



УДК 159.9

EDN ZHRCNO

<https://doi.org/10.33910/2687-0223-2023-5-3-202-206>

## Механизмы, включающиеся при транскраниальном магнитном воздействии. Обзор современных исследований

Е. И. Николаева<sup>✉1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 191186, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 48

### Сведения об авторе

Елена Ивановна Николаева,  
SPIN-код: 4312-0718,  
ResearcherID: D-2869-2016,  
ORCID: 0000-0001-8363-8496,  
e-mail: [klemtina@yandex.ru](mailto:klemtina@yandex.ru)

### Для цитирования:

Николаева, Е. И.  
(2023) Механизмы, включающиеся при транскраниальном магнитном воздействии. Обзор современных исследований. *Комплексные исследования детства*, т. 5, № 3, с. 202–206. <https://doi.org/10.33910/2687-0223-2023-5-3-202-206> EDN ZHRCNO

**Получена** 24 июля 2023; прошла рецензирование 26 июля 2023; принята 26 июля 2023.

**Финансирование:** Исследование не имело финансовой поддержки.

**Права:** © Е. И. Николаева (2023). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

**Аннотация.** В обзоре делается попытка описать современные представления о процессах, которые происходят в мозге при транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС). Показано, что весьма часто это воздействие используют при попытках активации речевых процессов у детей, прежде всего, мальчиков. Описывается причина, по которой речевые проблемы чаще встречаются у мальчиков, нежели у девочек. Отмечается, что физиологическое распространение ТМС сложно смоделировать, потому что спинномозговая жидкость, а также белое и серое вещества имеют разную проводимость. Рассматриваются три ранних гипотезы, связывающие изменения в мозге и ТМС: 1) дезорганизация активности сетей; 2) гипотеза конкуренции заключена в том, что ТМС подавляет нервную активность, т. е. уменьшает сигнал, а не добавляет шум; 3) гипотеза состоит в том, что при низких интенсивностях активности мозг улучшает обнаружение сигнала. Появление новых технологий позволило не только проверить данные гипотезы, но и выяснить возможные изменения состояния активности мозговой ткани в месте воздействия ТМС. Далее описываются результаты исследований, в которых ТМС проводили параллельно с измерением ЭЭГ или функциональной томографией. Представлены данные, полученные при стимуляции префронтальной коры, сенсорной коры и париетальной области.

Эти технологии позволили показать, что изменения активности нейронов мозга происходят не только в месте воздействия ТМС, но и в отдаленных глубинных структурах. Важнейшим результатом стал вывод, что в наибольшей степени при ТМС активируются слабоактивные популяции нейронов и нейроны, которые были активированы перед воздействием ТМС. Результат позволяет предположить, что ТМС будет особенно эффективна при применении на детях с проблемами речи, если непосредственно перед воздействием будет предложена речевая задача.

**Ключевые слова:** транскраниальная магнитная стимуляция, речь, речевые проблемы, мальчики, девочки

# Mechanisms triggered by transcranial magnetic exposure: Overview of current research

E. I. Nikolaeva<sup>✉1</sup>

<sup>1</sup> Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Moika Emb., Saint Petersburg 191186, Russia

## Author

Elena I. Nikolaeva,  
SPIN: 4312-0718,  
ResearcherID: D-2869-2016,  
ORCID: 0000-0001-8363-8496,  
e-mail: klemtina@yandex.ru

## For citation:

Nikolaeva, E. I.  
(2023) Mechanisms triggered  
by transcranial magnetic exposure:  
Overview of current research.  
*Comprehensive Child Studies*, vol. 5,  
no. 3, pp. 202–206. <https://doi.org/10.33910/2687-0223-2023-5-3-202-206> EDN ZHRCNO

**Received** 24 July 2023; reviewed  
26 July 2023; accepted 26 July 2023.

**Funding:** The study did not receive  
any external funding.

**Copyright:** © E. I. Nikolaeva (2023).  
Published by Herzen State  
Pedagogical University of Russia.  
Open access under CC BY-NC  
License 4.0.

