

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623398>

Эффекты транскраниальной магнитной стимуляции на изменения активности кортикальных структур во время выполнения моторного воображения в интерфейсе мозг-компьютер

А.О. Савосенков^{1, 2*}, Н.А. Григорьев^{1, 2}, А.М. Удоратина¹, С.А. Куркин², С.Ю. Гордлеева^{1, 2}¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация;² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Последствия инсульта часто включают нарушение двигательных функций, что приводит к трудностям в выполнении привычных движений конечностей. Эти нарушения движения возникают из-за повреждения коры головного мозга и нарушения нейронных связей в центральных пирамидальных путях [1]. Восстановление моторных навыков после инсульта является сложным и трудоёмким процессом, требующим как внешних медицинских ресурсов, так и собственных усилий пациента. Однако возможно восстановить контроль над движениями конечностей. Стандартный подход к нейрореабилитации после инсульта включает терапевтические физические упражнения и кинезитерапию. Эти техники опираются на афферентную информацию во время моторных задач для восстановления связей между целостными областями головного мозга. [2] Путём тренировки поражённых конечностей происходит перестройка синапсов в коре, активация спящих нейронов и расширение корковых областей, прилегающих к неактивным регионам. Несмотря на эффективность этих методик в частичном восстановлении движений, многие пациенты после инсульта продолжают испытывать нарушения. Традиционные методы реабилитации часто не обеспечивают полного контроля над движением, поэтому исследователи ищут альтернативные подходы. В последние годы большое внимание уделяется мозг-компьютерным интерфейсам (ИМК) на основе моторного воображения [3, 4]. Эти интерфейсы позволяют интегрировать различные механизмы обратной связи и могут быть использованы вместе с экзоскелетами верхних и нижних конечностей. Уровень контроля, который имеет пациент над ИМК-системой, непосредственно влияет на процесс восстановления [5]. Введение транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) в ИМК на основе моторного воображения обещает создать единый и высокоэффективный метод реабилитации после инсульта.

Для исследования были подобраны 29 здоровых взрослых испытуемых (21 женщина) среднего возраста 20,93±2,14 года. У них не было опыта работы с мозг-компьютерными интерфейсами, и они были правшами. Исследование получило одобрение этического комитета ННГУ (протокол № 2, от 19.03.2021), и все участники предоставили письменное информированное согласие. Испытуемые были случайным образом распределены на группы, получающие либо ложную (15 человек), либо реальную транскраниальную магнитную стимуляцию (14 человек). Задания демонстрировались на ЖК-экране диагональю 24 дюйма, расположенном на расстоянии 2 метров. Участники сидели в комфортном кресле, в это время записывались сигналы ЭЭГ. Обучение моторному воображению с использованием ИМК проводилось в течение двух дней, по четыре задания в день: моторная активность, квази-моторная активность и два моторных воображения доминирующей руки. Фоновая активность ЭЭГ регистрировалась до и после выполнения заданий, каждое задание состояло из 20 повторений продолжительностью 10 секунд. Экспериментатор контролировал электромиографию (ЭМГ) в режиме реального времени во время моторных задач. ТМС проводилась между двумя заданиями по моторному воображению с двухминутным перерывом после стимуляции. Сигналы электроэнцефалографии (ЭЭГ) регистрировались с помощью сертифицированного усилителя NVX-52 с 32 электродами Ag/Cl, расположенными в соответствии с международной системой 10-10. ЭЭГ сигнал был записан с частотой дискретизации 1000 Гц, также применялся режекторный фильтр на частоте 50 Гц. ЭМГ регистрировалась с помощью одноразовых электродов со сгибателя пальцев на правой руке. ТМС применялась к дорсолатеральной префронтальной коре с использованием двойного углового индуктора, подключённого к магнитному стимулятору Neuro MS/D. Ложная стимуляция проводилась с использованием тех же параметров, но катушка была повернута на 90 градусов для имитации звука реальной стимуляции. Для оценки статистически значимых различий между периодами покоя и периодами выполнения моторной задачи после ТМС был проведён непараметрический перестановочный тест. Были выделены значимые кластеры наивысшей событийной десинхронизации (ERD). Анализ показал значимый

Рукопись получена: 22.05.2023

Рукопись одобрена: 26.11.2023

Опубликована online: 20.01.2024

отрицательный кластер в тета-ритме (0–6 Гц), который отличался от области магнитной стимуляции. Подобные значимые кластеры ERD наблюдались между первой и второй сериями воображаемых движений.

