



# ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ КОПИРОВАНИИ ПРЕДЛОЖЕНИЙ

**МОМОТЕНКО Д.А.**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
(ФГАОУ ВО НИУ ВШЭ), г. Москва, Российская Федерация*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: [daryamomotenko@gmail.com](mailto:daryamomotenko@gmail.com)*

**ГОРБУНОВ И.А.**

*Санкт-Петербургский государственный университет (ФГБОУ ВО СПбГУ),  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7558-750X>, e-mail: [i.a.gorbunov@spbu.ru](mailto:i.a.gorbunov@spbu.ru)*

Печать является многоуровневым процессом, в котором задействованы исполнительные и моторные функции. В связи с ее иерархической организацией появляется возможность изучения психофизиологических особенностей высших психических функций в естественной среде путем анализа автоматизированной моторной деятельности. Целью данной работы является выявление психофизиологических коррелятов исполнительных функций через печать на компьютере скопированных предложений. Уровень развития исполнительных функций измерялся с помощью методик UNIT-2 и BRIEF-2. Выборка составляла 49 человек (Возраст:  $M(SD) = 18,64(0,74)$ ), предварительно подтвердивших автоматизированность навыка печати. По результатам исследования были построены регрессионные модели, которые отражают зависимость уровня развития исполнительных функций от альфа-, бета- и тета-ритмов, возникающих в процессе печати скопированных предложений. Было обнаружено, что чем выше уровень развития исполнительных функций (торможения, переключения и рабочей памяти), тем выше мощность бета-ритмов в префронтальных и фронтальных областях. Резюмируя, можно говорить о значительном вкладе исполнительных функций в процессы печати и о возможностях потенциального развития ИФ путем автоматизации печати.

**Ключевые слова:** исполнительные функции, рабочая память, исполнительный контроль, торможение, ЭЭГ, нейрофизиология, печать.

---

**Финансирование.** Исследование проведено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) от 13.09.2020 № 20–313–90046\20, руководитель Е.Л. Григоренко.

**Благодарности.** Авторы благодарят за помощь в сборе данных для исследования и подготовки статьи руководителя проекта Е.Л. Григоренко.

**Для цитаты:** Момотенко Д.А., Горбунов И.А. Психофизиологические маркеры исполнительных функций при копировании предложений // Экспериментальная психология. 2024. Том 17. № 4. С. 208—221. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170414>



# PSYCHOPHYSIOLOGICAL MARKERS OF EXECUTIVE FUNCTIONS DURING COPYING SENTENCES

**DARYA A. MOMOTENKO**

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: [daryamomotenko@gmail.com](mailto:daryamomotenko@gmail.com)

**IVANA A. GORBUNOV**

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7558-750X>, e-mail: [i.a.gorbunov@spbu.ru](mailto:i.a.gorbunov@spbu.ru)

Typing is a multi-level process involving executive and motor functions. Due to its hierarchical organization, it becomes possible to study the psychophysiological features of higher mental functions in the natural environment by analyzing automated motor activity. The purpose of this work is to identify psychophysiological correlates of executive functions through computer typing. This study presents two EEG experiments aimed at copying sentences. The level of development of executive functions was measured using the UNIT and BRIEF-2 techniques, the sample consisted of 49 people (Age: M (SD) = 18.64 (0.74)), who previously confirmed the automation of the typing skill. According to the results of the study, regression models were constructed that reflect the dependence of the level of development of executive functions on alpha, beta and theta rhythms that arise during the printing of copied sentences. It was found that the higher the level of development of executive functions (braking, switching and working memory), the higher the power of beta rhythms in the prefrontal and frontal areas. Summarizing, we can talk about the significant contribution of executive functions to the typing processes, and about the possibilities of potential development of EF, by automating typing.

**Keywords:** executive functions, working memory, executive control, inhibition, EEG, neurophysiology, typing.

**Funding.** The study was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) dated 09/13/2020 No. 20-313-90046\20, head Grigorenko E.L.

**Acknowledgments.** The authors thank the Head of the Project Grigorenko E.L. for her help in collecting data for the research and preparation of the article.

**For citation:** Momotenko D.A., Gorbunov I.A. Psychophysiological Markers of Executive Functions during Copying Sentences. *Ekspperimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology (Russia)*, 2024. Vol. 17, no. 4, pp. 208–221. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170414> (In Russ.).

## Введение

### *Исполнительные функции при печати на компьютере*

Исполнительные функции (ИФ) представляют собой набор когнитивных способностей, отвечающих за саморегуляцию поведения и контроль над когнитивными, эмоциональными и моторными процессами [3]. Активация ИФ происходит, когда автоматизированные действия становятся неэффективными или когда возникают ошибки в привычной деятельности [13]. Особую важность развитие исполнительных функций приобретает именно в подростковом возрасте, поскольку этот период связан с формированием префронтальной коры [6]. Теоретический обзор [8] показывает, что число исследований по изучению особенностей развития исполнительных функций у молодых взрослых весьма ограничено.



