

РОЛЬ ЗОНЫ БРОКА И ЕЕ ПРАВОПОЛУШАРНОГО ГОМОЛОГА В УСВОЕНИИ АБСТРАКТНОЙ И КОНКРЕТНОЙ СЕМАНТИКИ: ДАННЫЕ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

© 2023 г. Д. С. Гнедых¹, *, Е. Д. Благовещенский², С. Н. Костромина¹,
Н. А. Мкртычян¹, Ю. Ю. Штыров³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Орхусский университет, Орхус, Дания

*E-mail: d.gnedyh@spbu.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 31.01.2023 г.

В данной статье представлено сравнение результатов научения новым конкретным и абстрактным словам после транскраниальной электрической стимуляции (ТЭС, также известной как микрополяризация) зоны Брока и ее правополушарного гомолога. Усвоение новых понятий происходило через чтение предложений, последовательно раскрывающих их значение. Перед обучением проводили 15-минутную анодную или катодную стимуляцию одной из целевых зон. Проверку результатов обучения проводили сразу после обучения и спустя 24 ч с помощью задания на лексическое решение. Была выявлена вовлеченность правополушарного гомолога зоны Брока в усвоение и обработку новых конкретных и абстрактных понятий, выразившаяся в увеличении количества правильных ответов после ее стимуляции по сравнению с зоной Брока левого полушария. Было установлено, что ТЭС гомолога зоны Брока оказала положительное влияние на консолидацию мнемических репрезентаций новых слов.

Ключевые слова: транскраниальная электрическая стимуляция (микрополяризация), зона Брока, правополушарный гомолог зоны Брока, конкретные слова, абстрактные слова, усвоение понятий, научение, мозг, язык (речь), правое полушарие.

DOI: 10.31857/S0131164622600926, EDN: GCENLX

Процессы усвоения речевых навыков являются предметом исследования различных областей знаний — когнитивных наук, психолингвистики, нейрофизиологии, наук об образовании. Можно выделить такие проблемы, как сохранение семантических следов в рабочей памяти, продолжительность интеграции слов в ментальный лексикон, роль различных зон мозга в речевых функциях, специфика условий обучения новой терминологии и др. Особенно актуальным является вопрос о механизмах усвоения мозгом новых слов как конкретных, так и абстрактных.

Принято считать, что конкретные слова имеют референты в физическом (материальном) мире, т.е. обозначают существующие объекты, действия или явления (например, “река”, “полет”, “ураган”), в то время как абстрактные слова относятся к менее явным или даже не имеющим физического воплощения явлениям, таким как психические состояния (например, “замешательство”),

ситуации (“бунт”), эмоции (“счастье”), отношения (“дружба”) и т.д. [1]. Согласно данным поведенческих исследований, конкретные слова, по сравнению с абстрактными, лучше распознаются [2] и быстрее обрабатываются [3]. Такие различия, в свою очередь, могут указывать на то, что нейрофизиологические механизмы кодирования конкретной и абстрактной семантики могут отличаться. Так, существует предположение, что конкретные слова усваиваются за счет не только чисто речевого, но также сенсорного и моторного опыта [4], а кодирование абстрактных слов и доступ к ним преимущественно поддерживаются основными речевыми областями в левом полушарии головного мозга (ГМ) — зоной Брока и зоной Вернике [5], без явного вовлечения других (например, модальностеспецифических сенсорных и моторных) зон. Однако последние исследования указывают на вовлечение большего количества зон ГМ в обработку абстрактных понятий [6].

Имеющиеся данные о зонах ГМ, участвующих в обработке абстрактных и конкретных слов, в целом несут неоднозначный характер [7].

Функционально зону Брока (часть левой нижней лобной извилины; *inferior frontal gyrus, IFG*) связывают с порождением речи в целом [8, 9], генерацией глаголов [10], синтаксической [11, 12], фонологической [13] и семантической обработкой речи [14, 15]. Так, во время одновременного выполнения артикуляционной задачи (многократное повторение слога) и задачи на семантическую категоризацию слов было зафиксировано более длительное время отклика для абстрактных слов по сравнению с конкретными [3], что указывает на конкуренцию за вовлечение области Брока в процессы контроля артикуляции и доступа к абстрактным словам. Недавние исследования также подтверждают, что в процессе абстрактного мышления, как и при обработке непосредственно абстрактных слов, активируются области, связанные с внутренней речью [16, 17].

