic processing: ERP patient data / S.A. Kotz, T.C. Gunter, S. Wonneberger // *Brain and Language*. — 2005. — Vol. 95. — № 1. — P. 70–71.
121. Kotz, S.A. Syntactic language processing: ERP lesion data on the role of the basal ganglia / S.A. Kotz, S. Frisch, D.Y. von Cramon, A.D. Friederici // *Journal of the International Neuropsychological Society*. — 2003. — Vol. 9. — № 7. — P. 1053–1060.
122. Kraus, N. Music training for the development of auditory skills / N. Kraus, B. Chandrasekaran // *Nature Reviews Neuroscience*. — 2010. — Vol. 11. — № 8. — P. 599–605.

123. Kreidler, K. Children With Developmental Language Disorder Show Deficits in the Production of Musical Rhythmic Groupings / K. Kreidler, J. Vuolo, L. Goffman // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. — 2023. — Vol. 66. — № 11. — P. 4481–4496.
124. Kristjánsson, A. The Role of Visual Factors in Dyslexia / A. Kristjánsson, H.M. Sigurdardóttir // *Journal of Cognition*. — 2023. — Vol. 6. — № 1. — Article 31.
125. Kuehl, L.K. Exploring the time course of N170 repetition suppression: A preliminary study / L.K. Kuehl, E.S.L. Brandt, E. Hahn, M. Dettling, A.H. Neuhaus // *International Journal of Psychophysiology*. — 2013. — Vol. 87. — № 2. — P. 183–188.
126. Kuperberg, G.R. Neural correlates of processing syntactic, semantic, and thematic relationships in sentences / G.R. Kuperberg, D. Caplan, T. Sitnikova, M. Eddy, P.J. Holcomb // *Language and Cognitive Processes*. — 2006. — Vol. 21. — № 5. — P. 489–530.
127. Kutas, M. Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential (ERP) / M. Kutas, K.D. Federmeier // *Annual Review of Psychology*. — 2011. — Vol. 62. — № 1. — P. 621–647.
128. Kutas, M. Reading Senseless Sentences: Brain Potentials Reflect Semantic Incongruity / M. Kutas, S.A. Hillyard // *Science*. — 1980. — Vol. 207. — № 4427. — P. 203–205.
129. Ladányi, E. Does rhythmic priming improve grammatical processing in Hungarian-speaking children with and without developmental language disorder? / E. Ladányi, Á. Lukács, J. Gervain // *Developmental Science*. — 2021. — Vol. 24. — № 6. — Article e13112.
130. Lê, M. Rhythm in the blood: The influence of rhythm skills on literacy development in third graders / M. Lê, P. Quémart, A. Potocki, M. Gimenes, D. Chesnet, E. Lambert // *Journal of Experimental Child Psychology*. — 2020. — Vol. 198. — Article 104880.
131. Lee, Y. S. Rhythm and syntax processing in school-age children / Y. S. Lee, S. Ahn, R. F. Holt, E. G. Schellenberg // *Developmental Psychology*. — 2020. — Vol. 56. — № 9. — P. 1632–1641.
132. Di Liberto, G. M. Atypical cortical entrainment to speech in the right hemisphere underpins phonemic deficits in dyslexia / G. M. Di Liberto, V. Peter, M. Kalashnikova, U. Goswami, D. Burnham, E. C. Lalor // *NeuroImage*. — 2018. — Vol. 175. — P. 70–79.
133. Linnavalli, T. Music playschool enhances children’s linguistic skills / T. Linnavalli, V. Putkinen, J. Lipsanen, M. Huotilainen, M. Tervaniemi // *Scientific Reports*. — 2018. — Vol. 8. — № 1. — P. 8767.
134. Luck, S. J. *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*, second edition / S. J. Luck // MIT Press, 2014.

135. Luo, C. Nudging the N170 forward with prior stimulation—Bridging the gap between N170 and recognition potential / C. Luo, W. Chen, R. VanRullen, Y. Zhang, C. M. Gaspar // *Human Brain Mapping*. — 2022. — Vol. 43. — № 4. — P. 1214–1230.
136. Mahé, G. Is the impaired N170 print tuning specific to developmental dyslexia? A matched reading-level study with poor readers and dyslexics / G. Mahé, A. Bonnefond, N. Doignon-Camus // *Brain and Language*. — 2013. — Vol. 127. — № 3. — P. 539–544.
137. Mahé, G. Impaired visual expertise for print in French adults with dyslexia as shown by N170 tuning / G. Mahé, A. Bonnefond, N. Gavens, A. Dufour, N. Doignon-Camus // *Neuropsychologia*. — 2012. — Vol. 50. — № 14. — P. 3200–3206.
138. Maris, E. Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data / E. Maris, R. Oostenveld // *Journal of Neuroscience Methods*. — 2007. — Vol. 164. — № 1. — P. 177–190.
139. Matar, S. Left occipital and right frontal involvement in syntactic category prediction: MEG evidence from Standard Arabic / S. Matar, L. Pykkänen, A. Marantz // *Neuropsychologia*. — 2019. — Vol. 135.
140. Maurer, U. Emerging Neurophysiological Specialization for Letter Strings / U. Maurer, S. Brem, K. Bucher, D. Brandeis // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2005. — Vol. 17. — № 10. — P. 1532–1552.
141. Maurer, U. The development of print tuning in children with dyslexia: Evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI / U. Maurer, E. Schulz, S. Brem, S. V. Der Mark, K. Bucher, E. Martin, D. Brandeis // *NeuroImage*. — 2011. — Vol. 57. — № 3. — P. 714–722.
142. Meng, Z. Spatial and temporal processing difficulties in Chinese children with developmental dyslexia: An ERP study / Z. Meng, M. Liu, H. Bi // *Dyslexia*. — 2022. — Vol. 28. — № 4. — P. 416–430.
143. Mills, K. L. Structural brain development between childhood and adulthood: Convergence across four longitudinal samples / K. L. Mills, A.-L. Goddings, M. M. Herting, R. Meuwese, S.-J. Blakemore, E. A. Crone, R. E. Dahl, B. Güroğlu, A. Raznahan, E. R. Sowell, C. K. Tamnes // *NeuroImage*. — 2016. — Vol. 141. — P. 273–281.
144. Mills, K. L. Inter-individual variability in structural brain development from late childhood to young adulthood / K. L. Mills, K. D. Siegmund, C. K. Tamnes, L. Ferschmann, L. M. Wierenga, M. G. N. Bos, B. Luna, C. Li, M. M. Herting // *NeuroImage*. — 2021. — Vol. 242. — Article 118450.
145. Molinaro, N. Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions / N. Molinaro, H. A. Barber, M. Carreiras // *Cortex*. — 2011. — Vol. 47. — № 8. — P. 908–930.

