



Гигиеническая оценка клавиатурного письма: биокрибернетический подход. Сообщение I

П.И. Храмов, О.А. Вятлева, М.Г. Вершинина, А.П. Фисенко

ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России, Ломоносовский пр., д. 2, стр. 1, г. Москва, 119991, Российская Федерация

Резюме

Введение. Внедрение в образовательный процесс цифровых технологий предполагает широкое использование клавиатурного письма и сокращение доли ручного письма. Вместе с тем исследования в области физиологии и гигиены письма свидетельствуют о важности письма рукой для развития и формирования мозговых функций у детей в процессе обучения. Потенциальные риски для развития детского организма, связанные с использованием клавиатурного письма и снижением доли ручного письма, требуют проведения научных исследований по гигиенической оценке клавиатурного письма. Однако отсутствие научно обоснованного методического подхода ограничивает возможности проведения таких исследований.

Цель исследования – разработать методический подход и провести тестовое исследование по гигиенической оценке клавиатурного письма на основе биокрибернетического анализа биоэлектрической активности мозга.

Материалы и методы. Для организации и проведения исследований разработан алгоритм, основанный на сравнительном анализе биоэлектрической активности мозга при клавиатурном и ручном письме. Система наложения электродов включала монополярные отведения по международной системе 10–20. Регистрация ЭЭГ проводилась с помощью компьютерного электроэнцефалографа «Нейро-КМ» («Статокин», Россия) с пакетом программ Brainsys для спектрально-когерентного и статистического анализа ЭЭГ. Программное обеспечение позволяло оценить топографию абсолютной мощности альфа-ритма в состоянии покоя, при ручном и клавиатурном письме, внутриполушарную и межполушарную когерентность альфа-ритма.

Результаты. Установлено, что мощность колебаний в альфа-диапазоне снижается при клавиатурном и ручном письме по сравнению с состоянием покоя. Снижение мощности альфа-волн, отражающих активацию коры, отмечается в более обширной области при ручном письме. При клавиатурном письме снижение альфа-волн установлено только в моторных и сенсомоторных отделах мозга. При ручном письме по сравнению с состоянием покоя значимо возросло взаимодействие всех областей коры внутри обоих полушарий, при клавиатурном – только в одном.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что ручное письмо обеспечивается более сложной системой активации и взаимодействия областей коры мозга, чем при клавиатурном письме. Предложенный алгоритм может быть использован при проведении дальнейших научных исследований по гигиенической оценке клавиатурного письма.

Ключевые слова: клавиатурное письмо, ЭЭГ-исследования, биокрибернетический подход.

Для цитирования: Храмов П.И., Вятлева О.А., Вершинина М.Г., Фисенко А.П. Гигиеническая оценка клавиатурного письма: биокрибернетический подход. Сообщение I // Здоровье населения и среда обитания. 2021. Т. 29. № 10. С. 27–33. doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-10-27-33>

Сведения об авторах:

✉ Храмов Петр Иванович – д.м.н., проф., заведующий лабораторией комплексных проблем гигиены детей и подростков ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России; e-mail: pikhrantsov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0476-0969>.

Вятлева Ольга Алексеевна – к.б.н., ведущий научный сотрудник лаборатории комплексных проблем гигиены детей и подростков ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России; e-mail: olgavyat@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2940-1855>.

Вершинина Марина Германовна – к.м.н., руководитель НИИ гигиены и охраны здоровья детей и подростков ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России; e-mail: labckb@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6051-5231>.

Фисенко Андрей Петрович – д.м.н., проф., заслуженный врач Российской Федерации, директор ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России; e-mail: director@nczd.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8586-7946>.

Информация о вкладе авторов: Храмов П.И. – разработка концепции и дизайна исследования, анализ полученных данных, написание текста рукописи; Вятлева О.А. – обзор публикаций по теме статьи, разработка дизайна исследования, проведение исследований, анализ полученных данных; Вершинина М.Г. – разработка концепции и дизайна исследования, анализ полученных данных; Фисенко А.П. – разработка концепции исследования; все авторы приняли участие в редактировании материала и внесли свой вклад в обсуждение.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья получена: 29.08.21 / Принята к публикации: 22.10.21 / Опубликована: 30.10.21

Hygienic Assessment of Digital Writing: A Bio-Cybernetic Approach. Report I

Petr I. Khrantsov, Olga A. Vyatleva, Marina G. Vershinina, Andrey P. Fisenko

National Medical Research Center for Children's Health,
Bldg 1, 2 Lomonosovskiy Avenue, Moscow, 119991, Russian Federation

Summary

Background: Introduction of digital technologies into the educational process involves the widespread use of keyboard typing and spending less time handwriting. At the same time, studies in the field of physiology and hygiene of handwriting show its importance for the development and formation of brain functions in children in the learning process. Potential risks for child development associated with regular typing and rare handwriting require proper hygienic assessment of the former. Yet, the lack of a scientifically based methodological approach is a strong limitation for such studies.

Objective: To develop a methodological approach and conduct a pilot study on hygienic assessment of digital writing based on a bio-cybernetic analysis of the bioelectrical activity of the brain.