Ряд исследований также указывает на участие *правополушарного гомолога зоны Брока* в обработке речи, в частности, в понимании знакомых метафор [18], а также в синтаксической и семантической обработке [19, 20]. С другой стороны, была обнаружена более выраженная активация в правой нижней лобной извилине при обработке конкретных существительных по сравнению с абстрактными, в то время как левая нижняя лобная извилина, наоборот, показывала большую активность при восприятии абстрактных понятий [21]. Также было выявлено, что задняя треть правой *IFG* включается в производство речи в случае повреждения левой *IFG*, которая обычно и обеспечивает этот процесс [22]. При этом в норме продуцирование речи подавляет активность правой *IFG* (там же). Эти факты свидетельствуют о существовании сложной динамической связи между левой и правой нижними лобными извилинами во время речевого производства [23].

Важно отметить, что результаты исследований с использованием таких методов нейровизуализации, как функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), демонстрируют активацию какой-либо области ГМ после предъявления некоторого стимула, однако такая активация может являться и вторичным побочным эффектом, не связанным напрямую с рассматриваемыми когнитивными процессами. Выявление же причинно-следственной взаимосвязи обеспечивают методы неинвазивной стимуляции мозга, одним из которых является транскраниальная электрическая стимуляция постоянным током (ТЭС, также известная как микрополяризация). В отличие от

магнитной стимуляции, которая может непосредственно вызывать потенциалы действия нейронов, воздействие ТЭС является более мягким и заключается в сдвиге трансмембранного потенциала покоя, приводящем к изменениям паттернов активации определенных областей ГМ при обработке того или иного стимула [24, 25]. Данный метод активно используется в исследованиях, посвященных изучению моторной системы, в которых была выявлена следующая тенденция: анодная ТЭС чаще всего связана с увеличением, а катодная — с торможением возбудимости первичной моторной коры ГМ [26, 27]. Однако при изучении когнитивных функций, в частности, речи, проявление таких противоположных по направлению эффектов полярности ТЭС не так очевидно.

Предыдущие исследования показали, что анодная ТЭС области Брока улучшает усвоение грамматических навыков у здоровых испытуемых [28] и облегчает воспроизведение глаголов у лиц с хронической афазией [29], а катодная ТЭС правой *IFG* обеспечивает более быстрое называние изображений [30]. В клинических исследованиях также было выявлено, что одновременная двусторонняя ТЭС (анодная стимуляция области Брока и катодная — ее правополушарного гомолога) улучшает речевые и языковые навыки (по сравнению с плацебо-стимуляцией) [31, 32], а анодная ТЭС левой и правой *IFG* у пожилых испытуемых во время устного рассказа улучшает производство речи по сравнению с плацебо-стимуляцией [33]. Большинство исследований с использованием ТЭС, посвященных выявлению функций зоны Брока и ее правополушарного гомолога в обработке языка, в основном сосредоточены на изучении производства речи и обработки синтаксиса. Только в некоторых экспериментах исследовалось участие данных областей ГМ в семантической обработке.

Таким образом, целью настоящего исследования стало изучение роли зоны Брока и ее правополушарного гомолога в усвоении новых абстрактных и конкретных слов с помощью ТЭС. Одной из задач исследования также являлась оценка устойчивости эффектов ТЭС во времени, а именно влияние стимуляции на консолидацию следов памяти во время сна. Принято считать, что такая консолидация способствует интеграции новых слов в ментальный лексикон [34]. Согласно одним исследованиям, эффект лексической интеграции проявляется спустя сутки или даже недели после изучения новых слов [35, 36], в то время как другие утверждают, что она может быть сразу после обучения [37, 38].

Основываясь на результатах исследований, рассмотренных выше, нами были выдвинуты следующие гипотезы:

1. Зона Брока и ее правополушарный гомолог больше вовлечены в обработку абстрактных, чем конкретных слов и, следовательно, основные эффекты ТЭС должны проявляться по отношению к абстрактной семантике. Такие эффекты могут иметь генерализованный характер и выражаться как в улучшении, так и в ухудшении усвоения абстрактных слов по сравнению с конкретными словами в зависимости от зоны стимуляции.