Исследование нейрофизиологических коррелятов исполнительных функций при копировании предложений представляется весьма *актуальной задачей* в контексте изучения механизмов языковой обработки и когнитивных процессов. Исполнительные функции, такие как внимание, рабочая память, планирование и контроль, имеют решающее значение для успешного выполнения задач по копированию предложений, требующих точного воспроизведения текста. Учитывая широкое распространение навыков печати в современном обществе, изучение этого феномена может предоставить ценные данные о многоуровневой работе нейрофизиологических систем в процессе формирования навыков и сознательного регулирования деятельности, т. е. об исполнительном контроле деятельности [3]. *Цель* данного исследования — определить нейрофизиологические корреляты исполнительных функций при копировании припоминаемых предложений. *Новизна* исследования заключается в изучении непосредственных изменений психофизиологических процессов, связанных с работой иерархической системы исполнительных функций при печати. Понимание нейрофизиологических коррелятов копирования предложений может способствовать развитию методов реабилитации при различных нарушениях, таких как афазия, постинсультные последствия или болезнь Альцгеймера. Также это может способствовать оптимизации методов обучения и пониманию индивидуальных различий в когнитивных способностях. *Практическая значимость* исследования заключается в том, что свободная печать может быть широко использована для диагностики различных речевых и моторных нарушений, а также для разработки современных технологий, например, нейроинтерфейсов [12].

В заключение можно сказать, что печать представляет собой пример многоуровневой функциональной когнитивной активности, затрагивающей различные психические процессы, включая исполнительный контроль, рабочую память и когнитивную гибкость. Таким образом, исследование процесса печати может стать одним из подходов к изучению этих феноменов. Особое внимание следует уделить изучению психофизиологических аспектов печати, так как такие исследования могут предоставить ценную информацию о функционировании иерархических систем в головном мозге. Основываясь на представленных выше рассуждениях, *гипотеза* настоящего исследования предполагает наличие статистически значимой связи между показателями развития исполнительного контроля и активацией префронтальной и моторной коры при воспроизведении ранее запомненного предложения.

Модель А. Мияке (2002) включает в себя три блока ИФ, такие как торможение, обновление и переключение. Блок торможения касается способности человека сознательно тормозить доминирующие, автоматические реакции, когда это необходимо [5]. Этот тип торможения обычно связывают с лобными долями. Учитывая, что термин «торможение» обычно используется для описания широкого спектра функций, важно отметить, что используемая здесь концепция торможения ограничивается преднамеренным, контролируемым подавлением автоматизированных ответов [11].

Блок переключения, или, как определяют некоторые исследователи, — это блок процесса когнитивной гибкости [15], который демонстрирует способность человека переключаться между различными типами деятельности, удерживая в фокусе внимания наиболее приоритетную из них в настоящий момент [8]. В данном случае переключение между задачами связано с ментальными усилиями и когнитивной нагрузкой, которая регулируется передней поясной областью [9].

Блок обновления рассматривается через активацию рабочей памяти [5]. Рабочая память актуализирует процессы сбора, обработки, фильтрации и выбора информации, необходимой в конкретной ситуации [1]. Локализация рабочей памяти обычно ассоциируется с дорсола-



теральной префронтальной корой, тогда как функции, отвечающие за пассивное хранение и удержание информации скорее локализованы в премоторных областях лобной коры [6].

Зачастую в когнитивных исследованиях можно обнаружить исследования ИФ через степень когнитивной нагрузки, которая требуется для выполнения той или иной задачи. При автоматизированной печати пользователь, владеющий навыками полуслепой или слепой печати [4], особенно на привычной клавиатуре [7], будет совершать гораздо меньше когнитивных усилий. Тем не менее при усложнении задачи, когда деятельность становится менее автоматизированной, когнитивная нагрузка повышается [14]. Соответственно, мы можем пронаблюдать степень активации ИФ при незначительном усложнении задачи, когда задействуется не только механическая моторная память [14]. Примером такой деятельности может быть печать скопированного предложения по памяти. Данное исследование направлено на изучение нейрофизиологических маркеров ИФ при печати припоминаемого предложения, в зависимости от уровня развития ИФ.

## Методы

### 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 в 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. Перед началом исследования все участники подписывали информированное согласие об участии, которое было одобрено Этическим комитетом Института психологии Российской академии наук. Каждому из участников после исследования выдавалось вознаграждение в эквиваленте 1000 рублей. Исследование проводилось в лаборатории междисциплинарных исследований развития человека при Санкт-Петербургском Государственном Университете. Процедура включала в себя два блока: поведенческий и психофизиологический (рис. 1).