146. Moreno, S. Short-Term Music Training Enhances Verbal Intelligence and Executive Function / S. Moreno, E. Bialystok, R. Barac, E. G. Schellenberg, N. J. Cepeda, T. Chau // *Psychological Science*. — 2011. — Vol. 22. — № 11. — P. 1425–1433.
147. Morillon, B. Predictive motor control of sensory dynamics in auditory active sensing / B. Morillon, T. A. Hackett, Y. Kajikawa, C. E. Schroeder // *Current Opinion in Neurobiology*. — 2015. — Vol. 31. — P. 230–238.
148. Münte, T. F. Brain potentials and syntactic violations revisited: no evidence for specificity of the syntactic positive shift / T. F. Münte, H.-J. Heinze, M. Matzke, B. M. Wieringa, S. Johannes // *Neuropsychologia*. — 1998. — Vol. 36. — № 3. — P. 217–226.
149. Nitin, R. Exploring individual differences in musical rhythm and grammar skills in school-aged children with typically developing language / R. Nitin, D. E. Gustavson, A. S. Aaron, O. A. Boorom, C. T. Bush, N. Wiens, C. Vaughan, V. Persici, S. D. Blain, U. Soman, D. Z. Hambrick, S. M. Camarata, J. D. McAuley, R. L. Gordon // *Scientific Reports*. — 2023. — Vol. 13. — № 1. — P. 2201.
150. Notbohm, A. Modification of Brain Oscillations via Rhythmic Light Stimulation Provides Evidence for Entrainment but not for Superposition of Event-Related Responses / A. Notbohm, J. Kurths, C.S Herrmann // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2016. — Vol. 10.
151. Osterhout, L. Event-Related Brain Potentials Elicited by Failure to Agree / L. Osterhout, L.A Mobley // *Journal of Memory and Language*. — 1995. — Vol. 34. — № 6. — P. 739–773.
152. Ozernov-Palchik, O. Musical rhythm and reading development: does beat processing matter? / O Ozernov-Palchik, A.D Patel // *Annals of the New York Academy of Sciences*. — 2018. — Vol. 1423. — № 1. — P. 166–175.
153. Patel, A. D. Why would Musical Training Benefit the Neural Encoding of Speech? The OPERA Hypothesis / A. D. Patel // *Frontiers in Psychology*. — 2011. — Vol. 2. — Article 142.
154. Patel, A. D. Can nonlinguistic musical training change the way the brain processes speech? The expanded OPERA hypothesis / A. D. Patel // *Hearing Research*. — 2014. — Vol. 308. — P. 98–108.
155. Peirce, J. PsychoPy2: Experiments in behavior made easy / J. Peirce, J. R. Gray, S. Simpson, M. MacAskill, R. Höchenberger, H. Sogo, E. Kastman, J. K. Lindeløv // *Behavior Research Methods*. — 2019. — Vol. 51. — № 1. — P. 195–203.
156. Penolazzi, B. Early semantic context integration and lexical access as revealed by event-related brain potentials / B. Penolazzi, O. Hauk, F. Pulvermüller // *Biological Psychology*. — 2007. — Vol. 74. — № 3. — P. 374–388.
157. Poulin-Charronnat, B. Processing of Musical Syntax Tonic versus Subdominant: An Event-related Potential Study / B. Poulin-Charronnat, E. Bigand, S. Koelsch // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2006. — Vol. 18. — № 9. — P. 1545–1554.

158. Press, C. The Perceptual Prediction Paradox / C. Press, P. Kok, D. Yon // *Trends in Cognitive Sciences*. — 2020. — Vol. 24. — № 1. — P. 13–24.
159. Przybylski, L. Rhythmic auditory stimulation influences syntactic processing in children with developmental language disorders / L. Przybylski, N. Bedoin, S. Krifi-Papoz, V. Herbillon, D. Roch, L. Léculier, S. A. Kotz, B. Tillmann // *Neuropsychology*. — 2013. — Vol. 27. — № 1. — P. 121–131.
160. Rao R.P.N Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects / R.P.N Rao, D.H Ballard // *Nature Neuroscience*. — 1999. — Vol. 2. — № 1. — P. 79–87.
161. Rayner, K. Models of the reading process / K. Rayner, E. D. Reichle // *WIREs Cognitive Science*. — 2010. — Vol. 1. — № 6. — P. 787–799.
162. Rebreikina, A. B. Characteristics of the Early Stages of Processing of Target and Nontarget Known and Unknown Verbal Stimuli / A. B. Rebreikina, V. B. Strelets // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. — 2014. — Vol. 44. — № 1. — P. 24–30.
163. Rebreikina, A. B. Event-related potentials during literacy acquisition / A. B. Rebreikina, E. V. Larionova, O. V. Martynova // *Journal of Modern Foreign Psychology*. — 2020. — Vol. 9. — № 2. — P. 21–33.
164. Ricketts, J. Reading and Oral Vocabulary Development in Early Adolescence / J. Ricketts, A. Lervåg, N. Dawson, L. A. Taylor, C. Hulme // *Scientific Studies of Reading*. — 2020. — Vol. 24. — № 5. — P. 380–396.
165. Roberts, E. A Bayesian Mixture Model for Change-point Estimation Using Ordinal Predictors / E. Roberts, L. Zhao // *arXiv*, 2020.
166. Rugg, M. D. Event-related potentials and recognition memory / M. D. Rugg, T. Curran // *Trends in Cognitive Sciences*. — 2007. — Vol. 11. — № 6. — P. 251–257.
167. Savill, N. J. Reading for sound with dyslexia: Evidence for early orthographic and late phonological integration deficits / N. J. Savill, G. Thierry // *Brain Research*. — 2011. — Vol. 1385. — P. 192–205.
168. Seibold, V. C. Temporal attention / V. C. Seibold, J. Balke, B. Rolke // *Frontiers in Cognition*. — 2023. — Vol. 2. — Article 1168320.
169. Shandiz, J. Pattern visual evoked potentials in dyslexic children / J. Shandiz, M. Heyrani, D. Sobhani-Rad, Z. Salehinejad, S. Shojaei, M. Khoshshima, A. Azimi, A. Yekta, S. Hoseini Yazdi // *Journal of Ophthalmic and Vision Research*. — 2017. — Vol. 12. — № 4. — P. 402–407.
170. Sauer, S. Brain Products GmbH | Solutions for neurophysiological research [Electronic resource] / S. Sauer // Brain Products GmbH (accessed: 26.06.2024).

171. Shen, C. Face identity is encoded in the duration of N170 adaptation / C. Shen, J. Stasch, L. Velenosi, A. R. Madipakkam, H. Edemann-Callesen, A. H. Neuhaus // *Cortex*. — 2017. — Vol. 86. — P. 55–63.
172. Sigurdardottir, H. M. Words as Visual Objects: Neural and Behavioral Evidence for High-Level Visual Impairments in Dyslexia / H. M. Sigurdardottir, I. M. Ólafsdóttir, H. Devillez // *Brain Sciences*. — 2021. — Vol. 11. — № 11. — P. 1427.
173. Simon, G. N170 ERPs could represent a logographic processing strategy in visual word recognition / G. Simon, L. Petit, C. Bernard, M. Rebaï // *Behavioral and Brain Functions*. — 2007. — Vol. 3. — № 1. — P. 21.
174. Sollberge, B. Musical Chords as Affective Priming Context in a Word-Evaluation Task / B. Sollberge, R. Rebe, D. Eckstein // *Music Perception*. — 2003. — Vol. 20. — № 3. — P. 263–282.
175. Sousa, J. Rhythm but not melody processing helps reading via phonological awareness and phonological memory / J. Sousa, M. Martins, N. Torres, S. L. Castro, S. Silva // *Scientific Reports*. — 2022. — Vol. 12. — № 1. — P. 13224.
176. Stein, J. The visual basis of reading and reading difficulties / J. Stein // *Frontiers in Neuroscience*. — 2022. — Vol. 16.
177. Steinbeis, N. Affective Priming Effects of Musical Sounds on the Processing of Word Meaning / N. Steinbeis, S. Koelsch // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2011. — Vol. 23. — № 3. — P. 604–621.
178. Stekić, K. ERP Indicators of Phonological Awareness Development in Children: A Systematic Review / K. Stekić, O. Ilić, V. Ković, A. M. Savić // *Brain Sciences*. — 2023. — Vol. 13. — № 2. — P. 290.
179. Swaminathan, S. Musical ability, music training, and language ability in childhood / S. Swaminathan, E. G. Schellenberg // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. — 2020. — Vol. 46. — № 12. — P. 2340–2348.
180. Tamnes, C. K. Development of the Cerebral Cortex across Adolescence: A Multisample Study of Inter-Related Longitudinal Changes in Cortical Volume, Surface Area, and Thickness / C. K. Tamnes, M. M. Herting, A.-L. Goddings, R. Meuwese, S.-J. Blakemore, R. E. Dahl, B. Güroğlu, A. Raznahan, E. R. Sowell, E. A. Crone, K. L. Mills // *The Journal of Neuroscience*. — 2017. — Vol. 37. — № 12. — P. 3402–3412.
181. Taroyan, N.A. Reading words and pseudowords in dyslexia: ERP and behavioural tests in English-speaking adolescents / N.A. Taroyan, R.I. Nicolson // *International Journal of Psychophysiology*. — 2009. — Vol. 74. — № 3. — P. 199–208.
182. Tierney, A. Auditory-motor entrainment and phonological skills: precise auditory timing hypothesis (PATH) / A. Tierney, N. Kraus // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2014. — Vol. 8.