Materials and methods: To arrange and conduct the research, we developed an algorithm based on a comparative analysis of the bioelectrical activity of the brain during typing and handwriting. Scalp electrodes were applied according to the International 10–20 system. EEG registration was carried out using a Neuro-KM computer-aided electroencephalograph by Statokin, Russia, with a Brainsys software for spectral-coherent and statistical analysis of EEG. The software allowed us to estimate the topography of the absolute power of the alpha rhythm in a resting state, during handwriting and typing, and

the intrahemispheric and interhemispheric coherence of the alpha rhythm.

Results: We established that the power of vibrations in the alpha range during digital and handwriting decreased compared to the resting state. Such a decrease reflecting activation of the cortex was noted in a more extensive area during handwriting. Typing decreased alpha waves only in the motor and sensorimotor areas of the brain. Compared to the resting state, handwriting significantly increased interaction between all areas of the cortex inside both hemispheres while typing did that in one hemisphere only.

Conclusion: Our findings indicate that handwriting is provided by a more complex system of activation and interaction of areas of the cerebral cortex than typing. The developed algorithm can be used for further research on digital writing.

Keywords: digital writing, EEG studies, bio-cybernetic approach.

For citation: Khramtsov P.I., Vyatleva O.A., Vershinina M.G., Fisenko A.P. Hygienic assessment of digital writing: a bio-cybernetic approach. Report I. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2021; 29(10):27–33. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-10-27-33>

Author information:

✉ Petr I. Khramtsov, Dr. Sci. (Med.), Professor; Head of the Laboratory of Complex Problems of Pediatric and Adolescent Health, National Medical Research Center for Children's Health; e-mail: pikhrantsov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0476-0969>.

Olga A. Vyatleva, Cand. Sci. (Biol.); Leading Researcher, Laboratory of Complex Problems of Pediatric and Adolescent Health, National Medical Research Center for Children's Health; e-mail: olgavyat@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2940-1855>.

Marina G. Vershinina, Cand. Sci. (Med.), Head of the Research Institute of Hygiene and Health Protection of Children and Adolescents, National Medical Research Center for Children's Health; e-mail: labckb@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6051-5231>.

Andrey P. Fisenko, Dr. Sci. (Med.), Professor, Honored Doctor of the Russian Federation; Director of the National Medical Research Center for Children's Health; e-mail: director@nczd.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8586-7946>.

Author contributions: Khramtsov P.I. developed the study design, analyzed data, and wrote the manuscript; Vyatleva O.A. did a literature review, conducted the study, and analyzed data; Vershinina M.G. developed the study design and analyzed data; Fisenko A.P. developed the study design and conception; all authors contributed to the discussion and approved the final version of the manuscript.

Funding information: The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Received: August 29, 2021 / Accepted: October 22, 2021 / Published: October 30, 2021

Введение. Современное образовательное пространство характеризуется широким внедрением цифровых технологий, оценка безопасности которых для здоровья обучающихся требует проведения соответствующих гигиенических исследований [1–4]. Отличительной особенностью цифровизации учебного процесса является использование клавиатурного письма, которое существенно отличается от ручного письма и в дальнейшем все в большей степени предполагает его вытеснение [5–8]. Исследования в области гигиены и физиологии письма свидетельствуют о том, что замена ручного письма на клавиатурное небезразлично для развития мозга, особенно в процессе активного развития и формирования мозговых функций у детей в условиях образовательной деятельности [9–13].

Биокибернетический подход к гигиенической оценке клавиатурного письма предусматривает исследование механизмов управления тонко-координированными движениями пальцев и кистей рук на основе сравнительного анализа биоэлектрической активности мозга с ручным письмом [14].

Ручное письмо является сложным моторным актом, при котором траектория пишущего острей не тождественна движениям кончиков пальцев, направляющих пишущий инструмент [15, 16]. Это очень латерализованный процесс, характеризующийся участием одной руки и трех пальцев. Клавиатурное письмо отличается от ручного как по характеру движений, так и по тактильным, проприоцептивным и кинестетическим ощущениям пальцев и кистей рук. При печатании на клавиатуре используются обе руки и все 10 пальцев. Движения пальцев при клавиатурном письме менее разнообразные, менее точные и менее тонкие, чем при письме рукой.

Отличительной биомеханической особенностью клавиатурного письма является внутренняя ротация предплечья в локтевом суставе, в то время как при ручном письме сохраняется естественное положение предплечья и кисти руки практически в одной вертикальной плоскости с небольшим углом ротации внутрь. Положение кисти при ручном письме является более физиологичным, чем при клавиатурном [17].

Ручное письмо требует более высокого уровня зрительно-моторной координации в отличие от клавиатурного письма. При клавиатурном письме положение кистей рук практически не меняется, в то время как при ручном письме кисть рабочей руки постоянно меняет свое положение.

Особенности клавиатурного письма определили необходимость разработки методического обеспечения гигиенических исследований по оценке его влияния на организм обучающихся.

Цель исследования – разработать методический подход и провести тестовое исследование по гигиенической оценке клавиатурного письма на основе биокибернетического анализа биоэлектрической активности мозга.