2. ТЭС целевых областей может по-разному влиять на консолидацию следов памяти для конкретных и абстрактных слов; однако, отсутствие в предыдущих исследованиях ингибирующего влияния катодной стимуляции на языковые функции [39, 40] не позволило нам сделать однозначное предположение об избирательном характере воздействия двух полярностей на усвоение того или иного типа семантики.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 96 чел. в возрасте от 18 до 35 лет (средний возраст $\pm$ ст. отклонение — 22.4 ± 4.64) без истории психоневрологических расстройств, травм головного мозга и злоупотребления наркотическими веществами в анамнезе; все испытуемые — правши, единственный родной язык — русский. Испытуемые были разделены на четыре группы по 24 чел.: количество мужчин в зависимости от группы варьировалось от 4 до 6, женщин — от 18 до 20, однако согласно статистической проверке (χ^2 Пирсона) группы по полу были однородны ($p = 0.868$, $\chi^2(3) = 0.722$), а также не различались по возрасту ($p = 0.198$, $\chi^2(3) = 4.666$), праворукости ($p = 0.395$, $\chi^2(3) = 2.981$), уровню образования (измеренном в годах; $p = 0.212$, $\chi^2(3) = 4.499$) и по возрасту начала изучения второго языка ($p = 0.392$, $\chi^2(3) = 2.997$) (критерий Н Краскала-Уоллиса).

Стимульный материал. В качестве стимульного материала выступали словоформы, подобранные к ним конкретные и абстрактные значения и набор предложений, в контексте которых передавали значение новых понятий.

Новые словоформы создавали на основе 40 слов (восьмибуквенных существительных, состоящих из трех слогов, например, “барбарис”) родного для испытуемых языка. Сформированные из них случайным образом 4 группы слов (по 10 слов в каждой) статистически не различались по частоте лемм и последних слогов (согласно t -критерию).

Процедура создания новых словоформ заключалась в перестановке последних слогов внутри трех групп из 10 слов (например, *барбарин*, где первые два слога взяты от слова *барбарис*, а последний слог — от слова *мандарин*). Слова из четвертой группы не менялись и выступали в качестве контрольного условия в проверочном задании. Каждая словоформа побывала в разной роли, которую чередовали между испытуемыми — в качестве нового конкретного понятия, абстрактного понятия или контрольного условия (псевдослова, отсутствующего в обучающем блоке).

Для придания семантики (смысла) новым словам были отобраны 10 конкретных (редкие или устаревшие объекты) и 10 абстрактных (понятия, не представленные в родном языке испытуемых) значений (например, “Механический заводной вертел для жарки мяса на открытом огне”, “Состояние удовольствия от прослушивания музыки в одиночестве”).

Для каждого нового значения было создано 5 предложений из 8 слов каждое (всего 100 предложений, т.е. по 5 на каждую из 20 новых словоформ), что обеспечивало контекстное усвоение понятий. Новое слово всегда помещали в конец предложения в единственном числе и именительном или винительном падеже (например, “Слушая музыку, Оля всегда уединялась, чтобы почувствовать барбарин”).

Стимульным материалом в проверочном задании “Лексическое решение” выступали 80 стимулов, из них 20 новых слов (10 абстрактных и 10 конкретных) и 60 стимулов-филлеров (по 30 слов и псевдослов).

Процедура исследования. 15-минутную катодную или анодную стимуляцию (1.5 мА) ТЭС зоны Брока или ее правополушарного гомолога проводили до начала обучения новым словам при помощи стимулятора “*BrainStim*” (EMS, Италия). Активный электрод (анодный или катодный, 5×5 см) располагали на коже головы над целевой зоной (F_5 или F_6 согласно расширенной международной системе ЭЭГ 10–20), референтный электрод (5×10 см) — над ипсилатеральной лопаткой; с целью достижения хорошего контакта электродов с кожей использовали электродный гель “Унимакс” (компания “Гельтек”, Россия).