183. Tong, X. Coarse and fine N1 tuning for print in younger and older Chinese children: Orthography, phonology, or semantics driven? / X. Tong, J.C.M. Lo, C. McBride, C.S. Ho, M.M.Y. Waye, K.K.H. Chung, S.W.L. Wong, B.W.-Y. Chow // *Neuropsychologia*. — 2016. — Vol. 91. — P. 109–119.
184. Treisman, A.M. A feature-integration theory of attention / A.M. Treisman, G. Gelade // *Cognitive Psychology*. — 1980. — Vol. 12. — № 1. — P. 97–136.
185. van de Meerendonk, N. Monitoring in language perception: Electrophysiological and hemodynamic responses to spelling violations / N. van de Meerendonk, P. Indefrey, D.J. Chwilla, H.H.J. Kolk // *NeuroImage*. — 2011. — Vol. 54. — № 3. — P. 2350–2363.
186. van de Meerendonk, N. Monitoring in language perception: Mild and strong conflicts elicit different ERP patterns / N. van de Meerendonk, H.H.J. Kolk, C.Th.W.M. Vissers, D.J. Chwilla // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2010. — Vol. 22. — № 1. — P. 67–82.
187. Van Setten, E.R.H. Print-Tuning Lateralization and Handedness: an Event-Related Potential Study in Dyslexic Higher Education Students / E.R.H. Van Setten, S. Martinez-Ferreiro, N.M. Maurits, B.A.M. Maassen // *Dyslexia*. — 2016. — Vol. 22. — № 1. — P. 64–82.
188. Vidyasagar, T.R. Reading into neuronal oscillations in the visual system: implications for developmental dyslexia / T.R. Vidyasagar // *Frontiers in Human Neuroscience*. — 2013. — Vol. 7.
189. Vidyasagar, T.R. Visual attention and neural oscillations in reading and dyslexia: Are they possible targets for remediation? / T.R. Vidyasagar // *Neuropsychologia*. — 2019. — Vol. 130. — P. 59–65.
190. Vissers, C.Th.W.M. Monitoring in language perception: The effect of misspellings of words in highly constrained sentences / C.Th.W.M. Vissers, D.J. Chwilla, H.H.J. Kolk // *Brain Research*. — 2006. — Vol. 1106. — № 1. — P. 150–163.
191. Vissers, C.Th.W.M. Monitoring in language perception: Evidence from ERPs in a picture–sentence matching task / C.Th.W.M. Vissers, H.H.J. Kolk, N. van de Meerendonk, D.J. Chwilla // *Neuropsychologia*. — 2008. — Vol. 46. — № 4. — P. 967–982.
192. Wang, E. N400 and P600 Effect of Chinese Words Recognition / E. Wang, G. Zhou, H. Huang, Q. Min, W. Chao, Y. Wang // *NeuroQuantology*. — 2017. — Vol. 15. — № 4. — P. 39–44.
193. Weber-Fox, C. Event-related brain potential markers of high-language proficiency in adults / C. Weber-Fox, L.J. Davis, E. Cuadrado // *Brain and Language*. — 2003. — Vol. 85. — № 2. — P. 231–244.
194. Wilsch, A. Spatial Attention and Temporal Expectation Exert Differential Effects on Visual and Auditory Discrimination / A. Wilsch, M.R. Mercier, J. Obleser, C.E. Schroeder, S. Haegens // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2020. — Vol. 32. — № 8. — P. 1562–1576.

195. Xu, M. Dynamic Brain Responses Modulated by Precise Timing Prediction in an Opposing Process / M. Xu, J. Meng, H. Yu, T.-P. Jung, D. Ming // *Neuroscience Bulletin*. — 2021. — Vol. 37. — № 1. — P. 70–80.
196. Yu, W. The effects of word and beat priming on Mandarin lexical stress recognition: an event-related potential study / W. Yu, Y.-F. Chien, B. Wang, J. Zhao, W. Li // *Language and Cognition*. — 2024. — P. 1–23.
197. Yuan, P. Cortical entrainment to hierarchical contextual rhythms recomposes dynamic attending in visual perception / P. Yuan, R. Hu, X. Zhang, Y. Wang, Y. Jiang // *eLife*. — 2021. — Vol. 10. — P. e65118.
198. Zhao, J. Fine Neural Tuning for Orthographic Properties of Words Emerges Early in Children Reading Alphabetic Script / J. Zhao, K. Kipp, C. Gaspar, U. Maurer, X. Weng, A. Mecklinger, S. Li // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 2014. — Vol. 26. — № 11. — P. 2431–2442.
199. Zhao, J. Development of neural specialization for print: Evidence for predictive coding in visual word recognition / J. Zhao, U. Maurer, S. He, X. Weng // *PLOS Biology*. — 2019. — Vol. 17. — № 10. — P. e3000474.
200. Zoefel, B. Speech Entrainment: Rhythmic Predictions Carried by Neural Oscillations / B. Zoefel // *Current Biology*. — 2018. — Vol. 28. — № 18. — P. R1102–R1104.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Демографические характеристики и читательские привычки участников

Таблица 1 — Демографические характеристики и читательские привычки участников

Переменная	<i>n</i>	%
Возраст		
13 лет	7	21,88
14 лет	10	31,25
15 лет	4	12,5
16 лет	4	12,5
17 лет	7	21,88
Класс		
6	1	3,13
7	3	9,38
8	11	34,38
9	4	12,5
10	5	15,63
11	8	25
Пол		
Мужской	7	21,88
Женский	25	78,13
Время ежедневного чтения (% от типичного дня)		
<10%	4	12,5
от 10% до 20%	7	21,88
от 20% до 50%	13	40,63
>50%	8	25

Ведущая рука		
Левая	2	6,25
Правая	29	90,63
Обе	1	3,13

Приложение 2. Языковая среда участников

Таблица 2 — Языковая среда участников

Языковая среда	<i>n</i>	%
Дом		
Русский язык	30	93,75
Другой язык	0	0
Русский и другой язык	2	6,25
Школа		
Русский язык	27	84,38
Другой язык	0	0
Русский и другой язык	5	15,63
Свободное время		
Русский язык	29	90,63
Другой язык	0	0
Русский и другой язык	3	9,38
Социальное взаимодействие		
Русский язык	31	96,88
Другой язык	0	0
Русский и другой язык	1	3,13
Опыт проживания в нерусскоязычной среде		
Да	6	18,75
Нет	26	81,25

Приложение 3. Примеры предложений для каждого экспериментального условия

Таблица 3 — Примеры предложений для каждого экспериментального условия

Условие	Пример предложения
Грамматически согласованное слово	«По улице шла, постукивая высокими каблуками, <i>модница</i> ».
Грамматически согласованное псевдослово	«По тропинке шла, помахивая пушистым хвостом, <i>нудрица</i> ».
Грамматически несогласованное слово	«По городу шла, с любопытством разглядывая прохожих, <i>иностранец</i> ».
Грамматически несогласованное псевдослово	«По пустыне шла, изнывая от неутолимой жажды, <i>носкитанец</i> ».