Материалы и методы исследования. Для разработки методического подхода обоснован алгоритм и проведено тестовое исследование с использованием биокибернетического анализа механизмов управления сложно-координированными движениями пальцев и кистей рук на основе оценки результатов ЭЭГ-активности отделов головного мозга, участвующих в управлении тонкой моторикой в процессе клавиатурного и ручного письма.

Предварительное тестовое исследование проведено в лаборатории биокибернетических методов исследования с участием волонтера-студента 21 года для установления адекватности и информативности методического подхода и обоснования возможности дальнейших серийных исследований с участием детей и подростков разного возраста и пола, а также в разных условиях их обучения и воспитания, в том числе в современных условиях цифровой образовательной среды. Рабочая гипотеза состояла в том, что отсутствие адекватных цели результатов явилось бы основанием корректировки или модификации предложенного методического подхода прежде проведения исследования с участием обучающихся школьного возраста.

У участника исследования было получено письменное информированное согласие до начала исследования. Условием включения в исследование являлось отсутствие хронических заболеваний в стадии обострения и жалоб на состояние здоровья, в том числе со стороны центральной нервной системы.

Исследование выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации (2013). Алгоритм исследования включал:

- 1) регистрацию ЭЭГ в покое: глаза открыты — 3 мин, затем глаза закрыты — 3 мин;
- 2) печать на клавиатуре стандартного текста — 3 мин, запись ЭЭГ (F5)–(F5) — 3 мин;
- 3) регистрацию ЭЭГ в покое: глаза открыты — 3 мин, затем глаза закрыты — 3 мин;
- 4) письмо рукой стандартного текста (того же, что и при клавиатурном письме) — 3 мин, запись ЭЭГ (F6)–(F6);
- 5) регистрацию ЭЭГ в покое: глаза открыты — 3 мин, затем глаза закрыты — 3 мин.

Система наложения электродов состояла из монополярных отведений по международной системе 10–20 (Fp1,2; F3,4; C3,4; P3,4; O1,2; F7,8; T3,4; T5,6; Fz; Cz; Pz). Регистрация ЭЭГ проводилась на компьютерном электроэнцефалографе «Нейро-КМ» с пакетом программ Brainsys для спектрально-когерентного и статистического анализа ЭЭГ. Программное обеспечение позволяет проводить статистическую обработку электроэнцефалограмм с расчетом мощности альфа-ритма и определением топографии абсолютной мощности альфа-ритма ЭЭГ и ее различий при клавиатурном и ручном письме.

При проведении исследования необходимо соблюдение следующих условий: а) выключение экрана монитора во время регистрации ЭЭГ покоя с открытыми глазами; б) стандартный текст должен соответствовать психофизиологическому уровню развития обследуемых; в) текст для печати на клавиатуре и для ручного письма должен быть расположен перед обследуемым.

Результаты исследования и их обсуждение. Апробация предложенного алгоритма проведена в условиях тестового исследования. По результатам электроэнцефалографического исследования установлено, что в покое при открытых глазах фиксируется характерный для данного состояния сенсомоторный ритм альфа-диапазона, который исчезает при письме рукой и печатании на клавиатуре.

Статистический анализ выявил снижение абсолютной мощности ритмов альфа-диапазона при письме и печатании (рис. 1).

Топография значимого снижения мощности альфа-волн различна при письме рукой и клавиатурном письме (рис. 2).

При письме рукой снижение мощности альфа-волн, отражающее активацию коры, отмечается в более обширной зоне (рис. 3, слева) и включает не только моторные (F, C), но и зрительные

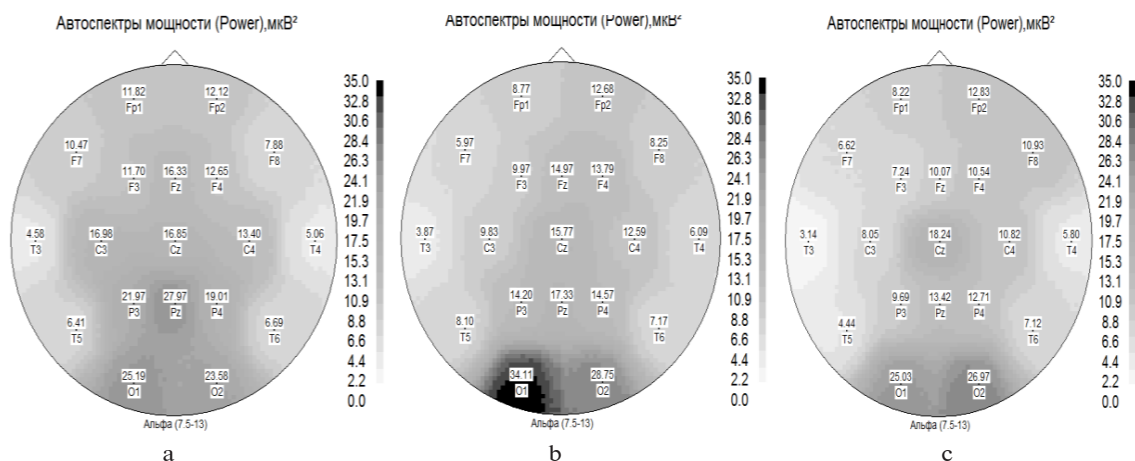


Рис. 1. Топография абсолютной мощности альфа-ритма ЭЭГ в покое с открытыми глазами (а), при письме рукой (б) и при наборе текста на клавиатуре (с)