Исследование изучало изменения активности моторной коры после целенаправленной ТМС. Полученные результаты показали, что ТМС с определёнными параметрами приводит к предварительной активации областей головного мозга, аналогичных активации во время моторного воображения. Использование этого метода стимуляции повышает активность корковых областей, связанных с воображением движений. Результаты свидетельствуют о потенциальной эффективности ТМС в усилении активации моторной коры в процессе реабилитации.

Ключевые слова: ИМК; ритмическая ТМС; ЭЭГ; нТМС; моторное воображение; десинхронизация.

Как цитировать:

Савосенков А.О., Григорьев Н.А., Удоратина А.М., Куркин С.А., Гордлеева С.Ю. Эффекты транскраниальной магнитной стимуляции на изменения активности кортикальных структур во время выполнения моторного воображения в интерфейсе мозг-компьютер // Гены и клетки. 2023. Т. 18, № 4. С. 645–648. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623398>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Работа была поддержана Российским научным фондом в рамках гранта № 21-72-10121. А. Савосенков, Н. Григорьев и С. Гордлеева получили поддержку в рамках федеральной академической программы «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang L., Xu H., Yu C. Brain connectivity plasticity in the motor network after ischemic stroke // *Neural plasticity*. 2013. Vol. 2013. P. 924192. doi: 10.1155/2013/924192
2. Gómez-Pinilla F., Ying Z., Roy R.R., et al. Afferent input modulates neurotrophins and synaptic plasticity in the spinal cord // *Journal of neurophysiology*. 2004. Vol. 92, N 6. P. 3423–3432. doi: 10.1152/jn.00432.2004
3. Lukoyanov M.V., Gordleeva S.Yu., Pimashkin A.S., et al. The Efficiency of the Brain-Computer Interfaces Based on Motor Imagery with Tactile and Visual Feedback // *Human Physiology*. 2018. Vol. 44. P. 280–288. doi: 10.1134/S0362119718030088
4. Lukoyanov M.V., Gordleeva S.Yu., Grigorev N.A., et al. Investigation of Characteristics of a Motor-Imagery Brain-Computer Interface with Quick-Response Tactile Feedback // *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2018. Vol. 73. P. 222–228. doi: 10.3103/S0096392518040053
5. Grosse-Wentrup M., Mattia D., Oweiss K. Using brain-computer interfaces to induce neural plasticity and restore function // *Journal of neural engineering*. 2011. Vol. 8, N 2. P. 025004. doi: 10.1088/1741-2560/8/2/025004

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

* А.О. Савосенков; адрес: Российская Федерация, 603022, Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 23;
e-mail: Andrey.savosenkov@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623398>

Effects of transcranial magnetic stimulation on cortical structures during motor imagination performance in the brain-computer interface

A.O. Savosenkov^{1, 2*}, N.A. Grigorev^{1, 2}, A.M. Udoratina¹, S.A. Kurkin², S.Yu. Gordleeva^{1, 2}¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation;² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

The aftermath of a stroke can frequently result in impaired motor functions causing problems performing habitual limb movements. These movement disorders stem from damage to the cerebral cortex and disruptions to neuronal connections in the central pyramidal pathways [1]. Restoring motor skills following a stroke is a time-consuming and challenging process, requiring resources from both external medical sources and the patient. Despite these challenges, it is still feasible for patients to regain control over their limb movements. The common approach for stroke neurorehabilitation consists of therapeutic physical activities and kinesiotherapy. These methods rely on afferent information during motor tasks to repair connections between intact brain areas [2]. Through exercising the impacted limbs, synaptic rearrangement happens in the cortex, awakening dormant neurons and increasing cortical areas adjacent to inactive regions. Although these techniques can partially restore movement, a significant number of stroke patients still face impairments. It is crucial to acknowledge the limitations of the current interventions and explore new approaches for better outcomes. Traditional rehabilitation methods often do not fully restore movement control, prompting researchers to explore alternative approaches. Motor-imagery-based brain-computer interfaces (BCIs) have gained attention recently [3, 4]. They allow for integrating various feedback mechanisms, which can be combined with upper and lower limb exoskeletons. The level of control a subject has over a BCI system directly affects the recovery process [5]. Introducing transcranial magnetic stimulation (TMS) into motor-imagery BCIs shows promise for developing a unified and highly efficient approach to post-stroke rehabilitation.