**Abstract.** The review attempts to describe the current understanding of the processes that occur in the brain during transcranial magnetic stimulation (TMS). It was shown that this effect is often used in attempts to activate speech processes in children, primarily boys. The study specifies the reason why speech problems are more common in boys compared to girls. It is noted that the physiological distribution of TMS is difficult to model, because the cerebrospinal fluid as well as white and gray matter have different conductivity. First, I propose three early hypotheses linking the changes in the brain and TMS: the disorganization of network activity; the competition hypothesis, which implies that TMS suppresses neural activity, i. e., reduces the signal but does not add noise; and the hypothesis that the brain improves signal detection at lower activity intensity. The emergence of new technologies made it possible not only to test these hypotheses but also to find out possible changes in the state of brain tissue activity at the site of TMS exposure. The article describes the results of the studies in which TMS was performed in parallel with EEG measurements and functional tomography and presents the data obtained during stimulation of the prefrontal cortex, sensory cortex and parietal region. These technologies made it possible to show that changes in the activity of brain neurons occur not only at the site of SCI impact but also in distant deep structures. The most important result was that weakly active populations of neurons and neurons that were activated before exposure to TMS were activated to the greatest extent during TMS. This result suggests that TMS will be particularly effective when used on children with speech problems if a speech task is presented immediately prior to exposure.

**Keywords:** transcranial magnetic stimulation, speech, speech problems, boys, girls

Еще десять лет назад считалось, что беспокоиться по поводу речи ребенка родители могут только после 5 лет, да и многие специалисты рекомендовали обращаться к логопедам именно в этот период времени. В настоящий момент ситуация радикально изменилась. Это обусловлено и открытиями, которые сделаны нейронаукой в области изучения становления речи, и тем, что логопедические проблемы в настоящий момент встречаются существенно чаще, чем в середине XX столетия.

Здесь мы не будем касаться многих причин возникновения речевых расстройств, затронем лишь ту, которая и привела к широкому распространению применения транскраниальной магнитной стимуляции при коррекции речи детей.

Заглянув в любой речевой детский сад, даже неспециалист без труда обнаружит, что количество мальчиков в подобных садах как минимум в два раза превышает количество девочек. Сейчас понятно, что это связано с особенностью

внутриутробного развития мальчиков и девочек. Примерно на четвертом месяце внутриутробного развития мозг мальчика получает сигнал, направляющий его согласно мужской программе развития (Martin 2013). Таким сигналом является тестостерон, который также способствует более эффективному созреванию правого полушария у мальчиков (Goldberg 2003). Фиксация мозга девочек происходит по женскому типу, в первые недели после рождения, поскольку мозг девочек защищен от воздействий специальным белком альфа-фетпротеином. Это ведет к тому, что девочки рождаются с более зрелым левым полушарием, которое в большей мере отвечает за речь, тогда как мальчики — с более зрелым правым полушарием (Nikolaeva et al. 2019). Этот процесс способствует более успешному речевому развитию девочек на ранних этапах онтогенеза.

Мозг мальчика некоторое время находится под большим контролем правого полушария, что снижает способность произносить

(но не понимать) слова. Иногда правое полушарие слишком долго доминирует над левым, что затрудняет появление беглой речи у мальчика (Nikolaeva et al. 2019). В таких случаях либо транскраниальная микрополяризация, либо транскраниальная магнитная стимуляция могут быть полезными инструментами, меняющими взаимодействие левого и правого полушарий у ребенка.

До сих пор нет четкого ответа на вопрос, что конкретно происходит с мозговыми процессами при такого рода воздействии. В настоящем обзоре мы рассмотрим данные исследований последних десяти лет, которые позволяют определить, какие процессы происходят в мозге при транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС).

Наиболее важным является вопрос: «Изменится ли эффект, если воздействие сместить на несколько миллиметров или поменять полушария?» (Wasserman et al. 2008), на который пока нет ответа. Сложность объяснения связана с тем, что физиологическое распространение ТМС сложно смоделировать, потому что спинномозговая жидкость, а также белое и серое вещества имеют разную проводимость (Abera et al. 2020).

