

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 612.821, 81'23, 159.9.072

НЕСПЕЦИФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ НА УСВОЕНИЕ НОВЫХ СЛОВ

© 2022 г. М. Г. Филиппова^{1,*}, Е. И. Перикова¹, Е. Д. Благовещенский¹, О. В. Щербакова¹,
А. С. Кирсанов¹, Ю. Ю. Штыров^{1,2}

¹Лаборатория поведенческой нейродинамики, Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

²Центр функциональной интегративной нейронауки, Орхусский университет, Орхус, Дания

*e-mail: m.filippova@spbu.ru

Поступила в редакцию 26.10.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 20.12.2021 г.

С целью изучения влияния транскраниальной электрической стимуляции (ТЭС) мозга на речевое научение реализовано масштабное исследование с участием 288 человек, включающее комплексную оценку эффектов ТЭС в различных условиях (имплицитная/эксплицитная стратегия научения, с артикуляцией/без артикуляции, анодная/катодная полярность стимуляции, левое/правое полушарие и зона стимуляции (Брока/Вернике и их гомологи в правом полушарии)). После 15-минутной реальной или плацебо-стимуляции испытуемым предъявлялись на слух восемь новых слов с семантической привязкой по 10 раз каждое. В качестве показателя эффективности усвоения новых слов использовалась латентность правильных ответов в проверочном задании на смысловое соотнесение слова и изображения. Результаты показали наличие общего неспецифического эффекта ускорения ответов в условиях реальной стимуляции (в сравнении с плацебо), не зависящего от тестируемых условий.

Ключевые слова: транскраниальная электрическая стимуляция (ТЭС), усвоение языка, речевое научение, зоны Брока и Вернике, анодная стимуляция, катодная стимуляция, имплицитное научение, эксплицитное научение, артикуляция

DOI: 10.31857/S0044467722020046

ВВЕДЕНИЕ

Транскраниальная электрическая стимуляция постоянным током (ТЭС) — это распространенный метод неинвазивной стимуляции мозга. Этот метод впервые был предложен в лаборатории Н.П. Бехтеревой под названием микрополяризация, и в русскоязычной литературе часто обозначается данным термином. В настоящее время он широко применяется как на животных (Гурская и др., 2012), так и на различных зонах головного и спинного мозга человека (Шелякин, Преображенская, 2021). Несмотря на простоту данной техники, она вызывает много споров: тогда как одни исследователи настаивают на ее эффективности, сообщая о позитивном влиянии ТЭС на память, внимание и

исполнительные функции (см. обзор у Dedoncker et al., 2016), другие утверждают, что эффекты ТЭС ненадежны и не поддаются репликации (см. обзор у Horvath et al., 2015).

Отдельный интерес представляет вопрос о влиянии ТЭС на речевую функцию человека. В клинических исследованиях были получены достаточно убедительные данные о позитивном воздействии ТЭС при терапии речевых расстройств. Впечатляющие эффекты, в частности, были продемонстрированы в работах, где ТЭС использовалась для восстановления речи при афазии (например, Fiori et al., 2014). Учитывая эти оптимистичные достижения, можно ожидать позитивного воздействия ТЭС на языковые функции в целом.

Исследования в области речевого научения сосредоточены, как правило, на изучении роли основных речевых зон (Брока и Вернике), находящихся у большинства людей в левом полушарии. Однако можно встретить и данные, согласно которым активация их правополушарных гомологов также может способствовать улучшению речевой функции (см. обзор у Cossu et al., 2017).

При ТЭС может использоваться как положительная полярность (анодная стимуляция), так и отрицательная (катодная стимуляция); для различных типов и разновидностей ТЭС применяется различный монтаж электродов на поверхности головы. Результаты большинства экспериментов говорят о позитивном влиянии анодной стимуляции речевых зон на усвоение новых слов (напр., Flöel et al., 2008; Dedoncker et al., 2016) и об отсутствии влияния катодной стимуляции (Flöel et al., 2008; Pisoni et al., 2015; Dedoncker et al., 2016). Но бывают и исключения: так, в ряде работ описано негативное воздействие катодной стимуляции на речевое научение (Elmer et al., 2009; Fiori et al., 2014), а в других — положительное влияние катодной ТЭС зоны Брока на скорость называния глаголов и существительных (Malyutina, den Ouden, 2015) и катодной ТЭС зоны Вернике — на скорость узнавания псевдослов (Brückner, Kammer, 2017) в сравнении с плацебо.