Fig. 1. Topography of the absolute power of the EEG alpha rhythm at rest with open eyes (a), during handwriting (b) and typing (c)

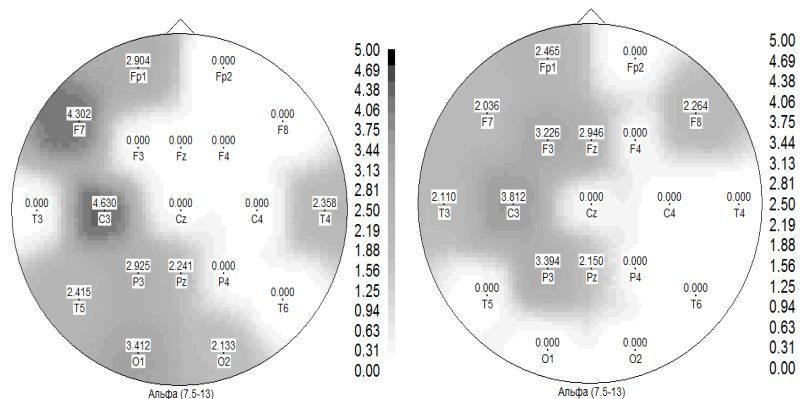


Рис. 2. Топография значимых различий по абсолютной мощности альфа-ритма: слева — между ЭЭГ в покое и ЭЭГ при письме от руки; справа — между ЭЭГ покоя и ЭЭГ при печати на клавиатуре ($p < 0,05$, $t > 2,0$; $p < 0,01$, $t > 2,7$). На шкале указаны значения критерия Стьюдента. Темным фоном отмечено значимое снижение АМ альфа-волн по сравнению с состоянием покоя

Fig. 2. Topography of significant differences in the absolute power of the alpha rhythm: on the left — between the EEG at rest and the EEG during handwriting; on the right — between the EEG at rest and the EEG during typing ($p < 0.05$, $t > 2.0$; $p < 0.01$, $t > 2.7$). Values of the Student's criterion are shown on the scale. The dark background shows a significant decrease in AM alpha waves compared to the resting state

(О) отделы. При клавиатурном письме снижение мощности альфа-волн отмечено лишь в моторных и сенсомоторных отделах.

Анализ показателей когерентности альфа-волн, отражающий синхронность в работе различных зон коры мозга, также выявил различия между ручным и клавиатурным письмом (рис. 3–6).

При ручном письме по сравнению с состоянием покоя (рис. 4, слева) значительно возрастало взаимодействие всех областей коры внутри обоих полушарий. При клавиатурном письме усиливалось взаимодействие лишь внутри правого полушария, но оно было менее выражено. В обоих случаях

взаимодействие областей в большей степени усиливалось в правом полушарии, которое, по-видимому, является речевым у испытуемого левши.

Письмо рукой и на клавиатуре сопровождалось также снижением межполушарного взаимодействия, причем это снижение было более выражено при клавиатурном письме (рис. 5 и 6).

Проведенный анализ ЭЭГ показал, что письмо рукой обеспечивается более сложной системой активации и взаимодействия областей коры, чем письмо на клавиатуре.

С биобибернетических позиций система является более гибкой в процессе адаптации

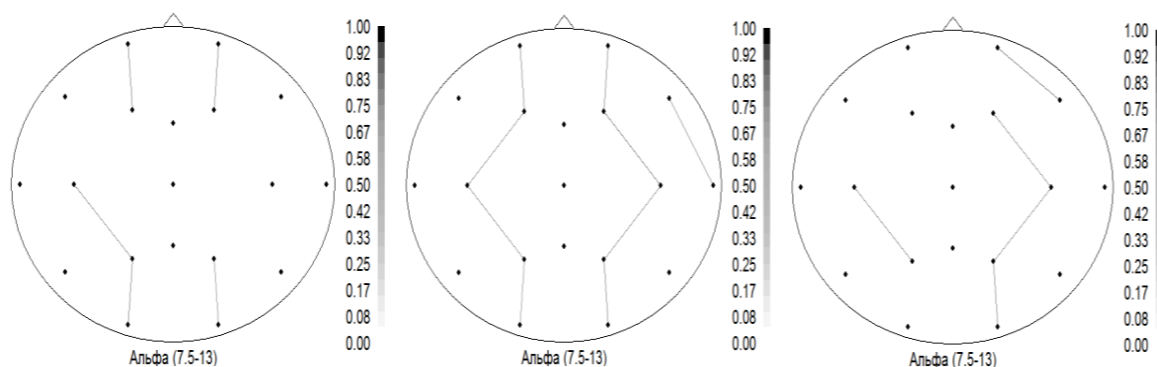


Рис. 3. Внутриполушарная когерентность в альфа-диапазоне (указаны значения $\geq 0,8$) слева направо: в покое с открытыми глазами, при письме рукой и при наборе текста на клавиатуре

