

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Момотенко Дарья

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ
ФУНКЦИЙ ПРИ ПЕЧАТИ НА КОМПЬЮТЕРЕ

5.3.2 - Психофизиология

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата психологических наук:

Научный руководитель:
кандидат психологических наук,
Горбунов Иван Анатольевич

_____ (подпись)

Санкт- Петербург, 2023

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Психофизиология исполнительных функций в процессе печати на компьютере.....	10
1.1. Исполнительные функции: определение и классификация.....	10
1.1.1 Классификация исполнительных функций.....	12
1.1.2. Модель исполнительных функций Мияке	13
1.1.3 Определение рабочей памяти	16
1.1.4. Модели рабочей памяти.....	18
1.1.5. Нейрофизиология рабочей памяти.....	18
1.1.6. Определение исполнительного контроля.....	19
1.1.7. Определение когнитивной гибкости	21
1.2. Теоретические основы печати	25
1.2.1. Модель двух петель обратной связи при печати	26
1.2.2. Нейрофизиология печати.....	28
1.2.3. Рабочая память в процессе печати.....	29
1.2.4. Исполнительный контроль в процессе печати	30
1.2.6. Способы изучения нейрофизиологии печати	31
1.2.7. Вызванные потенциалы при печати	32
1.2.8. Спектральные вызванные потенциалы при печати.....	34
1.2.9. Анализ фоновой ЭЭГ при печати	35
1.3. Резюме.....	35
1.3.1. Исполнительный контроль.....	36
1.3.2. Когнитивная гибкость.....	37
1.3.3. Рабочая память.....	38
Глава 2. Методы исследования.....	39
2.1 Описание исследования.....	41
2.2. Поведенческие методы	43
2.2.1. Исследование исполнительных функций. BRIEF-2	43
2.2.2. Исследование исполнительных функций интеллектуального развития. UNIT-2....	45
Символическая память	46
Несимволический счет	46
Рассуждение по аналогии.....	47
Пространственная память	48
Числовые ряды	49

Дизайн кубиков.....	49
2.3. Психофизиологические методы.....	50
2.3.1. Копирование предложений.....	51
2.3.2 Формулирование предложений.....	52
2.4. Предварительная обработка данных.....	54
2.5. Математико-статистические методы обработки данных.....	55
Глава 3. Результаты.....	57
3.1 Описательная статистика.....	57
3.2. Результаты корреляционного анализа методик BRIEF-2 и UNIT-2.....	58
3.3. Результаты поведенческих показателей в процессе печати на компьютере.....	59
3.4. Результаты кластерного анализа.....	61
3.5. Результаты эксперимента по копированию предложений.....	62
3.6. Результаты эксперимента по формулированию предложений.....	67
3.7. Сравнительный анализ двух экспериментов.....	72
3.8. Обсуждение полученных результатов.....	75
Выводы.....	80
Заключение.....	82
Список работ, опубликованных по результатам диссертационного исследования.....	84
Список литературы.....	85
Приложение 3. Стимульный материал для ЭЭГ эксперимента.....	102
Приложение 4. Стимульный материал (слова) для ЭЭГ эксперимента «Формулирование предложений».....	103
Приложение 5. Стимульный материал (примеры изображений) для ЭЭГ эксперимента «Формулирование предложений».....	104
Приложение 6. Форма опросника BRIEF-2.....	105

Введение

Исследование проведено в Санкт-Петербургском Государственном Университете в Лаборатории междисциплинарных исследований развития человека при поддержке гранта РФФИ от 13.09.2020 № 20–313–90046\20, руководитель Григоренко Е. Л., которая являлась руководителем аспирантуры до момента прекращения ее трудовых отношений с СПбГУ 2022 году. Диссертационное исследование направлено на изучение исполнительных функций при печати на компьютере.

Письменная речь – это форма речи, связанная с выражением слов с помощью графических обозначений. Письменная речь произвольна, поскольку предполагает анализ и синтез как с грамматической, так и с фонетической и синтаксической точек зрения. По мере развития компьютерных технологий письменная речь становится все более распространенной, а в некоторых профессиях может практически полностью заменить устную речь. Так дети, начиная с 6 лет и ранее, могут печатать на планшетах или телефонах поисковые запросы для детских каналов [102], а пожилые люди начинают осваивать новые методы связи и общаются в социальных сетях [102]. Широкое распространение и использование клавиатур повысило навык автоматизированной печати у обычных пользователей до уровня опытных стенографисток [123]. Таким образом, в наши дни становятся актуальными исследования письменной речи при печати на компьютере и альтернативных устройствах. Их результаты могут найти применение в различных практических областях: начиная от клинической диагностики речевых или когнитивных нарушений и заканчивая разработкой нейроинтерфейсов — устройств, помогающих респондентам управлять компьютерными программами без участия мышечной активности [68; 108].

Большинство работ, посвященных психофизиологии печати, можно разделить на три группы. Во-первых, они отвечают на вопрос, как взаимосвязаны центральные и периферические отделы нервной системы при печати.

Исследования в данной области направлены на разработку различных теоретических и математических моделей печати [118]. Второй блок исследований включает в себя работы, изучающие ингибирующие и активационные процессы в мозге при различных способах печати [58]. Третьим блоком исследований, наиболее часто встречающимся в литературе, является изучение и разработка нетрадиционных способов печати, например, нейроинтерфейсы, печать на сенсорной клавиатуре или печать с помощью датчиков в ротовой полости [118].

Учитывая распространенность навыка печати в современном мире, изучение данного феномена может дать ценную информацию об уровнях иерархической работы нейрофизиологических систем при формировании навыков и сознательной регуляции деятельности, т.е. об исполнительном контроле деятельности [93]. В этом и заключается **актуальность** исследования. Сравнительно недавний теоретический обзор современных исследований по исполнительным функциям [4] иллюстрирует, что несмотря на обширный блок исследований, проведенных на выборках детей младшего и среднего школьного возраста, а также на пожилых людях, исследований периода молодости и средней взрослости крайне ограниченное количество.

Предметом данного исследования являются исполнительные функции: процессы функционирования рабочей памяти, исполнительного контроля, а также процессы переключения и торможения.

Объектом исследования являются нейрофизиологические маркеры исполнительных функций при печати.

Целью данного исследования является определить нейрофизиологические корреляты исполнительных функций при печати.

Для реализации данной цели нами были поставлены следующие **задачи**:

1. Определить структуру взаимосвязей поведенческих

показателей исполнительных функций измеренных психологическими методиками.

2. Определить, какие поведенческие характеристики печати (например, скорость, точность, количество ошибок) могут выступать дополнительным фактором в моделях исполнительных функций при печати.

3. Оценить вклад уровня развития исполнительных функций в поведенческие характеристики печати на компьютере.

4. Оценить вклад уровня развития рабочей памяти, торможения и переключения внимания в особенности функционального состояния головного мозга, выражающееся в спектральных характеристиках электрической активности при печати припоминаемого текста.

5. Оценить вклад уровня развития исполнительных функций в процессе формулирования предложений в особенности функционального состояния головного мозга, выражающегося в спектральных характеристиках электрической активности.

6. Сравнить функциональное состояние головного мозга, выражающееся в спектральных характеристиках в процессе копирования и формулирования предложений.

Исходя из вышеописанного можно сформулировать следующую гипотезу исследования: существует модель, которая может наиболее эффективно описать дисперсию активации мощностей альфа, бета и тета ритмов при печати на компьютере через уровень исполнительных функций, память и выраженность тормозных процессов, измеренных психологическими методиками.

В данном исследовании используются две методики для изучения уровня развития исполнительных функций респондента: самоопросник «Краткая шкала исполнительных функций» (BRIEF, Behavior Rating Inventory of Executive Function) (BRIEF; [48]) и универсальный невербальный тест интеллекта (UNIT-2,

Universal Nonverbal Intelligence Test, Second Edition, [22]. Такой выбор опосредован тем, что в литературе рекомендовано оценивать исполнительные функции комбинацией опросников и методик [34]. Также, следу Также в исследовании проводилось два психофизиологических эксперимента, направленных на копирование и формулирование предложений. В процессе экспериментов регистрировалась электроэнцефалограмма (ЭЭГ).

Новизна исследования состоит в изучении непосредственной динамики психофизиологических процессов, отражающих работу иерархической системы исполнительных функций при печати. Такой подход не просматривается в списке доступных источников. Иерархическая система взаимодействия состоит из отдельных элементов, которые функционируют в отношении один–ко–многим [93]. Тем не менее, процессы когнитивной обработки в данной иерархии могут не носить иерархический характер, а выполняться параллельно [64]. Например, при печати механизмы формулирования предложения и набора слов могут выполняться в одно время, поскольку эти действия задействуют разные психические процессы и области головного мозга. Соответственно, данный вопрос требует более углубленного изучения с точки зрения психофизиологии печати.

Практическая и теоретическая значимость данного исследования состоит в том, что свободная печать может быть повсеместно применена как в диагностике различного рода речевых и моторных нарушений, так и в развитии современных технологий, например, нейроинтерфейсов. Согласно исследованиям, в процесс печати большой вклад вносят ИФ, и важным шагом на пути их исследования будет разработка специфических экспериментов по их изучению, включающих в себя дополнительную оценку ИФ с помощью методик и опросников. В настоящее время достаточно много литературы посвящено нейроинтерфейсам. В подобных исследованиях изучается нейрональная активность при различных способах ввода информации (печать на сенсорной панели, с помощью клавиатуры и т.д.). Чаще всего участникам

предлагается копировать заданный текст или формулировать отдельные предложения. Нами не было обнаружено исследований в области нейроинтерфейсов, в которых использовалась свободная печать. Поскольку в повседневной жизни чаще всего встречается свободная речь, так важно рассматривать ее особенности в процессе разработки новейших технологий, таких как нейроинтерфейсы, а также в задачах диагностики.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием статистических методов (в т. ч. применением поправок на множественные сравнения) и тщательным контролем факторов. Мы использовали следующие методы контроля переменных: 1) случайное распределение участников по группам; 2) рандомизация предъявления стимулов внутри каждого из экспериментов; 3) 4) автоматизация предъявления стимульного материала и регистрации измеряемых показателей.

Результаты экспериментов обсуждались на следующих научных конференциях:

- Дарья Момотенко с докладом «Психофизиология исполнительных функций в процессе печати на компьютере» на Всероссийском Форуме Психологов России, 28-30 сентября, 2022 года

- Дарья Момотенко с онлайн-докладом «Working memory during typing: EEG study» на международной конференции «Neurowissenschaftliche Nachwuchskonferenz» в 2021 году

- Дарья Момотенко с онлайн-докладом «Predicatory capacity of beta activity during typing: assessing the level of language development» на 20-ом Мировом Конгрессе по Психофизиологии (20th World Congress of Psychophysiology) в 2021.

Подводя итог, можно сказать, что печать является примером многоуровневой функциональной когнитивной деятельности, которая затрагивает комплекс психических процессов, включающих в себя ИФ, т.е. исполнительный контроль, рабочую память и когнитивную гибкость.

Соответственно, исследование печати может стать одним из способов изучения данных феноменов. Особенное внимание стоит уделить изучению психофизиологии печати, поскольку подобные работы могут дать ценные сведения о реализации иерархических систем в головном мозге.

Положения, выносимые на защиту

1. Чем более высокий уровень развития навыка торможения нервной системы, и, как следствие, более эффективна работа тормозных процессов, тем выше точность напечатанного предложения.
2. При копировании припоминаемого предложения наблюдается активация альфа, бета и тета ритмов. Бета ритм иллюстрирует процесс обработки информации и выдачи моторных команд, тогда как альфа и тета ритм показывают баланс тормозных и активационных процессов. Во взаимодействии данных процессов при печати, можно наблюдать модель моторной рабочей памяти.
3. При формировании автоматизированного навыка печати у участников с высоким исполнительным контролем освобождаются ресурсы для реализации других когнитивных задач, тем самым расширяется ресурсоемкой рабочей памяти и снижается когнитивная нагрузка. Это демонстрируется через увеличение альфа ритма у участников с высокими исполнительными функциями, и увеличение бета ритма у участников с низкими.
4. Разница в бета ритме может говорить, что копирование сложных, бессмысленных предложений, которые требуют большой ресурсной нагрузки, согласно теории рабочей памяти, в меньшей степени активируют бета ритмику, возникающую в процессе решения сложных задач. Согласно имеющимся данным, появление тета активности в фронтально–медиальной области при копировании текста свидетельствует об общем повышении когнитивной нагрузки в процессе печати.

Глава 1. Психофизиология исполнительных функций в процессе печати на компьютере

1.1. Исполнительные функции: определение и классификация

Одним из основоположников изучения произвольной регуляции целенаправленного поведения является А. Р. Лурия (1970) [5], который в своих работах занимался исследованиями функциональных нарушений блока контроля и программирования мозга. Данный блок объединяет в себе как моторную составляющую программирования и реализации движения, так и его регуляторный компонент, отвечающий за корректность выполненного действия.

В настоящий момент в русской литературе существуют несколько переводов термина “исполнительные функции”, который пришел из зарубежной литературы. В частности: «исполнительные функции» (Алексеев, Рупчев, 2010; Виленская, 2019, Грачева и др., 2008; Николаева, Вергунов, 2016; Пушина, 2014; Чухутова и др., 2011), «управляющие функции» (Алфимова и др., 2009; Величковский, 2009; Мачинская, 2015; Семенова, Кошельков, 2009) и регуляторные функции (Веракса, Гаврилова, Бухаленкова, 2019).

Исполнительные функции (ИФ) – это набор когнитивных способностей, которые обеспечивают саморегуляцию поведения, а также контроль когнитивных процессов, управляющих другими когнитивными, эмоциональными и моторными процессами [4]. Соответственно, ИФ активируются, когда автоматизированные действия перестают быть эффективными, или появляются ошибки в привычной деятельности. В исследовательской литературе исполнительные функции (ИФ) описываются как способность удерживать информацию в рабочей памяти и подавлять неосознанные реакции на внешнюю стимуляцию [2]. ИФ являются основой для волевого исполнительного контроля поведения [12]; [27], а также задействованы в процессах эмоциональной регуляции, в планировании и принятии продуманных решений [78].

На настоящий момент существует большое количество исследований, направленных на изучение исполнительных функций. Остро стоит вопрос об определении, функциях, локализации и способе измерения данного феномена. Тем не менее, исходя из анализа литературы можно определить некоторые основные характеристики и функциональные компоненты исполнительных функций [27]; [78]. Также следует обратить внимание на то, какие способности составляют исполнительные функции, какие процессы в них включаются [99]. Эта тема в том числе привлекательна для исследователей, потому как роль ИФ в процессе когнитивного (или исполнительного) контроля и регуляции поведения определена, но вопрос о концептуализации и операционализации данного процесса остается открытым [12]. Исполнительные функции затрагивают когнитивные процессы более высокого порядка, которые участвуют в планировании и предвосхищении событий. Когнитивные навыки респондента, которые включены в эту структуру, сопутствуют регуляции эмоций, принятию продуманных решений и планированию собственных действий [12]; [78].

В современных российских исследованиях исполнительные функции, также определяются как комплекс когнитивных функций, которые направлены на целенаправленное и адаптивное поведение. В свою очередь, существует ряд исследований, которые иллюстрируют важность развития исполнительных функций в подростковом возрасте, в связи с сензитивным периодом для формирования префронтальной коры [3]. Например, для детей дошкольного возраста авторы предлагают разработку игровых методов тренировки исполнительных функций в связи с тем, что они могут затрагивать как моторный, так и когнитивный компонент формирования навыка регулирования поведения.

Исполнительные функции задействованы в процессах получения и обработки информации, а также реализации действий. В настоящий момент существует три наиболее популярные теории, которые описывают процесс функционирования исполнительных функций, которые не противоречат друг другу. Это теории сетей внимания М. И. Познера и С. Е. Петерсона (1990),

трехмерная модель А. Мияке [81] и трехкомпонентная модель, предложенная А. Даймондом [41]

1.1.1 Классификация исполнительных функций

Точкой отсчета современных исследований исполнительных функций послужила классификация сетей внимания М. И. Познера и С. Е. Петерсона (1990). Сети внимания – это сеть регионов головного мозга, которые вовлечены в процессы регулирования и контроля различных видов внимания. Согласно этой теории, системы внимания анатомически отделены от систем обработки информации, также, как и сенсорная и моторная системы. Более того, сети внимания возможно локализовать в головном мозге, с учетом того, какие когнитивные функции включены в процесс активации данных сетей. Согласно авторам, суммарно можно наблюдать три сети: (1) ориентация на сенсорный стимул, (2) осознанная обработка зафиксированного сигнала и (3) удержание концентрации, то есть стадия готовности к действию.

Например, сеть ориентации включает в себя процессы переключения внимания и локализуется, согласно авторам, в задней теменной доле и частично, в таламусе. Это было подтверждено наблюдением за обезьянами, которым делали химические инъекции в соответствующие области, а также депрессией соответствующих областей у пациентов с нарушениями процессов переключения внимания [90]. В первую очередь, авторы связывали данный эффект со зрительным распознаванием и задействованием зрительного анализатора. Тогда как в последующем обзоре [90] авторы демонстрируют, что в процесс обнаружения стимула вовлечен в основном общий набор областей правого полушария и таламуса [111] в одних исследованиях, и, наоборот, механизмы левого полушария головного мозга в других [45]. Данный феномен может отражать различия между полушариями, в которых латеральные процессы часто включают более медленные эффекты (тонические), в то время как механизмы левого полушария чаще задействованы в более высоких временных (фазических) или пространственных частотах [90].

Система фиксирования стимула - в последствии, это сеть исполнительного внимания [90].), отвечала за процесс распознавания стимула и его обработки. Она включала в себя мониторинг окружающих процессов, выделение определенного стимула, который рассматривался как целевой. Авторы также отмечают, что для более точной дифференциации различных стимулов требуется отдельная анатомическая структура, которая, может быть расположена в передней поясной извилине и дорсальной префронтальной коре. Что также подтверждается другими исследованиями [51] Данные структуры также включают в себя языковую обработку, что позволяет сделать отдельный акцент на системе исполнительного контроля, которая будет рассмотрена более подробно ниже.

Последней сетью внимания в данной классификации выступает система оповещения, которая позволяет удерживать внимание на более приоритетном стимуле, и обеспечивать быстрое реагирование. Она отвечает за задачи семантической классификации. То есть, в данной системе происходит как накопление информации, так и поддержание состояния постоянной готовности. Большая часть исследований апеллирует к правому полушарию, срединной лобной коре, что также демонстрировалось в исследованиях на пациентах с нарушением данной функции. Тем не менее, следует отметить, что все три системы крайне плотно взаимосвязаны между собой. В более поздней классификации [90] данную сеть внимания также связывали с функциями рабочей памяти.

1.1. 2. Модель исполнительных функций Мияке

Зачастую в литературе упоминается, классификация ИФ по трехмерной модели А. Мияке [81]. Согласно этой модели, весь блок исполнительных функций локализован во фронтальной лобной доле. Исторически изучение и принцип организации исполнительных функций строился на исследовании пациентов с нарушениями когнитивных функций или травмами головного мозга во фронтальных областях. Зачастую для диагностики нарушений использовались

методики Висконсинский тест сортировки карточек (Wisconsin Card Sorting Test (WCST), [109]) или Башни Лондона (Tower of London task,). Все вышеупомянутые методы также определяют уровень развития флюидного интеллекта, что, с одной стороны демонстрирует взаимодействие между уровнем развития интеллекта и исполнительных функций, а с другой, показывает различия и сложности в диагностике ИФ. Результаты данных методик варьировались в зависимости от индивидуальных различий, а значит требовали факторизации на домены. Это и послужило шагом к разработке отдельной классификации ИФ, которая была проверена эмпирически.

Модель А. Мияке [81] включает в себя три блока, такие как как торможение, обновление и переключение [12], [99]. Блок торможения включает в себя исполнительный контроль, который рассматривается как целенаправленная и сознательная способность контролировать автоматизированные или импульсивные мысли и действия [12]. Эта функция касается способности человека сознательно тормозить доминирующие, автоматические реакции, когда это необходимо. Прототипом задачи на ингибирование является задача Струпа [55], в которой необходимо подавить или преодолеть тенденцию к более доминирующей или автоматической реакции (например, назвать слово, написанное не соответствующим цветом). Этот тип торможения обычно связывают с лобными долями [81]. Учитывая, что термин торможение обычно используется для описания широкого спектра функций, важно отметить, что используемая здесь концепция торможения ограничивается преднамеренным, контролируемым подавлением автоматизированных ответов. Таким образом, под торможением не подразумевается "реактивное торможение" или снижение активации в результате отрицательного веса связи. Задачи, используемые для проверки способности к торможению, - это задача Струпа [110], задача антисаккады [53] и задача стоп-сигнала [71] и задача "go - no go" [44]. Все они требуют сознательной остановки относительно автоматической реакции, хотя конкретная реакция, которую необходимо затормозить, в разных задачах разная.

Второй блок – это блок переключения, или, как определяют некоторые исследователи – это блок процесса когнитивной гибкости [41], который демонстрирует способность человека рассматривать различные точки зрения, вставать на место другого человека, целенаправленно переключаться между задачами, мыслями и действиями [12]. Также этот блок включает в себя способность к намеренному переключению, фокусированию внимания [41], процессам целенаправленности и избирательности внимания. Если рассматривать эту функцию более детально - то можно сказать, что это отказ от нерелевантного набора задач, с последующим переключением на релевантные [81], или другими словами, проактивная интерференция негативного прайминга. В вышеописанной модели Познера и Петерсена [90] также фигурировало зрительное внимание, сосредоточенное в теменной области. В данном случае, переключение между задачами связано с ментальными усилиями и когнитивной нагрузкой, которая регулируется передней поясной областью, то есть, скорее отражает ориентационную сеть внимания. Задачи, которые использовали авторы для определения переключения - это задачи плюс-минус, число- буква и локальное-глобальное.

Третий блок – блок обновления, зачастую рассматривается через функционирование рабочей памяти. Рабочая память отвечает за хранение и актуальную переработку информации. Она поддерживается процессами, мониторинга, кодирования и сохранения информации об актуальной задаче , а также обработкой уже хранящейся информации, которая имеет непосредственное отношение к данной задаче. Важно отметить, что рабочая память в первую очередь отвечает за активное манипулирование информацией [81]. Также функцией рабочей памяти является фильтрация необходимой информации в конкретной ситуации [12]. Локализация рабочей памяти, согласно модели А. Мияке, обычно ассоциируется с дорсолатеральной префронтальной корой, тогда как функции, отвечающие за пассивное хранение и удержание информации скорее локализованы в премоторными областями лобной коры. Задачи, которые могут измерять рабочую память - это задачи на отслеживание, N-back, запоминание

последовательностей и мониторинг фона.

Рассчитанная исследователями модель включала в себя результаты методик, которые предварительно были распределены по трем блокам исполнительных функций и показала статистически значимые различия между блоками. Тем не менее, авторы заявляют, что три данных функции (переключение, обновление и торможение) не являются полностью независимыми, то есть, они показывают и внутреннюю корреляцию, но, совместно, достаточно полно описывают исполнительные функции в целом. Коллеги предполагают две возможных причины наличия данной корреляции. Во-первых, это может быть обусловлено тем, что их объединяет задача, связанная с контролем обработки информации. Так как в этот процесс включены все три функции. Во-вторых, все три исполнительные функции для своей нормальной работы задействуют процессы торможения. Например, функция обновления может требовать игнорирования нерелевантной входящей информации, а также подавления уже неактуальной информации. Аналогично, функция переключения может потребовать деактивации или подавления нерелевантной информации, для переключения на релевантную. Таким образом, все три целевые функции могут иметь общий тормозной процесс. Авторы подчеркивают, что данный вопрос требует дальнейших исследований.

Более полно исполнительные функции описал в своей работе А. Даймонд (2013), выделив три основных: исполнительный контроль, рабочая память и когнитивная гибкость. Остановимся на каждой из них подробнее.