Нередки сообщения о неспецифическом положительном влиянии ТЭС на воспроизведение всех использовавшихся в эксперименте стимулов, без каких-либо выборочных эффектов. Так, в исследовании А. Писони и соавт. (Pisoni et al., 2015) говорится о неспецифическом ускорении извлечения из памяти слов, в том числе конкурентов требуемых имен собственных в результате анодной стимуляции зоны Вернике. О неспецифическом ускорении называния фонологически связанных с предъявляемым изображением слов (ожидаемый результат), а также несвязанных слов (неожиданный результат) сообщается и в другом эксперименте с анодной стимуляцией зоны Вернике (Pisoni et al., 2017).

Как можно заметить, влияние ТЭС на вербальное научение и речевую функцию в целом не является однозначным. Кроме того, вместе с ростом числа исследований, посвященных влиянию ТЭС на те или иные психические функции и когнитивные процессы, возрастает и их методологическая неоднородность, которая связана, в первую очередь,

с использованием широкого разнообразия методов даже при изучении одного и того же феномена. Интерпретация результатов дополнительно затрудняется за счет использования различных вариантов расположения электродов, протоколов стимуляции и т.п.

Нет определенности и в отношении влияния полярности стимуляции (катодной или анодной) на усвоение новых слов. Также существует нехватка прямых сравнений влияния ТЭС основных речевых зон левого полушария и их правополушарных гомологов на усвоение новых языковых единиц в рамках одного и того же экспериментального плана. И, наконец, совершенно неизученным остается влияние ТЭС на эффективность усвоения новых слов с помощью основных нейрокогнитивных стратегий научения: эксплицитной (explicit encoding) и имплицитной (fast mapping). Имплицитная стратегия связана с пониманием информации на основе контекста и исключением лишнего, тогда как эксплицитная обеспечивается прямым указанием на подлежащий запоминанию объект и его повторным предъявлением (Shtyrov et al., 2021).

Решение упомянутых проблем стало задачей настоящего эксперимента, включающего комплексную оценку эффектов ТЭС в условиях имплицитного и эксплицитного научения при различных полярностях (анодная/катодная), зонах стимуляции (Брока/Вернике), полушариях (левое/правое, т.е. правополушарные гомологи зон Брока и Вернике), с артикуляцией подлежащих выучиванию слов и без нее, т.е. перцептивно.

МЕТОДИКА

Выборку составили 288 испытуемых в возрасте от 18 до 35 лет (средний возраст 23.17; 184 женщины). Все они были русскоговорящими, праворукими, не имеющими в анамнезе травм головы, имели нормальное или скорректированное до нормы зрение. Протокол исследования был одобрен Этическим комитетом СПбГУ.

Испытуемые были в случайном порядке распределены на девять групп стимуляции (по 32 человека в каждой): анодная ТЭС зоны Брока, катодная ТЭС зоны Брока, анодная ТЭС зоны Вернике, катодная ТЭС зоны Вернике, анодная ТЭС правополушарного гомолога зоны Брока, катодная ТЭС правополушарного гомолога зоны Брока, анодная ТЭС