Fig. 3. Intrahemispheric coherence in the alpha range (values ≥ 0.8 are shown) from left to right: at rest with open eyes, during handwriting and typing on a keyboard

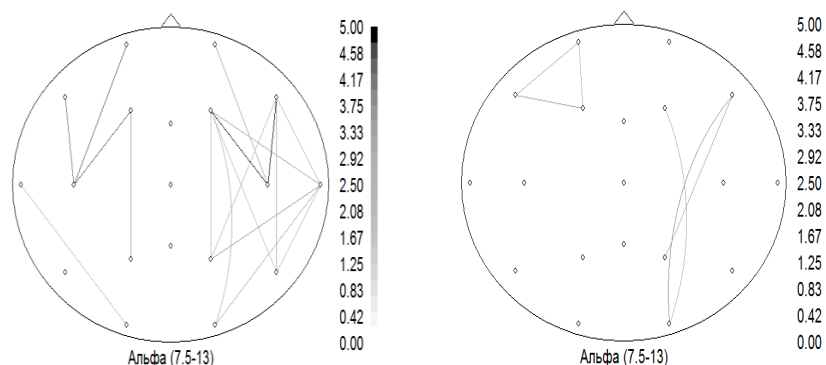


Рис. 4. Топография значимых различий по внутриполушарной когерентности альфа-ритма: слева — между ЭЭГ в покое и ЭЭГ при письме от руки; справа — между ЭЭГ покоя и ЭЭГ при печати на клавиатуре ($p < 0,05$, $t > 2,0$; $p < 0,01$, $t > 2,7$)

Fig. 4. Topography of significant differences in the intrahemispheric coherence of the alpha rhythm: on the left — between the EEG at rest and the EEG during handwriting; on the right — between the EEG at rest and the EEG during typing on the keyboard ($p < 0.05$, $t > 2.0$; $p < 0.01$, $t > 2.7$)

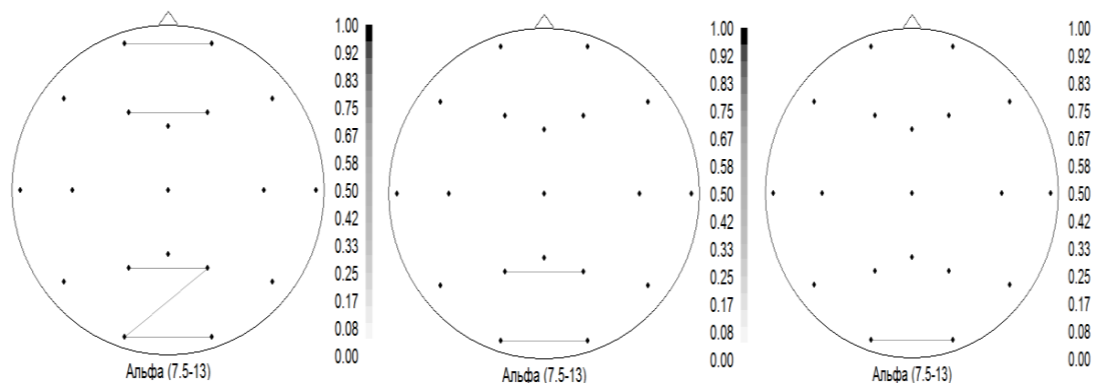


Рис. 5. Межполушарная когерентность в альфа-диапазоне (указаны значения $\geq 0,6$) слева направо: в покое с открытыми глазами, при письме рукой и при наборе текста на клавиатуре

Fig. 5. Interhemispheric coherence in the alpha range (values ≥ 0.6 are indicated) from left to right: at rest with open eyes, during handwriting and typing on a keyboard

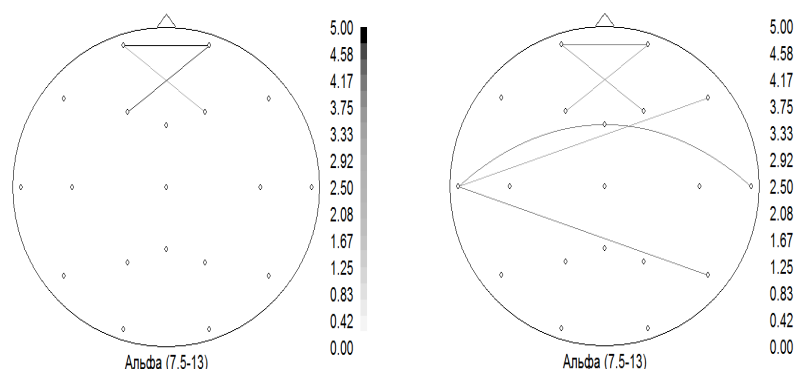


Рис. 6. Топография значимых различий по межполушарной когерентности альфа-ритма: слева — между ЭЭГ в покое и ЭЭГ при письме от руки; справа — между ЭЭГ покоя и ЭЭГ при печати на клавиатуре ($p < 0,05$, $t > 2,0$; $p < 0,01$, $t > 2,7$). Отрицательные значения отмечены пунктиром

Fig. 6. Topography of significant differences in the interhemispheric coherence of the alpha rhythm: on the left — between the EEG at rest and the EEG during handwriting; on the right — between the EEG at rest and the EEG during typing on the keyboard ($p < 0.05$, $t > 2.0$; $p < 0.01$, $t > 2.7$). Negative values are marked with a dotted line.