Примечание — Целевые стимулы выделены курсивом, а глаголы в прошедшем времени определяют род целевых стимулов. Подчеркивание выделяет окончание глаголов, подчеркивание и жирное выделение — окончание целевых стимулов.

Приложение 4. Порядок предъявления условий слуховой ритмической стимуляции

Таблица 4 — Порядок предъявления условий слуховой ритмической стимуляции

Последовательность 1	Последовательность 2	Последовательность 3	Последовательность 4
Контрольный	Регулярный	Нерегулярный	Регулярно-согласованный
Регулярный	Нерегулярный	Регулярно-согласованный	Контрольный
Нерегулярный	Регулярно-согласованный	Контрольный	Регулярный
Регулярно-согласованный	Контрольный	Регулярный	Нерегулярный

Примечание — Каждая последовательность повторялась трижды, в результате чего получилось 12 предложений для каждого из 12 блоков.

**Приложение 5. Описательная статистика значений скорости чтения
(слов/мин)**

Таблица 5 — Описательная статистика значений скорости чтения (слов/мин)

Переменная	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Median</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Skew</i>	<i>SE</i>
Скорость чтения (слов в минуту)	157,8 3	42,10	169	45,50	220	-0,98	7,44

Примечание — *M* = Среднее, *SD* = Стандартное отклонение, *Median* = Медиана, *Min* = Минимум, *Max* = Максимум, *Skew* = Асимметрия, *SE* = Стандартная ошибка.

Приложение 6. Количество доступных эпох событийно-связанных потенциалов для каждого условия

Таблица 6 — Количество доступных эпох событийно-связанных потенциалов для каждого условия

Условие	<i>M</i>	<i>SD</i>
Грамматически согласованное слово	20,09	4,17
Грамматически согласованное псевдослово	20,31	3,55
Грамматически несогласованное слово	20,25	3,66
Грамматически несогласованное псевдослово	21,06	3,04

Примечание — *M* = Среднее, *SD* = Стандартное отклонение.

Приложение 7. Топография событийно-связанных потенциалов

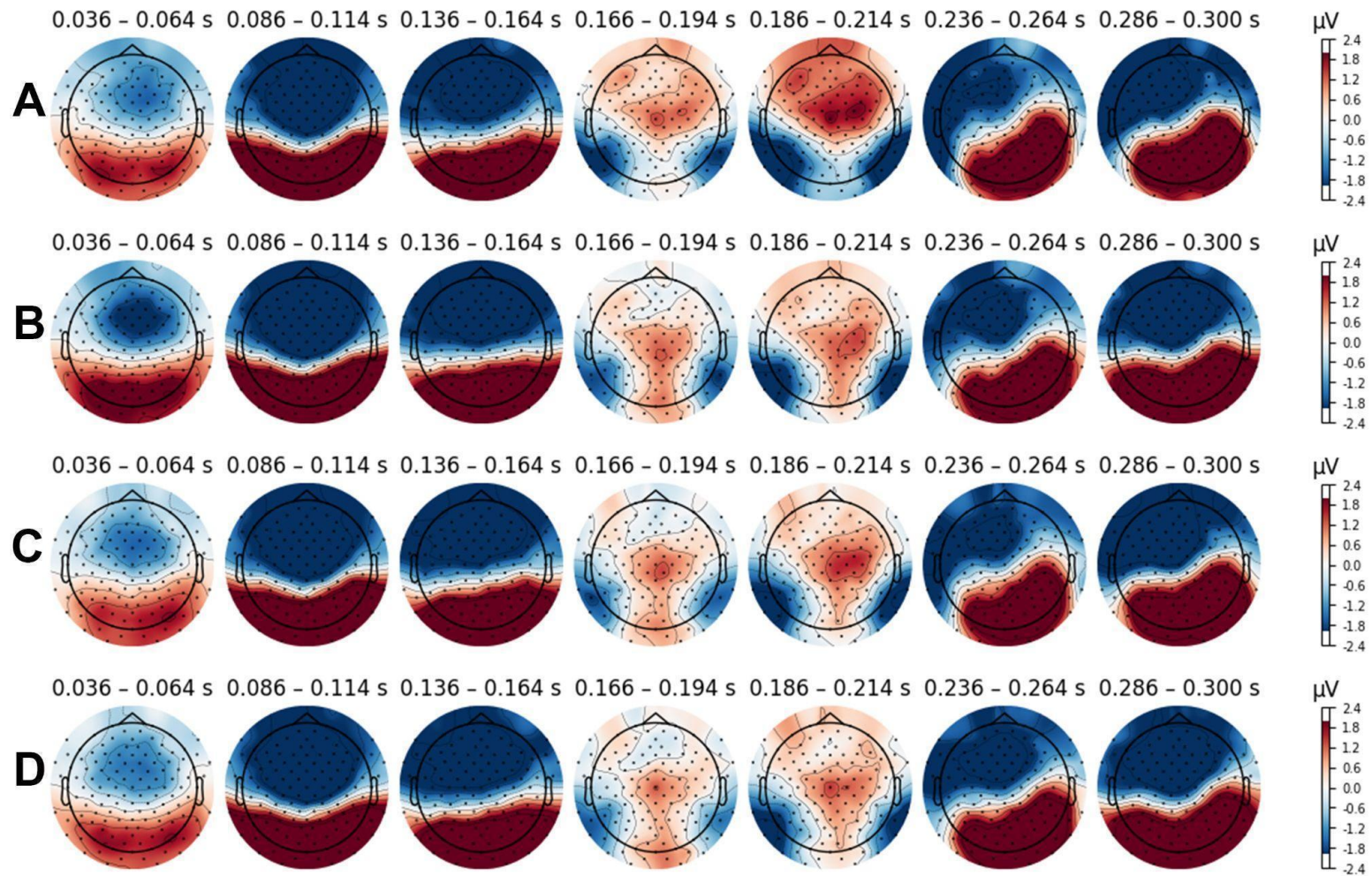


Рисунок 2 — Топография событийно-связанных потенциалов по всем условиям, грамматически согласованное слово (А), грамматически согласованное псевдослово (В), грамматически несогласованное слово (С), грамматически несогласованное псевдослово (D).