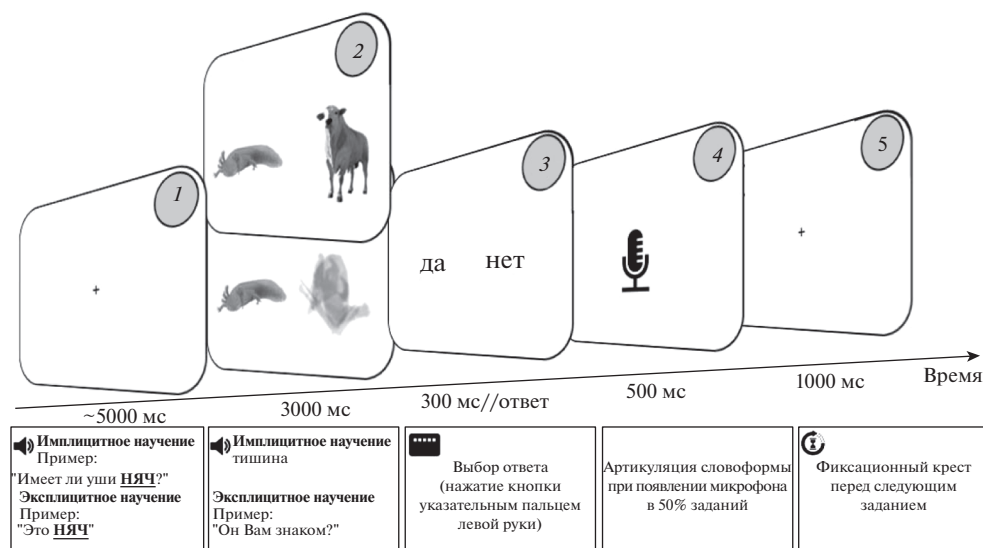


Рис. 1. Пример стимуляционной последовательности в обучающей сессии. Верхний вариант второго слайда относится к задаче имплицитного научения, нижний — эксплицитного.

Fig. 1. Example of learning task trial sequence. Top image of the second slide refers to the fast mapping task, bottom one — to the explicit encoding task.

правополушарного гомолога зоны Вернике, катодная ТЭС правополушарного гомолога зоны Вернике и плацебо-стимуляция. В каждой группе использовались условия имплицитного и эксплицитного научения, в обоих случаях как с артикуляцией, так и без нее.

Параметры ТЭС. Для стимуляции использовался прибор BrainStim SYS (E.M.S, Италия). Постоянный ток 1.5 мА подавался в течение 15 мин. Для группы плацебо-стимуляции подача тока осуществлялась только в течение первых и последних 30 сек стимуляционной сессии. Активный (анодный либо катодный) электрод помещался на кожу головы на область Брока, Вернике или их правополушарных гомологов (положения F5, CP5 и F6, CP6 в международной системе ЭЭГ 10–20% соответственно). Референтный электрод помещался на левую трапецевидную мышцу. Сразу после стимуляции испытуемые переходили к обучению.

Экспериментальный дизайн исследования был основан на аудиальном предъявлении испытуемым новых слов вместе с их визуальными референтами. Для эксперимента были созданы 16 новых трехбуквенных словоформ, которые группами по восемь стимулов ротировались между условиями и испытуемыми для полной кросс-балансировки. Их семантическими референтами служили изображения малоизвестных предметов и животных,

по 10 изображений в разных ракурсах для каждого, что позволяло испытуемому сформировать целостное представление о референте (подробнее см. в Shtyrov et al., 2021).

Процедура исследования. Стимуляционная последовательность обучающей сессии проиллюстрирована на рис. 1. Условия имплицитного и эксплицитного научения были сбалансированы между собой: оба включали одновременное предъявление двух изображений (целевого и нецелевого) и сопровождалось вопросом, представляемым на слух и семантически связанным с целевым изображением. При этом в условии имплицитного научения испытуемый должен был использовать контекстную информацию, чтобы сделать вывод о целевом объекте, исключив уже знакомый объект. В условии эксплицитного научения предъявление изображений сопровождалось прямым указанием на целевой объект с вопросом для привлечения внимания. В данном случае в качестве нецелевого изображения предъявлялся бессмысленный размытый филлер.