1.1.2 Определение рабочей памяти

Одним из основных компонентов ИФ является рабочая память, которая включает в себя процессы удержания и обработки информации в уме (или, другими словами, работу с информацией, которая больше не присутствует в восприятии; [11], [107]). Рабочая память – это комплекс психических процессов, посредством которых ограниченный объем информации удерживается в

состоянии временной доступности для обслуживания когнитивной деятельности [36]; [2]. Рабочую память можно разделить по содержанию на вербальную и визуально–пространственную рабочую память [41]. Рабочая память участвует в процессах восприятия, припоминания обработки, продуцирования и осмысления информации, поскольку это требует удержания в памяти того, что происходило ранее и соотнесения этого с актуальной повесткой. Таким образом, она участвует в понимании смысла устной и письменной речи, выполнении математических вычислений, упорядочивании предметов, планировании, рассмотрении альтернатив, а также анализа и синтеза информации. Рабочая память также участвует в мышлении, при нахождении связей между объектами и событиями, вычленении элементов изобщей картины, а также при решении творческих задач.

Самые распространенные методы изучения рабочей памяти - это задачи на повторение чисел или слов в обратном или измененном порядке, задачи на нахождение наиболее эффективного маршрута, тесты зрительно-пространственной памяти (например, UNIT-2), задача N-Back в различных модальностях.

В настоящий момент все еще отсутствует всеобъемлющая классификация памяти [28], тем не менее, наиболее используемая сейчас классификация выделяет долговременную, кратковременную и рабочую память [38]. Принципиальное различие в долговременной и кратковременной памяти заключается в сроке хранения закодированной информации. Кроме того, в долговременной памяти хранится большой запас знаний о прошлом опыте каждого индивида [38], тогда как в кратковременной памяти информация хранится непродолжительный промежуток времени: удержание последовательностей чисел или слов отражает этот компонент. Таким образом, рабочую память можно определять, как имеющую сходство с кратковременной, но обладающей функцией обработки и манипулирования информацией [9], [10].

1.1.4. Модели рабочей памяти

Наиболее известная многокомпонентная модель рабочей памяти [28], утверждает, что рабочая память представляет собой многокомпонентную систему, которая обеспечивает хранение и обработку информации с целью оптимизации когнитивной деятельности [11]. Данная модель включает в себя три компонента: фонологическая петля (вербальная рабочая память), визуально–пространственный компонент (визуально–пространственная рабочая память) и центральный исполнительный контроль. Более поздний ее вариант [8] включает также «эпизодический буфер», который рассматривается как системы внутреннего хранения, которая перераспределяет потоки сенсорной информации. Если рассматривать механизм функционирования модели, можно говорить, что центральный исполнительный контроль обеспечивает управление обработкой и хранением информации, которая затем распределяется по трем оставшимся компонентам: вербальному, невербальному компонентам и эпизодическому буферу.

Альтернативная модель рабочей памяти, предложенная Коуэном [37], которая в настоящий момент также является актуальной, рассматривает рабочую память как компонент кратковременного хранения информации, длительность и функциональность которого зависят от емкости рабочей памяти, а также уровня развития внимания и исполнительных функций, которые участвуют в обработке информации. В данной модели взаимодействие между кратковременной, долговременной и рабочей памятью построено иерархически, и рабочая память является частью «активированной» долговременной памяти.

1.1.5. Нейрофизиология рабочей памяти.

Большинство исследователей согласны, нейрофизиологическая основа ИФ связана с когнитивными процессами, происходящими в префронтальной коре [67]. Исследования нейробиологии рабочей памяти продемонстрировали, что вербальная и акустическая информация активирует области Брока и Вернике, в

то время как визуально– пространственная информация представлена в правом полушарии [11]. Тем не менее, современные исследования определяют топографию рабочей памяти в лобно–теменной доле (дорсально–префронтальная кора, теменная кора и поясная извилина) [28] или же говорят об общей нейросетевой активации.

К примеру, дорсолатеральная префронтальная кора зачастую задействуется в задачах на исполнительный контроль [60], интеграцию информации или принятие решений [56], обработки полученной информации [98] или процессов обновления полученной информации [83]. В свою очередь, поясная извилина отвечает за процессы переключения внимания, который также задействован в корректировке и адаптации полученной информации [88]. Теменная область может рассматриваться как область хранения и обработки сенсорной и перцептивной информации [28].

Тем не менее, большинство современных исследователей придерживаются точки зрения о том, что процессы активации рабочей памяти включают в себя активацию нейросетей по всему головному мозгу, то есть, функциональную активацию мозга в целом [28]. Тем не менее, в нейросетевых исследованиях также были показаны двунаправленные эндогенные связи между вышеуказанными областями в лобно–теменной коре [46]; [77].

Если обращаться к более глубоким структурам, то исследования демонстрируют, что в процессах рабочей памяти также задействованы базальные ганглии [82], медиадорсальный таламус [19], средний мозг [83], а также мозжечок [124], что также иллюстрирует работу всего мозга в процессе активации рабочей памяти.

1.1.6. Определение исполнительного контроля

Исполнительный (сдерживающий, тормозящий или когнитивный) контроль рассматривается в литературе как способность контролировать и регулировать свое внимание, поведение, мысли и эмоции, с целью преодоления

внутренней интенции или внешней стимуляции, чтобы совершить целенаправленное и осознанное действие [41].

Исполнительный контроль позволяет подавлять внимание к другим стимулам, концентрируя внимания на конкретной задаче. Наиболее иллюстративный пример работы этой функции можно наблюдать при эффекте «коктейльной вечеринки», когда респондент осознанно фокусирует внимание только на одном стимуле, игнорируя все прочие. Зачастую исполнительный контроль измеряется через точность и скорость реакции в задачах на множественный выбор. Такими задачами может быть тест Струпа [55], задача «go–no go» [44], задача Саймона [36], [24], задача Фланкера [61] или антисаккадные задачи [18]. Такого рода тесты, требующие ингибирующего (или тормозящего) контроля, отлично иллюстрируют работу исполнительных функций. Они демонстрируют способность фокусироваться на конкретной, наиболее наполненной смысловой задаче, и игнорировать все прочие, побочные стимулы. Так, в задаче Струпа, респондента просят прочесть слово, не обращая внимания на цвет чернил. Если апеллировать к процессам печати, то яркой иллюстрацией данного процесса будет являться корректировка слова, то есть, удаление напечатанного. Респондент должен следить за смысловым содержанием текста, исправляя ошибки в процессе [106]. И, если сам процесс набора клавиш может быть условно автоматизирован, то есть, в данном процессе не будут задействованы высшие психические функции, то исправление ошибок очевидно требует включения механизмов торможения исполнительного контроля [43].

Важно отметить, что исполнительный контроль затрагивает все этапы печати, начиная от формулирования предложений и заканчивая непосредственным набором текста. Когнитивные усилия, которые затрачиваются при письме, зависят от уровня навыка пользователя. При написании текста от руки более опытные авторы затрачивали меньше усилий [30]; [95]. Таким образом, автоматизация почерка у взрослых позволяет им активировать процессы письма высокого уровня (планирование, обработка и редакция написанного) одновременно с письмом ([17]). Тот же самый принцип сохраняется и при печати

на клавиатуре [58].

Если говорить о нейрофизиологии исполнительного контроля, префронтальные области коры выполняют в мозге важную управляющую функцию. Префронтальная кора отвечает за высокоорганизованное целенаправленное поведение [2], частью которого в том числе является иерархический исполнительный контроль. Процессы целеполагания, планирования, мониторинга и оценки результатов включены требуют активации исполнительного контроля на каждом из этапов. Исследования [26]; [30]; [117] показывают, что при активации исполнительного контроля можно наблюдать бета активность в дорсолатеральной префронтальной коре, в цингулярной коре. В случае необходимости пространственного поиска – в теменной коре [55].

1.1.7. Определение когнитивной гибкости

Когнитивная гибкость также является одной из основных исполнительных функций, которая появляется гораздо позже в процессе онтогенеза [41]. Ее основными областями проявления является способность смотреть на проблему с альтернативной точки зрения. Это может быть проявляться как внутри одного индивида, то есть рассмотрение проблемы с другой стороны, нестандартные подходы к решению задачи, так и межличностно, то есть, как возможность принять чужую точку зрения. Следует отметить, что в процессах когнитивной гибкости задействованы и рабочая память, и торможение, как более ранние эволюционные процессы.

Когнитивная гибкость (когнитивное переключение, переключение внимания) является способностью индивида переключаться между двумя или более различными задачами, легко менять перспективы в пространстве (способность увидеть плоское изображение глубоким) или межличностном общении (умение посмотреть на проблему с другой точки зрения) [35]. Когнитивная гибкость является важнейшей способностью оценивать и адаптировать текущие психологические операции и надлежащим образом

координировать распределение когнитивных процессов в динамичных условиях принятия решений [66].

Другим аспектом когнитивной гибкости является способность адаптироваться к изменяющимся обстоятельствам внешней среды, корректировать свое поведение, в зависимости от приоритетов ситуации, а также способность пользоваться новыми, неожиданными возможностями. Когнитивная гибкость предполагает креативные подходы к решению задач, а также высокую способность к переключению, которая опосредована быстрой сменой фокуса деятельности [66]. Следует сделать особый акцент на том, что когнитивная гибкость участвует в определении того, какие конкретно когнитивные ресурсы требуются для решения поставленной задачи. Во-первых, человек, принимающий решение, должен быть в состоянии описать тип проблемы, с которой он столкнулся, что требует идентификации различных элементов, взглядов и перспектив ситуации. Во-вторых, ему необходимо рассмотреть различные возможности, что требует активного размышления над выявленными элементами, чтобы найти возможные связи и оценить их уместность. И, наконец, можно использовать когнитивную гибкость для переключения между этими процессами при решении задач [66]. Также когнитивная гибкость задействована в понимании собственных ограничений при принятии решений, основанных на фактах [126].

Когнитивную гибкость в психологии обычно исследуют при помощи разного типа парадигм на переключение внимания между задачами: тест нейросетей внимания (Attention Network Test – ANT), тест Струпа, парадигма переключения задач или парадигма двойных задач и т. д. Эти классические парадигмы когнитивной гибкости требуют переключения или координации когнитивных процессов для успешного выполнения поставленной задачи. Показатели в таких парадигмах оценивают способность координировать процессы внимания между двумя или более параллельными или чередующимися задачами. В таких задачах измеряется «стоимость переключения» — увеличение

времени реакции при переключениями между задачами по сравнению с ситуацией без переключения.

Также методами измерения когнитивной гибкости, являются задачи на вербальную, семантическую беглость. Такого рода задачи используются в тестах на креативность. Например, участнику необходимо назвать неординарные способы использования предмета (карандаша), придумать предложение, каждое слово в котором будет начинаться на буквы ПРАИ, назвать максимальное количество характеристик предмета за ограниченное время. Важным аспектом задач на когнитивную гибкость является то, что чем больше времени участник размышляет над задачей, тем более неординарные решения могут быть представлены. Также в этот блок задач входят задачи на визуальную беглость. То есть, участник должен нарисовать максимальное количество объектов, в которых есть круг или найти предметы в зашумленной картинке [41].

Существуют также стандартизированные методики изучения когнитивной гибкости. Например, уже упомянутый Висконсинский тест на сортировку карточек [112], который направлен на категоризацию карточек по определенному признаку. Также в пример можно привести дуальные задачи на принятие решений, которые с одной стороны отслеживают процессы переключения внимания (задачи на форму, цвет или местоположение фигуры). При этом, задача, которую выполняет участник изменяется с каждым следующим предъявлением, и у каждого стимула одновременно присутствует несколько свойств, которые отвечают как предыдущему, так и следующему заданию [23]. Важно отметить, что принципиальным отличием задач на когнитивную гибкость является содержательный компонент. То есть, участнику предлагается некоторый новый набор элементов, или принципиально иное правило по их отбору. Это позволяет измерить скорость принятия решения, а не емкость рабочей памяти, необходимой для его реализации.

Такого рода тест был разработан Зелазо и коллегами (2003), ключевым отличием которого было только одно переключение между задачами. То есть,

стимулы были также бивалентны, но сортировка проводилась только по одному закону. Этот тест гораздо более иллюстративен для детей дошкольного возраста, потому как детям сложнее запоминать инструкцию при высокой скорости переключения задач. Было предложено следующее объяснение этого феномена. В связи с тем, что у детей активация в дорсолатеральной префронтальной коре сначала определяется правилом предыдущего испытания [119], детям сложно преодолевать “инерцию внимания”, способность фокусировать внимание на том, что ранее было не актуальным, что связано с последующим торможением реакции. Более того, с возрастом также можно наблюдать подобного вида инерцию, которая выражается в трудности переключения между задачами [41]. Вне зависимости от сложности задачи, при добавлении дополнительного стимула, скорость ее решения увеличивается [23]. Это проверено на задачах на сортировку, неоднозначных фигурах или задаче Фланкера. Когнитивная гибкость показывает, насколько участник способен переключиться между ментальными задачами различной направленности и преодолеть инерционную тенденцию.

Некоторые авторы [23] описывают когнитивную гибкость как мета-контроль исполнительных функций. Если раскрыть эту идею, то когнитивная гибкость рассматривается как процесс более высокого порядка, а осознанное переключение между задачами способствует адаптивному поведению. Большинство исследований показывают, что префронтальная кора активно задействована в процессах когнитивной гибкости, в частности, при дифференциации ресурсов внимания при усвоении определенного сигнала, то есть, переключения внимания на стимул [97]. Тем не менее, исследования показывают, что таламические структуры также глубоко вовлекаются в данные процессы, что говорит об иерархической структуре когнитивной гибкости. Медиодорсальный таламус считывает предварительные “подсказки” из внешней среды и регулирует префронтальное переключение репрезентаций, что обеспечивает вычислительную основу для вовлечения таламуса в когнитивную гибкость [97]. Другими словами, в экспериментах на мышах была подтверждена иерархическая структура когнитивной гибкости. Таламические структуры

избирательны к содержанию подсказок, что обеспечивает контекстуальное представление поступившего сигнала для префронтальной коры.

Метаанализ, посвященный нейрофизиологии исполнительных функций [85] продемонстрировал, что в процессах когнитивной гибкости задействованы префронтальная, премоторная, теменная, нижняя височная, затылочная кора, а также подкорковые структуры, например, таламус. Остановившись подробнее, префронтальная кора включена в процессы переключения между задачами, а также отслеживания контекста для реализации процессов торможения. Поскольку исследования показывают, что вентралатеральная префронтальная кора активируется, как при тормозном контроле, так и в задачах на когнитивную гибкость, которые предполагают переключение между задачами. Соответственно, можно предполагать, что либо происходит обновление набора ответов на правила задачи, либо торможение предыдущего набора ответов.

1.2. Теоретические основы печати

Печать – это комплексный процесс, который задействует как когнитивные, так и моторные функции, анализ только речевой продукции недостаточен для формирования единой теории развития и функционирования речевых навыков при письме.

В когнитивных исследованиях печать чаще всего изучается посредством оценки когнитивной нагрузки, связанной с различными условиями набора текста. Рассмотрим исследование [26], в котором респонденты, не имевшие возможности исправить ошибку в тексте, были более успешны: их скорость печати была выше, и они совершали меньше ошибок. Существует несколько условий, позволяющих снизить когнитивную нагрузку при печати и сделать ее автоматизированной: печать без исправления ошибок [26], знакомая клавиатура [121], навык слепой или полуслепой печати [93]. Когда печать перестает быть автоматизированной, появляется дополнительная когнитивная нагрузка. Процесс речевой продукции

усложняется не только двигательными усилиями, необходимыми для набора слов, но и когнитивными усилиями по поиску определенных букв на клавиатуре. Эти когнитивные процессы задействуют пространственное мышление, исполнительное внимание и рабочую память [47]; [64]; [93]. При автоматизированной печати когнитивные функции могут быть не задействованы, а набор текста будет осуществляться за счет механической памяти [118]. Таким образом иерархия процессов формулировки и реализации текста при печати идет автономно, и деятельность становится продуктивнее. Несмотря на признание роли рабочей памяти при наборе текста, в современных когнитивных исследованиях не представлено комплексное изучение ИФ в процессе печати [6].

Один из главных вопросов, возникающий в большинстве исследований, связан с ролью центральной и периферической нервной системы при печати.

Ряд исследователей считает, что процесс печати происходит поэтапно, а значит центральные и периферические отделы функционируют автономно, последовательно передавая друг другу контроль над процессом печати. Другие авторы говорят о существовании иерархической взаимосвязи между ними, в которой центральные отделы корректируют работу периферических систем на всем протяжении набора текста [16]; [54].

1.2.1. Модель двух петель обратной связи при печати

Человеческая деятельность состоит из множества программ последовательностей действий, которые функционируют по законам иерархии [92]; [123]. Параллельная обработка информации из окружающей среды и упорядочивание действий являются важными факторами формирования навыков. Чем быстрее и качественнее производится обработка, тем лучше формируется навык [104]. Печать – является одним из таких навыков. Одной из самых популярных психофизиологических моделей печати в настоящий момент является модель двух петель обратной связи ((two feedback loops).), которая иллюстрирует взаимодействие центральных и периферических отделов головного мозга. Эксперименты, построенные на этой модели, отражают работу

различных когнитивных процессов.

Описанные в ней петли обладают специфическими свойствами, касающимися обработки слов [39]. Эта модель основана на принципе иерархического контроля когнитивных процессов при печати [47] и наиболее полно отражает нейрофизиологию печати на компьютере. Согласно данной модели, внешняя петля отвечает за процесс формулирования предложения, а внутренняя – за его непосредственную реализацию при печати. Внешняя петля начинается с понимания или формулирования речи и заканчивается в момент генерации серии слов, которые должны быть напечатаны. Внутренняя петля, в свою очередь, начинается с получения слова, которое требуется напечатать, и заканчивается последовательным нажатием клавиш [39]. Эта теория включает в себя глобальные процессы (формулирование и реализацию), не заостряя внимание на моторике пальцев. Тогда как в более ранних моделях, например, Румельхарта и Нормана [100], большое внимание уделялось моторному компоненту печати. Согласно данной модели, печать – это сложная деятельность, включающая в себя множество последовательных действий, потому как нажатие клавиш управляется определенными моторными программами (*motor schema*) [100]. Они собраны в иерархические схемы, каждая из которых исполняет свою функцию [21]. В частности, при печати задействованы две руки, поэтому необходим контроль за перемещением пальцев, положением плеча и предплечья [100]. Помимо параллельных процессов обработки информации, т.е. планирования движения для каждой клавиши, необходимо объединять их в моторные комбинации для набора целого слова [74]. Комбинирование отдельных движений в паттерны происходит за счет процессов последовательного ингибирования при нажатии клавиш [21]; [94]. При печати слова сначала активируется движение, связанное с набором первой буквы, а все последующие движения ингибируются [86]. После набора первой буквы моторная схема перестраивается, и активным становится движение, связанное со следующей буквой. Таким образом, возникает последовательная конгруэнтная система глобальной активации [100]. Моторным механизмам печати в литературе

уделялось достаточно внимания, и в данный момент они подробно описаны. Однако в настоящее время не существует единой теории, описывающей все этапы печати, начиная от формулирования предложений и заканчивая уровнем моторной реализации движений при печати.

1.2.2. Нейрофизиология печати

Поскольку печать – это зачастую осознанная деятельность, которая требует согласованности действий и некоего контроля над ними, рассмотрим систему, которая была предложена Миллером [80] и до настоящего времени остается актуальной. Он предположил, что процесс печати управляется с помощью ТОТЕ, что расшифровывается как «test, operate, test, exit» (проверка, реализация, проверка, выход). Этот механизм аналогичен процессу прекращения обратного распространения ошибки. Рассмотрим его на примере печати буквы «Й». После постановки цели (напечатать букву Й) выполняется проверка – сличение актуального состояния с желаемым (как далеко от буквы Й находится палец). Если актуальное состояние отличается от желаемого (палец далеко), производится уменьшение разницы между состояниями (палец перемещается). После этого производится еще одно сличение актуального состояния с текущим. Если задача может быть выполнена корректно (палец находится на клавише Й), то цикл завершается. Если задача не может быть выполнена корректно (например, палец вместо Й нажал на Ц), то процесс запускается сначала. В данном примере задача будет изменена, потому что перед тем, как напечатать корректную клавишу Й, необходимо будет стереть некорректную Ц с помощью клавиши удаления (Backspace), что усложняет процесс печати. Если при печати респондент исправляет ошибки, механизм ТОТЕ становится иерархическим – последовательность печати букв изменяется, поскольку в плане печати появляется новая клавиша [106]. Это может иллюстрировать процесс передачи информации из внешней петли во внутреннюю.

1.2.3. Рабочая память в процессе печати

Теоретическая рамка данной теории также согласуется с блоком ресурсных теорий. К примеру, модель, предложенная несколькими исследователями [14], которая говорит о том, что когнитивная нагрузка и объем рабочей памяти, который требуется для реализации задачи, является продуктом процессов переключения и распределения внимания между этими задачами. То есть, чем больше ресурсов внимания есть у индивида, тем больший объем рабочей памяти он может задействовать, выделенные когнитивные ресурсы обеспечивали успешность выполнения данной задачи.

На важный вклад рабочей памяти в процесс печати указывает тот факт, что в моделях письменной речи рабочая память выступает как один из ключевых элементов процесса письма. Рабочая память, в том числе при печати, рассматривается как комплекс психических процессов, посредством которых ограниченный объем информации удерживается в состоянии временной доступности для обслуживания когнитивной деятельности [37]. Задача преобразования данных при печати требует привлечения рабочей памяти как буфера для хранения, обработки и передачи информации. Можно выделить два типа моделей рабочей памяти, в рамках которых описывается процесс письма. Ресурсные модели, согласно описанию Е.Л. Григоренко (2012), разделяют процессы генерации текста, т.е. выбора лексических и синтаксических структур, и процессы транскрипции, т.е. орфографии и написания непосредственно [12]. В этих моделях присутствует концепция распределения ресурсов [30] между психическими процессами, согласно которой более трудная задача сильнее нагружает рабочую память [30]. Тогда как с автоматизированностью процессов печати скорость обработки информации увеличивается. Чем выше навык автоматизированного письма, тем быстрее протекают процессы в рабочей памяти.

Альтернативные компонентные модели [28], описанные выше, предполагают, что в рабочей памяти существуют обособленные домены, ответственные за различные когнитивные процессы. Так, например, процесс

планирования связан с визуальной рабочей памятью, структурирование текста задействует пространственный компонент памяти, а за непосредственное написание, т.е. преобразование текста из устного в письменный, может отвечать фонологическая память.

1.2.4. Исполнительный контроль в процессе печати

Тем не менее, в исследованиях, касающихся исполнительного контроля, показано, что часть активации приходится также на автоматизированные действия, которые не задействуют исполнительный контроль [58]. Стоит отметить, что автоматизированные процессы могут включать в себя контроль в случаях, когда была совершена ошибка, или привычная стратегия была нарушена. Примером такого действия может быть обнаруженная в тексте ошибка (тогда печать процесс печати активирует исполнительный контроль), перелом руки (в таком случае привычные движения необходимо будет восстанавливать) или перекрытие дороги на привычном маршруте (в таком случае возникает необходимость перестройки когнитивной карты). Данные примеры отражают переключение между автоматизированной и осознанной деятельностью. Следует отдельно остановиться на процессах произвольного управления движениями. Иерархический контроль функционирует как система взаимодействия элементов в отношении один–ко–многим [72]. В случае печати это хорошо иллюстрируется на примере последовательного набора буква – слово – словосочетание – предложение – текст. Данная система состоит из самостоятельных элементов, которые организуют иерархию. Тем не менее, процессы когнитивной обработки в данной иерархии могут носить неиерархический характер, а выполняться одновременно [104]. Например, при печати процессы формулирования предложения и печати слова могут выполняться в одно время, потому как эти два процесса задействуют разные психические процессы и области головного мозга. Предложение может быть сформулировано полностью, но процесс моторного ответа не успевает за скоростью формирования предложения.