В более ранний период применения ТМС появились три гипотезы, описывающие соотношение изменения активности мозговых процессов под воздействием ТМС. Первая состоит в том, что ТМС дезорганизует активность ансамблей, лежащих в зоне воздействия (Miniussi et al. 2013). Следующая, гипотеза конкуренции (Harris et al. 2008), заключается в том, что ТМС подавляет нервную активность, т. е. уменьшает сигнал, а не добавляет шум. Это согласуется с третьей гипотезой (Schwarzkopf et al. 2011), когда при более низких интенсивностях активности улучшается обнаружение целевого сигнала.

Появление новых технологий позволило не только проверить данные гипотезы, но и выяснить возможные изменения состояния активности мозговой ткани в месте воздействия ТМС. Сначала сочетали воздействие ТМС и запись ЭЭГ активности анестезированных животных (Pasley et al. 2009). Результаты таких исследований позволили выявить фазность реакции мозга на ТМС: за первой тормозной реакцией возникало более длительное возбуждение. Более того, было показано, что результат воздействия зависит от уровня активности нейронов до стимуляции.

Проведение ЭЭГ исследований на бодрствующих обезьянах показало, что при стимуляции с помощью ТМС первичной зрительной коры (V1) при выполнении животным задачи слеже-

ния за объектом активность менялась не только в зрительной коре, но и в латеральных колленчатых телах (Ortuño et al. 2014). И опять было показано, что интенсивность этого изменения предопределяется первоначальным состоянием нейронов коры.

Известно, что нейроны префронтальной коры участвуют в выборе цели действия (Bonini et al. 2011). М. Ромеро с соавторами (Romero et al. 2019) измерили нейронные реакции после 300 импульсов ТМС и обнаружили, что подавляющее большинство нейронов префронтальной коры обнаружили значительное снижение активности. Ответы нейронов разделились на три группы: ранняя группа, в которой 47 % клеток были затронуты через 5 мин. после стимуляции; более поздняя группа из 44 % клеток проявляла ингибирующие эффекты в период от 5 до 30 мин.; очень поздняя группа оставшихся клеток демонстрировала пониженную возбудимость в большей степени через 30 мин. после воздействия. Эти результаты доказывают, что стимуляция тета-всплеска не имеет унитарных эффектов, и теперь это нужно учитывать при интерпретации поведенческих исследований (Rahnev et al. 2013).

Можно предположить, что ранние и поздние изменения соответствуют шумоподобному эффекту, который в противном случае нейроны не произвели бы (Miniussi et al. 2013). Вторая фаза сниженных ответов — это именно то, что предсказывается гипотезой уменьшения сигнала (Harris et al. 2008).

Сочетание ТМС с функциональной магнитно-резонансной томографией (фМРТ) позволяет картировать отдаленные эффекты, возникающие в целом в мозге (Pitcher et al. 2021).

Одной из областей исследований, в которой комбинированные исследования ТМС-фМРТ оказались особенно полезными, является изучение, как лобная кора осуществляет нисходящий контроль над зрительным восприятием и принятием решений. После исследований стимуляции, которые показали нисходящий контроль лобной коры в задачах визуального различения (Silvanto et al. 2006), С. Руф (Ruff et al. 2006), записали данные фМРТ в то время, когда ТМС производили над лобным полем глаза. Они выявили, что стимуляция справа снижала активность ретинотопического представительства центрального поля зрения в зонах V1 через V4, а также увеличивала представленность периферического поля зрения. Исследование ТМС подтвердило поведенческую значимость этих результатов, продемонстрировав, что ТМС усиливает воспринимаемый контраст

для периферических зрительных стимулов по сравнению с центральными.

Важнейшим исследованием было применение TMS-фМРТ для наблюдения за когнитивными сетями в отсутствие внешней задачи.