к разным видам деятельности при наличии большего количества сформированных нервных связей. Несмотря на то что использование клавиатуры позволяет увеличить скорость набора текста, письмо вручну в большей степени способствует обучению [8, 19]. Простота движений при печатании на клавиатуре облегчает бездумное копирование текста, тогда как дополнительные усилия, связанные с ручным письмом, требуют глубокой обработки его содержания. По данным Мюллер и Оппенгеймера [20], студенты, которые во время просмотра фильма и прослушивания отрывков прозаического текста использовали для заметок ноутбук, были более склонны делать записи дословно, а те, кто вел записи вручну, использовали творческий подход, перефразируя текст. Проверка усвоения материала показала, что пользовавшиеся клавиатурой менее эффективно запоминали его более глубокий смысл, чем те, кто делал заметки от руки.

В ряде исследований показано, что обучение письму и чтению на клавиатуре менее эффективно, чем с помощью ручного письма. Исследование, проведенное на взрослых, которые в течение трех недель обучались новым буквенным знакам с помощью ручного письма и клавиатуры [21], показало, что те, кто учился писать вручну, лучше справлялись с задачами на запоминание и визуальное распознавание этих знаков, чем те, кто обучался с помощью клавиатуры. Это преимущество ручного письма проявлялось не сразу, а чаще всего спустя 3 недели обучения.

Различия в эффективности обучения с помощью клавиатуры и ручного письма, как показывают исследования, обусловлены различиями в мозговых механизмах ручного и клавиатурного письма.

Более высокая активация мозга при восприятии букв, изученных с помощью письма, в сравнении с клавиатурой, наблюдается не только в моторной, но и в ассоциативной зрительной коре, что показано в МРТ-исследовании дошкольников [22, 23]. Авторы проводили МРТ-сканирование мозга до и после обучения детей разным буквам и геометрическим фигурам последовательно: 1) с помощью ручного письма, 2) на клавиатуре и 3) путем зрительного отслеживания. Анализ МРТ при проверке на узнавание букв показал, что наибольшая активация областей мозга, ответственных за чтение, наблюдалась лишь у тех, кто обучался письму вручну, а самая низкая — у детей, обучавшихся на клавиатуре.

Меньшая эффективность клавиатурного письма в обучении, возможно, связана также с особенностями внимания. При ручном письме зрительное внимание, направленное на кончик ручки или карандаша, максимально приближено к зоне движения, что обеспечивает наиболее близкое совпадение внимания и движения во времени и пространстве. При использовании клавиатуры зрительное внимание, направленное на экран, отдалено от процесса движения пальцев на клавиатуре. При печатании на клавиатуре пользователь может абстрагироваться от думания и слушания, но ручное письмо требует сосредоточения и «помогает думать» [24–26]. Максимальное пространственно-временное совпадение зрительного внимания с движением при письме рукой способствует более высокому функциональному взаимодействию между зрительными и моторными зонами коры в сравнении с печатанием на клавиатуре.

Заключение. Проведенное предварительное исследование позволило разработать методический подход к гигиенической оценке клавиатурного письма на основе сравнительного анализа результатов ЭЭГ-исследования с ручным письмом. Полученные данные свидетельствуют о том, что ручное письмо обеспечивается более сложной системой активации и взаимодействия областей коры мозга, чем при клавиатурном письме. Предложенный алгоритм может быть использован при проведении дальнейших углубленных научных исследований по гигиенической оценке клавиатурного письма.

Список литературы

1. Байбородова Л.В., Тамарская Н.В. Трансформация дидактических принципов в условиях цифровизации образования // Педагогика. 2020. Т. 84. № 7. С. 22–30.
2. Кондаков А.М., Сергеев И.С. Методология проектирования общего образования в контексте цифровой трансформации // Педагогика. 2021. Т. 85. № 1. С. 5–23.
3. Александрова И.Э. Гигиеническая оптимизация учебного процесса в школе в условиях использования электронных средств обучения // Анализ риска здоровью. 2020. № 2. С. 47–54.
4. Айязтова М.В., Александрова И.Э., Мирская Н.Б., Исакова Н.В., Вершинина М.Г., Фисенко А.П. Влияние использования интерактивных панелей в процессе учебных занятий на основные параметры внутришкольной среды // Здоровье населения