Рис. 1. Структура исследования

Уровень развития ИФ респондента оценивался с помощью самоопросника «Краткая шкала исполнительных функций» (BRIEF, Behavior Rating Inventory of Executive Function) (BRIEF-2; Gioia, Isquith, Guy, & Kenworthy, 2000), адаптированного для русских выбо-



рок [2] и некоторых субтестов универсального невербального теста интеллекта (UNIT, Universal Nonverbal Intelligence Test, Second Edition, Bruce A. Bracken, R. Steve McCallum, 2016). 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, состоящая из 55 вопросов. Структура BRIEF-2 основана на теории иерархической организации ИФ, что соответствует модели ИФ, используемой в данной статье. В исследовании использовались шкалы «Торможение», «Переключение» и «Рабочая память». Методика UNIT-2 состоит из 6 субтестов, которые складываются в соответствующие индексы. Нами был использован Индекс Памяти, в который включены результаты субтестов «Символическая память» и «Пространственная память». Психофизиологический эксперимент был разработан в программном пакете Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc.). Регистрация ЭЭГ обеспечивалась с помощью программы BrainVision Recorder (Brain Products, Inc.). Полное сопротивление по всем отведениям сохранялось ниже 25 кΩ.

### ***Копирование предложений***

Цель первого блока эксперимента (рис. 2) состояла в изучении нейрофизиологических процессов в рабочей памяти и исполнительного контроля, участвующих в печати, а также в оценке объема рабочей памяти во время печати. В этом блоке эксперимента было представлено копирование предложений. Нами было использовано 13 предложений, которые включали в себя все буквы алфавита. Предложения насчитывали от 7 до 14 слов разной степени лексической сложности. Предложения были грамматически корректными и семантически бессмысленными. Задача участника заключалась в запоминании максимального количества 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.

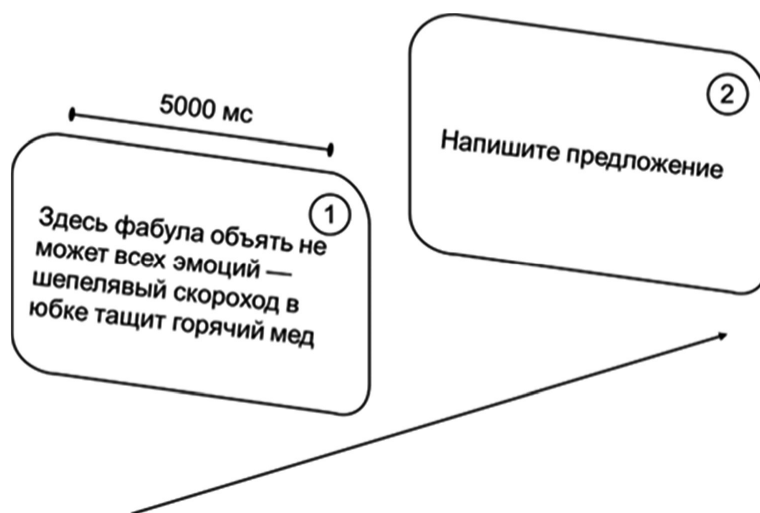


Рис. 2. Схема эксперимента «Копирование предложений»



Для определения ведущей руки респондента был использован опросник «Оценка преобладающей в использовании руки» (Oldfield, 1971). В связи с пандемией коронавирусной инфекции в протоколе подготовки и проведения ЭЭГ-исследования были учтены факторы, обеспечивающие должный уровень безопасности.

### ***Предварительная обработка данных***

Данные предварительно обрабатывались в программе BrainVision Analyser (Brain Products, Inc.). Частота дискретизации была снижена до 500 Гц, данные были отфильтрованы (нижняя частота — 0,1 Гц, верхняя — 70 Гц). Глазодвигательная активность удалялась с помощью анализа независимых компонент. 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  $\pm 110$  мВ. 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).

## **Результаты**

### ***Описательная статистика***

Проведенный анализ указывает на нормальность распределения показателей интеллекта ( $M(SD)=109,73(9,24)$ ), тем не менее выборка демонстрирует тенденцию к более высоким результатам по сравнению с нормотипичным срезом.

### ***Результаты кластерного анализа***

В связи с тем, что результаты корреляционного анализа показали значимую положительную корреляцию по индексам ИФ (Переключение и Торможение ( $r=0,48$ ,  $p < 0,01$ ), и Переключение и Рабочая память ( $r=0,57$ ,  $p < 0,01$ )), было принято решение разделить участников на кластеры методом К-средних 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 индексам Торможения ( $M = -0,62$ ,  $SD = 0,8$ ) и Переключения ( $M = -1,19$ ,  $SD = 0,53$ ). В свою очередь, Индекс Памяти ( $M = 0,47$ ,  $SD = 0,92$ ) по методике UNIT-2 у данных участников был достаточно высок.

Результаты ANOVA показали статистические различия между кластерами ( $F(2, 184) = 24,74$ ,  $p < 0,01$ ) и между кластерами по различным индексам ( $F(6,184) = 13,70$ ,  $p < 0,01$ ).

Поправка Шеффе продемонстрировала значимую разницу по индексу Рабочей памяти между первым и вторым ( $\text{diff}=1,49$ ,  $p < 0,05$ ), первым и третьим ( $\text{diff}=1,52$ ,  $p < 0,01$ ) кластерами; по индексу Торможения — между первым и третьим ( $\text{diff}=1,37$ ,  $p < 0,05$ ), вторым и третьим ( $\text{diff}=1,45$ ,  $p < 0,01$ ) кластерами; по индексу Переключения — между первым и третьим ( $\text{diff}=1,86$ ,  $p < 0,05$ ) кластерами.