Каждое новое слово во время обучающей серии предъявлялось 10 раз, но вопросы и семантические референты никогда не повторялись. Таким образом, каждая проба характеризовалась уникальным сочетанием слова, изображения и вопроса. Дополнительным условием для испытуемых была артикуляция

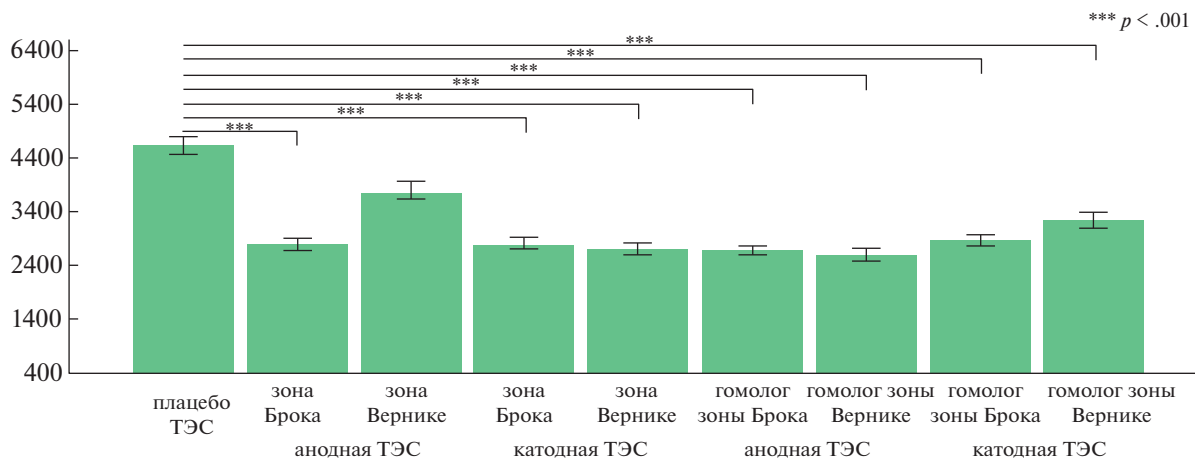


Рис. 2. Отличия групп реальной стимуляции от группы плацебо: время реакции (мс) и ошибка среднего. Все $p < 0.001$ с учетом поправок на множественные сравнения.

Fig. 2. Differences between the groups of real stimulation and placebo: reaction time (ms) and errors of the mean. All $p < 0.001$ after corrections for multiple comparisons.

слов для 50% изучаемых слов после ответа на вопрос.

Для проверки эффективности усвоения новых слов использовалась задача смыслового соотнесения, которая состояла в прослушивании аудиально представленного слова и выборе из четырех изображений одного, соответствующего ему по смыслу, нажатием кнопки с цифровым кодом.

Статистический анализ. Статистический анализ выполнялся с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics, 26.0. В качестве показателя эффективности усвоения новых слов использовалось время выполнения заданий смыслового соотнесения. В анализ вошли пробы с правильными ответами, время реакции которых было не менее 400 мс и не превышало два стандартных отклонения от среднего. Чистка данных в соответствии с указанными критериями привела к появлению неравного количества наблюдений для сопоставляемых между собой условий ТЭС, что предопределило использование критерия Н Краскела–Уоллиса с поправкой Данна–Бонферрони и оценкой размера эффекта для среднегрупповых различий (Tomczak, Tomczak, 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты статистического анализа обнаружили значимое влияние стимуляции на скорость смыслового соотнесения новых слов и изображений ($H\text{-test} = 95.67$, $p < 0.0001$;

$\eta^2 = 0.319$): после реальной стимуляции респонденты выполняли задание быстрее, чем после плацебо-стимуляции (рис. 2). Парные сравнения также выявили более быстрые ответы после ТЭС по сравнению с плацебо-стимуляцией, которое после поправок было значимо для всех групп (все $p < 0.001$) за исключением анодной ТЭС зон Вернике.