Приложение 8. Топография лексического эффекта

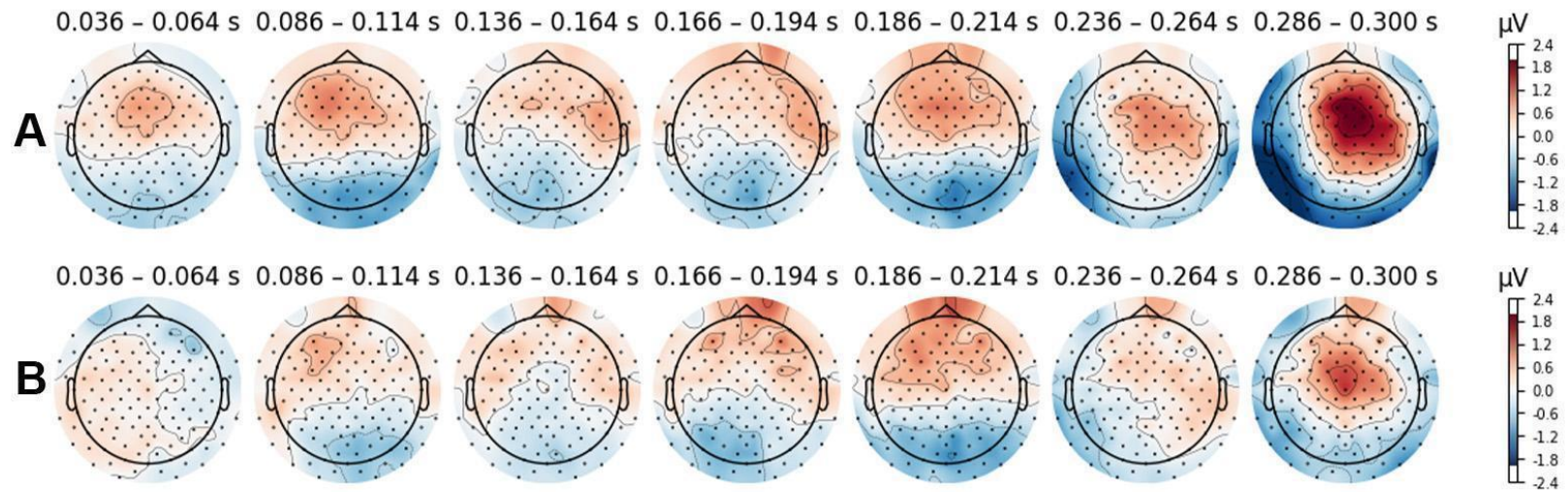


Рисунок 3 — Топография лексического эффекта, определяемого как разница в амплитуде в ответ на слова по сравнению с псевдословами (А), и грамматического эффекта, определяемого как разница в амплитуде в ответ на грамматически правильные слова и псевдослова по сравнению с неправильными (В).

Приложение 9. Средние (N=32) событийно-связанные потенциалы по всем электродам

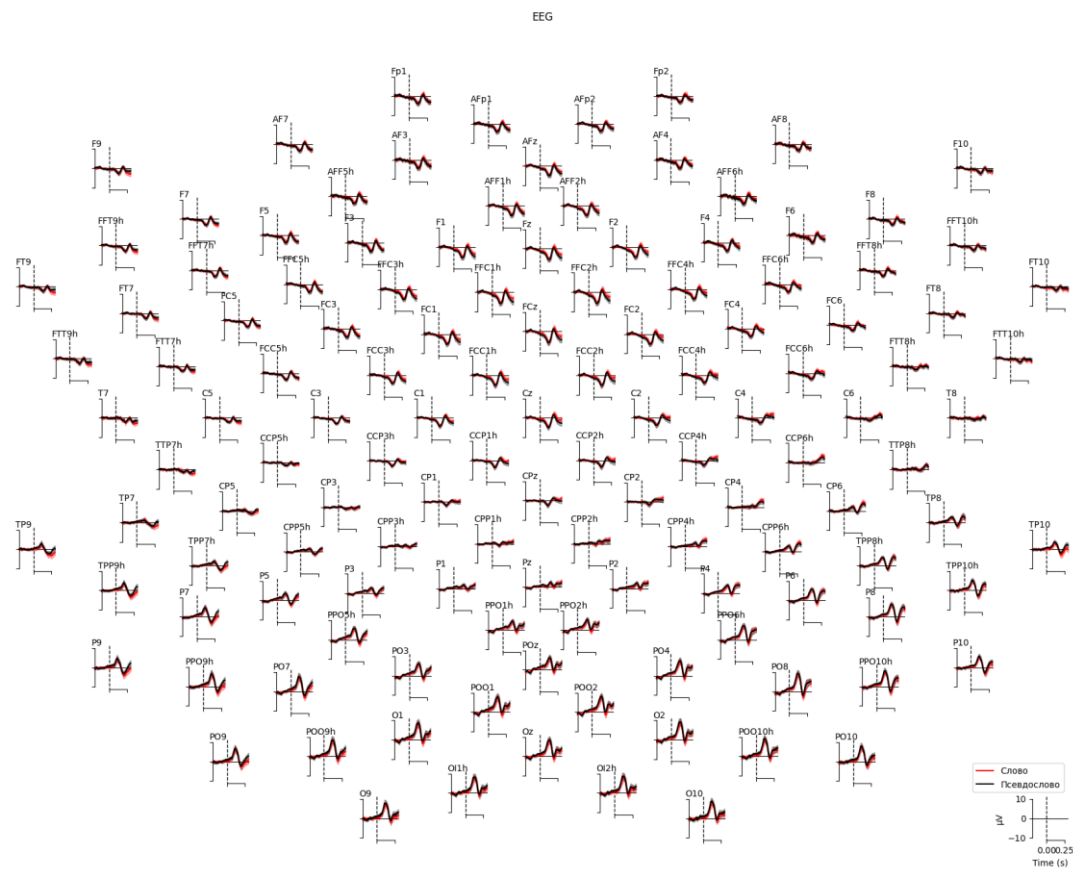


Рисунок 5 — Средние (N=32) событийно-связанные потенциалы по всем электродам: красная линия - грамматически согласованные слова, черная линия - грамматически согласованные псевдослова.

Приложение 10. Средние (N=32) событийно-связанные потенциалы по всем электродам

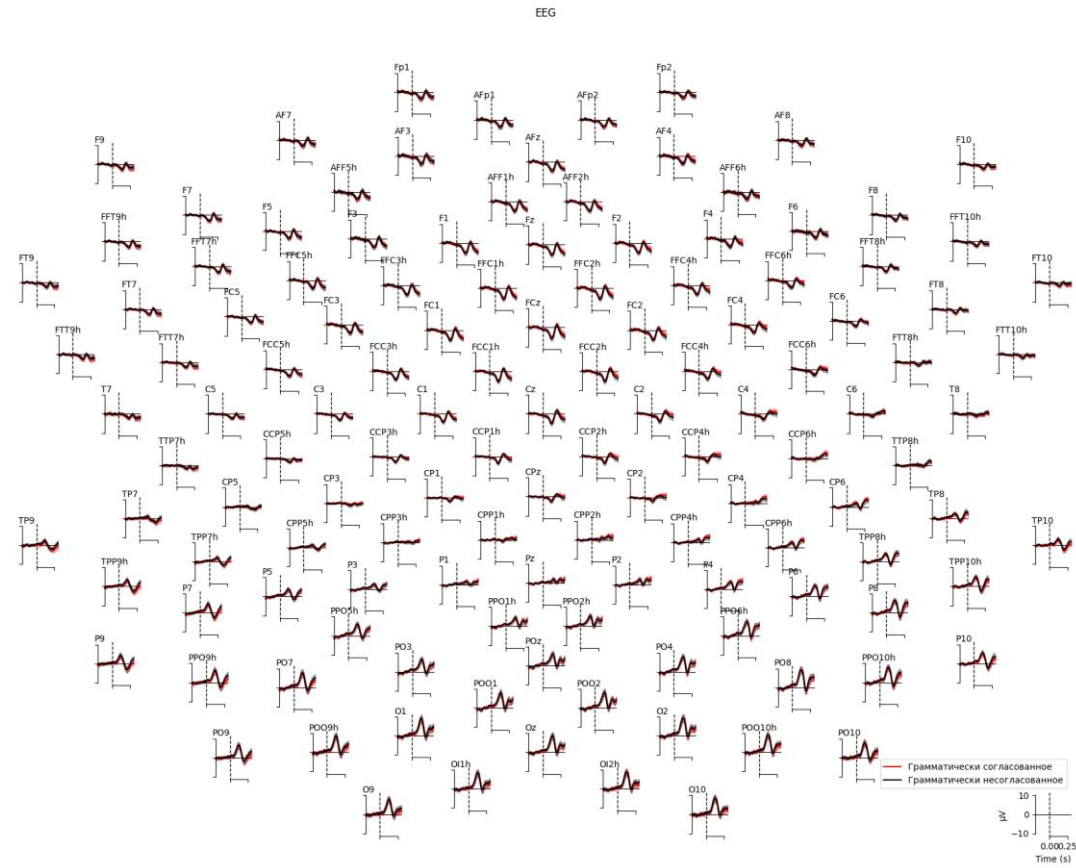


Рисунок 6 — Средние (N=32) событийно-связанные потенциалы по всем электродам: красная линия - грамматически несогласованные слова, черная линия - грамматически несогласованные псевдослова.