Второй кластер ( $n=14$ ) включал в себя участников с высокими показателями 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.

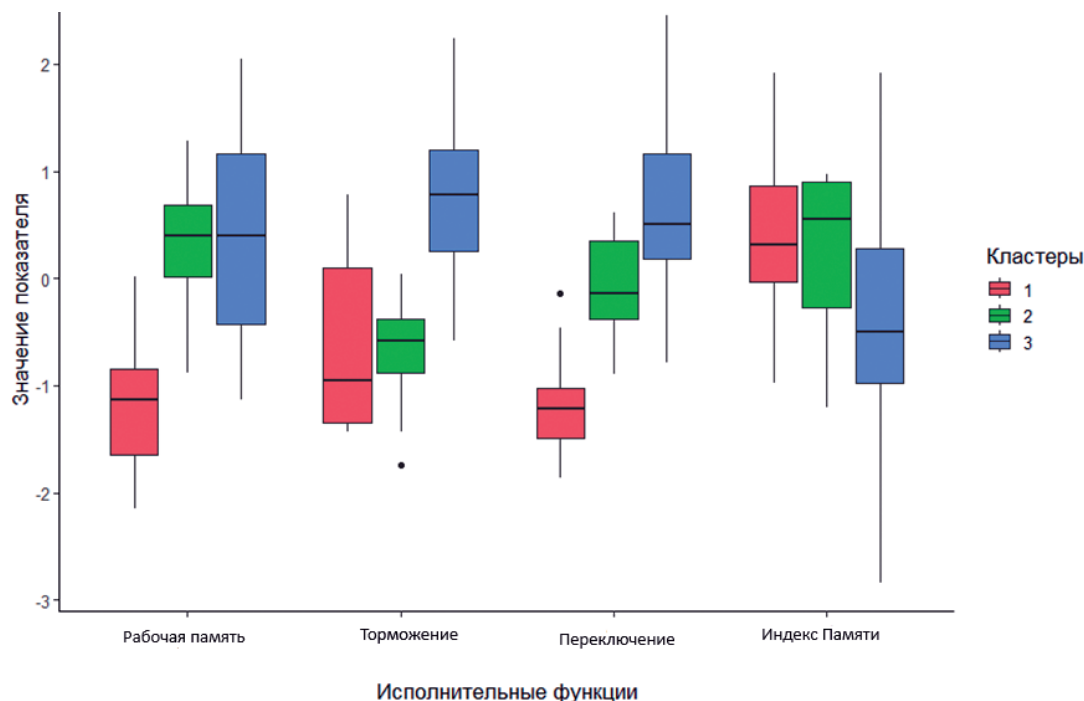


Рис. 3. Распределение участников на кластеры по развитию ИФ:  
кластеры: 1 — уровень развития ИФ ниже среднего; 2 — уровень развития ИФ  
на границе среднего; 3 — уровень развития ИФ выше среднего

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 среднего.

### **Результаты эксперимента по копированию предложений**

Были проанализированы результаты преобразования Фурье в префронтальной, фронтальной, центральной и центрально-теменной областях. По полученному массиву данных была построена линейная модель для определения вклада отдельных показателей ИФ в нейрофизиологическую активацию. В качестве зависимой переменной рассматривалась спектральная мощность ЭЭГ-ритмов, в качестве предикторов рассматривались индексы ИФ (Рабочая память, Торможение, Переключение и Индекс памяти), а также каналы, которые отображали наиболее значимую локализацию сигнала и процент верно напечатанных слов (WR). Был обнаружен (табл. 1) значимый вклад уровня развития ИФ, выраженный индексами методики BRIEF-2 в мощность альфа-ритма ( $F(18,1563) = 59,86$ ,  $p < 0,001$ ) при копировании предложений. Наиболее значимый вклад наблюдался с электродов C2, C3, Fz, FCz и FC4.

Также был обнаружен (табл. 2) значимый вклад индексов ИФ по методике BRIEF-2 (Рабочая память, Торможение, Переключение) в активацию нейрональной активности в бета-ритме ( $F(18,8838) = 256,4$ ,  $p < 0,001$ ) при копировании предложений в центральных и фронтальных областях.