Сразу после стимуляции проводили обучение новым словам через предъявление на экране компьютера предложений, раскрывающих их значение. Каждое предложение сначала предъявляли пословно, затем — целиком для полноты понимания (рис. 1). После прочтения полного предложения участники исследования должны были на-

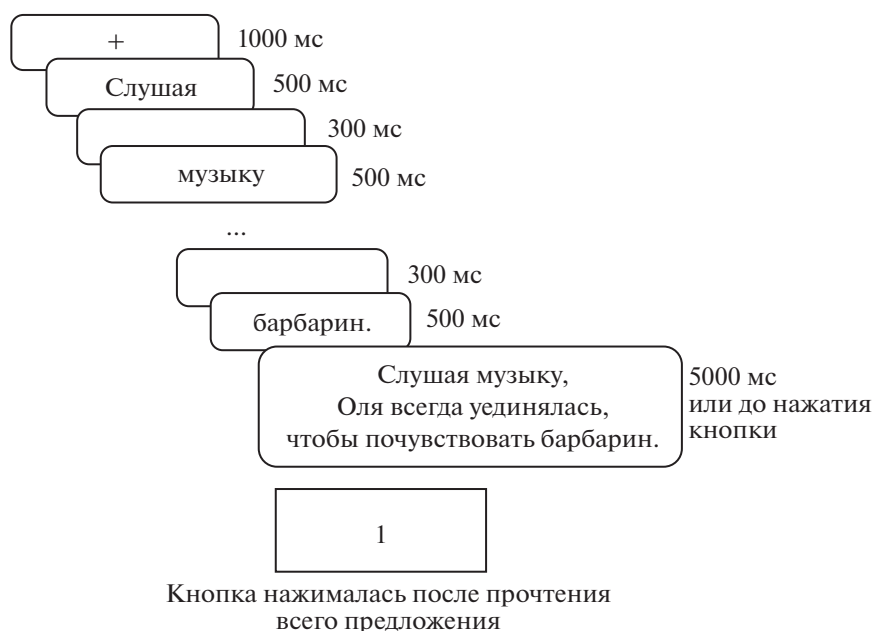


Рис. 1. Контекстное усвоение новых понятий (обучающий этап).

жать клавишу на пульте (*RB-740, Cedrus, США*) указательным пальцем левой руки. Пять предложений, передающих значение одного нового слова, предъявляли подряд, одним блоком. Предложения были отделены друг от друга одинарным фиксационным крестом, а блоки предложений (предъявленные в случайном порядке) – тройным.

Оценку результатов усвоения новых понятий проводили сразу после обучения и через 24 ч при помощи задания “Лексическое решение”. Данное задание является классическим для психолингвистических экспериментов, используется при изучении семантической памяти и лексического доступа, позволяя выявить, насколько быстро и точно стимулы классифицируются индивидом как настоящие слова, и, таким образом, оценить качество соответствующих следов памяти в лексиконе испытуемых. Участникам исследования в центре экрана последовательно в случайном порядке предъявляли новые слова и филлеры (по одному разу каждый). Длительность предъявления стимула составляла 600 мс, фиксационного креста между стимулами – 1400 мс. Стимульный материал был разделен поровну (два набора по 20) для того, чтобы в первый и во второй день предъявления стимулы не повторялись. Задача испытуемого состояла в том, чтобы нажимать кнопку “1”, если ему было представлено слово, имеющее смысл, или “2”, если предъявленное слово не имело смысла; время реакции фиксировали. Такая модификация стандартной задачи

лексического решения, в которой обычно существующие слова противопоставляются неизвестным псевдословам [41, 42], была произведена с целью ее адаптации к задаче научения, поскольку ключевыми стимулами в данном эксперименте выступали недавно выученные слова. Предъявление стимульного материала в обучающей сессии и в проверочном здании происходило с помощью программного обеспечения *NBS Presentation 20.0 (Neurobehavioral Systems, США)*. Продолжительность обучения составила приблизительно 20 мин, выполнения проверочного задания – 3 мин; с учетом заполнения анкеты, информированного согласия, установки электродов и продолжительности стимуляции общая длительность исследования составляла около часа.