1.2.6. Способы изучения нейрофизиологии печати

В настоящее время крайне мало исследований, направленных на изучение нейрофизиологии печати [47]; [39]. Принципы работы головного мозга в процессе печати до конца не изучены, и не существует единого понимания природы нейрональных процессов, лежащих в их основе. Также остается открытым вопрос о возможностях применения знаний о нейрофизиологии печати в практике и диагностике. Ниже будут описаны некоторые работы, посвященные данной проблеме.

Существуют электрофизиологические (ЭЭГ) исследования, которые подтверждают активацию ипсилатеральной [26] и контралатеральной [24]; [26]; [47] моторной коры перед нажатием клавиши. Активация ипсилатеральной коры в процессе реализации движения подтверждается и другими физиологическими методами: магнитоэнцефалография [30], транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС) [42]; [123] и функциональная магнитно–резонансная томография [70]. Также было обнаружено, что активность ипсилатеральной моторной коры увеличивается по мере усложнения производимого ответа [47]. Снижение возбудимости ипсилатеральной моторной коры регистрируется с помощью ЭЭГ как положительный компонент, появляющийся до моторного ответа и рассматривающийся как ожидание ответа [123]. В экспериментах, оценивающих различие времени реакции при наборе текста левой и правой рукой, контралатеральная и ипсилатеральная активность могут модулироваться независимо друг от друга. Предполагается, что они являются различными процессами: контралатеральная кора активируется при наборе правильного ответа, а ипсилатеральная кора ингибируется при неправильных ответах [26]. Далее будут рассмотрены несколько методов изучения печати, чтобы определить наиболее подходящие для исследования ИФ.

1.2.7. Вызванные потенциалы при печати

Два основных вызванных потенциала (ВП), которые используются при анализе движений в процессе печати – это условная отрицательная вариация (contingent negative variation, CNV) и латерализованный потенциал подготовки моторного ответа (lateralized readiness potential, LRP). Ранняя волна CNV рассматривается как реакция ориентации на предупреждающий сигнал [64]. Традиционно считается, что поздняя волна CNV отражает подготовку моторного ответа и, следовательно, идентична потенциалу готовности (readiness potential, RP), негативному потенциалу в ЭЭГ, предшествующему произвольным движениям. LRP предшествует RP, который демонстрирует большую негативность в полушарии, противоположном реагирующей руке [64]. LRP [64] – это вызванный потенциал (ВП), регистрируемый в моторной коре в ответ на начало движения. LRP обычно вычисляется в задачах, требующих левосторонних и правосторонних реакций, путем вычитания ипсилатеральной и контралатеральной амплитуды ВП, таким образом, фиксируя латерализацию ЭЭГ активности, генерируемой активацией специфической ответной руки [89]. Амплитуда LRP является показателем относительной активации двух первичных зон моторной коры [64]. LRP дает представление о пространственных или временных особенностях предстоящего движения. Например, данный потенциал может сообщать о направлении движения (например, вверх) или о руке ответа (левая или правая) [89]. В исследованиях печати чаще используется LRP, поскольку данный потенциал может отражать процессы ингибирования и активации в процессе печати.

При изучении ИФ нас интересует чередование ингибирования и активации, поскольку в головном мозге именно они отражают исполнительный контроль иерархических процессов, управляющих печатью. Наиболее ярко функции ингибирования проявляются при печати двумя руками и предотвращают преждевременное нажатие клавиш, сигнал об активации которых уже был отправлен [123]. Если придерживаться гипотезы о том, что подготовка моторного ответа реализуется до начала печати, то процессы ингибирования необходимы для

соблюдения иерархического контроля над последовательным нажатием клавиш [65]. Ингибирование должно достигать своего максимума перед первым нажатием клавиши, когда происходит суммация сигналов активации для всех последующих клавиш целевого слова [93]. При печати двумя руками буквы, которые должны быть напечатаны определенной рукой, ингибируются во время печати другой рукой [72]. Этот механизм предполагает ингибирование противоположных кортикальных структур ипсилатеральных для руки, совершающей движение [123]. Исследователи [123] сделали вывод, что вне зависимости от руки, которой производится печать, амплитуда LRP будет уменьшаться с нажатием каждой следующей буквы. Однако амплитуда от руки, которая первой приступила к печати, будет больше, чем амплитуда от второй руки.

Рабочая память также может изучаться с помощью LRP. Данный потенциал позволяет предсказывать последовательность нажатия клавиш при печати. Одно из исследований [16] демонстрирует, что печать опирается на параллельную обработку при нажатии клавиш. В ходе эксперимента участникам предъявлялось слово, а затем требовалось напечатать определенную букву. Когда в праймированном слове присутствовала требуемая буква, ее печать производилась быстрее, что иллюстрирует функционирование рабочей памяти при печати. Местоположение буквы в слове при этом не влияло на скорость ответа. Анализ амплитуды LRP [63], зафиксированной до первого нажатия клавиши при печати, показал, что амплитуда была выше, если все буквы в слове требовалось набирать одной рукой. Амплитуда уменьшалась в зависимости от количества переключений между руками. Это также подтверждает, что планирование печати (формирование моторных репрезентаций) происходит до момента начала набора текста.

Также существуют исследования, демонстрирующие высокую прогностическую валидность LRP для определения последовательности набора букв при печати двумя пальцами на сенсорной клавиатуре [100]. Подобные исследования могут открыть новые перспективы развития нейроинтерфейсов,

которые в настоящий момент чаще всего базируются на потенциале P300, возникающем в ответ на новый непривычный стимул [84]. Однако можно предположить, что при печати более продуктивно будет использование LRP, потому как он напрямую связан набором букв.

1.2.8. Спектральные вызванные потенциалы при печати

В литературе представлено несколько исследований, которые рассматривают спектральные ВП при печати. Так подготовка моторного ответа может выражаться в виде колебаний в бета-диапазоне частот (15–30 Гц) [13]; [123]. Существуют исследования о десинхронизации, связанной с событиями, в диапазоне бета-частот во время подготовки унимануальных движений [59]. В заданиях, требующих печати слов или предложений, спектральные потенциалы, связанные с событием, регистрируются билатерально в промежутке от 400 мс до начала движения [40], особенно в случае последовательного нажатия трех и более клавиш []. Обычно считается, что данный эффект указывает на общий уровень моторной подготовки перед печатью слова. Тем не менее существуют различные исследования, рассматривающие данный эффект и как ингибирование, и как активацию в зависимости от контекста задачи [80]. Так отрицательный потенциал спектральной активации регистрируется в моторной коре контралатерально эффектору и соответствует печати верного ответа в экспериментальном задании, в то время как положительный потенциал активации индексирует ингибирование ипсилатеральной моторной коры, ответственной за подавление ошибочных ответов [39];[114]. Стоит отдельно отметить, что активность в бета-диапазоне также отражает уровень когнитивной нагрузки, возникающей в процессе печати, и связанной с работой исполнительного контроля [69]. Таким образом, изучая спектральные потенциалы, можно оценить функционирование исполнительного контроля у различных респондентов, сравнивая эффекты активации и ингибирования при подготовке моторного ответа.

1.2.9. Анализ фоновой ЭЭГ при печати

В современной исследовательской литературе мало представлены работы, посвященные изучению фонового ЭЭГ [118] в процессе печати. Немногие существующие исследования [104];[118]; [63] зачастую направлены на выявление спектральной активности, когерентности или коннективности в процессе письма. Одной из целей данных работ является определение уровня когнитивной нагрузки при печати. Согласно имеющимся данным, появление тета активности в фронтально–медиальной области при копировании текста [79] свидетельствует об общем повышении когнитивной нагрузки в процессе печати. Рассинхронизация в теменных и затылочных областях в диапазоне тета и альфа–ритмов, проявляющаяся непосредственно после сенсорной печати [118], свидетельствует о распределении ресурсов.

Анализ фоновой ЭЭГ при печати может стать ценным инструментом в диагностике дислексии. Результаты недавнего обзора [102] показали, что в передней фронтальной зоне у детей с дислексией наблюдаются уникальные паттерны мозговой активности при сравнении с нормотипичными детьми.

Несмотря на существование работ, посвященных оценке когнитивной нагрузки при свободной печати (свободном формулировании предложений), ИФ практически не изучаются методом фонового ЭЭГ [105]. Учитывая, что печать – это сложный иерархический процесс, который в полном объеме задействует ИФ, подобные исследования были бы крайне актуальными.

1.3. Резюме

На основании обзора литературы можно выделить несколько групп экспериментов, направленных на изучение печати. Каждая из этих групп освещает определенную проблематику, которую можно рассмотреть с позиции изучения психофизиологии исполнительных функций. Отдельно хотелось бы отметить, что в настоящий момент отсутствуют разработанные

стандартизированные эксперименты по изучению ИФ в процессе печати. Поэтому при изучении данного феномена необходимо добавлять в дизайн эксперимента методики и опросники, направленные на оценку ИФ [6].

1. 3.1. Исполнительный контроль

Исследования по копированию слов одной или двумя руками направлены на анализ моторных схем, сформированных при автоматизации печати, а также для изучения процессов ингибирования и активации при реализации моторных команд [47]. На примере задания по копированию слов можно описать принцип работы ИФ в рамках модели двух петель обратной связи [72]. Во внешней петле происходит считывание и обработка стимула, а во внутреннюю петлю передаются команды по печати данного слова, которые там разделяются на отдельные символы для реализации процесса печати. Каждый символ соответствует определенному моторному паттерну, который выражается через нажатие на клавишу. В подобных экспериментах возможно анализировать как ВП, так и фоновую ЭЭГ для изучения процессов торможения нервной системы.

Исследования по изучению корректировки ошибок во время печати также могут иллюстрировать изучение исполнительного контроля [58]; [106]. Внутренняя петля полагается на обратную связь непосредственно от движений рук (корректная ли клавиша нажата), а внешняя петля ориентируется на информацию, которая появляется на экране (верное ли слово напечатано). Так иллюстрируется процесс исполнительного контроля центральных отделов над периферическими. Появление ВП в ответ на нажатие клавиши «Backspace» и в момент исправления ошибки могут коррелировать с показателями ИФ респондента, измеренными с помощью поведенческих методик, тем самым иллюстрируя работу исполнительного контроля. Поскольку корректировка ошибок - это получение отрицательной обратной связи от периферии, можно сказать, что это также и способ реализации исполнительного контроля [106]. Обратная связь об ошибке может быть получена двумя путями. Респондент

может увидеть ошибку на экране и исправить ее после написания слова. В этом случае иллюстрируется работа центрального исполнительного контроля. Если же ошибка была исправлена в процессе печати, исполнительный контроль будет реализован на периферии без участия центральных отделов. Для проверки данной гипотезы необходимо провести два эксперимента: копирование и свободное формулирование предложений. При формулировании предложений контроль за исправлением ошибок по большей части будет осуществляться в центральных отделах, а при копировании - на периферии. Это может быть связано с тем, что при формулировании предложений задействован не только исполнительный контроль за моторикой печати, но и другие психические процессы, которые обеспечивают большую когнитивную нагрузку. Тем самым, исполнительный контроль также возможно зафиксировать путем спектрального анализа ЭЭГ данных.

1.3. 2. Когнитивная гибкость

Исследования моторных схем при печати слов и предложений иллюстрируют процесс переключения между активацией и торможением во время печати или когнитивная гибкость [118]. Процессы переключения также могут изучаться с помощью LRP. Данный потенциал позволяет предсказывать последовательность нажатия клавиш при печати. Высота амплитуды LRP может продемонстрировать чередование процессов ингибирования и активации при печати, тем самым, иллюстрируя процесс переключения между передачей сигналов на правую или левую руку [116].

Исследования по печати слов или предложений по изображениям могут иллюстрировать процессы переключения при печати. Поскольку для печати слов по определенным изображениям (например, яблоко), требуется переключаться между различными модальностями, то при сравнении ЭЭГ данных при копировании слова, и при печати по картинке, можно наблюдать процессы переключения между вербальными и невербальными процессами [92].

1.3.3. Рабочая память

В исследованиях по печати слов или предложений по памяти, как в видоизмененной задаче n-back (задача по припоминанию стимула, который предъявлялся «n» стимулов назад) [80], можно наблюдать не только объем припоминаемых слов, но и психофизиологию рабочей и семантической памяти при сравнении спектральной мощности в процессе копирования и припоминания предложений.

Исследования по формулированию предложений по памяти также могут отражать процесс функционирования рабочей памяти. Внутренняя петля информационно изолирована - в ней обрабатывается только переданная на печать информация (слово). В свою очередь внешняя петля обладает более полной информацией (все предложение). Во внешней петле не хранится информации о том, какой рукой производится печать и как буквы размещаются на клавиатуре [72]. Данный феномен отражает процесс хранения и обработки информации, который реализуется в рабочей памяти. Поэтому, если демонстрировать респонденту слово и просить его сформулировать предложение с использованием данного слова, можно проследить процессы нейрональной активации и ингибирования в процессе печати [80]. Поскольку слово будет задано предварительно, мы сможем проанализировать нейрофизиологию процессов рабочей памяти в зависимости от необходимости запоминания стимульного слова [15]. В случае, когда слово будет представлено на экране во время выполнения задания, рабочая память не будет задействована, тогда как в случае его отсутствия, респонденту придется задействовать рабочую память.

Глава 2. Методы исследования

Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ от 13.09.2020 №20–313–90046\20, руководитель Григоренко Е. Л.

Предметом данного исследования являются исполнительные функции, в частности процессы функционирования рабочей памяти, исполнительного контроля, а также процессы переключения и торможения.

Объектом исследования являются нейрофизиологические маркеры исполнительных функций при печати.

Целью данного исследования является определение нейрофизиологических коррелятов исполнительных функций при печати.

Для реализации данной цели нами были поставлены следующие **задачи**:

1. Определить, какие из поведенческих показателей исполнительных функций в проведенных методиках демонстрируют между собой наибольшую корреляцию.
2. Определить, какие из поведенческих характеристик печати могут выступать дополнительным фактором в моделях исполнительных функций при печати.
3. Оценить уровень взаимодействия поведенческих характеристик печати с уровнем развития исполнительных функций.
4. Оценить спектральные характеристики нейрональной активации в процессе выполнения задачи на печать припоминаемого текста в зависимости от уровня развития рабочей памяти, процессов торможения и переключения.
5. Оценить спектральные характеристики электрической активности в процессе формулирования предложений в зависимости от

уровня развития исполнительных функций.

6. Сравнить спектральные характеристики электрической активности в процессе копирования и формулирования предложений.

Также определим операциональные **гипотезы**, на основе вышеописанных.

1. Будет наблюдаться значимая корреляция между результатами методик BRIEF–2 и UNIT, которые измеряют уровень развития соответствующих исполнительных функций.

2. Будет наблюдаться статистически значимый вклад уровня развития исполнительных функций в поведенческие показатели при печати.

3. Модель, которая наиболее эффективно описывает дисперсию активации мощностей альфа, бета и тета ритмов при печати, включает в себя предикторы, такие как память, рабочая память, выраженность тормозных процессов и уровень развития исполнительного контроля, которые были измерены психологическими методиками.

3.1 Будет наблюдаться статистически значимый вклад показателей развития исполнительных функций в активацию префронтальной и моторной коры при печати припоминаемого предложения.

3.2. Будет наблюдаться статистически значимый вклад показателей развития исполнительных функций в активацию префронтальной и моторной коры при печати сформулированного по картинке предложения.

4. Будет наблюдаться статистически значимые различия в высокочастотных ритмах между процессами копирования и формулирования предложений.

Резюмируя, нами были выдвинуты операциональные гипотезы, которые описывают взаимосвязь между нейрофизиологическими паттернами при копировании и формулировании предложения, и исполнительными функциями,

которые задействованы в этом процессе.

2.1 Описание исследования

Выборка исследования состояла из 49 человек ($M (SD) = 18.64 (0.74)$), из них 30 женщин ($M (SD) = 18,54 (0,74)$), 19 мужчин ($M (SD) = 18,94 (0,73)$). Набор участников осуществлялся в сети «Интернет», по объявлениям в сообществах социальной сети «ВКонтакте». Ограничения выборки определялись по возрасту (16-18 лет), навыкам печати (скорость не менее 150 символов в минуту, точность печати не менее 97%) и отсутствию черепно-мозговых травм и других неврологических нарушений. В исследование были включены только праворукие участники. Тест печати проводился онлайн, результаты отправлялись рекрутеру в виде сертификатов о прохождении теста. Перед началом исследования все участники подписывали информированное согласие об участии (Приложение 1), которое было одобрено Этическим комитетом Института Психологии Российской Академии Наук (Приложение 2). Каждому из участников после исследования выдавалось вознаграждение в размере эквивалентном 1000 рублей.

Исследование проводилось в лаборатории междисциплинарных исследований развития человека при Санкт-Петербургском Государственном Университете. Процедура включала в себя два блока: поведенческий и психофизиологический. В поведенческий блок входили методики, измеряющие уровень развития интеллекта и исполнительных функций участника, а психофизиологический блок включал в себя психофизиологический эксперимент и опросник ведущей руки (Рисунок 1). Все исследование занимало около 4 часов, между частями исследования делался перерыв не менее 1 часа.

Процедура сбора поведенческих данных начиналась со знакомства участника с методиками, которые ему предстояло выполнить. Далее последовательно участник заполнял самоопросник BRIEF-2, и проходил методику UNIT-2. Блок поведенческой части занимал не более 2 часов.



Рисунок 1 - Структура исследования

Процедура сбора нейрофизиологических данных начиналась со знакомства участника с протоколом исследования. Кратко были рассказаны цели и задачи этого этапа исследования. Для оптимизации процедуры записи объем головы участника для подбора ЭЭГ шапочки измерялся заранее, и электродная шапочка готовилась до начала исследования. Проведение психофизиологической части осуществлялось в изолированном помещении. Процесс подключения электродов занимал от 30 до 60 минут и осуществлялся путем нанесения на кожу головы гипоаллергенного электролитного геля, для увеличения проводимости и снижения сопротивления. После установки электродов участника просили отключить мобильные устройства или перевести их в режим полета, а также совершать как можно меньше движений. Блок психофизиологической части занимал около 2 часов. В исследовании была проведена оценка психофизиологических показателей печати на компьютере и их соотношение с показателями исполнительных функций.

2.2. Поведенческие методы

2.2.1. Исследование исполнительных функций. BRIEF–2

Поскольку основной гипотезой исследования является взаимосвязь между исполнительными функциями и процессом печати, важным фактором является определение уровня развития исполнительных функций. Для достижения наибольшей достоверности были выбраны две методики. Уровень развития исполнительных функций респондента оценивался с помощью самоопросника (Приложение 6) «Краткая шкала исполнительных функций» (BRIEF, Behavior Rating Inventory of Executive Function, BRIEF; [48]) и некоторых субтестов универсального невербального теста интеллекта (UNIT, Universal Nonverbal Intelligence Test, Second Edition, Bruce A. Bracken, R. Steve McCallum, 2016).

В настоящий момент существует большое количество исследований, направленных на изучение исполнительных функций, поскольку они играют важную роль в эмоциональном, когнитивном и поведенческом развитии [34]. Одним из широко используемых опросников для исследования исполнительных функций является методика BRIEF-2 [31]. Данный опросник используется в школах и медицинских учреждениях, а также в различных исследованиях с участием детей, подростков и взрослых [99]. BRIEF-2 применяется как для исследования лиц без поведенческих трудностей, так и для лиц с нарушениями развития, соматическими болезнями, неврологическими и психическими расстройствами. В рамках настоящего исследования нами была использована форма самоотчета (BRIEF–2: [49]).

Структура BRIEF–2 основана на теории иерархической организации исполнительных функций [10]. Согласно данной теории, управление комплексным поведением основывается на регуляции базовых процессов. Именно поэтому модель BRIEF–2 может рассматриваться как иерархическая структура, в которой шкалы формируют индексы более высокого порядка.

Второе издание методики (форма само опросника) включает в себя семь шкал: Торможение, Саморегуляция, Переключение, Эмоциональный контроль, Рабочая память, Планирование/Организованность, Мониторинг задач (Inhibit, Self-Monitor, Shift, Emotional Control, WorkingMemory, Plan/Organize, Task-Monitor). Данные шкалы организуются в три комплексных индекса, отражающих исполнительные функции: «Индекс регуляции поведения», «Индекс распознавания эмоций», «Индекс когнитивной регуляции» («Behavior Regulation Index», «Emotional Recognition Index» и «Cognitive Regulation Index»). Их совокупность иллюстрирует «Общий показатель исполнительных функций» [50].

Шкала Торможения оценивает уровень контроля ингибирования, т.е. способности осознанно не реагировать на стимулы. Также эта шкала включает себя способность к остановке собственным действиям в определенное время. Шкала Саморегуляции оценивает вклад влияния поведения индивида на окружающих людей и явления. Саморегуляция представлена как способность наблюдать и оценивать собственное поведение, оценивать собственные слабые и сильные стороны и эффективность в решении проблем. Шкала Переключение измеряет способность к гибкости при решении проблем, переключению внимания и смене фокуса. Шкала Эмоциональной регуляции измеряет Шкала Эмоциональной регуляции оценивает контроль над изменениями настроения, импульсивность, лабильность эмоционального состояния, а также фиксирует частоту чрезмерных реакций на ситуативные раздражители. Шкала Мониторинг задач оценивает успех в решении проблемы выполнении задач. Шкала Рабочей памяти оценивает способность к регуляции мыслительного процесса, на примере отслеживания задач, а также способность к поддержанию концентрации внимания. Шкала Планирования/Организации связана со способностью предвидеть будущие события и упорядочивать информацию. Индекс регуляции поведения – представляет способность к эффективному мониторингу и регуляции поведения. Индекс эмоциональной регуляции отражает эффективность мониторинга и регуляции эмоционального состояния. Соответственно, Индекс

когнитивной регуляции оценивает эффективную регуляцию когнитивных процессов. Глобальный индекс исполнительных функций иллюстрирует общий показатель трудностей с исполнительными функциями.

Несмотря на то, что BRIEF–2 демонстрирует высокую диагностическую валидность, некоторые исследования указывают на рассогласованность между результатами методики и поведенческими тестами. Согласно литературе, исполнительные функции можно разделить на «Холодные» и «Горячие». К «Холодным» можно отнести когнитивную часть исполнительных функций, то есть, рабочую память, исполнительный контроль и организационные навыки. Тогда как к «горячим» можно отнести способности эмоциональной регуляции [106]. Исследователи предполагают, что разные проявления ИФ лучше оценивать различными методами, поскольку лабораторные тесты могут быть нечувствительны к некоторым сегментам, к которым чувствителен BRIEF–2, и наоборот. В связи с этим, была выбрана еще одна методика, измеряющая исполнительные функции.

2.2.2. Исследование исполнительных функций и интеллектуального развития. UNIT-2

Также, для определения уровня развития рабочей памяти, пространственного и абстрактного мышления и интеллекта нами был выбран универсальный невербальный тест интеллекта UNIT-2 (Universal Nonverbal Intelligence Test, Second Edition, Bruce A. Bracken, R. Steve McCallum, 2016).

Методика имеет иерархическую структуру. Участник выполняет шесть субтестов, каждый из которых направлен на определенную когнитивную способность: символическая, пространственная и рабочая память, символический и несимволический счет и мышление по аналогии. Эти субтесты формируют три домена: память (Memory), количественное мышление (Quantitative) и способность к рассуждению (Reasoning). Все шкалы суммарно оценивают показатель интеллекта участника. Следует отметить, что в данной методике также

присутствует краткая шкала интеллекта, которая вычисляется по субтестам несимволического счета и аналогий. Остановимся чуть подробнее на каждом из субтестов.