Таблица 1

**Вклад показателей ИФ в мощность альфа ритма ЭЭГ  
 в процессе копирования предложений**

| Мощность альфа ритма                             |             |               |                  |
|--|-------------|---------------|------------------|
| Предикторы                                       | $\beta$     | CI            | P                |
| Перехват   | -0,56       | -0,73 – -0,39 | <b>&lt;0,001</b> |
| Рабочая память                                   | -0,16       | -0,20 – -0,11 | <b>&lt;0,001</b> |
| Переключение                                     | 0,08        | 0,04 – 0,12   | <b>&lt;0,001</b> |
| Торможение                                       | 0,06        | 0,02 – 0,10   | <b>0,008</b>     |
| Индекс верно напечатанных слов                   | 0,05        | -0,20 – 0,30  | 0,702            |
| Канал C2   | 0,20        | 0,07 – 0,33   | <b>0,003</b>     |
| Канал C3   | -0,26       | -0,39 – -0,13 | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал C4   | -0,17       | -0,30 – -0,04 | <b>0,012</b>     |
| Канал Cz   | -0,07       | -0,20 – 0,06  | 0,310            |
| Канал FC1  | 0,05        | -0,08 – 0,18  | 0,470            |
| Канал FC2  | 0,14        | 0,01 – 0,27   | <b>0,034</b>     |
| Канал FC3  | -0,04       | -0,17 – 0,09  | 0,555            |
| Канал FC4  | 0,77        | 0,64 – 0,90   | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал FCz  | -0,29       | -0,42 – -0,16 | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал Fz   | 0,58        | 0,45 – 0,71   | <b>&lt;0,001</b> |
| Рабочая память × Переключение                    | -0,07       | -0,11 – -0,03 | <b>&lt;0,001</b> |
| Рабочая память × Торможение                      | 0,48        | 0,43 – 0,53   | <b>&lt;0,001</b> |
| Переключение × Торможение                        | -0,52       | -0,57 – -0,48 | <b>&lt;0,001</b> |
| (Рабочая память × Переключение) × Торможение     | 0,05        | 0,02 – 0,09   | <b>0,005</b>     |
| Количество наблюдений                            | 1563        |               |                  |
| R <sup>2</sup> /R <sup>2</sup> скорректированный | 0,411/0,404 |               |                  |

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

Таблица 2

**Вклад показателей ИФ в мощность бета-ритма ЭЭГ  
 в процессе копирования предложений**

| Мощность бета ритма            |         |               |                  |
|--------------------------------|---------|---------------|------------------|
| Предикторы                     | $\beta$ | CI            | p                |
| Перехват                       | -1,28   | -1,35 – -1,20 | <b>&lt;0,001</b> |
| Торможение                     | 0,05    | 0,03 – 0,07   | <b>&lt;0,001</b> |
| Рабочая память                 | -0,11   | -0,13 – -0,09 | <b>&lt;0,001</b> |
| Переключение                   | 0,04    | 0,03 – 0,06   | <b>&lt;0,001</b> |
| Индекс верно напечатанных слов | -0,20   | -0,31 – -0,09 | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал C2                       | 0,19    | 0,13 – 0,24   | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал C3                       | -0,18   | -0,24 – -0,13 | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал C4                       | -0,14   | -0,20 – -0,08 | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал Cz                       | 0,09    | 0,03 – 0,14   | <b>0,002</b>     |
| Канал FC1                      | 0,25    | 0,19 – 0,31   | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал FC2                      | 0,27    | 0,21 – 0,33   | <b>&lt;0,001</b> |
| Канал FC3                      | 0,09    | 0,03 – 0,14   | <b>0,002</b>     |





| Мощность бета ритма                              |              |               |        |
|--|--------------|---------------|--------|
| Предикторы                                       | $\beta$      | CI            | p      |
| Канал FC4  | 0,66         | 0,61 – 0,72   | <0,001 |
| Канал FCz  | -0,14        | -0,20 – -0,09 | <0,001 |
| Канал Fz   | 0,78         | 0,72 – 0,84   | <0,001 |
| Рабочая память × Переключение                    | 0,37         | 0,34 – 0,39   | <0,001 |
| Рабочая память × Торможение                      | -0,45        | -0,47 – -0,43 | <0,001 |
| Переключение × Торможение                        | 0,01         | -0,00 – 0,03  | 0,159  |
| (Рабочая память × Переключение) × Торможение     | 0,06         | 0,04 – 0,08   | <0,001 |
| Количество наблюдений                            | 8857         |               |        |
| R <sup>2</sup> /R <sup>2</sup> скорректированный | 0346 / 0.344 |               |        |

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

При анализе результатов модели в тета-ритме был обнаружен (Таблица 3) значимый вклад Торможения (BRIEF-2) и Индекса Памяти (UNIT-2) в нейрональную активность в центральных областях ( $F(14, 1548) = 43,99, p < 0,001$ ) при копировании предложений.