Д. А. Хандверкер и др. (Handwerker et al. 2020) объединили TMS и фМРТ в состоянии покоя для картирования отдаленных последствий преходящего коркового изменения по всему мозгу. Обнаружилось снижение коннективности как между стимулируемыми участками, так и нестимулируемыми.

Дж. Сильванто (Silvanto et al. 2008) использовал адаптацию к стимулу для воздействия на начальное состояние стимулируемой области. Испытуемые адаптировались к цветовым ориентационным стимулам в течение 30 с. и затем сообщали цвет тестового стимула. TMS производилась в разное время после предъявления тестовых стимулов. TMS в зрительной коре вызывала смещение ответов в сторону исходного, адаптированного цвета стимула.

Несколько исследований TMS показали роль сенсорной коры в рабочей памяти (D'Esposito, Postle 2015; van de Ven, Sack 2013). Так, при одноимпульсной TMS над затылочной корой обнаружили, что испытуемые запоминали больше объектов (van Lamsweerde, Johnson 2017).

Важным представляется измерение влияния TMS на память с помощью фМРТ (Kim et al. 2018).

Авторы смогли показать по трем функциональным показателям и трем различным задачам памяти, что воздействие TMS на задние корково-гиппокампальные сети выборочно улучшило память и изменяло общесетевые модели активности.

## Заключение

Основной вывод, который можно сделать, анализируя одновременные результаты воздействия TMS на мозг, состоит в том, что в наибольшей степени при TMS активируются слабоактивные популяции нейронов и нейроны, которые были активированы перед воздействием TMS.

Этот результат позволяет предположить, что TMS будет особенно эффективна при применении на детях с проблемами речи, если непосредственно перед воздействием будет предложена речевая задача.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

## Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest, either existing or potential.

## References

- Aberra, A. S., Wang, B., Grill, W. M., Peterchev, A. V. (2020) Simulation of transcranial magnetic stimulation in head model with morphologically-realistic cortical neurons. *Brain Stimulation*, vol. 13, no. 1, pp. 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.10.002> (In English)
- Bonini, L., Serventi, F. U., Simone, L. et al. (2011) Grasping neurons of monkey parietal and premotor cortices encode action goals at distinct levels of abstraction during complex action sequences. *The Journal of Neurosciences*, vol. 31, no. 15, pp. 5876–5887. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5186-10.2011> (In English)
- D'Esposito, M., Postle, B. R. (2015) The cognitive neuroscience of working memory. *Annual Review of Psychology*, vol. 66, pp. 115–142. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015031> (In English)
- Goldberg, E. (2003) *Upravlyayushchij mozg: Lobnye doli, liderstvo i tsivilizatsiya [The executive brain: Frontal lobes and the civilized mind]*. Moscow: Smysl Publ., 335 p. (In Russian)
- Handwerker, D. A., Ianni, G., Gutierrez, B. et al. (2020) Theta-burst TMS to the posterior superior temporal sulcus decreases resting-state fMRI connectivity across the face processing network. *Network Neurosciences*, vol. 4, no. 3, pp. 746–760. [https://doi.org/10.1162/netn\\_a\\_00145](https://doi.org/10.1162/netn_a_00145) (In English)
- Harris, J. A., Clifford, C. W. G., Miniussi, C. (2008) The functional effect of transcranial magnetic stimulation: Signal suppression or neural noise generation? *Journal of Cognitive Neurosciences*, vol. 20, no. 4, pp. 734–40. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20048> (In English)
- Kim, S., Nilakantan, A. S., Hermiller, M. S. et al. (2018) Selective and coherent activity increases due to stimulation indicate functional distinctions between episodic memory networks. *Science Advances*, vol. 4, no. 8, article eaar2768. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar2768> (In English)
- Martin, R. (2013) *How we do it*. New York: Basic Books Publ., 320 p. (In English)
- Miniussi, C., Harris, J. A., Ruzzoli, M. (2013) Modelling non-invasive brain stimulation in cognitive neuroscience. *Neurosciences and Biobehavioral Reviews*, vol. 37, no. 8, pp. 1702–1712. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.014> (In English)
- Nikolaeva, E. I., Ilyuchina, V. A., Vergunov, E. G. (2019) Spetsifika mezhpolutsharnoj funktsional'noj asimmetrii lobnoj oblasti u detej 4–7 let s zaderzhkoj psikhicheskogo i rechevogo razvitiya [Peculiarities of interhemispheric