Анализ данных. Результаты усвоения оценивали по двум параметрам: 1) количество правильных ответов (максимальное количество баллов – 5 в каждый из дней для каждого типа стимулов); 2) время реакции (ВР) на правильные ответы (превышающее 250 мс), которое фиксировали как задержку нажатия одной из кнопок после предъявление стимула. Оба параметра рассчитывали отдельно для конкретных и абстрактных слов. Сравнительный анализ проводили между типами стимулов (конкретные vs. абстрактные), между днями (первый vs. второй день проверки), а также между группами (анодная ТЭС левого полушария, катодная ТЭС левого полушария, анодная ТЭС правого полушария, катодная ТЭС правого

Таблица 1. Значимые различия между группами стимуляции по параметру количества правильных ответов в задании “Лексическое решение” во второй день проверки (*U*-критерий Манна-Уитни; критерий Хохберга)

Сравнение	Тип слова	<i>Z</i>	<i>p</i> -уровень значимости	Группа	Ср. значение ± ст. ошибка
Катодная ТЭС ЛП vs. Катодная ТЭС ПП	Конкретные слова	–3.502	≤0.0001	Катод ЛП	1.08 ± 0.33
				Катод ПП	2.70 ± 1.45
Катодная ТЭС ЛП vs. Катодная ТЭС ПП	Абстрактные слова	–2.523	≤0.048	Катод ЛП	1.50 ± 0.37
				Катод ПП	2.65 ± 1.43
Анодная ТЭС ЛП vs. Анодная ТЭС ПП	Конкретные слова	–3.014	≤0.021	Анод ЛП	1.25 ± 0.35
				Анод ПП	2.54 ± 0.23
Анодная ТЭС ЛП vs. Анодная ТЭС ПП	Абстрактные слова	–2.843	≤0.032	Анод ЛП	1.21 ± 0.33
				Анод ПП	2.58 ± 0.31

Примечание: ТЭС – транскраниальная электрическая стимуляция; ЛП – левое полушарие; ПП – правое полушарие.

полушария). Для статистического анализа внутригрупповых эффектов использовали критерий Вилкоксона для связанных выборок, межгрупповых – *U*-критерий Манна-Уитни для независимых выборок. Анализ проводили при помощи *SPSS Statistics 26 (IBM, США)*. В качестве метода коррекции для множественных сравнений был выбран критерий Хохберга.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате межгруппового сравнения для параметра “количество правильных ответов” в первый день проверки значимые результаты были обнаружены только при сравнении групп катодной стимуляции и заключались в более высоком количестве правильных ответов для ТЭС правого полушария (ср. значение ± ст. ошибка среднего для каждого типа новых слов: 3.04 ± 1.45) по сравнению с левым (1.58 ± 0.37). Этот эффект, однако, после коррекции на множественные сравнения проявился только на уровне тенденции ($p \leq 0.072$, $Z = -2.625$ как для конкретных, так и для абстрактных слов). Сравнительный анализ времени реакции между типами стимулов (конкретные vs. абстрактные), проведенный для каждой группы в отдельности, выявил, что в катодной группе ВР на конкретные слова было больше (889 ± 41.22), чем на абстрактные (844 ± 26.67) в первый день проверки ($p \leq 0.033$; $Z = -2.134$), однако после коррекции на множественные сравнения данный результат оказался

значимым также только на уровне тенденции ($p \leq 0.099$).

На второй день проверки статистически значимые различия с учетом поправок на множественные сравнения были выявлены для параметра “количество правильных ответов” как между группами катодной стимуляции, так и между группами анодной ТЭС для обоих типов семантики: после стимуляции правополушарного гомолога зоны Брока конкретные и абстрактные понятия усвоились лучше, чем после стимуляции зоны Брока левого полушария (табл. 1). По параметру “время реакции” не было обнаружено никаких значимых различий для второго дня проверки.