Таблица 3

**Вклад показателей ИФ в мощность тета ритма ЭЭГ  
в процессе копирования предложений**

| Мощность тета ритма                              |             |               |              |
|--|-------------|---------------|--------------|
| Предикторы                                       | $\beta$     | CI            | P            |
| Перехват   | -0,03       | -0,25 – 0,19  | 0,789        |
| Индекс Память                                    | 0,19        | 0,15 – 0,23   | <0,001       |
| Торможение                                       | 0,14        | 0,10 – 0,18   | <0,001       |
| Индекс верно напечатанных слов                   | 0,13        | -0,20 – 0,45  | 0,446        |
| Канал C2   | 0,25        | 0,09 – 0,40   | <b>0,002</b> |
| Канал C3   | -0,38       | -0,54 – -0,22 | <0,001       |
| Канал C4   | -0,18       | -0,34 – -0,03 | <b>0,023</b> |
| Канал Cz   | -0,21       | -0,37 – -0,05 | <b>0,009</b> |
| Канал FC1  | -0,09       | -0,25 – 0,06  | 0,248        |
| Канал FC2  | 0,06        | -0,09 – 0,22  | 0,426        |
| Канал FC3  | -0,12       | -0,27 – 0,04  | 0,150        |
| Канал FC4  | 0,87        | 0,71 – 1,03   | <0,001       |
| Канал FCz  | -0,42       | -0,58 – -0,27 | <0,001       |
| Канал Fz   | 0,52        | 0,37 – 0,68   | <0,001       |
| Индекс Памяти × Торможение                       | -0,09       | -0,14 – -0,05 | <0,001       |
| Количество наблюдений                            | 1563        |               |              |
| R <sup>2</sup> /R <sup>2</sup> скорректированный | 0,285/0,278 |               |              |

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые значения.

После построения моделей был проведен двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для определения различий нейрональной активности в различных спектральных диапазонах между кластерами (рис. 4). Статистических различий между кластерами обнаружено не было.

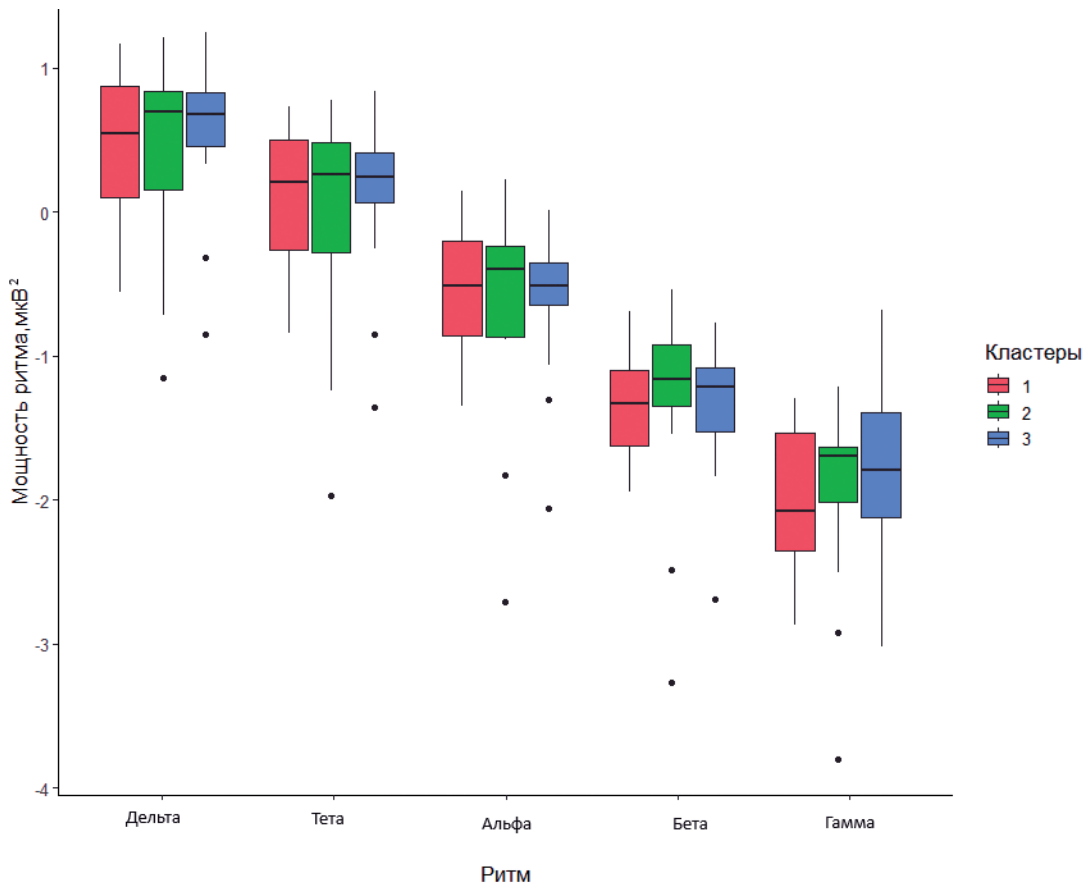


Рис. 4. Распределение мощности ритмов в процессе копирования предложений в зависимости от кластера: кластеры: 1 – уровень развития ИФ ниже среднего; 2 – уровень развития ИФ на границе среднего; 3 – уровень развития ИФ выше среднего. Диапазон ритмов ЭЭГ: Дельта ( $\delta$ ): 0–4 Гц, Тета ( $\theta$ ): 4–7 Гц, Альфа ( $\alpha$ ): 8–12 Гц, Бета ( $\beta$ ): 13–30 Гц, Гамма ( $\gamma$ ): 30–60 Гц

Согласно *post-hoc*-критерию Шеффе, по всем ритмам между кластерами не показано статистически значимых различий, что может говорить о том, что тенденция изменения активации применима отдельно к каждой их функций, но не к комплексу в целом.