- functional asymmetry of the frontal region in 4–7 year-old children with mental development and speech development delay]. *Kompleksnye issledovaniya detstva — Comprehensive Child Studies*, vol. 1, no. 1, pp. 11–21. <https://doi.org/10.33910/2687-0223-2019-1-1-11-21> (In Russian)
- Ortuño, T., Grieve, K. L., Cao, R. et al. (2014) Bursting thalamic responses in awake monkey contribute to visual detection and are modulated by corticofugal feedback. *Frontiers and Behavioral Neurosciences*, vol. 8, article 198. <https://doi.org/10.3389%2Ffnbeh.2014.00198> (In English)
- Pasley, B. N., Allen, E. A., Freeman, R. D. (2009) State-dependent variability of neuronal responses to transcranial magnetic stimulation of the visual cortex. *Neuron*, vol. 62, no. 2, pp. 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.03.012> (In English)
- Pitcher, D., Parkin, B., Walsh, V. (2021) Transcranial magnetic stimulation and the understanding of behavior. *Annual Review of Psychology*, vol. 72, pp. 97–121. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-081120-013144> (In English)
- Rahnev, D., Kok, P., Munneke, M. et al. (2013) Continuous theta burst transcranial magnetic stimulation reduces resting state connectivity between visual areas. *Journal of Neurophysiology*, vol. 110, no. 8, pp. 1811–1821. <https://doi.org/10.1152/jn.00209.2013> (In English)
- Romero, M., Janssen, P., Davare, M. (2019) Neural effects of continuous theta-burst stimulation on single neurons in macaque parietal cortex. *Brain Stimulation*, vol. 12, no. 2, pp. 485–486. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.587> (In English)
- Ruff, C. C., Blankenburg, F., Bjoertomt, O. et al. (2006) Concurrent TMS-fMRI and psychophysics reveal frontal influences on human retinotopic visual cortex. *Current Biology*, vol. 16, no. 15, pp. 1479–1488. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.06.057> (In English)
- Schwarzkopf, D. S., Silvanto, J., Rees, G. (2011) Stochastic resonance effects reveal the neural mechanisms of transcranial magnetic stimulation. *Journal of Neurosciences*, vol. 31, no. 9, pp. 3143–3147. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4863-10.2011> (In English)
- Silvanto, J., Lavie, N., Walsh, V. (2006) Stimulation of the human frontal eye fields modulates sensitivity of extrastriate visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, vol. 96, no. 2, pp. 941–945. <https://doi.org/10.1152/jn.00015.2006> (In English)
- Silvanto, J., Muggleton, N., Walsh, V. (2008) State-dependency in brain stimulation studies of perception and cognition. *Trends in Cognitive Neurosciences*, vol. 12, no. 12, pp. 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.09.004> (In English)
- Van de Ven, V., Sack, A. T. (2013) Transcranial magnetic stimulation of visual cortex in memory: Cortical state, interference and reactivation of visual content in memory. *Behavioural and Brain Research*, vol. 236, no. 1, pp. 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.08.001> (In English)
- Van Lamsweerde, A. E., Johnson, J. S. (2017) Assessing the effect of early visual cortex transcranial magnetic stimulation on working memory consolidation. *Journal of Cognitive Neurosciences*, vol. 29, no. 7, pp. 1226–1238. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01113](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01113) (In English)
- Wasserman, E. M., Epstein, C. M., Ziemann, U. et al. (eds.). (2008) *The Oxford handbook of transcranial stimulation*. Oxford: Oxford University Press, 764 p. (In English)