Значимый эффект ТЭС был обнаружен для всех переменных, по которым различались группы стимуляции: полушария ($H\text{-test} = 62.46$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.214$), полярности ($H\text{-test} = 61.34$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.21$) и зоны мозга ($H\text{-test} = 66.40$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.228$). В каждом случае время выполнения задания было меньше, чем в группе плацебо (все $p < 0.0001$), и при этом не различалось между своими разными подтипами стимуляции (правым и левым полушарием ($p = 0.10$); катодной и анодной стимуляцией ($p = 0.10$), зонами Брока и Вернике ($p = 0.07$)).

Также эффект ускорения соотнесения выученных названий объектов и их изображений после реальной стимуляции в сравнении с плацебо-стимуляцией был обнаружен во всех используемых условиях по отдельности: эксплицитном ($H\text{-test} = 88.34$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.295$), имплицитном ($H\text{-test} = 57.21$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.185$), артикулируемом ($H\text{-test} = 75.38$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.247$) и неартикулируемом ($H\text{-test} = 75.42$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.25$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты настоящего исследования согласуются с результатами ряда предыдущих работ, в которых сообщается о положительном влиянии ТЭС зон Брока и Вернике на речевое научение (Dedoncker et al., 2016; Brückner, Kammer, 2017). Однако нам не удалось воспроизвести часто обсуждаемый в литературе эффект, состоящий в позитивном влиянии анодной стимуляции и отсутствии влияния катодной стимуляции речевых зон на усвоение новых слов (напр., Flöel et al., 2008). Не было обнаружено и какого-либо ингибирующего влияния катодной ТЭС (как в исследованиях Elmer et al., 2009; Fiori et al., 2014). Напротив, было выявлено положительное влияние не только анодной, но и катодной стимуляции на усвоение новых слов, что подтверждает результаты, полученные ранее (Malyutina, den Ouden, 2015; Brückner, Kammer, 2017).

Кроме того, нами было показано, что стимуляция не только речевых зон левого полушария, но и их гомологов в правом полушарии уменьшает время смыслового соотнесения новых слов в сравнении с плацебо-стимуляцией, о чем ранее сообщалось другими авторами (Cocquyt et al., 2017).

Положительный эффект ТЭС был продемонстрирован во всех группах стимуляции, кроме группы анодной ТЭС зоны Вернике. Объяснение этому может быть найдено в тех работах, в которых анодная стимуляция зоны Вернике также не дала ожидаемого эффекта и где высказывается соображение о том, что данный вид стимуляции способствует активации конкурентов целевых стимулов (напр., Pisoni et al., 2015, 2017). В качестве подтверждения этой идеи, по всей видимости, может быть рассмотрен тот факт, что в нашем исследовании испытуемые продемонстрировали несколько большую задержку реакции именно в имплицитном условии, для которого важным является отвержение альтернативных вариантов целевого стимула (отличие от эксплицитного условия на уровне тенденции, критерий Вилкоксона, $W = 344$, $p = 0.06$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате как анодной, так и катодной ТЭС зон Брока и Вернике, а также их правополушарных гомологов, ускоряется семантическое распознавание заучиваемых слов в сравнении с плацебо. Это общий паттерн, ко-