### Обсуждение полученных результатов

Исследование нейрофизиологии ИФ в процессе печати на компьютере представляет собой значительную новизну в области психофизиологических исследований. Данное исследование вносит существенный вклад в понимание взаимосвязей между активностью мозга и выполнением задач по копированию предложений, освещая психофизиологические аспекты этого процесса. Данного рода исследования с использованием копирования предложений в качестве стимульного материала направлены на анализ моторных схем, сформированных при автоматизации печати, а также для изучения процессов ингибирования и активации при реализации моторных команд [4]. На примере задания по копированию слов можно описать принцип работы ИФ в рамках модели двух петель обратной связи [10]. Во внешней петле происходит считывание и обработка стимула, а во внутрен-



ную петлю передаются команды по печати данного слова, которые далее разделяются на отдельные символы для реализации процесса печати. Каждый символ соответствует определенному моторному паттерну, который выражается в нажатии на клавишу. 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 предложение) в сочетании с механизмом коррекции каждого отдельного элемента отдельным подчиненным блоком [8]. Этот эффект можно наблюдать в построенных в данном исследовании моделях нейрональной активности в тета-, альфа- и бета-ритмах. Поскольку бета-ритм наблюдается при решении задач, требующих максимально сосредоточенного внимания, и иллюстрирует баланс тормозных и возбуждающих процессов [5], можно предположить, что мощность бета-ритма является индикатором механизма обработки информации и выдачи моторных команд при печати.

Результаты исследований с использованием печати предложений по памяти позволяют наблюдать не только изменение объема припоминаемых слов, но и психофизиологию рабочей и семантической памяти при сравнении спектральной мощности в процессе копирования предложений в видеоизмененной задаче n-back (задача по припоминанию стимула, который предъявлялся «n» стимулов назад) [5].

Взаимодействие показателей (Торможение и Переключение, Торможение и Рабочая память по методике BRIEF-2) демонстрирует значимый вклад в распределение нейрональной активации во фронтальной и префронтальной коре. Исходя из этого можно говорить именно о комплексе нейрофизиологических индикаторов, отражающих уровень когнитивной нагрузки в процессе печати. Исследования исполнительного контроля [13] демонстрировали, что при активации моторной памяти (в данном случае автоматизированность процесса печати может быть рассмотрена как моторная память) рост торможения в префронтальной области сопровождается повышением бета-ритма, что и подтверждается в данном исследовании. Исследования моторных схем при печати слов и предложений иллюстрируют процесс переключения между активацией и торможением во время печати, или когнитивную гибкость [14]. То есть процесс копирования предложения, сопровождающийся увеличением бета-ритма в премоторной области, отражает общую тенденцию задействования моторной памяти.

Также следует отметить, что степень вовлеченности исполнительного контроля определяется уровнем развития навыка печати и степенью его автоматизированности. 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 [8] и, соответственно, меньшей активации процессов торможения, т.е. более успешную работу исполнительного контроля.

## Выводы

1. Чем более эффективны процессы торможения, тем выше точность напечатанного.
2. 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 мотор-



ной памяти и также отражается в активации тета- и альфа-ритмов во фронтальной и префронтальной коре.

3. Респонденты с более высоким навыком печати демонстрируют лучший исполнительный контроль, поскольку высокий навык печати требует 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. Разница в бета-ритме может говорить о том, 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.

### Заключение

Научная значимость полученных результатов отражается в определении психофизиологических паттернов ИФ при печати. Печать является сложным иерархическим процессом, в котором задействованы исполнительные и моторные функции. 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 Краппа (2011) об иерархических процессах при печати, данный инструмент можно использовать в том числе для тренировки ИФ, 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. Моторный компонент, который задействован в данном иерархическом процессе (моторная память), часто в литературе упоминается в качестве диагностического или при профилактике дегенеративных заболеваний [10]. Данное исследование наглядно проиллюстрировало вклад, который вносит в процесс печати уровень развития различных ИФ, что может говорить о том, 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 функций или ИФ. Поскольку печать является распространенной деятельностью, то подобные тренировки могут быть доступны практически любым слоям населения.