Twenty-nine healthy adult participants (21 females) with a mean age of 20.93 ± 2.14 years were recruited for this experiment. All participants were right-handed and had no prior experience with brain-computer interfaces. Ethical approval was obtained from the local ethics committee of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (ethical approval No. 2, dated 03/19/2021), and written informed consent was obtained from all participants. Subjects were randomly assigned to receive either a sham intervention ($n=15$) or active TMS ($n=14$). The experiment displayed tasks on a 24-inch LCD screen placed 2 meters away. Participants sat in a reclining chair with hands on adjustable armrests for EEG signal recording. Motor-imagery-based BCI training took place over two days with four daily tasks: motor performance, quasi-motor, and two motor imaginations of the dominant hand. EEG activity was recorded prior to and after completing the tasks. Each task comprised of 20 trials, each lasting 10 seconds. TMS was administered in between two motor imagination tasks, and a rest period of 2 minutes followed the stimulation. The researcher objectively monitored electromyography (EMG) in real-time during motor tasks. Certified NVX 52 amplifiers with 32 Cl/Ag electrodes positioned according to the international 10-10 system recorded electroencephalography (EEG) signals. The EEG was digitized at a sampling rate of 1000 Hz and filtered with a 50 Hz Notch filter. Disposable electrodes were used to record EMG data from musculus flexor digitorum superficialis on the right hand. EMG signals were digitized at 1000 Hz and filtered using a 50 Hz Notch filter. TMS was applied to the dorsolateral prefrontal cortex (dlPFC) using a figure-8 coil connected to a Neuro MS/D magnetic stimulator. Sham stimulation was performed with the same parameters, except the coil was tilted 90 degrees to simulate the sound of real stimulation. A nonparametric permutation test was conducted to assess the statistically significant dissimilarities between rest periods and periods subsequent to conducting motor imagery after TMS. Significant clusters of the highest event-related desynchronization (ERD) were observed. The analysis demonstrated a significant negative cluster in the theta rhythm (0–6 Hz) that was distinct from the magnetic stimulation site. Similar significant ERD clusters were identified during the first and second series of imaginary movements.

The study examined alterations in motor cortex function following targeted rTMS. The results demonstrated that TMS using particular parameters resulted in the pre-activation of brain regions comparable to those stimulated during motor imagery. The implementation of this stimulation protocol increased activity in cortical regions related to motor imagery. The outcomes propose the probable effectiveness of TMS in elevating motor cortex activation during the rehabilitation process.

Keywords: BCI; repetitive TMS; EEG; nTMS; motor imaging; event-related desynchronization.

Received: 22.05.2023

Accepted: 26.11.2023

Published online: 20.01.2024

To cite this article:

Savosenkov AO, Grigorev NA, Udoratina AM, Kurkin SA, Gordleeva SYu. Effects of transcranial magnetic stimulation on cortical structures during motor imagination performance in the brain-computer interface. *Genes & Cells*. 2023;18(4):645–648. DOI: <https://doi.org/10.17816/gc623398>

ADDITIONAL INFORMATION

Funding sources. The work was supported by the Russian Science Foundation under Grant No. 21-72-10121. A. Savosenkov, N. Grigorev and S. Gordleeva received support from the Federal Academic Leadership Program “Priority 2030” of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in part of data collection.

REFERENCES

1. Jiang L, Xu H, Yu C. Brain connectivity plasticity in the motor network after ischemic stroke. *Neural plasticity*. 2013;2013:924192. doi: 10.1155/2013/924192
2. Gómez-Pinilla F, Ying Z, Roy RR, et al. Afferent input modulates neurotrophins and synaptic plasticity in the spinal cord. *Journal of neurophysiology*. 2004;92(6):3423–3432. doi: 10.1152/jn.00432.2004
3. Lukoyanov MV, Gordleeva SYu, Pimashkin AS, et al. The Efficiency of the Brain-Computer Interfaces Based on Motor Imagery with Tactile and Visual Feedback. *Human Physiology*. 2018;44:280–288. doi: 10.1134/S0362119718030088
4. Lukoyanov MV, Gordleeva SYu, Grigorev NA, et al. Investigation of Characteristics of a Motor-Imagery Brain-Computer Interface with Quick-Response Tactile Feedback. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2018;73:222–228. doi: 10.3103/S0096392518040053
5. Grosse-Wentrup M, Mattia D, Oweiss K. Using brain-computer interfaces to induce neural plasticity and restore function. *Journal of neural engineering*. 2011;8(2):025004. doi: 10.1088/1741-2560/8/2/025004.

AUTHORS' CONTACT INFO

* A.O. Savosenkov; address: 23 Gagarin avenue, 603022 Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: Andrey.savosenkov@gmail.com