Символическая память

В субтесте «Символическая память» (Рисунок 2) используется последовательность из универсальных символов («ребёнок», «девочка», «мальчик», «женщина» и «мужчина») двух цветов (зеленый и черный). Участникам (8 – 21 лет) предъявляется последовательность фигур на протяжении 5 секунд, после чего демонстрация прекращается. Участникам необходимо воспроизвести последовательность фигур с помощью карточек для ответа.

Задание оценивает способность обращать внимание на детали и отличать важную информацию от незначительной; систематизировать и запоминать сложную информацию; способность содержательно упорядочивать информацию; способность понимать и решать многоэтапные математические задачи; игнорировать постороннюю, конкурирующую информацию во время решения задач. Можно предположить, что задание оценивает рабочую память.

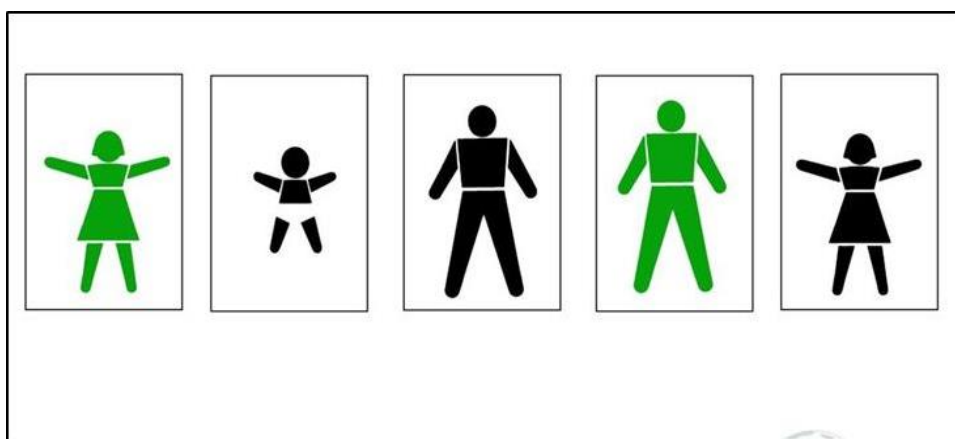


Рисунок 2 – Пример стимульного материала субтеста «Символическая память» методики UNIT-2

Несимволический счет

В субтесте «Несимволическая счет» (Рисунок 3) используется набор

черно–белых домино с разными числовыми значениями, создающими числовую последовательность, тождество, аналогию или математическую проблему. Участнику необходимо выбрать из представленных вариантов тот, который лучшим образом подходит для решения задачи.

Задание оценивает способность понимать и решать абстрактные задачи с помощью символов; определять взаимосвязи между числами; понимать отношения, представленные числами; способность анализировать и классифицировать числовую (количественную) информацию; обобщать изученные принципы для решения новых задач (например, применять уже изученные правила к новым примерам или типам заданий).

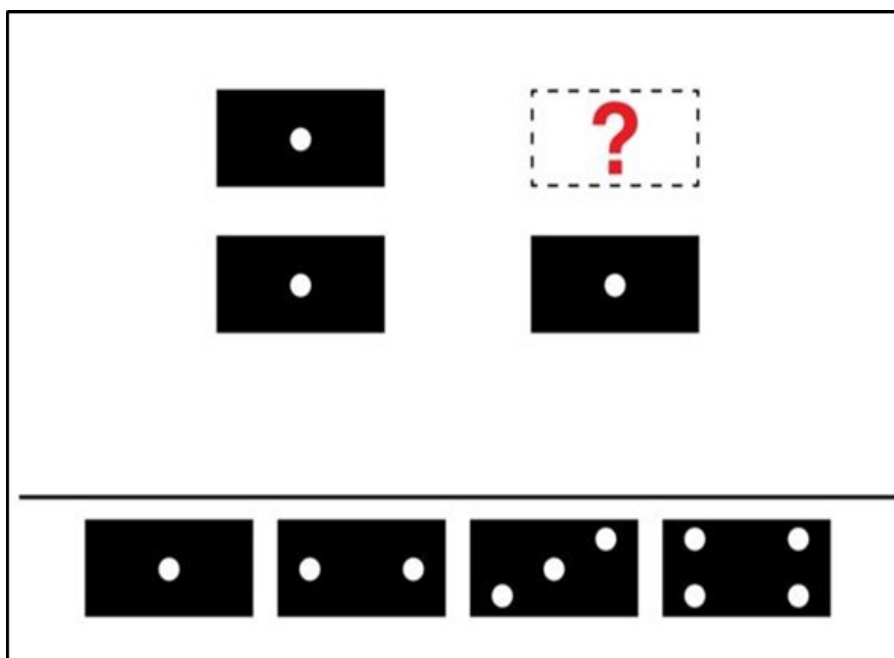


Рисунок 3 – Пример стимульного материала субтеста «Несимволический счет» методики UNIT-2

Рассуждение по аналогии

Каждое из заданий субтеста «Аналогии» представляет собой незавершенную концептуальную или геометрическую аналогию, представленную в виде матрицы. После трех последовательных неверных ответов методика прекращается. Задание оценивает способность понимать и

решать практические, ситуативные задачи; определять взаимосвязи между причиной и следствием; приводить рациональные аргументы, основанные на последовательной логике; обобщать усвоенные принципы для решения новых проблем; систематически усваивать и использовать правила.

Пространственная память

Стимульный материал субтеста «Пространственная память» (Рисунок 4) представляет собой матрицы (1×2 , 2×2 , 3×3 , или 4×4) со случайно расположенными на ней фишками зеленого и черного цвета. Участник в течении 5 секунд запоминает расположение объектов, чтобы затем воспроизвести его в точности на поле ответов.

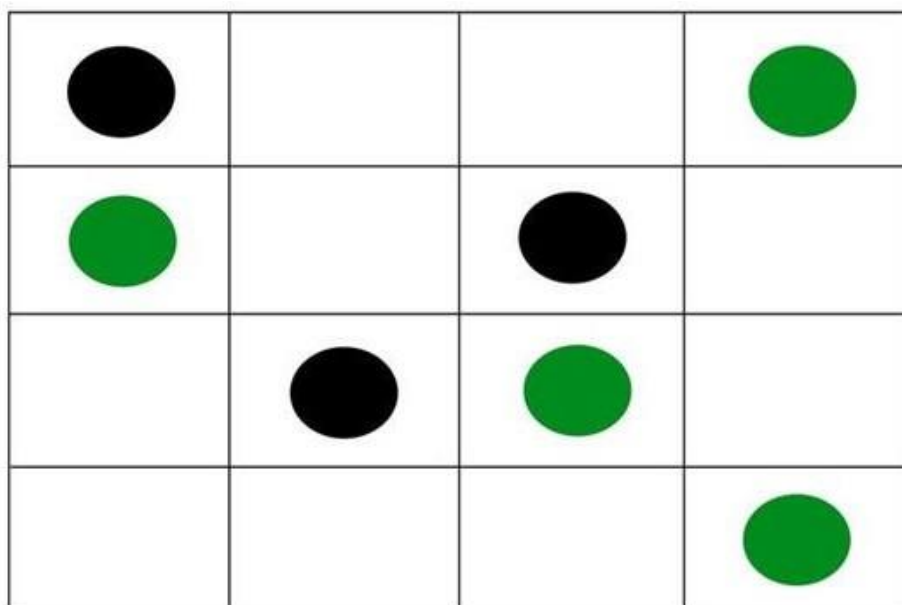


Рисунок 4 – Пример стимульного материала субтеста «Пространственная память» методики UNIT-2

Задание оценивает способность видеть ситуацию в целом; обращать внимание, обрабатывать и запоминать визуальные детали, суть информации, а не последовательность, в которой она была представлена; концентрироваться на проблеме до тех пор, пока проблема не будет понята; а также способность

отмечать незначительные изменения в окружающей среде.

Числовые ряды

Каждое задание субтеста «Числовые ряды» представляет собой набор чисел или математических символов, из которых можно создать перцептивную пару или продолжить количественный ряд. Задание оценивает способность понимать и решать математические задачи; определять взаимосвязи между числами; понимать отношения, представленные числами; анализировать числовые системы; обобщать изученные принципы для решения новых задач; и систематически использовать изученные правила. В отличие от заданий нечислового счета, этот блок оценивает знание математических правил и умение их применять в новых ситуациях.

Дизайн кубиков.

Стимульный материал субтеста «Дизайн Кубиков» (Рисунок 5) включает в себя 9 двухцветных кубиков, из которых требуется собрать представленные на изображении конструкции. Задание выполняется на время.

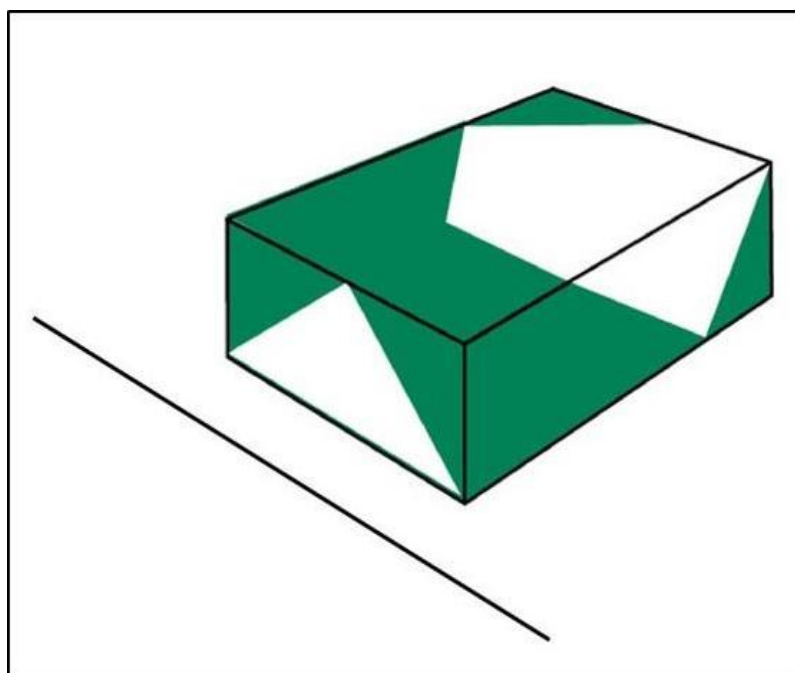


Рисунок 5 – Пример стимульного материала субтеста «Дизайн кубиков» методики UNIT-2.

Задание оценивает способность разделять проблему на отдельные части и последовательно решать их; упорство при решении сложных задач; реакцию на необходимость выполнить задания в ограниченное время; гибкость в оценке и модификации стратегий решения; а также способность ориентироваться в окружающей среде.

Данная методика невербальна, поэтому не возникает препятствий в использовании на русской выборке. Методика включает в себя все интересующие нас домены, а также позволяет полно оценить интеллект участника.

2.3. Психофизиологические методы

Для определения психофизиологических паттернов письменной речи был разработан психофизиологический эксперимент в программном пакете Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc.). Данная программа отвечает требованиям, необходимым для проведения психофизиологического эксперимента. Она обеспечивает использование любого стимульного материала, обладает возможностью подключения переносной клавиатуры или другого устройства ввода. Свободная среда для написания кода дает возможность для проведения любых манипуляций, необходимых для эксперимента или серии экспериментов.

Регистрация ЭЭГ обеспечивалась с помощью программы BrainVision Recorder (BrainProducts, Inc.) Полное сопротивление по всем отведениям сохранялось ниже 25 k Ω . Установка включала в себя следующее оборудование: ЭЭГ–усилитель actiCHamp (BrainProducts, Inc.) с 128 активными Ag/AgCl электродами; ноутбук с установленным программным пакетом для предъявления стимулов Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc.); ноутбук с установленным программным пакетом для записи ЭЭГ– сигналов BrainVision Recorder (BrainProducts, Inc.). Коррекция тайминга меток на записи ЭЭГ с помощью устройства StimTrak (BrainProducts, Inc.) проводилась после записи материала.

Также, поскольку при свободной речи прогнозирование печати последующих букв является более когнитивно–сложной задачей, во второй части нашего исследования была рассмотрена взаимосвязь между уровнем развития исполнительных функций и спектральной нагрузкой в процессе печати. Соответственно, для определения полной модели письменной речи, эксперимент состоял из нескольких блоков. Также, для более глубокого понимания принципа работы исполнительных функций, было введено две группы: контрольная и экспериментальная. В контрольной группе участники выполняли задачи наблюдая изображение и слово, а в экспериментальной задания выполнялись с припоминанием. Рассмотрим более подробно каждый из блоков.

Таблица 1 – Описание экспериментального блока психофизиологического эксперимента

Блок	Контрольная группа (23 человека, 14 женщин)	Экспериментальная группа (26 человек, 16 женщин)
Копирование предложений	Печать по памяти	Печать по памяти
Формулирование предложений	Печать, наблюдая стимульный материал	Печать по памяти

2.3.1. Копирование предложений

Целью первого блока эксперимента (Рисунок 6) было изучить нейрофизиологические процессы в рабочей памяти и исполнительного контроля, участвующие в печати, а также объем рабочей памяти во время печати. Во этом блоке эксперимента было представлено копирование предложений. Нами было использовано 13 предложений, которые включали в себя все буквы алфавита (Приложение 3). Предложения насчитывали от 7 до 14 слов разной степени лексической сложности. Предложения были

грамматически корректными и семантически бессмысленными. Задачей участника было запомнить максимальное количество слов в предложении за время предъявления (5000 мс), после чего участнику требовалось напечатать максимальное количество запомненных слов. В процессе эксперимента по копированию предложений регистрировалось ЭЭГ. В дальнейшем анализе использовались фрагменты ЭЭГ, которые соответствовали процессу печати текста. Вся остальная запись при данном анализе не использовалась.

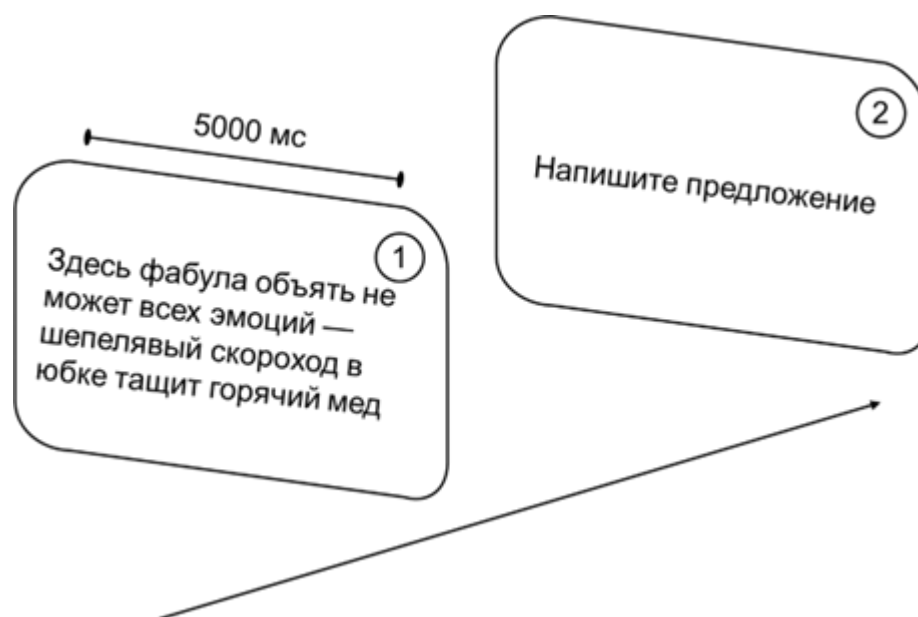


Рисунок 6 – Схема эксперимента «Копирование предложений»

Примечание. В каждом предложении насчитывалось от 7 до 14 слов, участниками было напечатано 13 предложений.

2.3.2 Формулирование предложений

Вторым блоком данного эксперимента (Рисунок 7) было формулирование предложений. Для контроля экспериментальных условий использовалось 24 изображения из стандартизированного теста Formulated Sentences Examiner's Manual (Clinical Evaluation of Language Fundamentals®– Fifth Edition, CELF®–5; Elisabeth H. Wiig, Eleanor Semel & Wayne A. Secord, 2013). Респонденту предъявлялось изображение (Приложение 5) с написанным над ним словом (Приложение 4). Задачей респондента было описать ситуацию по картинке,

используя данное слово. В различных группах варьировалось условие процесса печати в эксперименте. Контрольная группа респондентов печатала предложения, наблюдая изображение, экспериментальная – сначала запоминала изображение и слово на протяжении 5 секунд, а затем печатала его. Эксперимент направлен на изучение свободной речи респондента. А также на выявление психофизиологических закономерностей рабочей памяти. В процессе эксперимента по формулированию предложений регистрировалось ЭЭГ. В дальнейшем анализе использовались фрагменты ЭЭГ, которые соответствовали процессу печати текста. Вся остальная запись при данном анализе не использовалась.

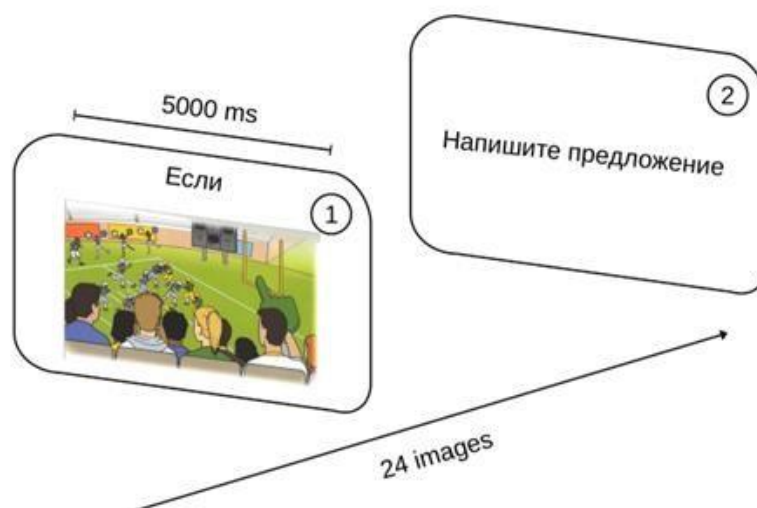


Рисунок 7 – Схема эксперимента «Формулирование предложений»

Для определения ведущей руки респондента был использован опросник Оценка превалирующей в использовании руки (Oldfield, 1971).

В связи с пандемией коронавирусной инфекции, в протоколе подготовки проведения ЭЭГ-исследования, были учтены факторы, которые обеспечат должный уровень безопасности (например, наличие защитных костюмов, масок, перчаток и минимизация контакта с участником эксперимента). Изменения

вносились согласно разработанному протоколу снижения риска распространения COVID–19 (Protocol for reducing COVID–19 transmission risk in EEG research Aaron M. Simmons and Steven J. Luck Center for Mind & Brain, University of California Davis).

2.4. Предварительная обработка данных

Данные предварительно обрабатывались в программе Brain Vision Analyser (BrainProducts, Inc.) Частота дискретизации была снижена до 500 Гц, данные были отфильтрованы (нижняя частота 0.1 Гц, верхняя 70 Гц, постоянная времени 1,59). Качество записи каналов было предварительно проверено с помощью автоматической программной обработки, и в случае, если более 30% записанных данных на канале были зашумлены (демонстрировали артефакты), канал удалялся. После автоматической проверки проводился повторный контроль каналов – каждая запись отсматривалась вручную. Каналы, которые демонстрировали наличие артефактов, более чем в 30% записи, но не были автоматически определены, также удалялись. Следующим шагом из данных удалялась глазодвигательная активность с помощью алгоритма ICA (Independent Component Analysis) – Анализ независимых компонент [1]. Компоненты горизонтальных движений глаз (движений глаз вправо и влево) вычислялись путем анализа данных с электродов FT9 и FT10, компоненты вертикальных движений глаз (моргания) вычислялись с электрода Fp1 или электрода Fp2. В случае, если данные с обоих электродов были неудовлетворительны, в качестве референтного электрода демонстрировал наиболее ярко выраженные вертикальные движения глаз (например, AF8). Также к данным применялся шаг смены референтного электрода. В качестве референтного электрода рассматривалось усредненное значение всех записанных электродов. После данного шага вновь проводилась автоматизированная проверка зашумленности записей ЭЭГ каналов. В случае, если обнаруживались электроды, которые демонстрировали зашумленность более чем на 15% – процесс предобработки повторялся с шага удаления электродов [32]. В противном случае все

удаленные электроды были восстановлены с помощью топографической интерполяции. Дальнейшая обработка записи проводилась автоматически для всего набора данных и включала в себя следующие шаги. Предварительно записи были сегментированы согласно условиям, в зависимости от типа парадигмы. Для парадигм, которые предусматривали спектральный анализ, сегменты были разделены на фрагменты по 4 секунды с перекрытием в 50%. После этого было проведено удаление сегментов, которые содержат артефакты, с размахом амплитуды в ± 110 мВ. После было проведено удаление трендов на промежутке 2–4000 мс, и сегменты были усреднены по типу стимула с расчетом стандартного отклонения. После окончания предварительной обработки был проведен Фурье-анализ, с разделением на следующие спектральные диапазоны: тета (4–8 Гц), альфа (8–12 Гц), бета (12–30) Гц, гамма (30–44 Гц) [62].

2.5. Математико-статистические методы обработки данных

Вся математико-статистическая обработка данных осуществлялась с помощью программного обеспечения R-Studio (версия 4.1.1). В анализе использовались следующие библиотеки: `car`, `ggplot2`, `tidyverse`, `psych`, `dplyr`, `data.table`, `Hmisc`, `GGally`, `lme4`, `lmerTest`. Для анализа полученных результатов были использованы следующие методы:

1. Критерий Шапиро-Уилкса для определения нормальности распределения переменных;
2. Критерий χ^2 Пирсона для определения гомогенности выборки по полу и возрасту;
3. Критерий t-Стьюдента для сравнения шкалированных показателей исполнительных функций между группами;
4. Однофакторной дисперсионный анализ (ANOVA) для сравнения уровня интеллектуального развития между группами;

5. Корреляционный анализ для определения взаимосвязи между шкалированными показателями методик и поведенческих показателей печати;
6. Кластерный анализ для определения групп с различным уровнем развития исполнительных функций.
7. Двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для сравнения нейрональных показателей между полученными кластерами.
8. Построение регрессионной модели нейрональной активации в зависимости от уровня развития исполнительных функций.

Глава 3. Результаты

3.1 Описательная статистика

Участники продемонстрировали нормальное распределение по показателям интеллекта ($M(SD) = 109,73 (9,24)$), тем не менее, выборка демонстрирует тенденцию к более высоким результатам по сравнению с нормотипичным срезом. Также из участников были в случайном порядке сформированы контрольная (23 участника (14 ж), $M(SD) = 18.43(0.73)$, IQ: $M(SD) = 107.04 (9,86)$) и экспериментальная группы (26 участников (16 ж), $M(SD) = 18.92(0.69)$, IQ: $M(SD) = 112.40 (7.46)$), отличающиеся по типу эксперимента. Статистически значимых различий по возрасту ($\chi^2 (3) = 6.35, p > 0.05$) и полу ($\chi^2 (13) = 12.874, p > 0.05$) между группами не наблюдается. По результатам однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) различий по интеллектуальному развитию между участниками обнаружено не было ($F (1,47) = 0.45, p > 0.05$).

Предварительно все полученные баллы по методикам UNIT-2 и BRIEF-2 были проверены на нормальность и гомогенность. В результате анализа только шкалы Мониторинга и Общий Эмоциональный индекс не прошли проверку на нормальность, но поскольку данные шкалы не используются в анализе, дальнейший анализ правомерен. В качестве независимых переменных в анализе планируется использовать шкалированные показатели по шкалам методики BRIEF-2: Торможение, Переключение, Рабочая память; и показатель Памяти по методике UNIT-2.

Тест Шапиро–Уилкса показал нормальное распределение в методике UNIT по шкалам Памяти ($W = 0.97, p = 0.17$), Мышления ($W = 0.98, p = 0.40$) и интеллекта ($0.96, p = 0.06$). Также по методике BRIEF интересующие нас шкалы Рабочая память ($W = 0.98, p = 0.38$), Торможение ($W = 0.97, p = 0.25$), Переключение ($W = 0.98, p = 0.55$) продемонстрировали нормальность распределения.