Приложение 11. Описательная статистика амплитуды и латентности P100 и N170 для каждого условия

Таблица 7 — Описательная статистика амплитуды и латентности P100 и N170 для каждого условия

Переменная	<i>M</i>	<i>SD</i>
Амплитуда P100		
<i>Условие</i>		
Грамматически согласованное слово	7,85	4,92
Грамматически согласованное псевдослово	8,29	4,80
Грамматически несогласованное слово	8,23	4,70
Грамматически несогласованное псевдослово	8,21	4,93
Амплитуда N170		
<i>Условие</i>		
Грамматически согласованное слово	-3,23	3,37
Грамматически согласованное псевдослово	-2,34	3,20
Грамматически несогласованное слово	-2,56	3,79
Грамматически несогласованное псевдослово	-2,43	3,58
Амплитуда P100		
<i>Условие</i>		

Грамматически согласованное слово	127,34	19,14
Грамматически согласованное псевдослово	126,15	19,80
Грамматически несогласованное слово	128,64	20,37
Грамматически несогласованное псевдослово	126,83	20,08
Амплитуда N170		
<i>Условие</i>		
Грамматически согласованное слово	196,46	18,04
Грамматически согласованное псевдослово	195,60	19,13
Грамматически несогласованное слово	197,05	19,31
Грамматически несогласованное псевдослово	195,35	19,00

Примечание — M = среднее значение, SD = стандартное отклонение.

Приложение 12. Анализ ковариации (ANCOVA) для амплитуды/латентности P100 и N170

Таблица 8 — Анализ ковариации (ANCOVA) для амплитуды/латентности P100 и N170

Измерение	Возраст		Лексичность		Грамматичность		Полушарие		Лексичность×Грамматичность		Лексичность×Полушарие		Грамматичность×Полушарие		Лексичность×Грамматичность×Полушарие	
	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2	F (1,31)	η^2
Амплитуда P100	6,82*	0,185	0,93	0,029	0,33	0,011	10,79**	0,258	1,36	0,042	0,03	0,001	0,00	0,000	3,66	0,106
Амплитуда N170	0,95	0,031	7,49*	0,194	1,13	0,035	0,71	0,023	3,21	0,094	0,88	0,028	0,15	0,005	0,00	0,000
Латентность P100	2,38	0,074	2,97	0,087	1,15	0,036	0,15	0,005	0,17	0,005	1,69	0,052	1,72	0,053	0,62	0,020
Латентность N170	0,12	0,004	2,15	0,065	0,05	0,002	4,29*	0,122	0,16	0,005	1,20	0,037	1,32	0,041	0,46	0,015

Примечание — *p < 0,05, **p < 0,01

Приложение 13. Регрессионные модели амплитуды/латентности P100 и латентности N170

Таблица 9 — Регрессионные модели амплитуды/латентности P100 и латентности N170

Эффект	b	SE	β	t (30)	95% ДИ		p	Модель			
					LL	UL		F(2,29)	p	Multiple R ²	R ² Adjusted
Фиксированные эффекты											
Амплитуда P100											
Intercept	8,146	0,553	-	14,728	7,015	9,277	<0,001	3,85	0,033	0,210	0,155
Скорость чтения	0,534	0,564	0,157	0,946	-0,621	1,688	0,352				
Возраст	-1,515	0,564	-0,445	-2,685	-2,670	-0,361	0,012				
Латентность P100											
Intercept	127,240	2,315	-	54,97	122,505	131,975	<0,001	9,66	0,001	0,400	0,358
Скорость чтения	-9,378	2,362	-0,574	-3,970	-14,209	-4,546	0,000				
Возраст	5,315	2,362	0,325	2,250	0,484	10,147	0,032				
Латентность N170											
Intercept	196,115	2,044	-	95,944	191,934	200,296	<0,001	13,28	0,000	0,478	0,442
Скорость чтения	-10,704	2,086	-0,691	-5,131	-14,970	-6,438	0,000				
Возраст	1,989	2,086	0,129	0,954	-2,277	6,256	0,348				

Примечание — ДИ = доверительный интервал, LL = нижний предел; UL = верхний предел.

Приложение 14. Регрессионная модель амплитуды N170 с бинарными предикторами

Таблица 10 — Регрессионная модель амплитуды N170 с бинарными предикторами

Эффект	b	SE	β	t (122)	95% ДИ		p	Модель			
					LL	UL		F(2,29)	p	Multiple R ²	R ² Adjusted
Фиксированные эффекты											
Амплитуда N170								1,327	,257	0,052	,013
Intercept	-3,233	0,474	-	-6,816	-4,172	-2,294	<0,001				
Скорость чтения											
Возраст	-0,408	0,242	-0,098	-1,108	-0,747	0,211	0,270				
Грамматичность1	0,676	0,671	0,126	1,007	-	-	0,316				
Лексичность1	0,891	0,671	0,166	1,328	-	-	0,187				
Грамматичнос	- 0,765	0,949	-0,123	-0,807	-	-	0,422				

ть1хЛексичнос											
ть1											

Примечание — ДИ = доверительный интервал, LL = нижний предел; UL = верхний предел, Грамматичность = грамматический [0] / неграмматический [1], Лексичность = слово [0] / псевдослово [1].

Приложение 15. Демографические характеристики и читательские привычки участников

Таблица 11 — Демографические характеристики и читательские привычки участников

Переменная	<i>n</i>	%
Возраст		
13 лет	6	14,63
14 лет	7	17,07
15 лет	11	26,83
16 лет	5	12,2
17 лет	12	29,27
Класс		
6	1	2,44
7	1	2,44
8	9	21,95
9	9	21,95
10	7	17,07
11	14	34,15
Пол		
Мужской	10	24,39
Женский	31	75,61
Время ежедневного чтения (% от типичного дня)		
<10%	4	9,76
от 10% до 20%	2	4,88
от 20% до 50%	19	46,34
>50%	14	34,15
Ведущая рука	2	4,88

Приложение 16. Языковая среда участников

Таблица 12 — Языковая среда участников

Языковая среда	<i>n</i>	%
Младенчество		
Только или преимущественно русский	38	92,68
В равной степени русский и другой язык	1	2,44
В основном другой язык	0	0
Только другой язык	0	0
Дошкольный возраст		
Только или преимущественно русский	37	90,24
В равной степени русский и другой язык	2	4,88
В основном другой язык	0	0
Только другой язык	0	0
Начальная школа		
Только или преимущественно русский	32	78,05
В равной степени русский и другой язык	6	14,63
В основном другой язык	1	2,44
Только другой язык	0	0
Средняя/Высшая школа		
Только или преимущественно русский	26	63,41
В равной степени русский и другой язык	12	29,27
В основном другой язык	0	0
Только другой язык	1	2,44

Опыт проживания в нерусскоязычной среде		
Да	2	4,88
Нет	37	90,24
Анкета не была завершена	2	4,88