Статистически значимых различий при прямом сравнении результатов первого дня проверки с результатами за второй день обнаружено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В проведенном исследовании изучались нейрофизиологические механизмы научения новым конкретным и абстрактным словам на основе вмешательства в процесс обработки информации мозгом при помощи ТЭС, что позволяет судить о критичности участия в данном процессе той или иной области мозга. Авторы настоящей статьи сосредоточились на изучении именно научения новым словам, а не на обработке ранее существовавшей и известной испытуемым абстрактной и конкретной семантики, поскольку использование существующих знакомых слов в психолинг-

вистических исследованиях сопряжено с рядом трудностей. Например, было выявлено, что конкретные слова обычно усваиваются в течение жизни раньше, чем абстрактные [43, 44]; кроме того, слова могут естественным образом отличаться по длине, частоте встречаемости (как целых словоформ, так и составляющих их биграмм и триграмм) и т.д. В связи с этим любые различия в экспериментальных результатах, полученных для конкретных и абстрактных слов, могут быть обусловлены не столько их семантическими особенностями как таковыми, сколько другими сопутствующими переменными. В свою очередь, использование новых, специально сконструированных слов в экспериментальных условиях позволяет полностью контролировать длину, частоту, фонологическую и орфографическую структуру данных слов, а также избежать влияния различного опыта их усвоения и использования. Создание новых словоформ и их значений со строго определенными и уравновешенными параметрами, а также единая процедура научения данным словам позволили нам обеспечить полный контроль над условиями эксперимента.

В результате исследования основные различия во влиянии катодной и анодной ТЭС на научение новым абстрактным и конкретным словам были выявлены при сравнении зоны Брока и ее правополушарного гомолога и выражались в более успешном выполнении проверочного задания после стимуляции последнего. Данные результаты в некоторой степени противоречат теории двойного кодирования, согласно которой конкретные понятия усваиваются на основе сенсомоторного опыта и активируют основанные на восприятии представления, недоступные абстрактным понятиям [45], в то время как обработка абстрактных слов поддерживается только основными речевыми системами головного мозга, находящимися, как традиционно считается, в левом полушарии [5]. Подтверждение данной теории было найдено в некоторых нейровизуализационных исследованиях [21], однако наши данные показывают также возможное вовлечение правого полушария в обработку абстрактных слов, что согласуется, например, с результатами метаанализа, проведенного *R.H. Desai et al.* [6]: обработка и хранение разных типов абстрактных понятий (моральных суждений, чисел, слов, обозначающих эмоции, и т.д.) обеспечивается разными областями обоих полушарий ГМ. С другой стороны, наблюдаемые эффекты стимуляции могли возникнуть не в результате прямого влияния на гипотетические правополушарные семантические механизмы, а за счет того, что стимули-

рование зон правого полушария через межполушарную взаимосвязь может оказывать воздействие (как правило, подавляющее) на работу их гомологов в левом полушарии, влияя в данном случае на процессы возбуждения и торможения в зоне Брока как таковой. Принцип реципрокного межполушарного взаимодействия областей коры ГМ хорошо известен для сенсорных и моторных систем и, как правило, выражается в подавлении контралатеральной активности [46]. Возможно, и в данном случае мы сталкиваемся с антагонистическими взаимоотношениями между центром Брока и его правополушарным гомологом. Для проверки данного предположения необходимы дополнительные исследования с одновременным использованием методов нейровизуализации и стимуляции для отслеживания индуцированной во время ТЭС активации мозга.

Важно отметить, что значимые различия между группами стимуляции наблюдались во второй день проверки, что может говорить в пользу влияния ТЭС на процессы консолидации как конкретных, так и абстрактных слов, причем для обеих полярностей это влияние было положительным. Таким образом, ингибирующий эффект катодной стимуляции, чаще выявляемый при изучении моторной системы [26, 27], в нашем исследовании не подтвердился. Возможно, в данном конкретном случае больше важен сам факт вмешательства в работу той или иной зоны, чем полярность стимуляции [47].

Одним из возможных направлений дальнейших исследований может быть одновременная ТЭС зоны Брока и ее правополушарного гомолога с целью выявления взаимосвязи этих областей в научении новым словам. Такой протокол стимуляции успешно используется в клинических исследованиях для восстановления речевых функций у пациентов с хронической афазией [31, 32], однако доказательств наличия эффектов двусторонней стимуляции у здоровых испытуемых пока не достаточно.