Данные результаты могут говорить о том, что выборка достаточно равномерно распределена по возрасту, интеллекту и результатам методик на исполнительные функции. Что позволяет нам сделать вывод о том, что полученные в дальнейшем анализе можно использовать показатели сравнения средних и дисперсии, а также, что данная выборка является репрезентативной. Поскольку тест Стьюдента не продемонстрировал статистически значимых различий средних по группам, можно предполагать, что полученные группы гомогенны по данным показателям, что потребуется нам для дальнейшего анализа.

3.2. Результаты корреляционного анализа методик BRIEF-2 и UNIT-2.

Все переменные были предварительно проверены на нормальность и прошкалированы. Все интересующие нас переменные были нормально распределены. Результаты поведенческого анализа продемонстрировали следующие корреляции. Между индексами принятия решения и показателем интеллекта ($r=0.67$, $p < 0.01$) наблюдается высокая корреляция. В данном исследовании мы не фокусируемся на процессах принятия решения, поэтому данная переменная в качестве независимой в анализ включена не была. Также наблюдаются средние корреляции между процессами переключения и торможения ($r=0.48$, $p < 0.01$), и переключением и рабочей памятью ($r=0.57$, $p < 0.01$), которые нами рассматриваются как индикаторы исполнительного контроля и рабочей памяти соответственно.

Полученные результаты иллюстрируют высокую корреляцию по интересующим нас показателям внутри методик, тогда как между методиками этой тенденции не наблюдается. Соответственно, можно предполагать, что данные методики покрывают различные домены исполнительных функций. Так, например, у респондента визуальная модальность рабочей памяти развита гораздо лучше, чем пространственная [28], и поэтому в литературе рекомендуется давать несколько методик на исполнительные функции, чтобы обеспечить более полный охват [12].

Также можно отметить различия по результатам самоопросника и методики реальных достижений. Важным выводом на основе полученных результатов будет являться то, что в последующие модели необходимо будет включать несколько шкалированных индексов, с поправкой на респондента, поскольку это даст более высокую точность при построении модели.

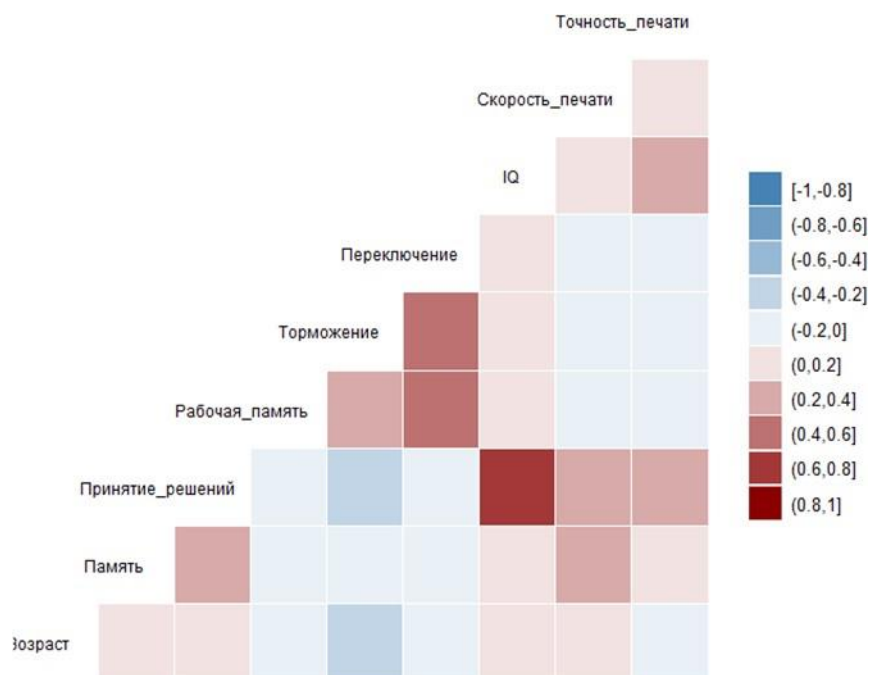


Рисунок 8 – Результаты корреляционного анализа методик UNIT-2 и BRIEF-2 и поведенческими показателями печати

Примечания. На данном графике отображена сила корреляции между субтестами, иллюстрирующими показатели развития исполнительных функций по различным методикам и поведенческими показателями печати. Сила корреляции определяется цветовой дифференциацией, от темно-бордового (сильная) до темно-синего (слабая).

3.3. Результаты поведенческих показателей в процессе печати на компьютере

Для анализа поведенческих результатов ЭЭГ эксперимента было использовано отношение общего количества верно напечатанных слов к общему количеству слов (WR). Была построена регрессионная модель, в которой в качестве зависимой переменной была использована WR, в качестве независимых переменных были использованы индексы ИФ (Индекс Памяти по методике

UNIT-2, Индексы Торможения, Рабочей памяти и Переключения по методике BRIEF-2). По результатам поведенческого анализа эксперимента (Таблица 2) был получен статистически значимый вклад независимой переменной Индекс Торможения (ANOVA III: $F(1, 48) = 6.74$, $p < 0,01$, $\eta^2 = 0,013$ [CI:0,01- 0,09]).

Количество верно напечатанных слов увеличивается с возрастанием Индекса Торможения. Согласно теории двух петель обратной связи, выдвинутой Логаном и Крапом (2011) [73], в процессе печати ингибирующие (тормозящие) процессы проявляются в момент печати каждой следующей буквы, поскольку «тормозят» печать всех вариантов последующих букв [93]. Соответственно, можно предположить, что, чем более активны данные процессы, тем выше точность напечатанного, поскольку процессы торможения успешно справляются с поставленной задачей. Исходя из этого предположения, мы можем говорить о том, что полученные нами результаты иллюстрируют факт, что, чем выше точность написанного, тем лучше развит навык торможения у респондента. Отдельно необходимо отметить, что все предъявляемые предложения для участников были идентичны – то есть, сложность задачи была одинакова, и, следовательно, показатель точности был достаточно индивидуален.

Таблица 2 – Результаты линейной модели: Вклад индексов ИФ в поведенческие результаты печати предложений.

Предикторы	B	CI	P
(Intercept)	0.58	0.54 – 0.61	<0.001
Memory	0.02	-0.02 – 0.05	0.353
Inhibit	0.05	0.01 – 0.09	0.013
WM	0.01	-0.04 – 0.05	0.769
Shift	-0.03	-0.08 – 0.01	0.151
Observations	48		
R2 / R2 adjusted	0.149 / 0.070		

Примечания. β – коэффициент регрессии, Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2.

3.4. Результаты кластерного анализа

В связи с тем, что результаты корреляционного анализа показывают корреляцию по ИФ, было принято решение разделить участников на кластеры, для дальнейшего анализа, чтобы нивелировать корреляционные эффекты.

В первый кластер ($n=12$) вошли участники, которые продемонстрировали низкий уровень развития рабочей памяти ($M=-1,14$, $SD=0,61$), а также более низкие показатели по факторам Торможения ($M=-0,62$, $SD=0,8$) и Переключения ($M=-1,19$, $SD=0,53$). В свою очередь, показатели Памяти ($M=0,47$, $SD=0,92$) по методике UNIT-2, у данных участников были достаточно высоки.

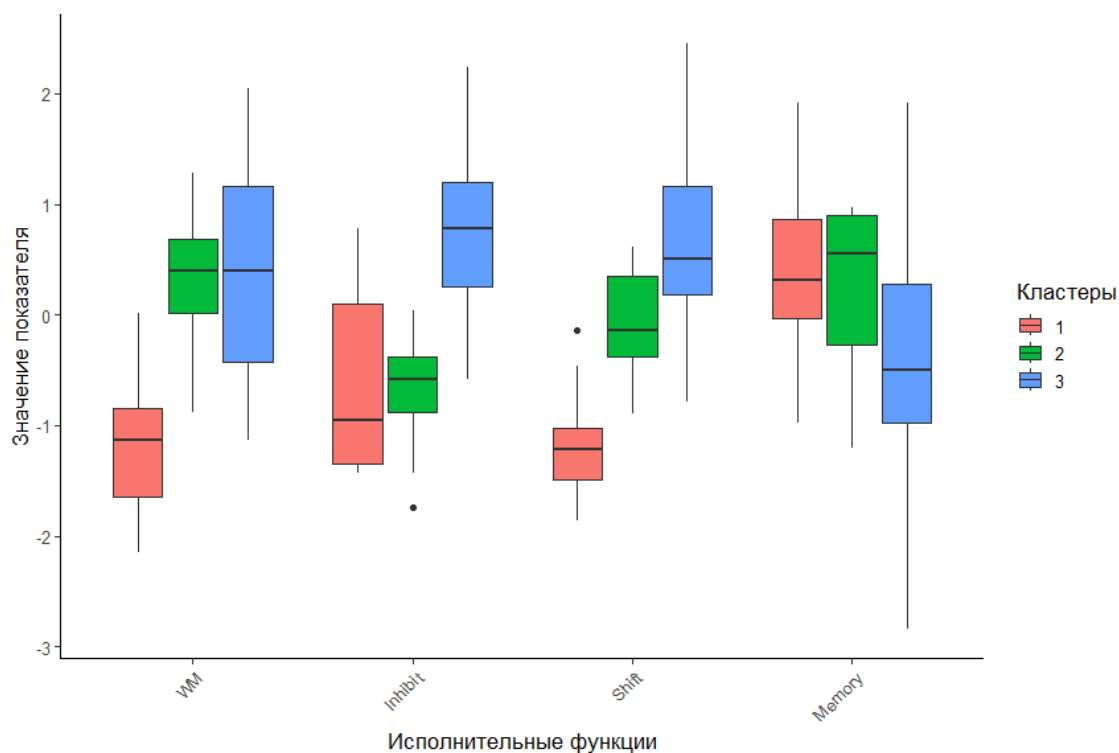


Рисунок 9 – Распределение участников на кластеры по развитию ИФ

Примечания: Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2
 Кластеры; 1 - Уровень развития исполнительных функций ниже среднего, 2 - Уровень развития исполнительных функций на границе среднего, 3 - Уровень развития исполнительных функций выше среднего.

Второй кластер ($n=14$) включал в себя участников с высокими показателями по Рабочей Памяти ($M=7,50$, $SD=4,18$) и общему показателю памяти ($M=0,25$, $SD=0,76$), тогда как Торможение ($M=-0,70$, $SD=0,50$) и Переключение ($M=-0,08$, $SD=0,49$) было ниже средних значений по выборке.

Третий кластер ($n=23$) продемонстрировал высокие показатели по Торможению ($M=0,75$, $SD=0,75$), Переключению ($M=0,67$, $SD=0,80$) и Рабочей памяти ($M=0,38$, $SD=0,92$), и высокую дисперсию по Памяти ($M=-0,40$, $SD=1,04$), со средним значением чуть ниже средних значений.

Полученные кластеры могут демонстрировать следующие группы:

1. Уровень развития исполнительных функций ниже среднего.
2. Уровень развития исполнительных функций на границе среднего.
3. Уровень развития исполнительных функций выше среднего.

3.5. Результаты эксперимента по копированию предложений

Предварительно из всего набора ЭЭГ данных нами были отобраны только данные, которые попадают в тета, альфа, бета диапазоны. Спектральные показатели, превышающие три стандартных отклонения, исключены из анализа. Далее из выборки были удалены значения, превышающие 2 стандартных отклонения по интересующим поведенческим индексам (Индекс Памяти по методике UNIT-2, Индексы Торможения, Рабочей памяти и Переключения по методике BRIEF-2). В дальнейший регрессионный анализ были включены только те показатели, доля объясненной дисперсии в которых превышала 0.4.

Были проанализированы результаты преобразования Фурье в префронтальной, фронтальной, центральной и центрально-теменной областях. По оставшемуся массиву данных была построена линейная модель, для определения вклада отдельных показателей ИФ в нейрофизиологическую активацию. В качестве зависимой переменной рассматривалась спектральная

мощность, в качестве независимых переменных рассматривались различные индексы ИФ, а также каналы и процент верно напечатанных слов (WR).

Было обнаружено (Таблица 3) значительное влияние индексов исполнительных функций на мощность альфа ритма ($F(18,1563) = 59,86$, $p < 0,001$).

Таблица 3 – Вклад показателей ИФ в мощность альфа ритма ЭЭГ в процессе копирования предложений

Предикторы	β	Мощность альфа ритма	
		CI	P
(Intercept)	-0.56	-0.73 – -0.39	<0.001
WM	-0.16	-0.20 – -0.11	<0.001
Shift	0.08	0.04 – 0.12	<0.001
Inhibit	0.06	0.02 – 0.10	0.008
WR	0.05	-0.20 – 0.30	0.702
Channel [C2]	0.20	0.07 – 0.33	0.003
Channel [C3]	-0.26	-0.39 – -0.13	<0.001
Channel [C4]	-0.17	-0.30 – -0.04	0.012
Channel [Cz]	-0.07	-0.20 – 0.06	0.310
Channel [FC1]	0.05	-0.08 – 0.18	0.470
Channel [FC2]	0.14	0.01 – 0.27	0.034
Channel [FC3]	-0.04	-0.17 – 0.09	0.555
Channel [FC4]	0.77	0.64 – 0.90	<0.001
Channel [FCz]	-0.29	-0.42 – -0.16	<0.001
Channel [Fz]	0.58	0.45 – 0.71	<0.001
WM × Shift	-0.07	-0.11 – -0.03	<0.001
WM × Inhibit	0.48	0.43 – 0.53	<0.001
Shift × Inhibit	-0.52	-0.57 – -0.48	<0.001
(WM × Shift) × Inhibit	0.05	0.02 – 0.09	0.005
Observations		1563	
R2 / R2 adjusted	0.411 / 0.404		

Примечания. Методу – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

Было обнаружено (Таблица 4) значительное влияние индексов исполнительных функций на нейрональную активность в бета ритме ($F(18,8838) = 256,4, p < 0,001$).

Таблица 4 – Вклад показателей ИФ в мощность бета ритма ЭЭГ в процессе копирования предложений

<i>Предикторы</i>	Мощность бета ритма		
	β	<i>CI</i>	<i>P</i>
(Intercept)	-1.28	-1.35 – -1.20	<0.001
Inhibit	0.05	0.03 – 0.07	<0.001
WM	-0.11	-0.13 – -0.09	<0.001
Shift	0.04	0.03 – 0.06	<0.001
WR	-0.20	-0.31 – -0.09	<0.001
Channel [C2]	0.19	0.13 – 0.24	<0.001
Channel [C3]	-0.18	-0.24 – -0.13	<0.001
Channel [C4]	-0.14	-0.20 – -0.08	<0.001
Channel [Cz]	0.09	0.03 – 0.14	0.002
Channel [FC1]	0.25	0.19 – 0.31	<0.001
Channel [FC2]	0.27	0.21 – 0.33	<0.001
Channel [FC3]	0.09	0.03 – 0.14	0.002
Channel [FC4]	0.66	0.61 – 0.72	<0.001
Channel [FCz]	-0.14	-0.20 – -0.09	<0.001
Channel [Fz]	0.78	0.72 – 0.84	<0.001
Inhibit × WM	0.37	0.34 – 0.39	<0.001
Inhibit × Shift	-0.45	-0.47 – -0.43	<0.001
WM × Shift	0.01	-0.00 – 0.03	0.159
(Inhibit × WM) × Shift	0.06	0.04 – 0.08	<0.001
Observations	8857		
R ² / R ² adjusted	0.346 / 0.344		

Примечания. Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

Было обнаружено (Таблица 5) значительное влияние индексов исполнительных функций на нейрональную активность в бета ритме ($F(14, 1548) = 43,99, p < 0,001$).

Таблица 5 – Вклад показателей ИФ в мощность тета ритма ЭЭГ в процессе копирования предложений

Предикторы	Мощность тета ритма		
	<i>B</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	-0.03	-0.25 – 0.19	0.789
Memory	0.19	0.15 – 0.23	<0.001
Inhibit	0.14	0.10 – 0.18	<0.001
WR	0.13	-0.20 – 0.45	0.446
Channel [C2]	0.25	0.09 – 0.40	0.002
Channel [C3]	-0.38	-0.54 – -0.22	<0.001
Channel [C4]	-0.18	-0.34 – -0.03	0.023
Channel [Cz]	-0.21	-0.37 – -0.05	0.009
Channel [FC1]	-0.09	-0.25 – 0.06	0.248
Channel [FC2]	0.06	-0.09 – 0.22	0.426
Channel [FC3]	-0.12	-0.27 – 0.04	0.150
Channel [FC4]	0.87	0.71 – 1.03	<0.001
Channel [FCz]	-0.42	-0.58 – -0.27	<0.001
Channel [Fz]	0.52	0.37 – 0.68	<0.001
Memory × Inhibit	-0.09	-0.14 – -0.05	<0.001
Observations	1563		
R ² / R ² adjusted	0.285 / 0.278		

Примечания. Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

После построения моделей был проведен двухфакторный дисперсионный анализ для определения различий нейрональной активности в различных спектральных диапазонах между различными кластерами (Рисунок10).

Было обнаружено статистически значимое взаимодействие двух предикторов (ритм и кластер), определяющих нейрофизиологическую активность (($F(8, 51) = 7,60, p < 0,001$). В свою очередь, оба предиктора, как Кластер ($F(2, 80) = 47,45, p < 0,001, \eta^2 = 0,02$, так и ритм ($F(4, 17119) = 5064, p < 0,001$), показали статистически значимые различие.

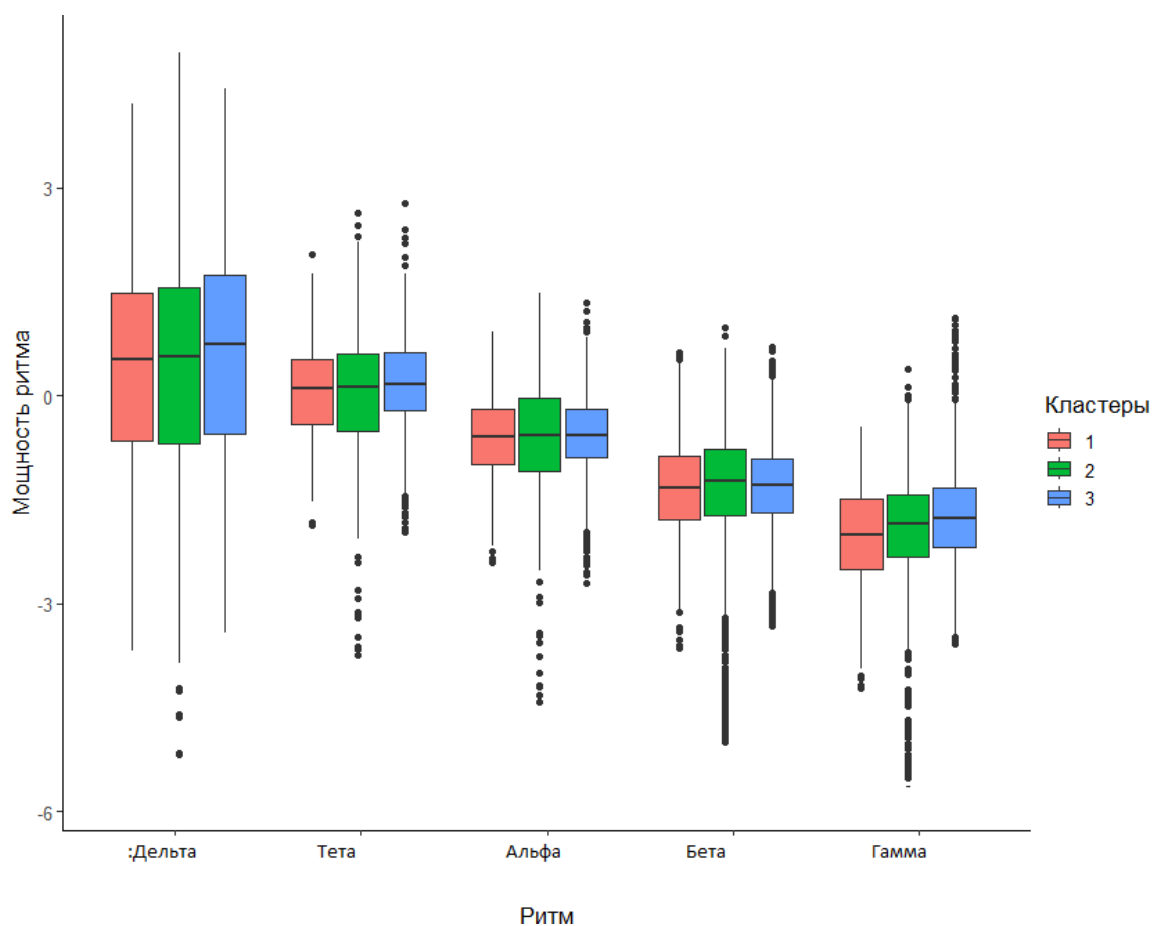


Рисунок 10 – Распределение мощности ритмов в процессе копирования предложений в зависимости от кластера

Примечания: Кластеры; 1 - Уровень развития исполнительных функций ниже среднего, 2 - Уровень развития исполнительных функций на границе среднего, 3 - Уровень развития исполнительных функций выше среднего.

Согласно *post-hoc* критерию Тьюки, по альфа бета и тета ритмам между кластерами не показано статистически значимой разницы. Что может говорить о том, что тенденция изменения активации применима отдельно к каждой из функций, а не к комплексу. Тогда как в дельта и в гамма ритмах, мы можем наблюдать статистически значимые различия между третьим и первым кластерами (Дельта: $\text{diff} = 0,19$, $p < 0,001$; Гамма: $\text{diff} = 0,26$, $p < 0,001$) и третьими вторым кластерами (Дельта: $\text{diff} = 0,16$, $p < 0,001$; Гамма: $\text{diff} = 0,22$, $p < 0,001$).

3.6. Результаты эксперимента по формулированию предложений

Предварительно из всего набора ЭЭГ данных нами были отобраны только данные, которые попадают в тета, альфа, бета диапазоны. Спектральные показатели, превышающие 50 мкВ^2 исключены из анализа. Далее из выборки были удалены значения, превышающие 2 стандартных отклонения по интересующим поведенческим индексам (Индекс Памяти по методике UNIT-2, Индексы Торможения, Рабочей памяти и Переключения по методике BRIEF-2). В дальнейший регрессионный анализ были включены только те показатели, которые продемонстрировали корреляцию выше 40%.

Были проанализированы результаты преобразования Фурье (полученные спектральные показатели) в префронтальной, фронтальной, центральной и центрально-теменной областях. По оставшемуся массиву данных были построены линейные регрессионные модели. В качестве зависимой переменной рассматривалась спектральная мощность, в качестве независимых переменных рассматривались различные индексы ИФ, а также каналы и процент верно напечатанных слов (WR). Также был проведен двухфакторный дисперсионный анализ для сравнения трех кластеров по ритмике.

Был обнаружен значимый ($F(18,1400) = 37,62, p < 0,001$) вклад индексов ИФ в мощность альфа ритма (Таблица 6). Также был показан значимых вклад центральных каналов C2, C3, FC2, FC4, FCz и Fz, которые также являлись предикторами. Таким образом, мы можем наблюдать, что наибольшая активация наблюдается в центральных и фронтальных каналов.