Приложение 17. Музыкальный опыт участников

Таблица 13 — Музыкальный опыт участников

Музыкальный опыт	<i>n</i>	%
Я занимался регулярной ежедневной практикой игры на музыкальном инструменте (включая вокал) в течение ___ лет.		
0	18	43,9
1	3	7,32
3	4	9,76
4-5	5	12,2
6-9	4	9,76
>10	5	12,2
В пик моего интереса я практиковался ___ часов в день на своем основном инструменте.		
0	14	34,15
1	3	7,32
0,5	2	4,88
1	3	7,32
1,5	7	17,07
2	3	7,32
3-4	6	14,63
>5	1	2,44
У меня было ___ лет формального обучения музыкальной теории.		
0	16	39,02
0,5	2	4,88
1	3	7,32
2	3	7,32
3	3	7,32
4-6	5	12,2
>7	7	17,07

В течение жизни я имел ___ лет формального обучения игре на музыкальном инструменте (включая вокал).		
0	16	39,02
0,5	1	2,44
1	4	9,76
2	1	2,44
3-5	9	21,95
6-9	3	7,32
>10	5	12,2
Я могу играть на ___ музыкальных инструментах.		
0	15	36,59
1	8	19,51
2	12	29,27
3	4	9,76
4	1	2,44
Занимались ли вы когда-либо серьезно музыкой, включая уроки музыки или тренировку слуха? (Случайное пение/игра на гитаре на вечеринках, прослушивание радио и т.д, не учитываются).		
Да	15	36,59
Нет	24	58,54
Анкета не была завершена	2	4,88

Приложение 18. Схема регулярно-согласованной последовательности

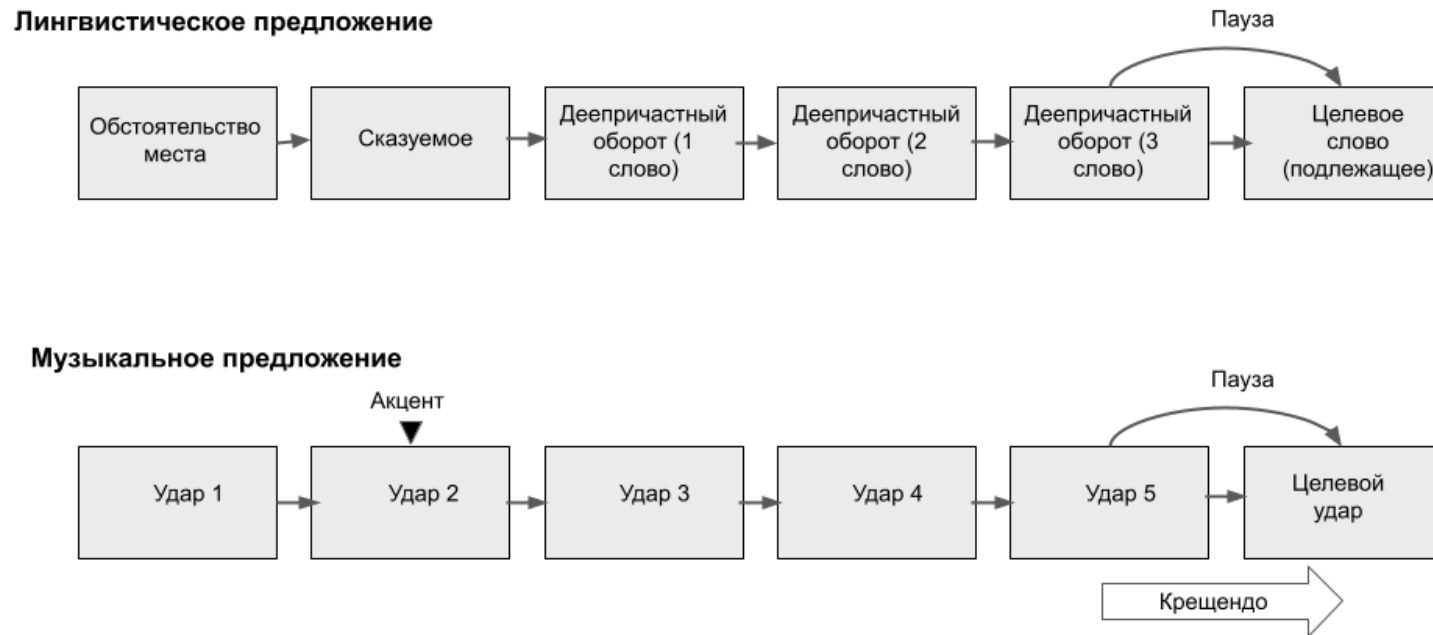


Рисунок 9 — Схема регулярно-согласованной последовательности. Подобно лингвистическим стимулам, которые включали 6 слов, каждая музыкальная фраза в регулярно-согласованной последовательности содержала 6 ударных звуков, сгруппированных в размере 2/4. Шестой удар, соответствующий целевому слову и расположенный на сильной доле четвертого такта, был подчеркнут добавлением к нему звукового крещендо, с целью усилить предвосхищение целевого удара. второй удар в музыкальной последовательности, соответствующий лингвистической структуре простого глагольного сказуемого, был выделен добавлением высокочастотного спектрального звука.

Приложение 19. Количество доступных эпох событийно-связанных потенциалов для каждого условия грамматичности × прайминга

Таблица 14 — Количество доступных эпох событийно-связанных потенциалов для каждого условия грамматичности × прайминга

Условие	<i>M</i>	<i>SD</i>
Грамматический × Регулярно-согласованный	13,56	4,45
Неграмматический × Регулярно-согласованный	13,83	3,93
Грамматический × Регуляр ный	13,89	3,96
Неграмматический × Регулярный	13,75	4,33
Грамматический × Нерегулярный	14,06	3,63
Неграмматический × Нерегулярный	14,06	3,96
Грамматический × Контрольный	13,89	3,69
Неграмматический × Контрольный	13,64	4,21

Примечание — *M* = среднее значение, *SD* = стандартное отклонение.

Приложение 20. Анализ дисперсии (ANOVA) для RT, SD и коэффициента стабильности ритма чтения для целевых и предцелевых стимулов

Таблица 15 — Анализ дисперсии (ANOVA) для RT, SD и коэффициента стабильности ритма чтения для целевых и предцелевых стимулов

Измерение	Прайминг		Грамматичность		Прайминг×Грамматичность	
	F (3,120)	η^2	F (1,40)	η^2	F (3,120)	η^2
Целевое ВР	2,021	0,048	10,49**	0,208	1,612	0,039
Вариабельность целевых ответов	1,05	0,026	0,122	0,003	1,486	0,036
Коэффициента стабильности ритма чтения (целевые стимулы)	0,919	0,022	1,016	0,025	0,587	0,37
Предцелевое ВР	0,455	0,011	-	-	-	-
Вариабельность предцелевых ответов	0,4	0,010	-	-	-	-

Измерение	Прайминг		Грамматичность		Прайминг×Грамматичность	
	F (3,120)	η^2	F (1,40)	η^2	F (3,120)	η^2
Коэффициента стабильности ритма чтения (предцелевые стимулы)	0,754	0,43	-	-	-	-

Примечание — Целевое ВР= логарифмически преобразованное время реакции для целевых стимулов, вариабельность целевых ответов = стандартное отклонение времени реакции для целевых стимулов, предцелевое ВР = логарифмически преобразованное время реакции для предцелевых стимулов, вариабельность предцелевых ответов = стандартное отклонение времени реакции для предцелевых стимулов, *p <0,05, **p <0,01.