### Литература

1. 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. P. 418–426. DOI:10.1152/jn.00439.2018
2. 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] // *Klinicheskaja i spetsial'naja psikhologija = Clinical Psychology and Special Education*. 2022. Vol. 11. № 2. P. 138–157. DOI:10.17759/cpse.2022110209
3. 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*. 2021. Vol. 31. № 3. P. 422–446.
4. 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. P. 286–293. DOI:10.1016/j.cognition.2018.10.020



5. 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. Article 116615. DOI:10.1016/j.neuroimage.2020.116615
6. Krueger R., Huang Y., Liu X., Santander T., Weimer W., Leach K. Neurological divide: an fMRI study of prose and code writing // In 2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering (ICSE), October 2020. P. 678–690. DOI:10.1145/3377811.338034
7. Pinet S., Nozari N. Electrophysiological correlates of monitoring in typing with and without visual feedback // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2020. Vol. 32. № 4. P. 603–620. DOI:10.1162/jocn\_a\_01500
8. Qu X., Mei Q., Liu P., Hickey T. Using EEG to distinguish between writing and typing for the same cognitive task // In International Conference on Brain Function Assessment in Learning, October 2020. P. 66–74. DOI:10.1007/978-3-030-607
9. Richter C.G., Bosman C.A., Vezoli J., Schoffelen J.M., Fries P. Brain rhythms shift and deploy attention // *bioRxiv*. 2019. DOI:10.1101/795567
10. 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. Article 104758. DOI:10.1016/j.bandl.2020.104758
11. Śmigajewicz 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. Article 100742. DOI:10.1016/j.dcn.2019.100742
12. Soghoian G., Smetanin N., Lebedev M., Ossadtschi A. Performance Analysis of a Source-Space Low-Density EEG-Based Motor Imagery BCI // In International Conference on Cognitive Sciences, October 2020. P. 687–691. DOI:10.3389/fmins.2017.00
13. Tempel T., Frings C., Pastötter B. EEG beta power increase indicates inhibition in motor memory // *International Journal of Psychophysiology*. 2020. Vol. 150. P. 92–99. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2020.02.008
14. Wang C., Zhang Q. Word frequency effect in written production: Evidence from ERPs and neural oscillations // *Psychophysiology*. 2021. Vol. 58(5). P. e13775. DOI:10.1111/psyp.13775
15. 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. P. 200–208. DOI:10.1016/j.paid.2019.01.016

## References

1. 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, no. 2, pp. 418–426. DOI:10.1152/jn.00439.2018
2. 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 [Elektronnyy resurs]. *Klinicheskaya i spetsial'naya psikhologiya = Clinical Psychology and Special Education*, 2022. Vol. 11, no. 2, pp. 138–157. DOI:10.17759/cpse.2022110209
3. 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*, 2021. Vol. 31, no. 3, pp. 422–446.
4. 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. DOI:10.1016/j.cognition.2018.10.020
5. 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, Article 116615. DOI:10.1016/j.neuroimage.2020.116615
6. Krueger R., Huang Y., Liu X., Santander T., Weimer W., Leach K. Neurological divide: an fMRI study of prose and code writing. In 2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering (ICSE), October 2020. Pp. 678–690. DOI:10.1145/3377811.338034
7. Pinet S., Nozari N. Electrophysiological correlates of monitoring in typing with and without visual feedback. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2020. Vol. 32, no. 4, pp. 603–620. DOI:10.1162/jocn\_a\_01500



8. Qu X., Mei Q., Liu P., Hickey T. Using EEG to distinguish between writing and typing for the same cognitive task. *In International Conference on Brain Function Assessment in Learning*, October 2020. Pp. 66–74. DOI:10.1007/978-3-030-607
9. Richter C.G., Bosman C.A., Vezoli J., Schoffelen J.M., Fries P. Brain rhythms shift and deploy attention. *bioRxiv*, 2019. DOI:10.1101/795567
10. 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, Article 104758. DOI:10.1016/j.bandl.2020.104758
11. 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, Article 100742. DOI:10.1016/j.dcn.2019.100742
12. Soghoian 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*, October 2020. Pp. 687–691. DOI:10.3389/fnins.2017.00
13. 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. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2020.02.008
14. Wang C., Zhang Q. Word frequency effect in written production: Evidence from ERPs and neural oscillations. *Psychophysiology*, 2021. Vol. 58(5), pp. e13775. DOI:10.1111/psyp.13775
15. 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. DOI:10.1016/j.paid.2019.01.016

#### **Информация об авторах**

*Момотенко Дарья Анатольевна*, кандидат психологических наук, научный сотрудник Центра биоэлектрических интерфейсов, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (ФГАОУ ВО НИУ ВШЭ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: [daryamomotenko@gmail.com](mailto:daryamomotenko@gmail.com)

*Горбунов Иван Анатольевич*, кандидат психологических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет (ФГБОУ ВО СПбГУ), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7558-750X>, e-mail: [i.a.gorbunov@spbu.ru](mailto:i.a.gorbunov@spbu.ru)

#### **Information about the authors**

*Darya A. Momotenko*, PhD, Researcher, Center for Bioelectric Interfaces, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2544-5420>, e-mail: [daryamomotenko@gmail.com](mailto:daryamomotenko@gmail.com)

*Ivan A. Gorbunov*, PhD, Senior Researcher, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7558-750X>, e-mail: [i.a.gorbunov@spbu.ru](mailto:i.a.gorbunov@spbu.ru)

Получена 10.10.2023

Received 10.10.2023

Принята в печать 01.12.2024

Accepted 01.12.2024