Таблица 6 – Вклад показателей ИФ в мощность альфа ритма ЭЭГ в процессе формулирования предложений

<i>Предикторы</i>	Мощность альфа ритма		
	β	<i>CI</i>	<i>P</i>
(Intercept)	0.95	0.73 – 1.18	<0.001
Memory	0.24	0.19 – 0.28	<0.001
Shift	-0.07	-0.11 – -0.03	0.001
Inhibit	0.14	0.10 – 0.18	<0.001
WR	-0.29	-0.63 – 0.05	0.096
Channel [C2]	0.20	0.06 – 0.34	0.007
Channel [C3]	-0.24	-0.38 – -0.10	0.001
Channel [C4]	-0.14	-0.28 – 0.00	0.055
Channel [Cz]	-0.05	-0.20 – 0.09	0.461
Channel [FC1]	0.10	-0.05 – 0.24	0.181
Channel [FC2]	0.19	0.05 – 0.34	0.008
Channel [FC3]	0.01	-0.13 – 0.16	0.857
Channel [FC4]	0.77	0.62 – 0.91	<0.001
Channel [FCz]	-0.24	-0.39 – -0.10	0.001
Channel [Fz]	0.69	0.55 – 0.83	<0.001
Memory × Shift	0.10	0.06 – 0.13	<0.001
Memory × Inhibit	-0.11	-0.16 – -0.06	<0.001
Shift × Inhibit	-0.14	-0.17 – -0.10	<0.001
(Memory × Shift) × Inhibit	-0.09	-0.13 – -0.06	<0.001
Observations	1419		
R2 / R2 adjusted	0,326 / 0,317		

Примечания. Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

Был обнаружен значимый ($F(18, 8022) = 253,6, p < 0,001$) вклад индексов ИФ (Торможение и Рабочая память) в мощность бета ритма (Таблица 7). Также был показан значимых вклад фронтальных и центральных каналов.

Таблица 7 – Вклад показателей ИФ в мощность бета ритма ЭЭГ в процессе формулирования предложений

<i>Предикторы</i>	Мощность бета ритма		
	<i>B</i>	<i>CI</i>	<i>P</i>
(Intercept)	0.36	0.29 – 0.44	<0.001
Inhibit	0.06	0.04 – 0.08	<0.001
WM	-0.07	-0.09 – -0.05	<0.001
Shift	0.01	-0.01 – 0.03	0.324
WR	-0.57	-0.68 – -0.46	<0.001
Channel [C2]	0.21	0.15 – 0.27	<0.001
Channel [C3]	-0.18	-0.23 – -0.12	<0.001
Channel [C4]	-0.11	-0.16 – -0.05	<0.001
Channel [Cz]	0.06	0.00 – 0.12	0.042
Channel [FC1]	0.24	0.18 – 0.30	<0.001
Channel [FC2]	0.28	0.22 – 0.34	<0.001
Channel [FC3]	0.10	0.05 – 0.16	<0.001
Channel [FC4]	0.70	0.64 – 0.76	<0.001
Channel [FCz]	-0.15	-0.21 – -0.09	<0.001
Channel [Fz]	0.82	0.76 – 0.87	<0.001
Inhibit × WM	0.39	0.37 – 0.41	<0.001
Inhibit × Shift	-0.43	-0.45 – -0.41	<0.001
WM × Shift	-0.07	-0.09 – -0.05	<0.001
(Inhibit × WM) × Shift	0.06	0.04 – 0.07	<0.001
Observations	8041		
Marginal R2 / Conditional R2	0.363 / 0.361		

Примечания. Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

Был обнаружен значимый ($F(14, 1404) = 37,72, p < 0,001$) вклад индексов ИФ (Торможение и Память) в мощность тета ритма (Таблица 8). Также был показан значимых вклад центральных каналов.

Таблица 8 – Вклад показателей ИФ в мощность тета ритма ЭЭГ в процессе формулирования предложений

<i>Предикторы</i>	Мощность тета ритма		
	β	<i>CI</i>	<i>P</i>
(Intercept)	1.60	1.37 – 1.83	<0.001
Memory	0.15	0.11 – 0.19	<0.001
Inhibit	0.14	0.10 – 0.18	<0.001
WR	-0.28	-0.63 – 0.06	0.104
Channel [C2]	0.23	0.06 – 0.39	0.006
Channel [C3]	-0.33	-0.49 – -0.17	<0.001
Channel [C4]	-0.19	-0.35 – -0.03	0.022
Channel [Cz]	-0.17	-0.34 – -0.01	0.034
Channel [FC1]	-0.07	-0.23 – 0.10	0.418
Channel [FC2]	0.09	-0.07 – 0.25	0.291
Channel [FC3]	-0.10	-0.26 – 0.07	0.243
Channel [FC4]	0.84	0.67 – 1.00	<0.001
Channel [FCz]	-0.38	-0.54 – -0.22	<0.001
Channel [Fz]	0.62	0.46 – 0.78	<0.001
Memory \times Inhibit	-0.04	-0.08 – -0.00	0.048
Observations	1419		
Marginal R2 / Conditional R2	0.273 / 0.266		

Примечания. Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

После построения моделей был проведен двухфакторный дисперсионный анализ для определения различий нейрональной активности в различных спектральных ритмах между кластерами.

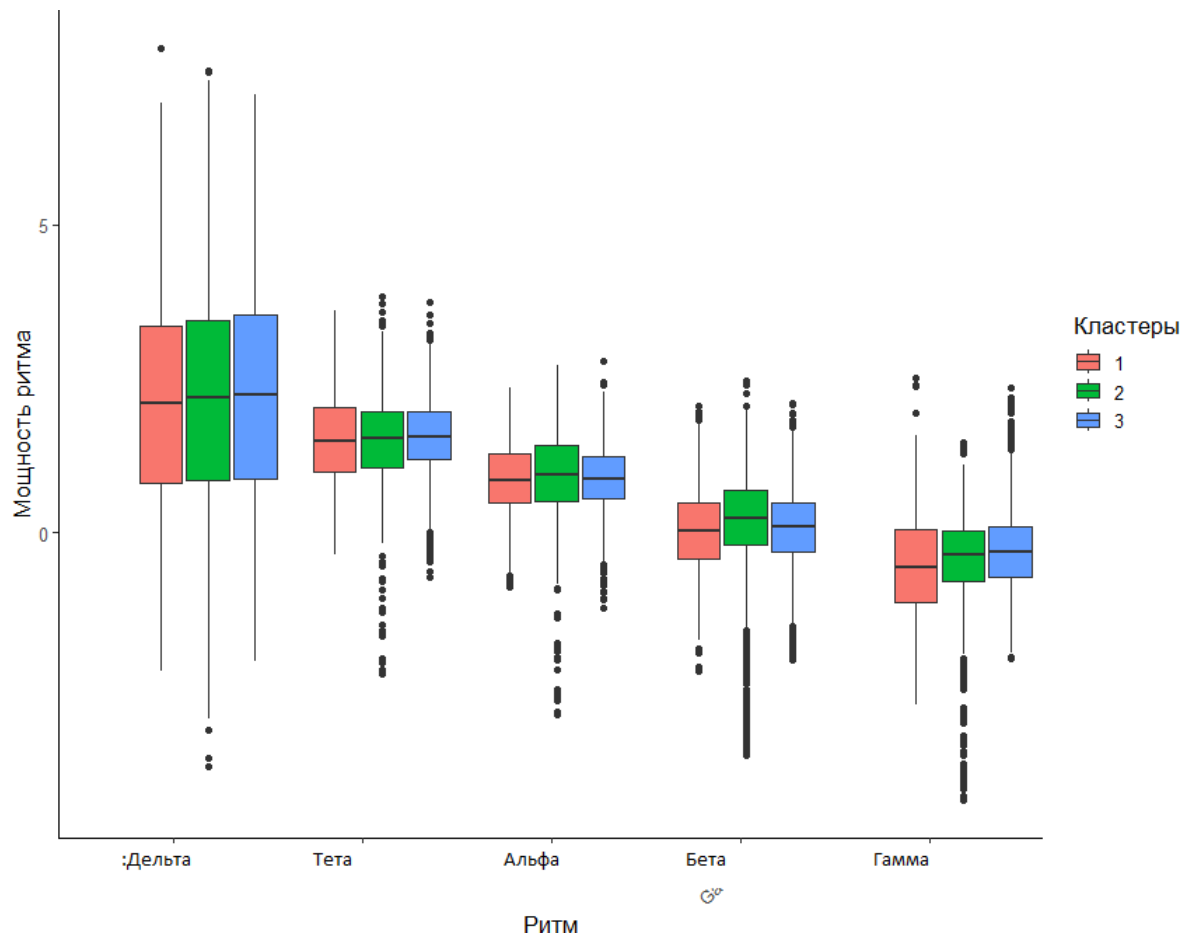


Рисунок 11 – Распределение мощности ритмов в процессе формулирования предложений в зависимости от кластера

Примечания: Кластеры; 1 - Уровень развития исполнительных функций ниже среднего, 2 - Уровень развития исполнительных функций на границе среднего, 3 - Уровень развития исполнительных функций выше среднего.

Было обнаружено статистически значимое взаимодействие двух предикторов (ритм и кластер), определяющих нейрофизиологическую активность ($F(2, 51) = 6,22, p < 0,001$). В свою очередь, оба предиктора, как Кластер ($F(2, 36) = 17,38, p < 0,001$), так и ритм ($F(4, 18453) = 4514,79, p < 0,001$), показали статистически значимые различие.

Согласно *post-hoc* критерию Тьюки, по альфа и тета ритмам между кластерами не показано статистически значимой разницы. Тогда как в бета ритме мы можем наблюдать различия между кластерами. Во втором кластере наблюдается наибольшая активация в сравнении с двумя другими (1 кластер: $\text{diff} = 0,12, p < 0,01$, 2 кластер: $\text{diff} = 0,09, p < 0,05$). В Дельта ритме мы наблюдаем

значимую разницу между третьим и первым кластером ($\text{diff} = 0,16, p < 0,01$). И, в гамма ритме третий кластер показывает наибольшую активацию (1 кластер: $\text{diff} = 0,22, p < 0,001$, 2 кластер: $\text{diff} = 0,17, p < 0,001$)

3.7. Сравнительный анализ двух экспериментов

Дальнейший анализ был направлен на определение групповых различий функционального состояния головного мозга между двумя экспериментальными условиями: копирования предложения по памяти и печати сформулированного предложения по картинке. Мы предполагали, что спектральные мощности высокочастотных ритмов в группе, в которой участники печатали предложения по картинке будут значимо выше, при этом, у участников, у которых показано более высокое развитие исполнительских функций, высокочастотные ритмы будут менее выражены. Для проверки данной гипотезы нами был выполнен двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с повторными измерениями. Предварительно показатели спектральной мощности были проверены на нормальность распределения и вычислена гомогенность дисперсий. В качестве зависимой переменной выступала спектральная мощность каждого ритма. В качестве независимых переменных выступали переменные группа и тип эксперимента. В качестве ковариат выступали интересующие нас поведенческие индексы: Индекс Памяти по методике UNIT-2, Индексы Торможения, Рабочей памяти и Переключения по методике BRIEF-2).

Линейная смешанная модель (LMM) с повторными измерениями была построена для сравнения мощности ЭЭГ между группами в двух экспериментах. Было обнаружено статистически значимое взаимодействие двух предикторов (ритм и эксперимент), определяющих нейрофизиологическую активность ($\chi^2(2) = 1622,68, p < 0,001, \eta^2 = 0,14$ [CI: 0,14 - 1]). В то же время, были обнаружены статистически значимые различия между группами в разных экспериментах ($\chi^2(2) = 37,72, p < 0,001, \eta^2 = 0,001$ [CI: 0,00 - 1]).

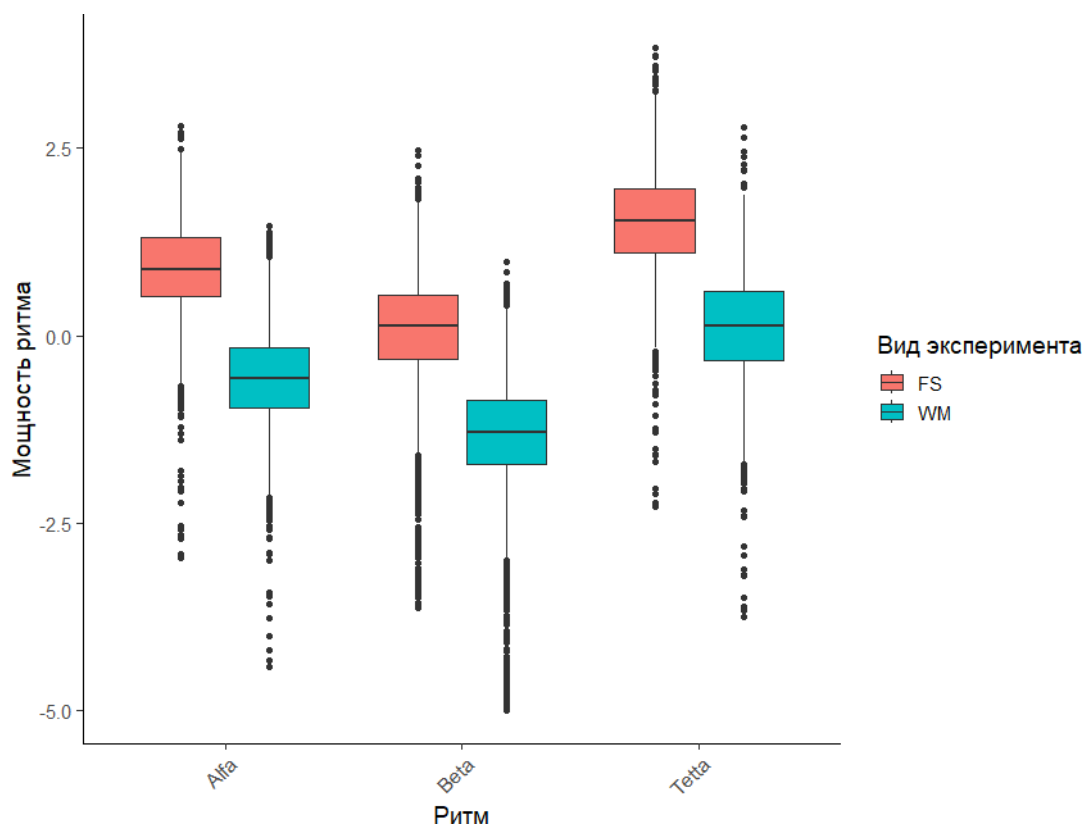


РИС 12 – Различия в спектральной плотности мощности между экспериментами

Примечания: FS - эксперимент по формулированию предложений, WM - эксперимент по копированию предложений

Были обнаружены статистически значимые различия спектральной мощности ритмов в процессе копирования и формулирования предложений. Согласно *post-hoc* критерию Тьюки ($\text{diff} = -2,22$, $p < 0,001$) мощность альфа ритма в эксперименте по копированию предложений (WM) была ниже ($M(SD) = 0,69 (0,49)$), чем в эксперименте по формулированию предложений (FS) ($M(SD) = 2,91 (1,95)$). В диапазоне бета, согласно критерию *post-hoc* Тьюки ($\text{diff} = -1,03$, $p < 0,001$), средняя мощность плотности мощности бета ритма в WM ($M(SD) = 0,33(0,23)$) значимо ниже, чем в FS ($M(SD) = 1,37(0,96)$). В то же время, согласно критерию *post-hoc* Тьюки ($\text{diff} = -4,47$, $p < 0,001$), мощность тета в WM была ниже ($M(SD) = 0,69 (1,32)$), чем в FS ($M(SD) = 5,94 (4,98)$).

Таблица 9 - Результат LMM модели по мощности спектральных ритмов между группами

<i>Предикторы</i>	Мощность ритмов		
	β	<i>CI</i>	<i>P</i>
(Intercept)	0.86	0.66 – 1.07	<0.001
Group [EG]	-0.05	-0.35 – 0.25	0.757
Exp [WM]	-1.43	-1.48 – -1.38	<0.001
Rythm [Beta]	-0.72	-0.76 – -0.68	<0.001
Rythm [Tetta]	0.63	0.58 – 0.69	<0.001
Group [EG] × Exp [WM]	-0.03	-0.10 – 0.05	0.480
Group [EG] × Rythm [Beta]	-0.09	-0.14 – -0.03	0.004
Group [EG] × Rythm[Tetta]	0.04	-0.03 – 0.12	0.274
Exp [WM] × Rythm [Beta]	0.04	-0.02 – 0.09	0.185
Exp [WM] × Rythm [Tetta]	0.08	0.01 – 0.15	0.036
(Group [EG] × Exp [WM] × Rythm [Beta])	0.00	-0.08 – 0.08	0.981
(Group [EG] × Exp [WM] × Rythm [Tetta])	-0.08	-0.18 – 0.03	0.151
Random Effects			
σ^2	0.27		
τ_{00} ID	0.27		
ICC	0.50		
N ID	48		
Observations	22862		
Marginal R2 / Conditional R2	0.585 / 0.793		

Примечания. Memory – Индекс памяти, UNIT-2; Inhibit – Индекс Торможения, BRIEF-2; WM – Индекс Рабочей памяти, BRIEF-2; Shift – Индекс Переключения, BRIEF-2. Типы экспериментов: WM - эксперимент по копированию предложений, FS - эксперимент по формулированию предложений. EG - экспериментальная группа, CG - контрольная группа. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

3.8. Обсуждение полученных результатов.

При печати механизмы формулирования предложения и печати слов могут выполняться параллельно и не носить иерархический характер, а выполняться на одном и том же уровне, одновременно регулируя простейший моторный акт и контроль ошибок [64]. Тем не менее, при произвольном управлении движением, исполнительный контроль регулирует последовательный набор печати в зависимости от цели и задачи, запуская иерархически

опосредованные моторные программы, которые могут обеспечивать целостную репрезентацию всего сложного моторного акта (такого как слово или целое предложения), в сочетании с механизмом коррекции каждого отдельного элемента отдельным подчиненным блоком [72]. Соответственно, можно говорить, что при печати наблюдаются как параллельные процессы (Торможение и Рабочая память), так и последовательно организованные процессы (Торможение и Переключение). Поскольку бета ритм наблюдается при решении задач, требующих максимально сосредоточенного внимания [75], и иллюстрирует баланс тормозных и возбуждающих процессов [57], можно предположить, что мощность бета ритма является индикатором механизма обработки информации и выдачи моторных команд при печати. Взаимодействие вышеупомянутых показателей (Торможение и Переключение, Торможение

и Рабочая память по методике BRIEF-2) демонстрирует значимый вклад в распределение нейрональной активации во фронтальной и префронтальной коре, что совпадает с результатами исследования исполнительного контроля [26]; [30]; [117] и рабочей памяти [98].

Исходя из этого, можно говорить именно о комплексе нейрофизиологических индикаторов, отражающих уровень когнитивной нагрузки в процессе печати.

Вклад исполнительного контроля наблюдается как при непосредственном наборе текста, так и в процессе формулирования предложений. Соответственно,

он захватывает обе петли обратной связи [72], управляющих, как целостным процессом печати предложения, так и отдельным моторным актом. Степень вовлеченности исполнительного контроля определяется уровнем развития навыка печати и степенью его автоматизированности. Также исполнительный контроль регулирует процессы целеполагания, планирования, мониторинга и оценки результатов [2]. Наши результаты показывают, что респонденты с более высоким навыком печати демонстрируют лучший исполнительный контроль. Что соотносится с результатами предыдущих исследований, в которых более высокий навык печати требовал меньше когнитивных усилий [30]; [95] и, соответственно, меньшей активации процессов торможения, то есть, более успешную работу исполнительного контроля. Тем самым, автоматизация печати позволяет успешнее реализовывать более сложные задачи по формулированию предложений [58]. А также, при формировании автоматизированного навыка, освобождается ресурс для использования когнитивных функций для реализации других задач.

Выше был поставлен вопрос о взаимодействии исполнительных функций. Можно предположить следующие варианты взаимодействия рабочей памяти и исполнительного контроля: (1) контроль обработки информации, (2) фильтрация или подавление нерелевантной информации.

Исполнительный контроль включается в процессы рабочей памяти при целенаправленном удержании одной цели, и подавлении всех прочих. В случае концентрации на конкретной задаче, например, написании текста, необходимо игнорировать все прочие внешние стимулы, которые поступают извне. Чем успешнее процессы торможения, тем проще удерживать концентрацию. При копировании, от участника требуется запомнить текст, который был предъявлен, удержать его в памяти и напечатать то, что запомнил. Это требует не только активации рабочей памяти, но и концентрации на одной задаче.

Существует достаточно много примеров исследований, в которых иллюстрируют, что чем более творческая и сложная задача, тем выше требуется концентрация, и тем больше снижают эффективность внешние отвлекающие

факторы. Данный феномен можно отнести как к копированию предложений, так и к их формулированию. При этом, копирование предложений является более простой задачей, чем формулирование.

Рассмотрим исследования, которые были проведены на комбинирование исполнительного контроля и рабочей памяти, например, задачи на подавление "шума". Достаточно известные эксперименты дихотомической подачи разных звуковых стимулов в разные уши, и концентрация только на одном, задачи на чередование буквы и цифры, разработанной Дунканом и др. (2008). Участники, которые не снизили релевантность дополнительной задачи, и не "притормозили" ее, гораздо хуже справляются с первичной, сложной задачей.

Задача на формулирование предложений отражает способность грамматически и синтаксически корректно формулировать сложные предложения. Поскольку предварительно было определено, что статистически значимых различий между группами по показателям исполнительных функций не наблюдалось, то различия дисперсий в бета ритме могут демонстрировать уровень когнитивной сложности между заданиями.

Исследования исполнительного контроля [115] демонстрировали, что при активации моторной памяти (в данном случае, автоматизированность процесса печати может быть рассмотрена как моторная память), рост торможения в префронтальной области сопровождался повышением бета ритма, что и подтверждается в данном исследовании. То есть, процесс копирования предложения, сопровождающийся увеличением бета ритма в премоторной области отражает общую тенденцию задействования моторной памяти. Процесс генерирования и формулирования текста и его последующей печати усложняется не только двигательными паттернами, которые задействуются при наборе слов, но и когнитивными усилиями по порождению текста. Эти процессы задействуют пространственное и вербальное мышление, исполнительное внимание и рабочую память [47]; [64]; [93]. При автоматизированной печати когнитивные функции задействованы в меньшей степени, а набор текста будет осуществляться за счет

механической и рабочей памяти [118]. При не автоматизированном процессе печати, комбинирование последовательных повторяющихся движений при наборе текста обеспечиваются за счет процессов ингибирования моторных импульсов для нажатия клавиш из структур высшего уровня [21]; [74]; [94]. Соответственно, чем более автоматизированным является паттерн, тем больше задействована внутренняя петля, и, тем меньше внешняя [39].

Тем не менее, как при копировании, так и при формулировании предложений наблюдается вклад взаимодействия показателей Рабочая память Торможение в мощность бета ритма передних отделов головного мозга. Процесс печати требует привлечения рабочей памяти как буфера для хранения, обработки и передачи информации [30]. Согласно модели распределения ресурсов, более сложная задача сильнее нагружает рабочую память. Также, чем выше навык автоматизированного письма, тем быстрее протекают процессы в рабочей памяти. Соответственно, можно говорить о том, что Рабочая память была задействована при удержании в памяти слов и изображений при выполнении сложной неавтоматизированной деятельности, такой как формулирование предложения [28]; [95]. Это иллюстрируется через увеличение мощности бета-активности в префронтальных и фронтальных областях [67].

Также по результатам данного исследования бета активность уменьшалась с увеличением самого показателя Переключения. Поскольку префронтальная кора задействована в процессах дифференциации ресурсов внимания, то есть, переключения внимания на стимул [97], можно предполагать, что процесс удержания внимания на задаче для участников с высоким переключением, требовал меньшей когнитивной нагрузки [96]. Эти результаты косвенным образом могут говорить о том, что в задаче на формулирование предложения по картинке задействованы процессы переключения. Поскольку исследования показывают, что навыки слепой и полуслепой печати [93] снижают когнитивную нагрузку участников, можно говорить о более репрезентативной иллюстрации процесса переключения. Соответственно, чем выше данная способность у

участника, тем проще ему выполнять задачу.