Приложение 21. Описательная статистика выполнения задачи суждения о грамматичности по условиям прайминга

Таблица 16 — Описательная статистика выполнения задачи суждения о грамматичности по условиям прайминга

Измерение	Регулярный		Регулярно-согласованный		Нерегулярный		Контрольный	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
<i>d'</i>	2,988	0,917	3,110	0,941	2,950	0,768	3,068	0,933
<i>c</i>	-0,056	0,248	-0,115	0,242	-0,144	0,288	-0,058	0,265
Целевое ВР	-0,066	0,145	-0,050	0,151	-0,054	0,156	-0,057	0,152
Вариабельность целевых ответов	0,153	0,050	0,160	0,055	0,152	0,045	0,160	0,052
Коэффициент стабильности ритма чтения (целевые стимулы)	0,32	13,11	5,23	54,68	-1,48	6,62	-1,09	5,70
Предцелевое ВР	0,424	0,172	0,426	0,168	0,422	0,162	0,418	0,160

Измерение	Регулярный		Регулярно-согласованный		Нерегулярный		Контрольный	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
d'	2,988	0,917	3,110	0,941	2,950	0,768	3,068	0,933
c	-0,056	0,248	-0,115	0,242	-0,144	0,288	-0,058	0,265
Вариабельность предцелевых ответов	0,214	0,097	0,218	0,098	0,210	0,097	0,216	0,091
Коэффициент стабильности ритма чтения (предцелевые стимулы)	-0,59	0,29	-0,49	0,28	-0,47	0,25	-0,47	0,25

Примечание — *M* = среднее значение, *SD* = стандартное отклонение, *d'* = чувствительность дискриминации, *c* = смещение ответа, целевое ВР = логарифмически преобразованное время реакции для целевых стимулов, вариабельность целевых ответов = стандартное отклонение времени реакции для целевых стимулов, Предцелевое ВР = логарифмически преобразованное время реакции для предцелевых стимулов, вариабельность предцелевых ответов = стандартное отклонение времени реакции для предцелевых стимулов.

Приложение 22. Топография эффекта грамматичности для каждого условия прайминга

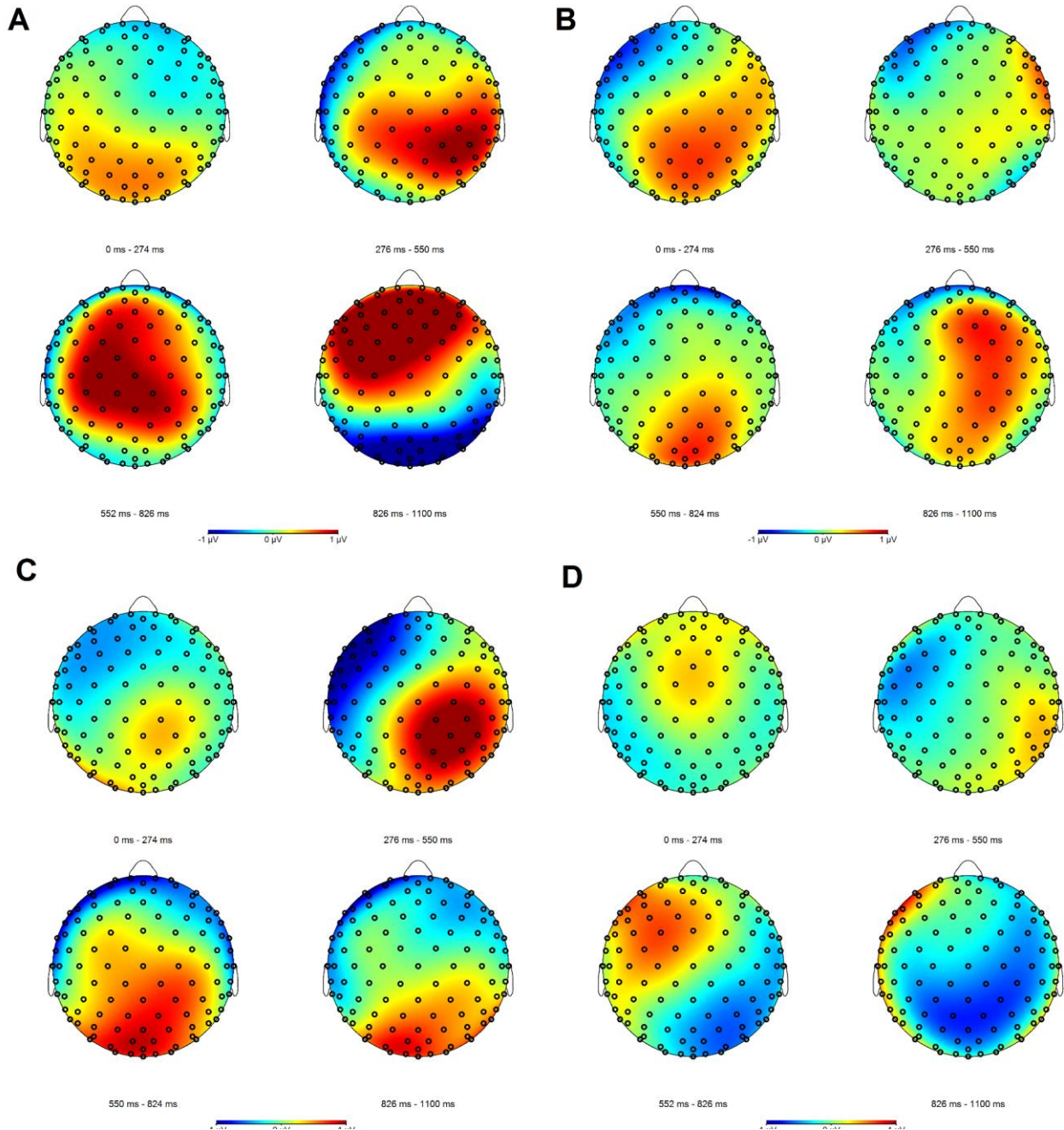


Рисунок 13 — Топография эффекта грамматичности, определяемого как разница в амплитуде в ответ на грамматически правильное условие по сравнению с неграмматическим условием для целевых стимулов, (А) нерегулярный, (В) регулярный, (С) регулярно-согласованный, (D) контрольный.

Приложение 23. Результаты модели линейной регрессии смешанных эффектов для чувствительности дискриминации (d')

Таблица 18 — Результаты модели линейной регрессии смешанных эффектов для чувствительности дискриминации (d')

Фиксированные эффекты	<i>b</i> (SE)	<i>t</i>	<i>p</i>
Интерсепт	2,79 (0,12)	22,85	<0,001
Нерегулярный	-0,19(0,1)	-1,99	0,048
Регулярно-согласованный	0,01(0,1)	0,05	0,1
Регулярный	-0,01(0,1)	-0,09	0,93
Вторые 6 предложений	-0,15(0,1)	-1,57	0,12
Нерегулярный:Вторые 6 предложений	0,24(0,14)	1,78	0,08
Регулярно-согласованный:Вторые 6 предложений	0,04(0,14)	0,26	0,8

Примечание — b = коэффициент регрессии, SE = стандартная ошибка.

Приложение 24. Результаты модели линейной регрессии смешанных эффектов для смещения ответа (с).

Таблица 19 — Результаты модели линейной регрессии смешанных эффектов для смещения ответа (с)

Фиксированные эффекты	<i>b</i> (SE)	<i>t</i>	<i>p</i>
Интерсепт	0,06(0,04)	1,51	0,13
Нерегулярный	0,06(0,05)	1,27	0,21
Регулярно-согласованный	0,05(0,05)	1,03	0,3
Регулярный	-0,03(0,05)	-0,6	0,55
Вторые 6 предложений	-0,02(0,05)	-0,33	0,74
Нерегулярный:Вторые 6 предложений	-0,02(0,07)	-0,28	0,78
Регулярно-согласованный:Вторые 6 предложений	-0,04(0,07)	-0,53	0,6

Примечание — b = коэффициент регрессии, SE = стандартная ошибка.