ВЫВОДЫ

1. Основные эффекты стимуляции правополушарного гомолога зоны Брока (относительно левополушарной зоны Брока) проявляются только на второй день, спустя сутки после ТЭС. Это, возможно, указывает на ее роль в консолидации следов памяти при усвоении конкретных и абстрактных понятий.

2. Как катодная, так и анодная ТЭС гомолога зоны Брока способствует усвоению абстрактной и конкретной семантики.

3. ТЭС гомолога зоны Брока положительно влияет на консолидацию следов памяти новых слов.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект № 94615876).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Маргарите Филипповой и Ольге Щербаковой за помощь в создании набора стимулов, Екатерине Периковой за помощь в наборе участников, а также Диане Цветовой и Анастасии Филатовой за помощь в сборе данных.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Д.С. Гнедых — сбор данных, визуализация, написание текста статьи; Н.А. Мкртычян — сбор данных, математико-статистическая обработка данных; Е.Д. Благовещенский — методология, редактирование текста статьи; С.Н. Костромина — дизайн исследования, методология, редактирование текста статьи; Ю.Ю. Штыров — дизайн исследования, методология, научное руководство, редактирование текста статьи, проектное финансирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borghi A.M., Binkofski F.* Words as social tools: an embodied view on abstract concepts. N.Y.: Springer New York, 2014. 127 p.
2. *Fliessbach K., Weis S., Klaver P. et al.* The effect of word concreteness on recognition memory // *NeuroImage*. 2006. V. 32. № 3. P. 1413.
3. *Borghi A.M.* A future of words: language and the challenge of abstract concepts // *J. Cogn.* 2020. V. 3. № 1. P. 42.
4. *Pulvermüller F.* How neurons make meaning: brain mechanisms for embodied and abstract-symbolic semantics // *Trends Cogn. Sci.* 2013. V. 17. № 9. P. 458.
5. *Binder J.R., Westbury C.F., McKiernan K.A. et al.* Distinct brain systems for processing concrete and abstract concepts // *J. Cogn. Neurosci.* 2005. V. 17. № 6. P. 905.
6. *Desai R.H., Reilly M., van Dam W.* The multifaceted abstract brain // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 2018. V. 373. № 1752. P. 20170122.
7. *Mkrtychian N., Blagovechchenski E., Kurmakaeva D. et al.* Concrete vs. abstract semantics: from mental representations to functional brain mapping // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 267.
8. *Broca P.P.* Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole) // *Bulletin et mémoires de la Société Anatomique de Paris*. 1861. № 6. P. 330.
9. *Sahin N.T., Pinker S., Cash S.S. et al.* Sequential processing of lexical, grammatical, and phonological information within Broca's Area // *Science*. 2009. V. 326. № 5951. P. 445.
10. *Tomasino B., Tronchin G., Marin D. et al.* Noun-verb naming dissociation in neurosurgical patients // *Aphasiology*. 2018. V. 33. № 12. P. 1418.
11. *Fiebach C.J., Schleewsky M., Lohmann G. et al.* Revisiting the role of Broca's area in sentence processing: syntactic integration versus syntactic working memory // *Hum. Brain Mapp.* 2005. V. 24. № 2. P. 79.
12. *Friederici A.D.* The neural basis for human syntax: Broca's area and beyond // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2018. V. 21. P. 88.
13. *Heim S., Eickhoff S.B., Amunts K.* Specialisation in Broca's region for semantic, phonological, and syntactic fluency? // *NeuroImage*, 2008. V. 40. № 3. P. 1362.
14. *Binder J.R., Desai R.H., Graves W.W., Conant L.L.* Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies // *Cereb. Cortex*. 2009. V. 19. № 12. P. 2767.
15. *Schell M., Friederici A.D., Zaccarella E.* Neural classification maps for distinct word combinations in Broca's area // *Front. Hum. Neurosci.* 2022. V. 16. P. 930849.
16. *Berkovich-Ohana A., Noy N., Harel M. et al.* Inter-participant consistency of language-processing networks during abstract thoughts // *NeuroImage*. 2020. V. 211. P. 116626.
17. *Fini C., Zannino G.D., Orsoni M. et al.* Articulatory suppression delays processing of abstract words: The role of inner speech // *Q. J. Exp. Psychol.* 2022. V. 75. № 7. P. 1343.
18. *Mashal N., Faust M., Hendler T.* The role of the right hemisphere in processing nonsalient metaphorical meanings: application of principal components analysis to fMRI data // *Neuropsychologia*. 2005. V. 43. № 14. P. 2084.
19. *Moro A., Tettamanti M., Perani D. et al.* Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies // *NeuroImage*. 2001. V. 13. № 1. P. 110.
20. *Friederici A.D., Opitz B., von Cramon D.Y.* Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the hu-