Суммируя вышесказанное, в процессе формулирования предложения когнитивная нагрузка, выраженная в бета-мощности, тем ниже, чем выше уровень развития переключения и торможения.

Различия в нейрональной активации между двумя типами заданий продемонстрировали, что в альфа, бета и тета ритмах уровень нагрузки в задаче на формулирование предложений был значимо выше. Разница в бета ритме может говорить, что копирование сложных, бессмысленных предложений, которые требуют большой ресурсной нагрузки, согласно теории рабочей памяти [28], в меньшей степени активируют бета ритмику, возникающую в процессе решения сложных задач. Согласно имеющимся данным, появление тета активности в фронтально–медиальной области при копировании текста [79] свидетельствует об общем повышении когнитивной нагрузки в процессе печати. Процесс формулирования предложений гораздо более сложен с точки зрения когнитивной нагрузки, поскольку задействует не только процесс печати, активацию исполнительных и когнитивных функций, но также процессы внутренней речи [47]. Соответственно, высокочастотные ритмы при этом процессе активируются выше, в сравнении с печатью припоминаемых предложений.

Выводы

Исходя из сформулированных гипотез и полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Полученные результаты между методиками BRIEF-2 и UNIT-2, которые измеряют уровень развития исполнительных функций, иллюстрируют высокую корреляцию по показателям внутри методик (Торможение, Переключение и Рабочая память), тогда как между методиками этой тенденции не наблюдается. Соответственно, данные методики покрывают различные домены исполнительных функций.

2. Наблюдается статистически значимый вклад уровня развития торможения к проценту верно напечатанных слов. Соответственно, можно предположить, что, чем более эффективны процессы торможения, тем выше точность напечатанного. Исходя из этого, чем выше точность написанного, тем лучше развит навык торможения у респондента. Остальные поведенческие характеристики статистической значимости не показали.

3. Модель, которая наиболее эффективно описывает дисперсию активации мощностей альфа, бета и тета ритмов при печати, включает в себя предикторы, такие как рабочая память, выраженность тормозных процессов и уровень переключения внимания.

3.1 Был показан значимый вклад показателей торможения, переключения и рабочей памяти в мощность альфа, бета и тета ритмах при копировании припоминаемого предложения. При этом, в гамма и в дельта ритмах наблюдаются значимые отличия по кластерам, сформированным по уровню развития исполнительных функций. Мощность бета ритма является индикатором механизма обработки информации и выдачи моторных команд при печати. Значимое влияние альфа и тета ритмов показывает баланс тормозных и возбуждающих процессов. Это иллюстрирует принцип работы

моторной памяти, и также отражается в активации тета и альфа ритмов во фронтальной и префронтальной коре, что совпадает с результатами исследования исполнительного контроля и рабочей памяти.

3.2. Был обнаружен значимый вклад рабочей памяти и торможения в мощность альфа, бета и тета ритмов при печати сформулированного по изображению предложения. При этом в бета ритме можно наблюдать более высокую активацию в кластере со средними значениями по всем показателям. Что может говорить о том, что когнитивная нагрузка в группе, с высокими показателями более низкая, в связи с наработанным навыком. Тогда как более высокий альфа-ритм обеспечивал баланс тормозных процессов в двух других группах. Также наши результаты показывают, что респонденты с более высоким навыком печати демонстрируют лучший исполнительный контроль, поскольку высокий навык печати требовал меньше когнитивных усилий и, соответственно, меньшей активации процессов торможения, рабочей памяти и переключения. А также, при формировании автоматизированного навыка, освобождается ресурс для использования когнитивных функций для реализации других задач.

4. Наблюдались значимые различия в нейрональной активности между типами экспериментов. В эксперименте по копированию предложений в альфа, бета и тета ритмах мощность ниже, чем в экспериментах по формулированию предложений. Разница в бета ритме может говорить, что копирование сложных, бессмысленных предложений, которые требуют большой ресурсной нагрузки, согласно теории рабочей памяти, в меньшей степени активируют бета ритмику, возникающую в процессе решения сложных задач. Согласно имеющимся данным, появление тета активности в фронтально–медиальной области при копировании текста свидетельствует обобщем повышении когнитивной нагрузки в процессе печати.

Заключение

Все задачи, поставленные в данном исследовании, были полностью решены. Нами были изучены психофизиологические и поведенческие особенности исполнительных функций в процессе печати и построены модели исполнительных функций, согласно поставленной цели.

Научная значимость полученных результатов отражается в определении психофизиологических паттернов исполнительных функций при печати. Печать является сложным иерархическим процессом, в котором задействованы исполнительные и моторные функции. Принципиальная разница между копированием предложений и формулированием новых предложений в процессе печати можно отследить по активации высокочастотных ритмов во фронтальных, префронтальных и моторных областях. Зачастую печать, как процесс, демонстрирует высокую нагрузку в премоторных и моторных областях, только если респондентам дается дополнительная задача на печать [102]. При этом, если речь идет о копировании текста или предложения, то, в связи с тем, что деятельность достаточно автоматизирована, высокочастотная нагрузка наблюдается в меньшей степени [72]. Соответственно, у респондентов, у которых печать автоматизирована (согласно литературе, скорость печати при копировании – выше 150 знаков в минуту, точность – выше 97%), возможно изучать более сложные психические процессы при печати, которые также задействованы в этом процессе. Согласно теории Логана и Крампа (2011) об иерархических процессах при печати, данный инструмент можно использовать в том числе для тренировки исполнительных функций, которые активно вовлечены в процессы печати на всех этапах. Данное исследование продемонстрировало высокий вклад исполнительного контроля, рабочей памяти, процессов торможения и переключения в печать предложений, как в случае припоминания заданных предложений, так и в ситуации формулирования предложений. Моторный компонент, который задействован в данном иерархическом процессе (моторная память), часто в литературе упоминается в качестве диагностики или

при профилактике дегенеративных заболеваний. Данное исследование наглядно проиллюстрировало вклад, который вносит в процесс печати уровень развития различных исполнительных функций, что может говорить, что различные тренажеры, основанные на печати, могут быть использованы для тренировки этих функций. Практический вклад данного исследования может быть отражен в полезности создания печатных тренажеров различного уровня сложности для респондентов, у которых наблюдаются нарушения когнитивных или исполнительных функций. Поскольку печать является распространенной деятельностью, то подобные тренировки могут быть доступны практически любым слоям населения.

Также, поскольку в настоящее время существует социальная проблема трудности обучения печати на компьютере возрастных групп населения, то популяризация информации о том, что данный вид деятельности может быть рассмотрен как профилактика и укрепление когнитивных и исполнительных функций, может повысить мотивацию пожилых людей к обучению.

Другим полярным блоком практической и социальной значимости может быть разработка более совершенных способов печати, на основе полученных результатов. Поскольку в данной работе была показана взаимосвязь между исполнительными функциями и печатью, то можно предполагать возможность обучения нейросетей на основе полученных психофизиологических данных, что и будет являться дальнейшей задачей автора.

Список работ, опубликованных по результатам диссертационного исследования

1. Андриянова Н.В., Бакулева К.К., Петров М.В., Голованова И.В., Момотенко Д.А., Абраменков А.И. Психологические и нейрофизиологические особенности проявления противоречий при социальном восприятии в зависимости от типа исходной информации о человеке // Интернет-журнал «Мир науки» 2017, Том 5, номер 6
2. Момотенко, Д. А. (2022). Психофизиология исполнительных функций при печати на компьютере. Современная зарубежная психология, 11(3), 105-113.
3. Chinn L.K., Momotenko D.A., Grigorenko E.L. A Russian Translation of the BRIEF2 Disproportionately Flags Typical Russian and Previously Institutionalized Individuals on Validity Scales [Elektronnyi resurs]. Klinicheskaiia i spetsial'naia psikhologiiia = Clinical Psychology and Special Education, 2022. Vol. 11, no. 2, pp. 138–157. doi:10.17759/cpse.2022110209.
4. Chinn, L. K., Momotenko, D. A., Sukmanova, A. A., Ovchinnikova, I. V., Golovanova, I. V., & Grigorenko, E. L. (2023). Effects of childhood institutionalization on semantic processing and its neural correlates persist into adolescence and adulthood. Cortex, 161, 93-115.
5. Chumakova, M. A., Momotenko, D. A., Sukmanova, A. A., Chinn, L. K., & Grigorenko, E. L. (2022). Executive functions as self-reported on the BRIEF scales in adolescents and adults with and without a history of institutionalized rearing in Russia. Cognitive Development, 64, 101261.

Список литературы

1. Андриянова Н.В., Бакулева К.К., Петров М.В., Голованова И.В., Момотенко Д.А., Абраменков А.И. Психологические и нейрофизиологические особенности проявления противоречий при социальном восприятии в зависимости от типа исходной информации о человеке // Интернет-журнал «Мир науки» 2017, Том 5, номер 6
2. Баарс, Б., & Гейдж, Н. Мозг, познание, разум: введение в когнитивные нейронауки. М., БИНОМ Лаборатория знаний, 2014.
3. Веракса А. Н., Гаврилова М. Н., Бухаленкова Д. А. Связь показателей развития речи и регуляторных функций у детей дошкольного возраста: анализ исследований // Психологический журнал. – 2019. – Т. 40. – № 3. – С. 64-76.
4. Виленская, Г. А. Исполнительные функции: природа и развитие // Психологический журнал. – 2019. – Т.37 – № 4. – С. 21-31.
5. Лурия А. Р. Мозг и психические процессы. Т. 2. М., 1970.
6. Момотенко, Д. А. Психофизиология исполнительных функций при печати на компьютере // Современная зарубежная психология. – 2022. – Т.11. – № 3, 105-113.
7. Arezzo, J., & Vaughan Jr, H. G. Intracortical sources and surface topography of the motor potential and somatosensory evoked potential in the monkey // In progress in brain research. – 1980. – Vol. 54, pp. 77–83).
8. Baddeley, A. The episodic buffer: a new component of working memory? // Trends in cognitive sciences. – 2000. – Vol. 4(11). – pp. 417–423.
9. Baddeley, A. Working memory, thought, and action. – 2007. – Vol. 45. – OuP Oxford.
10. Baddeley, A. Working memory: theories, models, and controversies // Annual review of psychology. – 2012. – Vol. 63. – pp. 1-29.
11. Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. Developments in the concept of working memory // Neuropsychology. – 1994. – Vol. 8(4). – pp. 485.

12. Baggetta, P., & Alexander, P. A. (2016). Conceptualization and operationalization of executive function // *Mind, Brain, and Education*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 10–33.
13. Bai, O., Mari, Z., Vorbach, S., & Hallett, M. Asymmetric spatiotemporal patterns of event-related desynchronization preceding voluntary sequential finger movements: a high-resolution EEG study // *Clinical neurophysiology*. – 2005. – Vol. 116(5). – pp. 1213–1221.
14. Barrouillet, P., and Camos, V. The time-based resource-sharing model of working memory // *The Cognitive Neuroscience of Working Memory*. – 2007. - ed. N. Osaka (Oxford: Oxford University Press), 59–80.
15. Baus, C., Strijkers, K., & Costa, A. When does word frequency influence written production? // *Frontiers in psychology*. – 2013. – Vol. 4. – pp. 963.
16. Berlot, E., Prichard, G., O'Reilly, J., Ejaz, N., & Diedrichsen, J. Ipsilateral finger representations in the sensorimotor cortex are driven by active movement processes, not passive sensory input // *Journal of neurophysiology* // 2019. - Vol. 121(2). – pp. 418–426.
17. Berninger, V. W., Cartwright, A. C., Yates, C. M., Swanson, H. L., & Abbott, R. D. Developmental skills related to writing and reading acquisition in the intermediate grades // *Reading and Writing*. – 1994. – Vol. 6(2). – pp. 161–196.
18. Bialystok, E., Craik, F. I., & Ryan, J. Executive control in a modified antisaccade task: Effects of aging and bilingualism // *Journal of experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*. – 2006. – Vol. 32(6). – pp. 1341.
19. Bolkan, S. S., Stujenske, J. M., Parnaudeau, S., Spellman, T. J., Rauffenbart, C., Abbas, A. I., et al. Thalamic projections sustain prefrontal activity during working memory maintenance // *Nat. Neurosci*. – 2018. – Vol. 20. – pp. 987–996.
20. Bolker, B. M. Linear and generalized linear mixed models // *Ecological statistics: contemporary theory and application*. – 2015. – pp. 309–333.
21. Botvinick, M., & Plaut, D. C. (2004). Doing without schema hierarchies: a recurrent connectionist approach to normal and impaired routine

sequential action // *Psychological review*. – 2004. – Vol. 111(2). – pp. 395.

22. Bracken, B. A., & McCallum, R. S. *Universal nonverbal intelligence test*. Chicago, IL, USA:: Riverside Publishing Company, 1998.

23. Braem, S., & Egner, T. Getting a grip on cognitive flexibility // *Current Directions in Psychological Science*. – 2018. – Vol. 27(6). – pp. 470-476.

24. Burle, B., Bonnet, M., Vidal, F., Possamai, C. A., & Hasbroucq, T. A transcranial magnetic stimulation study of information processing in the motor cortex: relationship between the silent period and the reaction time delay // *Psychophysiology*. – 2002. – Vol. 39(2). – pp. 207–217.

25. Burle, B., Possamai, C. A., Vidal, F., Bonnet, M., & Hasbroucq, T. Executive control in the Simon effect: an electromyographic and distributional analysis // *Psychological research*. – 2002. – Vol. 66(4). – pp. 324–336.

26. Burle, B., Van den Wildenberg, W. P., Spieser, L., & Ridderinkhof, K. R. Preventing (impulsive) errors: Electrophysiological evidence for online inhibitory control over incorrect responses // *Psychophysiology*. – 2016. – Vol. 53(7). – pp. 1008–1019.

27. Çak, H. T., ÇengelKültür, S. E., Gökler, B., Öktem, F., & Taşkiran, C. The Behavior Rating Inventory of Executive Function and continuous performance test in preschoolers with attention deficit hyperactivity disorder // *Psychiatry Investigation* – 2017. – Vol. 14(3). – pp. 260.

28. Chai, W. J., Abd Hamid, A. I., & Abdullah, J. M. Working memory from the psychological and neurosciences perspectives: a review // *Frontiers in psychology*. – 2018. – Vol. 9. Pp. 401.

29. Cheyne, D. O. (2013). MEG studies of sensorimotor rhythms: a review // *Experimental neurology*. – 2013. – Vol. 245. – pp. 27–39.

30. Cheyne, D. O., Ferrari, P., & Cheyne, J. A. Intended actions and unexpected outcomes: automatic and controlled processing in a rapid motor task // *Frontiers in human neuroscience*. 2012. – Vol. 6. – pp. 237.

31. Chinn, L. K., Momotenko, D. A., & Grigorenko, E. L. A Russian Translation of the BRIEF2 Disproportionately Flags Typical Russian and Previously

Institutionalized Individuals on Validity Scales // *Clinical Psychology & Special Education/Klinicheska I Special'naa Psihologia*. – 2022. – Vol. 11(2).

32. Chinn, L. K., Momotenko, D. A., Sukmanova, A. A., Ovchinnikova, I. V., Golovanova, I. V., & Grigorenko, E. L. Effects of childhood institutionalization on semantic processing and its neural correlates persist into adolescence and adulthood // *Cortex*. – 2023. – Vol. 161. – pp. 93-115.

33. Christoff, K., Gordon, A. M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J. W. Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2009. – Vol. 106(21). – pp. 8719-8724.

34. Chumakova, M. A., Momotenko, D. A., Sukmanova, A. A., Chinn, L. K., & Grigorenko, E. L. Executive functions as self-reported on the BRIEF scales in adolescents and adults with and without a history of institutionalized rearing in Russia // *Cognitive Development*. – 2022. – Vol. 64. – pp. 101261.

35. Clark, S. V., Semmel, E. S., Aleksonis, H. A., Steinberg, S. N., & King, T. Z. Cerebellar-subcortical-cortical systems as modulators of cognitive functions // *Neuropsychology Review*. – 2022. – Vol. 31(3). – pp. 422-446.

36. Cohen, A. L., Bayer, U. C., Jaudas, A., & Gollwitzer, P. M. Self-regulatory strategy and executive control: Implementation intentions modulate task switching and Simon task performance // *Psychological Research*. – 2008. – Vol. 72(1). – pp. 12–26.

37. Cowan, N. What are the differences between long-term, short-term, and working memory? // *Prog. Brain Res*. – 2008. – Vol. 169. – pp. 323–338.

38. Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes // *Cognitive psychology*. – 2005. – Vol. 51(1). – pp. 42–100.

39. Crump, M. J., & Logan, G. D. Hierarchical control and skilled typing: Evidence for word-level control over the execution of individual keystrokes // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. – 2010. – Vol.

36(6). – pp. 1369.

40. Dhamala, M., Pagnoni, G., Wiesenfeld, K., Zink, C. F., Martin, M., & Berns, G. S. Neural correlates of the complexity of rhythmic finger tapping // *Neuroimage*. – 2003. – Vol. 20(2). – pp. 918–926.

41. Diamond, A. Executive functions // *Annual review of psychology*. – 2013. – Vol. 64. – pp. 135–168.

42. Donner, T. H., Siegel, M., Fries, P., & Engel, A. K. (2009). Buildup of choice–predictive activity in human motor cortex during perceptual decision making // *Current Biology*. – 2009. – Vol. 19(18). – pp. 1581–1585.

43. Duque, J., Lew, D., Mazzocchio, R., Olivier, E., & Ivry, R. B. Evidence for two concurrent inhibitory mechanisms during response preparation // *Journal of Neuroscience*. – 2010. – Vol. 30(10). – pp. 3793–3802.

44. Eagle, D. M., Bari, A., & Robbins, T. W. The neuropsychopharmacology of action inhibition: cross–species translation of the stop–signal and go/no–go tasks // *Psychopharmacology*. – 2008. – Vol. 199(3). – pp. 439–456.

45. Fan, J., McCandliss, B. D., Fossella, J., Flombaum, J. I., & Posner, M. I. The activation of attentional networks // *Neuroimage*. – 2005. – Vol. 26(2). – pp. 471–479.

46. Friston, K., Moran, R., and Seth, A. K. Analysing connectivity with granger causality and dynamic causal modelling // *Curr. Opin. Neurobiol.* – 2013. – Vol. 23. – pp. 172–178.

47. García-Marco, E., Morera, Y., Beltrán, D., de Vega, M., Herrera, E., Sedeño, L., ...& García, A. M. Negation markers inhibit motor routines during typing of manual action verbs // *Cognition*. 2019. – Vol. 182. – pp. 286–293.

48. Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. Test review behavior rating inventory of executive function // *Child Neuropsychology*. – 2000. – Vol. 6(3). – pp. 235–238.

49. Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. BRIEF: Behavior rating inventory of executive function. Lutz, FL: Psychological Assessment

Resources, 2009.

50. Gioia, G. A., Isquith, P. K., Guy, S. C., & Kenworthy, L. BRIEF: Behavior rating inventory of executive function. Lutz, FL: Psychological Assessment Resources, 2015.

51. Goldberg, E. The new executive brain: Frontal lobes in a complex world. Oxford University Press, 2009

52. Grigorenko, E. L., Mambrino, E., & Preiss, D. D. Writing: A mosaic of new perspectives. Psychology Press, 2012

53. Hallett, P. E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions // *Vision research*. – 1978. – Vol. 18(10). – pp. 1279-1296.

54. Hamzei, F., Dettmers, C., Rzanny, R., Liepert, J., Büchel, C., & Weiller, C. Reduction of excitability («inhibition») in the ipsilateral primary motor cortex is mirrored by fMRI signal decreases // *Neuroimage*. – 2002. – Vol. 17(1). – pp. 490–496.

55. Heidlmayr, K., Kihlstedt, M., & Isel, F. A review on the electroencephalography markers of Stroop executive control processes // *Brain and Cognition*. – 2020. – Vol. 146. – pp. 105637.

56. Jimura, K., Chushak, M. S., Westbrook, A., and Braver, T. S. Intertemporal decision-making involves prefrontal control mechanisms associated with working memory // *Cereb. Cortex*. - 2017

57. Jones, K. T., Johnson, E. L., & Berryhill, M. E. Frontoparietal theta-gamma interactions track working memory enhancement with training and tDCS // *Neuroimage*. – 2020. – Vol. 211. - pp 116615.

58. Kalfaoğlu, Ç., Stafford, T., & Milne, E. Frontal theta band oscillations predict error correction and posterror slowing in typing // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2018. - Vol. 44(1). – pp. 69.

59. Kičić, D., Lioumis, P., Ilmoniemi, R. J., & Nikulin, V. V. Bilateral changes in excitability of sensorimotor cortices during unilateral movement: combined electroencephalographic and transcranial magnetic stimulation study // *Neuroscience*. –

2008. – Vol. 152(4). – pp. 1119–1129.

60. Kim, C., Kroger, J. K., Calhoun, V. D., and Clark, V. P. (2015). The role of the frontopolar cortex in manipulation of integrated information in working memory // *Neurosci. Lett.* – 2015. – Vol. 595. – pp. 25–29.

61. Kopp, B., Rist, F., & Mattler, U. W. E. N200 in the flanker task as a neurobehavioral tool for investigating executive control // *Psychophysiology.* – 1996. – Vol. 33(3). – pp. 282–294.

62. Kristeva, R., Patino, L., & Omlor, W. (2007). Beta-range cortical motor spectral power and corticomuscular coherence as a mechanism for effective corticospinal interaction during steady-state motor output // *NeuroImage.* – 2007. – Vol. 36(3). – pp. 785–792.

63. Krueger, R., Huang, Y., Liu, X., Santander, T., Weimer, W., & Leach, K. Neurological divide: an fMRI study of prose and code writing // 2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering (ICSE). – 2020. – pp. 678–690).

64. Kuanar, S., Athitsos, V., Pradhan, N., Mishra, A., & Rao, K. R. Cognitive analysis of working memory load from EEG, by a deep recurrent neural network // 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2018. – pp. 2576–2580.

65. Labruna, L., Lebon, F., Duque, J., Klein, P. A., Cazares, C., & Ivry, R. B. Generic inhibition of the selected movement and constrained inhibition of nonselected movements during response preparation // *Journal of cognitive neuroscience.* – 2014. – Vol. 26(2). – pp. 269–278.

66. Laureiro-Martínez, D., & Brusoni, S. Cognitive flexibility and adaptive decision-making: Evidence from a laboratory study of expert decision makers // *Strategic Management Journal.* – 2018. – Vol. 39(4). – pp. 1031-1058.

67. Lawson, G. M., Hook, C. J., & Farah, M. J. (2018). A meta-analysis of the relationship between socioeconomic status and executive function performance among children // *Developmental science.* – 2018. – Vol. 21(2). – pp. 12529.

68. Lebedev, M. A., & Nicolelis, M. A. Brain–machine interfaces: From

basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation // *Physiological reviews*. – 2017. – Vol. 97(2). – pp. 767–837.

69. Leocani, L., Toro, C., Zhuang, P., Gerloff, C., & Hallett, M. Event-related desynchronization in reaction time paradigms: a comparison with event-related potentials and corticospinal excitability // *Clinical Neurophysiology*. – 2001. – Vol. 112(5). – pp. 923–930.

70. Leuthold, H., Sommer, W., & Ulrich, R. Preparing for action: inferences from CNV and LRP // *Journal of psychophysiology*. – 2004. – Vol. 18(2/3). – pp. 77– 88.

71. Logan, G. D. On the ability to inhibit thought and action: A users' guide to the stop signal paradigm, 1994.

72. Logan, G. D., & Crump, M. J. The left hand doesn't know what the right hand is doing: The disruptive effects of attention to the hands in skilled typewriting // *Psychological Science*. – 2009. – Vol. 20(10). – pp. 1296–1300.

73. Logan, G. D., & Crump, M. J. Hierarchical control of cognitive processes: The case for skilled typewriting // In *Psychology of learning and motivation*. – 2011. – Vol. 54. – pp. 1–27. Academic Press.