- и среда обитания. 2021. № 2(335). С. 15–21. doi: 10.35627/2219-5238/2021-335-2-15-21
5. Aberšek M, Aberšek B, Flogie A. Writing versus typing during science teaching: case study in Slovenia. *J Balt Sci Educ*. 2018;17(1):84–96. doi: 10.33225/jbse/18.17.84
 6. Aragón-Mendizábal E, Delgado-Casas C, Navarro-Guzmán J, Menacho-Jiménez I, Romero-Oliva MF. A comparative study of handwriting and computer typing in note-taking by university students. *Comunicar*. 2016;24(48):101–110. doi: 10.3916/C48-2016-10
 7. Kiefer M, Schuler S, Mayer C, Trumpp NM, Hille K, Sachse S. Handwriting or typewriting? The influence of pen or keyboard-based writing training on reading and writing performance in preschool children. *Adv Cogn Psychol*. 2015;11(4):136–146. doi: 10.5709/acp-0178-7
 8. Mayer C, Wallner S, Budde-Spengler N, Braunert S, Arndt PA, Kiefer M. Literacy training of kindergarten children with pencil, keyboard or tablet stylus: The influence of the writing tool on reading and writing performance at the letter and word level. *Front Psychol*. 2020;10:3054. doi: 10.3389/fpsyg.2019.03054
 9. Guilbert J, Alamargot D, Morin M-F. Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Hum Mov Sci*. 2019;65:S0167-9457(18)30093–9. doi: 10.1016/j.humov.2018.09.001
 10. Li JX, James KH. Handwriting generates variable visual output to facilitate symbol learning. *J Exp Psychol Gen*. 2016;145(3):298–313. doi: 10.1037/xge0000134
 11. Longcamp M, Boucard C, Gilhodes J-C, et al. Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: behavioral and functional imaging evidence. *J Cogn Neurosci*. 2008;20(5):802–815. doi: 10.1162/jocn.2008.20504
 12. Palmis S, Danna J, Velay J-L, Longcamp M. Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cogn Neuropsychol*. 2017;34(3-4):187–204. doi: 10.1080/02643294.2017.1367654
 13. Planton S, Jucla M, Roux F-E, Démonet JF. The “handwriting brain”: a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*. 2013;49(10):2772–2787. doi: 10.1016/j.cortex.2013.05.011
 14. Бернштейн Н.А. О построении движений. М.: Книга по требованию, 2012. 253 с.
 15. Alamargot D, Morin M-F. Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between Grades Two and Nine. *Hum Mov Sci*. 2015;44:32–41. doi: 10.1016/j.humov.2015.08.011
 16. Frangou S-M, Ruokamo H, Parviainen T, Wikgren J. Can you put your finger on it? The effects of writing modality on Finnish students' recollection. *Writ Syst Res*. 2018;10(2):82–94. doi: 10.1080/17586801.2018.1536015
 17. Kim JH, Aulck L, Bartha MC, Harper CA, Johnson PW. Differences in typing forces, muscle activity, comfort, and typing performance among virtual, notebook, and desktop keyboards. *Appl Ergon*. 2014;45(6):1406–1413. doi: 10.1016/j.apergo.2014.04.001
 18. Umejima K, Ibaraki T, Yamazaki T, Sakai KL. Paper notebooks vs. mobile devices: brain activation differences during memory retrieval. *Front Behav Neurosci*. 2021;15:634158. doi: 10.3389/fnbeh.2021.634158
 19. Van der Meer ALH, Van der Weel FRR. Only three fingers write, but the whole brain works: a high-density EEG study showing advantages of drawing over typing for learning. *Front Psychol*. 2017;8:706. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00706
 20. Mueller PA, Oppenheimer DM. The pen is mightier than the keyboard: advantages of longhand over laptop note taking. *Psychol Sci*. 2014;25(6):1159–1168. doi: 10.1177/0956797614524581
 21. Longcamp M, Boucard C, Gilhodes J-C, Velay J-L. Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: a comparison between handwriting and typing. *Hum Mov Sci*. 2006;25(4–5):646–656. doi: 10.1016/j.humov.2006.07.007
 22. James KH. Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Dev Sci*. 2010;13(2):279–288. doi: 10.1111/j.1467-7687.2009.00883.x
 23. James KH, Engelhardt L. The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends Neurosci Educ*. 2012;1(1):32–42. doi: 10.1016/j.tine.2012.08.001
 24. Mangen A. The disappearing trace and the abstraction of inscription in digital writing. In: Pytash KE, Ferdig RE, eds. *Exploring Technology for Writing and Writing Instruction*. 2013:100–113. doi: 10.4018/978-1-4666-4341-3.ch006
 25. Mangen A. Modes of writing in a digital age: The good, the bad and the unknown. *First Monday*. 2018;23(10):1–9. doi: 10.5210/fm.v23i10.9419
 26. Park S, Baron NS. Space, context, and mobility: Different experiences of writing on mobile phones, laptops, and paper. In: Vincent J, Haddon L, eds. *Smartphone Cultures*. London: Routledge; 2017:150–162.