торый неспецифически проявляется при разных типах стимуляции и не зависит от условий научения (имплицитного или эксплицитного, артикуляторного или чисто перцептивного). Полученный результат позволяет делать выводы о позитивном влиянии ТЭС на процессы усвоения новых слов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование было поддержано грантом Правительства РФ № 14.W03.31.0010. Благодарим Е.А. Андрющенко, Е.Н. Блинову, Н.А. Новиковскую и А.А. Филиппова за помощь в сборе данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гурская О.А., Алтынбаев Р.Ш., Кудряшов И.Е. Эффекты длительного действия постоянного электрического поля на мозг крысы. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2011. Т. 62. № 1. С. 79–88.
- Шелякин А.М., Преображенская И.Г. Микрополяризация мозга. Вчера. Сегодня. Завтра. 2021. 378 с.
- Brückner S., Kammer T. Both anodal and cathodal transcranial direct current stimulation improves semantic processing. *Neuroscience*. 2017. 343: P. 269–275.
- Cocquyt E.M., De Ley L., Santen P., Van Borsel J., De Letter M. The role of the right hemisphere in the recovery of stroke-related aphasia: A systematic review. *J. Neurolinguistics*. 2017. 44: 68–90.
- Dedoncker J., Brunoni A.R., Baeken C., Vanderhasselt M.A. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Over the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Healthy and Neuropsychiatric Samples: Influence of Stimulation Parameters. *Brain Stimul.* 2016. 9 (4): 501–517.
- Elmer S., Burkard M., Renz B., Meyer M., Jancke L. Direct current induced short-term modulation of the left dorsolateral prefrontal cortex while learning auditory presented nouns. *Behavioral and Brain Functions*. 2009. 5. (1): 29.
- Fiori V., Cipollari S., Caltagirone C., Marangolo P. 'If two witches would watch two watches, which witch would watch which watch?' tDCS over the left frontal region modulates tongue twister repetition in healthy subjects. *Neuroscience*. 2014. 256: 195–200.
- Flöel A., Rösler N., Michka O., Knecht S., Breitenstein C. Noninvasive brain stimulation improves language learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2008. 20 (8): 1415–1422.
- Horvath J.C., Forte J.D., Carter O. Evidence that transcranial direct current stimulation (tDCS) gener-

- ates little-to-no reliable neurophysiologic effect beyond MEP amplitude modulation in healthy human subjects: A systematic review. *Neuropsychologia*. 2015. 66: 213–36.
- Malyutina S., den Ouden D.B.* High-definition tDCS of noun and verb retrieval in naming and lexical decision. *NeuroRegulation*. 2015. 2: 111–125.
- Pisoni A., Cerciello M., Cattaneo Z., Papagno C.* Phonological facilitation in picture naming: When and where? A tDCS study. *Neuroscience*. 2017. 352: 106–121.
- Pisoni A., Vernice M., Iasevoli L., Cattaneo Z., Papagno C.* Guess who? Investigating the proper name processing network by means of tDCS. *Neuropsychologia*. 2015. 66: 267–278.
- Shtyrov Y., Filippova M., Blagovechtchenski E., Kirsanov A., Nikiforova E., Shcherbakova O.* Electrophysiological evidence of dissociation between explicit encoding and fast mapping of novel spoken words. *Frontiers in Psychology*. 2021. 12.
- Tomczak M., Tomczak E.* The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trends in Sport Sciences*. 2014. 1 (21): 19–25.

NON-SPECIFIC FACILITATORY INFLUENCE OF TRANSCRANIAL DIRECT CURRENT STIMULATION ON NOVEL WORD ASQUTION

**M. G. Filippova^{a,#}, E. I. Perikova^a, E. D. Blagovechtchenski^a, O. V. Shcherbakova^a,
A. S. Kirsanov^a, and Y. Y. Shtyrov^{a,b}**

^a*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

^b*Center of Functionally Integrative Neuroscience, Aarhus University, Aarhus, Denmark*

[#]*e-mail: m.filippova@spbu.ru*

This study aimed at systematically assessing the effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on novel word learning. Using a sample of 288 healthy volunteers, we modulated tDCS stimulation regimes (anodal/cathodal/placebo), stimulated hemisphere (left/right), site (Broca/Wernicke/right-hemispheric Broca/Wernicke homologues), and assessed tDCS effects on different learning protocols: fast mapping vs. explicit encoding, with vs. without articulation. After 15 minutes of 1.5 mA tDCS, participants were auditorily presented with 8 novel words repeated 10 times each in a sentential context in association with pictures. Learning outcomes were quantified as reaction times in semantic word-picture matching task. The results showed that tDCS led to facilitation of novel word learning, expressed as faster semantic matching for different tDCS regimes in comparison with placebo, which did not depend on stimulation site or learning regime.

Keywords: tDCS, word learning, language acquisition, Broca's area, Wernicke's area, anodal, cathodal, fast mapping, explicit encoding, articulation