74. Logan, G. D., Miller, A. E., & Strayer, D. L. Electrophysiological evidence for parallel response selection in skilled typists // *Psychological science*. – 2011. – Vol. 22(1). – pp. 54–56.

75. Lundqvist, M., Herman, P., Warden, M. R., Brincat, S. L., & Miller, E. K. Gamma and beta bursts during working memory readout suggest roles in its volitional control // *Nature communications*. – 2018. – Vol. - 9(1). – pp. 1-12.

76. Lundqvist, M., Herman, P., Warden, M. R., Brincat, S. L., & Miller, E. K. Gamma and beta bursts during working memory readout suggest roles in its volitional control // *Nature communications*. – 2018. – Vol. 9(1). – pp. 1–12.

77. Ma, L., Steinberg, J. L., Hasan, K. M., Narayana, P. A., Kramer, L. A., and Moeller, F. G. Working memory load modulation of parieto– frontal connections: evidence from dynamic causal modeling // *Hum. Brain Mapp*. – 2012. –

Vol. 33. Pp. 1850–1867.

78. McAuley, T., Chen, S., Goos, L., Schachar, R., & Crosbie, J. Is the behavior rating inventory of executive function more strongly associated with measures of impairment or executive function? // *Journal of the International Neuropsychological Society*. – 2010. – Vol. 16(3). – pp. 495–505.

79. Meckler, C., Allain, S., Carbonnell, L., Hasbroucq, T., Burle, B., & Vidal, F. Motor inhibition and response expectancy: A Laplacian ERP study // *Biological psychology*. – 2010. – Vol. 85(3). – pp. 386–392.

80. Miller, E. K., Lundqvist, M., & Bastos, A. M. Working Memory 2.0 // *Neuron*. – 2018. – Vol. 100(2). – pp. 463–475.

81. Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis // *Cognitive psychology*. – 2000. – Vol. 41(1). – pp. 49–100.

82. Moore, A. B., Li, Z., Tyner, C. E., Hu, X., and Crosson, B. Bilateral basal ganglia activity in verbal working memory // *Brain Lang.* – 2013. – Vol. 125. – pp. 316–323.

83. Murty, V. P., Sambataro, F., Radulescu, E., Altamura, M., Iudicello, J., Zolnick, B., et al. Selective updating of working memory content modulates meso-cortico-striatal activity // *Neuroimage*. – 2011. – Vol. 57. – pp. 1264–1272.

84. Nguyen, P., Bui, N., Nguyen, A., Truong, H., Suresh, A., Whitlock, M., ...& Vu, T. Tyth–typing on your teeth: Tongue–teeth localization for human–computer interface // *Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications*. – 2018.

85. Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D.C., & Carter, C. S. (Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. – 2012. – Vol. 12(2). – pp. 241–268.

86. Nirkko, A. C., Ozdoba, C., Redmond, S. M., Bürki, M., Schroth, G., Hess, C. W., & Wiesendanger, M. (2001). Different ipsilateral representations for distal

and proximal movements in the sensorimotor cortex: activation and deactivation patterns // *Neuroimage*. – 2001. – Vol. 13(5). – pp. 825–835.

87. Oldfield, R.C. «The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory.» *Neuropsychologia*. 9(1):97–113. 1971

88. Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T., et al. The neural basis of individual differences in working memory capacity: an fMRI study // *Neuroimage*. – 2003. – Vol. 18. – pp. 789–797.

89. Perera, H., Shiratuddin, M. F., & Wong, K. W. (2018). Review of EEG-based pattern classification frameworks for dyslexia // *Brain informatics*. – 2018. – Vol. 5(2). – pp. 1–14.

90. Petersen, S. E., & Posner, M. I. The attention system of the human brain: 20 years after // *Annual review of neuroscience*. – 2012. – Vol. 35. – pp. 73.

91. Phillips, L. H. The role of memory in the Tower of London task. *Memory*, 7(2), 209-231, 1999.

92. Pinet, S., & Nozari, N. (2020). Electrophysiological correlates of monitoring in typing with and without visual feedback // *Journal of Cognitive Neuroscience*. – 2020. – Vol. 32(4). – pp. 603-620.

93. Pinet, S., Hamamé, C. M., Longcamp, M., Vidal, F., & Alario, F. X. Response planning in word typing: Evidence for inhibition // *Psychophysiology*. – 2015. – Vol. 52(4). – pp. 524–531.

94. Praamstra, P., & Seiss, E. The neurophysiology of response competition: Motor cortex activation and inhibition following subliminal response priming // *Journal of cognitive neuroscience*. – 2005. – Vol. 17(3). – pp. 483–493.

95. Qu, X., Mei, Q., Liu, P., & Hickey, T. Using EEG to distinguish between writing and typing for the same cognitive task // *International Conference on Brain Function Assessment in Learning*. 2020. – pp. 66–74. Springer, Cham.

96. Richter, C. G., Bosman, C. A., Vezoli, J., Schoffelen, J. M., & Fries, P. Brain rhythms shift and deploy attention // *bioRxiv*. – 2019.

97. Rikhye, R. V., Gilra, A., & Halassa, M. M. Thalamic regulation of switching between cortical representations enables cognitive flexibility // *Nature*

neuroscience. – 2018. – Vol. 21(12). – pp. 1753-1763.

98. Rodriguez Merzagora, A. C., Izzetoglu, M., Onaral, B., and Schultheis, M. T. Verbal working memory impairments following traumatic brain injury: an fNIRS investigation // *Brain Imaging Behav.* – 2014. – Vol. 8. – pp. 446–459.

99. Roth, R. M., Erdodi, L. A., McCulloch, L. J., & Isquith, P. K. Much ado about norming: The behavior rating inventory of executive function // *Child Neuropsychology.* – 2015. – Vol. 21(2). – pp. 225–233.

100. Rumelhart, D. E., & Norman, D. A. Simulating a skilled typist: A study of skilled cognitive-motor performance // *Cognitive science.* – 1982. – Vol. 6(1). – pp. 1– 36.

101. Salehinejad, M. A., Ghanavati, E., Rashid, M. H. A., & Nitsche, M. A. Hot and cold executive functions in the brain: A prefrontal–cingular network // *Brain and Neuroscience Advances.* – 2021. – Vol. 5.

102. Scaltritti, M., Alario, F. X., & Longcamp, M. The scope of planning serial actions during typing // *Journal of cognitive neuroscience.* – 2018. – Vol. 30(11). – pp. 1620-1629.

103. Scaltritti, M., Dufau, S., & Grainger, J. Stimulus orientation and the first-letter advantage // *Actapsychologica.* – 2018. – Vol. 183. – pp. 37-42.

104. Scaltritti, M., Pinet, S., Longcamp, M., & Alario, F. X. On the functional relationship between language and motor processing in typewriting: an EEG study // *Language, Cognition and Neuroscience.* – 2017. – Vol. 32(9). – pp. 1086- 1101.

105. Scaltritti, M., Suitner, C., & Peressotti, F. Language and motor processing in reading and typing: Insights from beta-frequency band power modulations // *Brain and Language.* – 2020. – Vol. 204.

106. Śmigasiewicz, K., Ambrosi, S., Blaye, A., & Burle, B. Inhibiting errors while they are produced: direct evidence for error monitoring and inhibitory control in children // *Developmental Cognitive Neuroscience.* – 2020. – Vol. 41. – pp. 100742.

107. Smith, E. E., & Jonides, J. Storage and executive processes in the

frontal lobes // *Science*. – 1999. – Vol. 283(5408). – pp.1657-1661.

108. Soghoyan, G., Smetanin, N., Lebedev, M., & Ossadtchi, A. Performance Analysis of a Source-Space Low-Density EEG-Based Motor Imagery BCI // In *International Conference on Cognitive Sciences*. – 2020. – pp. 687- 691. Springer.

109. Strauss E., Sherman E. M. S., Spreen O. *Wisconsin Card Sorting Test // A Compendium of Neuropsychological Tests: Administration, Norms, and Commentary*. — Oxford: Oxford University Press, 2006. — P. 526—545.

110. Stroop, J. R. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 18(6), 643, 1935.

111. Sturm, W., & Willmes, K. On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic alertness // *Neuroimage*. – 2001. – Vol. 14(1). – pp. S76-S84.

112. Stuss, D. T., Levine, B., Alexander, M. P., Hong, J., Palumbo, C., Hamer, L., ... & Izukawa, D. Wisconsin Card Sorting Test performance in patients with focal frontal and posterior brain damage: effects of lesion location and test structure on separable cognitive processes // *Neuropsychologia*. – 2000. – Vol. 38(4). – pp. 388-402.

113. Sun, L., Feng, Z., Chen, B., & Lu, N. A contralateral channel guided model for EEG based motor imagery classification // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2018. – Vol. 41. – pp. 1–9.

114. Taniguchi, Y., Burle, B., Vidal, F., & Bonnet, M. Deficit in motor cortical activity for simultaneous bimanual responses // *Experimental brain research*. - 2001. – Vol. 137(3). – pp. 259–268.

115. Tempel, T., Frings, C., & Pastötter, B. EEG beta power increase indicates inhibition in motor memory // *International Journal of Psychophysiology*. – 2020. – Vol. 150. – pp. 92–99.

116. Van der Meer, A. L., & Van der Weel, F. R. Only three fingers write, but the whole brain works†: a high-density EEG study showing advantages of drawing over typing for learning // *Frontiers in psychology*. - 2017. – Vol. 8. – pp. 706.

117. Vidal, F., Grapperon, J., Bonnet, M., & Hasbroucq, T. The nature of unilateral motor commands in between-hand choice tasks as revealed by surface

Laplacian estimation // *Psychophysiology*. – 2003. – Vol. 40(5). – pp. 796–805.

118. Wang, C., & Zhang, Q. (2021). Word frequency effect in written production: Evidence from ERPs and neural oscillations. *Psychophysiology*, 58(5), e13775. <https://doi.org/10.1111/psyp.13775>

119. Wendelken C, Munakata Y, Baym C, Souza M, Bunge S. Flexible rule use: common neural substrates in children and adults // *Dev. Cogn. Neurosci.* – 2012. – Vol. 2. – pp. 29–39.

120. Elisabeth H. Wiig, E. H., Secord, W. A., & Semel, E. *Clinical evaluation of language fundamentals: Fifth Edition, CELF®*. – 2013

121. Yang, Y., Shields, G. S., Guo, C., & Liu, Y. Executive function performance in obesity and overweight individuals: A meta-analysis and review // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2018. – Vol. 84. – pp. 225-244.

122. Zelazo, P. D., Müller, U., Frye, D., Marcovitch, S., Argitis, G., Boseovski, J., ... & Carlson, S. M. The development of executive function in early childhood // *Monographs of the society for research in child development*, i-151, 2003.

123. Zhang, X., Yao, L., Sheng, Q. Z., Kanhere, S. S., Gu, T., & Zhang, D. Converting your thoughts to texts: Enabling brain typing via deep feature learning of eeg signals // *2018 IEEE international conference on pervasive computing and communications (PerCom)*. – 2018.

124. Ziemus, B., Baumann, O., Luerding, R., Schlosser, R., Schuierer, G., Bogdahn, U., et al. Impaired working-memory after cerebellar infarcts paralleled by changes in bold signal of a cortico-cerebellar circuit // *Neuropsychologia*. – 2007. – Vol. 45. – pp. 2016–2024.

125. Zmigrod, L., Zmigrod, S., Rentfrow, P. J., & Robbins, T. W. The psychological roots of intellectual humility: The role of intelligence and cognitive flexibility // *Personality and Individual Differences*. – 2019. Vol. 141. pp. 200-208.

Приложение 1. Информированное согласие на исследование

ИНФОРМИРОВАННОЕ СОГЛАСИЕ НА УЧАСТИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ СОВЕРШЕННОЛЕТНЕГО УЧАСТНИКА

Исследовательская группа Лаборатории междисциплинарных исследований развития человека Санкт-Петербургского государственного университета приглашает Вас принять участие в исследовании «Психофизиологические модели письменной речи при печати», посвященном изучению нейрофизиологии письменной речи и исследованию исполнительных функций при печати.

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (договор от 13.09.2020 № [20-313-90046/20](#)). В этом исследовании примут участие от 30 до 60 человек, для которых русский язык является родным, без серьезных хронических и неврологических заболеваний, ограничивающих деятельность.

Прежде чем Вы примите решение о вашем участии в исследовании, мы бы хотели предоставить Вам информацию о нем.

Целью данного исследования является изучение особенностей письменной речи и изучение нейрофизиологии исполнительных функций, в частности, рабочей памяти, при печати. Мы исследуем, есть ли взаимосвязь между рабочей памятью и национальной активностью в процессе печати, и насколько эта активность уникальна для каждого человека.

Процедура исследования:

На предварительном этапе мы попросим вас пройти короткий тест на определение скорости печати. Для этого потребуется короткий текст на компьютере.

Исследование состоит из двух блоков: психофизиологическое исследование и проведение методик, направленных на изучение исполнительных функций.

На **первом этапе** мы попросим Вас заполнить опросник, направленный на изучение исполнительных функций и проведем поведенческую методику UNIT. Методика состоит из шести заданий и занимает от 40 минут до часа и направлена на изучение когнитивного развития участника.

На **втором этапе** мы проведем регистрацию электрической активности мозга с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ) – безболезненного и безопасного метода. Время проведения второго этапа индивидуально, занимает в среднем *1 - 1,5 часа*. В течение этого времени Вы будете сидеть перед монитором, на экране которого будут демонстрироваться изображения, буквы и слова. **Вашей задачей будет напечатать то, что изображено на экране или придумать предложение по картинке.** Регистрация активности мозга проводится с помощью специального набора электродов. Они закреплены на эластичной шапочке, и под каждый электрод мы поместим небольшое количество геля для контакта чувствительных датчиков с кожей.

По окончании обследования гель можно стереть или вымыть и высушить волосы. Данная процедура абсолютно безболезненна и безопасна. Используемое нами электрофизиологическое оборудование сертифицировано в России и соответствует международным стандартам безопасности.

Выгоды:

За участие в исследовании мы предлагаем участникам компенсацию в виде подарка эквивалентом 1000 рублей (одна тысяча рублей) . Для получения вознаграждения участникам необходимо пройти все этапы исследования (поведенческие методики, заполнение опросников и ЭЭГ-исследование). Вознаграждение вручается участникам сразу после окончания исследования.

Добровольность участия: мы очень надеемся на Ваше участие во всех блоках исследования, при этом хотим отметить, что участие в данном исследовании полностью добровольно. Участник исследования может принять решение не отвечать на определенные вопросы. Это решение не повлечет за собой никаких мер.

Конфиденциальность: Вся собранная информация абсолютно конфиденциальна и будет доступна только членам исследовательской группы. Всем участникам исследования присваиваются идентификационные номера, которые вводятся в защищенную зашифрованную компьютерную базу данных. Результаты исследования будут представлены на конференциях и в научных публикациях только в групповой форме (т.е. как описание совокупности участников, а не отдельных людей). Полученная информация не будет сообщаться в образовательное учреждение, в котором учится Ваш ребенок.

По всем вопросам, связанным с исследованием, обращайтесь к координатору:

Дарья Момотенко, телефон: +7 951 672 44 78 или +7 911 083 49 42

Данное исследование рассмотрено и одобрено Этическим комитетом Института психологии Российской академии наук (ИП РАН), куда Вы можете обратиться, если у Вас возникнут вопросы: [телефон: +7(495) 683-38-09; e-mail: adm3@psychol.ras].

Я, _____ (ФИО)
даю свое согласие на участие в данном исследовании.

Мне разъяснены условия участия и процедура проведения обследования.

Дата _____

Подпись участника _____

Подпись представителя проекта _____

Контактные данные _____

Приложение 2. Одобрение этического комитета.



Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт психологии
Российской академии наук
(ИП РАН)
129366, Москва,
ул. Ярославская, 13
Тел.: +7(495) 683-38-09
Факс: +7(495) 682-92-01
E-mail: adm3@psychol.ras.ru

Решение этического комитета от 2021 года

В этический комитет поступил на рассмотрение протокол исследования “Психологические модели письменной речи при печати”, который разработан в Лаборатории междисциплинарных исследований развития человека Санкт-Петербургского государственного университета.

Протокол исследования содержит описание следующих методик исследования:

1. Психофизиологическое исследование с помощью регистрации ЭЭГ и метода вызванных потенциалов.
2. Самоопросник BRIEF2 (Behavior Rating Inventory of Executive Function - II Edition (BRIEF2; Gioia, Isquith, Guy, & Kenworthy, 2000);
3. Универсальный невербальный тест интеллекта UNIT (Universal Nonverbal Intelligence Test, Second Edition, Bruce A. Bracken, R. Steve McCallum, 2016);

4. Культурно независимый тест интеллекта Кеттелла (Culture fair intelligence test, Scale 2; CFIT; Cattell & Cattell, 1960);

5. Оценка превалирующей в использовании руки (Oldfield, R.C. "The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory." Neuropsychologia. 9(1):97-113. 1971).

Этический комитет постановил следующее:

1. Одобрить протокол исследования, "Психологические модели письменной речи при печати", который разработан в Лаборатории междисциплинарных исследований развития человека Санкт-Петербургского государственного университета.

2. Признать предложенные методики безопасными для физического и психического здоровья участников исследования.

3. Разрешить использование данных методик как для взрослых, так и для несовершеннолетних участников исследования.

4. Утвердить порядок получения письменного информированного согласия для участия в исследовании:

- согласие на участие в исследовании лиц старше 14 лет должно быть зафиксировано в письменном информированном согласии, которое подписывается самими участниками исследования.

Председатель этического комитета



зам. директора ИП РАН,

чл.-корр. РАН А.В. Юревич

Приложение 3. Стимульный материал для ЭЭГ эксперимента «Копирование предложений»

1. эй цирюльникъ ёжик выстриги да щетину ряхи сбрей феном вошь запечь
гони
2. шалящий фавн прикинул объём горячих звезд этих вьюжных царств
3. пиши зять съел яйцо ещё чан брюквы... эх - ждем фигу
4. флегматичная эта верблюдица жуёт у подъезда засыхающий горький
шиповник
5. эх взъярюсь толкну флегматика - дал бы щец жарчайших пётр
6. вступив в бой с шипящими змеями - эфой и гадюкой - маленький цепкий
храбрый ёж съел их
7. однажды съев фейхоа я как зацикленный ностальгирую всё чаще и больше
по этому чуду
8. расчешись. объявляю - туфли у камина где этот хищный ёж цаплю
задел
9. шифровальщица попросту забыла ряд ключевых множителей и тэгов
10. южно-эфиопский грач увел мышь за хобот на съезд ящериц
11. широкая электрификация южных губерний даст мощный толчок подъёму
сельского хозяйства
12. здесь фабула объять не может всех эмоций — шепелявый скороход вюбке
тащит горячий мёд
13. художник-эксперт с компьютером всего лишь яйца в объёмный низкий
ящик чохом фасовал

**Приложение 4. Стимульный материал (слова) для ЭЭГэксперимента
«Формулирование предложений»**

1. после ... до
2. читать
3. она
4. и ... поэтому
5. несмотря на
6. в
7. быстро
8. наконец
9. если... то...
10. машина
11. третий
12. первый
13. прежде чем ... в противном случае
14. потому что
15. самолет
16. лучший
17. вместо того, чтобы
18. готовить
19. когда
20. перед
21. даже ... если
22. и ... или
23. и
24. если

Приложение 5. Стимульный материал (примеры изображений) для ЭЭГ эксперимента «Формулирование предложений»

Когда



Или ... и



Приложение 6. Форма опросника BRIEF-2

BRIEF-2

В данной анкете мы просим Вас ответить на ряд вопросов о как Вы управляете своим поведением. Мы хотим Вас спросить, были ли у Вас проблемы с какими-либо видами поведения в течение последних 6 месяцев. Пожалуйста, выберите подходящий ответ для каждого из пунктов.

Вся собранная информация конфиденциальна и будет доступна только членам исследовательской группы.

Ваш ID	
Дата рождения (дд.мм.гггг)	
Дата заполнения (дд.мм.гггг)	

№	Утверждение	Никогда	Иногда	Часто
1	Мне трудно сидеть спокойно			
2	Мне трудно принять другой для меня способ решения проблем, связанных с учебой/работой, друзьями или другими задачами			
3	Если я должен запомнить три вещи, я помню только первую или последнюю			
4	Я не осознаю, как мое поведение влияет на других людей или мешает им			
5	Я делаю свою работу неряшливо			
6	Я испытываю вспышки гнева			
7	Я не планирую заранее выполнение заданий по учебе/работе			

BRIEF ID _____

1

		Никогда	Иногда	Часто
8	Мне трудно находить свои вещи (одежду, очки, обувь, книги или канцелярские принадлежности)			
9	У меня есть проблемы с тем, чтобы начать что-либо делать в одиночку			
10	Я импульсивный/импульсивная (не думаю прежде, чем делать что-либо)			
11	Мне трудно привыкнуть к новым ситуациям (новому классу, группе, друзьям)			
12	Я могу только недолго удерживать что-то в поле своего внимания			
13	Я плохо представляю свои сильные и слабые стороны (пробую делать что-то слишком простое или сложное для меня)			
14	Я взрываюсь по мелочам			
15	Я теряюсь в деталях и упускаю главную идею			
16	Я теряю контроль над собой чаще, чем мои друзья			
17	Я "застреваю" на одной теме или виде деятельности			
18	Я забываю своё имя			
19	Мне трудно выполнять такие виды работ и задач, которые включают более одного "шага"			
20	Я не замечаю, когда мои действия мешают другим			
21	Мне трудно организовывать то, что я пишу			
22	Меня расстраивают незначительные происшествия			
23	У меня есть хорошие идеи, но я не довожу работу до конца			
24	Я говорю невпопад			

BRIEF ID _____

2

		Никогда	Иногда	Часто
25	Мне трудно завершить выполнение заданий (дома по хозяйству, в учебе)			
26	Я не замечаю, что мое поведение вызвало негативную реакцию до того момента, когда становится уже слишком поздно			
27	Я излишне бурно реагирую			
28	Мне трудно что-либо запомнить, даже всего на несколько минут (например, телефонные номера или маршрут)			
29	Я делаю ошибки по невнимательности			
30	Мне тяжело ждать своей очереди			
31	Мне неприятно иметь дело с изменениями (в рутине, еде, местах пребывания)			
32	Я забываю отдать свое домашнее/рабочее задание, даже если оно выполнено			
33	Я медленнее других завершаю работу			
34	Я легко впадаю в состояние перегруженности			
35	Я не планирую свои дела наперед			
36	Мне трудно досчитать до трех			
37	Я не думаю заранее о возможных проблемах в будущем			
38	Мне трудно самостоятельно завершить какое-либо задание/дело			
39	Я перебиваю окружающих			
40	Я пробую один и тот же подход к решению проблемы снова и снова, даже если он не работает (я застреваю)			

BRIEF ID _____

3

		Никогда	Иногда	Часто
41	Я легко забываю инструкции			
42	Мне требуется больше, чем другим, времени для завершения работы			
43	Я плачу по пустякам			
44	У меня есть трудности с завершением работы			
45	Мне сложно думать над разными способами решения проблемы, когда я застрял(а)			
46	Я рассеянный/рассеянная (забывчивый/забывчивая)			
47	Мне трудно расставлять приоритеты в своих делах			
48	Я думаю или рассуждаю вслух, когда что-либо делаю			
49	Я не думаю о последствиях до того, как сделал(а) что-то			
50	Я не отдаю себе отчет о своем поведении в группе людей			
51	Мне сложно переключаться с одной задачи на другую			
52	Мне трудно придумывать разные способы решения проблемы			
53	Мне трудно выполнять задачи, необходимые для достижения цели (например, копить деньги для чего-то конкретного или учиться для получения хороших оценок)			
54	Я не могу найти входную дверь моего дома			
55	Я испытываю трудности в завершении долгосрочных проектов (например, написание сочинения или отчета)			

BRIEF ID _____

4