References

1. Kondakov AM, Sergeev IS. Comprehensive methodology for designing general education in the context of digital transformation. *Pedagogika*. 2021;85(1):5–24. (In Russ.)
2. Bayborodova LV, Tamarskaya NV. Transformation of didactic principles in the conditions of digitalization of education. *Pedagogika*. 2020;84(7):22–30. (In Russ.)
3. Aleksandrova IE. Hygienic optimization of educational process at school involving massive use of electronic learning devices. *Health Risk Analysis*. 2020;(2):47–54. (In Russ.) doi: 10.21668/health.risk/2020.2.05.eng
4. Ayzatova MV, Aleksandrova IE, Morskaya NB, Isaakova NV, Vershinina MG, Fisenko AP. The impact of using interactive panels in the learning process on the main parameters of the indoor school environment. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2021;(2(335)):15–21. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2021-335-2-15-21
5. Aberšek M, Aberšek B, Flogie A. Writing versus typing during science teaching: case study in Slovenia. *J Balt Sci Educ*. 2018;17(1):84–96. doi: 10.33225/jbse/18.17.84
6. Aragón-Mendizábal E, Delgado-Casas C, Navarro-Guzmán J, Menacho-Jiménez I, Romero-Oliva MF. A comparative study of handwriting and computer typing in note-taking by university students. *Comunicar*. 2016;24(48):101–110. doi: 10.3916/C48-2016-10
7. Kiefer M, Schuler S, Mayer C, Trumpp NM, Hille K, Sachse S. Handwriting or typewriting? The influence of pen or keyboard-based writing training on reading and writing performance in preschool children. *Adv Cogn Psychol*. 2015;11(4):136–146. doi: 10.5709/acp-0178-7
8. Mayer C, Wallner S, Budde-Spengler N, Braunert S, Arndt PA, Kiefer M. Literacy training of kindergarten children with pencil, keyboard or tablet stylus: The influence of the writing tool on reading and writing performance at the letter and word level. *Front Psychol*. 2020;10:3054. doi: 10.3389/fpsyg.2019.03054
9. Guilbert J, Alamargot D, Morin M-F. Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Hum Mov Sci*. 2019;65:S0167-9457(18)30093–9. doi: 10.1016/j.humov.2018.09.001
10. Li JX, James KH. Handwriting generates variable visual output to facilitate symbol learning. *J Exp Psychol Gen*. 2016;145(3):298–313. doi: 10.1037/xge0000134
11. Longcamp M, Boucard C, Gilhodes J-C, et al. Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: behavioral and functional imaging evidence. *J Cogn Neurosci*. 2008;20(5):802–815. doi: 10.1162/jocn.2008.20504

12. Palmis S, Danna J, Velay J-L, Longcamp M. Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cogn Neuropsychol.* 2017;34(3-4):187–204. doi: 10.1080/02643294.2017.1367654
13. Planton S, Jucla M, Roux F-E, Démonet JF. The “handwriting brain”: a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex.* 2013;49(10):2772–2787. doi: 10.1016/j.cortex.2013.05.011
14. Bernstein NA. [On Construction of Movements.] Moscow: Kniga po Trebovaniyu Publ.; 2012. (In Russ.)
15. Alamargot D, Morin M-F. Does handwriting on a tablet screen affect students’ graphomotor execution? A comparison between Grades Two and Nine. *Hum Mov Sci.* 2015;44:32–41. doi: 10.1016/j.humov.2015.08.011
16. Frangou S-M, Ruokamo H, Parviainen T, Wikgren J. Can you put your finger on it? The effects of writing modality on Finnish students’ recollection. *Writ Syst Res.* 2018;10(2):82–94. doi: 10.1080/17586801.2018.1536015
17. Kim JH, Aulck L, Bartha MC, Harper CA, Johnson PW. Differences in typing forces, muscle activity, comfort, and typing performance among virtual, notebook, and desktop keyboards. *Appl Ergon.* 2014;45(6):1406–1413. doi: 10.1016/j.apergo.2014.04.001
18. Umejima K, Ibaraki T, Yamazaki T, Sakai KL. Paper notebooks vs. mobile devices: brain activation differences during memory retrieval. *Front Behav Neurosci.* 2021;15:634158. doi: 10.3389/fnbeh.2021.634158
19. Van der Meer ALH, Van der Weel FRR. Only three fingers write, but the whole brain works: a high-density EEG study showing advantages of drawing over typing for learning. *Front Psychol.* 2017;8:706. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00706
20. Mueller PA, Oppenheimer DM. The pen is mightier than the keyboard: advantages of longhand over laptop note taking. *Psychol Sci.* 2014;25(6):1159–1168. doi: 10.1177/0956797614524581
21. Longcamp M, Boucard C, Gilhodes J-C, Velay J-L. Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: a comparison between handwriting and typing. *Hum Mov Sci.* 2006;25(4-5):646–656. doi: 10.1016/j.humov.2006.07.007
22. James KH. Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Dev Sci.* 2010;13(2):279–288. doi: 10.1111/j.1467-7687.2009.00883.x
23. James KH, Engelhardt L. The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends Neurosci Educ.* 2012;1(1):32–42. doi: 10.1016/j.tine.2012.08.001
24. Mangan A. The disappearing trace and the abstraction of inscription in digital writing. In: Pytash KE, Ferdig RE, eds. *Exploring Technology for Writing and Writing Instruction.* 2013:100–113. doi: 10.4018/978-1-4666-4341-3.ch006
25. Mangan A. Modes of writing in a digital age: The good, the bad and the unknown. *First Monday.* 2018;23(10):1–9. doi: 10.5210/fm.v23i10.9419
26. Park S, Baron NS. Space, context, and mobility: Different experiences of writing on mobile phones, laptops, and paper. In: Vincent J, Haddon L, eds. *Smartphone Cultures.* London: Routledge; 2017:150–162.