- man brain: an fMRI investigation of different word types // *Cereb. Cortex*. 2000. V. 10. № 7. P. 698.
21. *Sabsevitz D.S., Medler D.A., Seidenberg M., Binder J.R.* Modulation of the semantic system by word imageability // *NeuroImage*. 2005. V. 27. № 1. P. 188.
 22. *Blank S.C., Bird H., Turkheimer F., Wise R.J.S.* Speech production after stroke: the role of the right pars opercularis // *Ann. Neurol*. 2003. V. 54. № 3. P. 310.
 23. *Scott S.K.* The neural control of volitional vocal production-from speech to identity, from social meaning to song // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 2022. V. 377. № 1841. P. 20200395.
 24. *Reato D., Salvador R., Bikson M. et al.* Principles of transcranial direct current stimulation (tDCS): introduction to the biophysics of tDCS / Practical guide to transcranial direct current stimulation // Eds. Knotkova H., Nitsche M., Bikson M., Woods A. Springer, Cham, 2019. P. 45.
 25. *Roy A.V., Camchong J., Lim K.O.* Principles and applications of transcranial electrical stimulation / *Engineering in Medicine: Advances and Challenges* // Ed. Iaizzo P. Elsevier, 2018. P. 319.
 26. *Bianco G., Feurra M., Fadiga L. et al.* Bi-hemispheric effects on corticospinal excitability induced by repeated sessions of imagery versus observation of actions // *Restor. Neurol. Neurosci.* 2012. V. 30. № 6. P. 481.
 27. *Santarnecchi E., Feurra M., Barneschi F. et al.* Time course of corticospinal excitability and autonomic function interplay during and following monopolar tDCS // *Front. Psychiatry*. 2014. V. 5. P. 86.
 28. *de Vries M.H., Barth A.C., Maiworm S. et al.* Electrical stimulation of Broca's area enhances implicit learning of an artificial grammar // *J. Cogn. Neurosci.* 2010. V. 22. № 11. P. 2427.
 29. *Fiori V., Cipollari S., Di Paola M. et al.* tDCS stimulation segregates words in the brain: evidence from aphasia // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 269.
 30. *Rosso C., Valabregue R., Arbizu C. et al.* Connectivity between right inferior frontal gyrus and supplementary motor area predicts after-effects of right frontal cathodal tDCS on picture naming speed // *Brain Stimul.* 2014. V. 7. № 1. P. 122.
 31. *Marangolo M., Fiori V., Gelfo F. et al.* Bihemispheric tDCS enhances language recovery but does not alter BDNF levels in chronic aphasic patients // *Restor. Neurol. Neurosci.* 2014. V. 32. № 2. P. 367.
 32. *de Aguiar V., Bastiaanse R., Capasso R. et al.* Can tDCS enhance item-specific effects and generalization after linguistically motivated aphasia therapy for verbs? // *Front. Behav. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 190.
 33. *Matar S.J., Sorinola I.O., Newton C., Pavlou M.* Transcranial direct-current stimulation may improve discourse production in healthy older adults // *Front. Neurol.* 2020. V. 11. P. 935.
 34. *Schimke E.A.E., Angwin A.J., Cheng B.B.Y., Copland D.A.* The effect of sleep on novel word learning in healthy adults: A systematic review and meta-analysis // *Psychon. Bull. Rev.* 2021. V. 28. № 6. P. 1811.
 35. *Liu Y., van Hell J.G.* Learning novel word meanings: an ERP study on lexical consolidation in monolingual, inexperienced foreign language learners // *Language Learning*. 2020. V. 70. P. 45.
 36. *Bakker I., Takashima A., van Hell J.G. et al.* Competition from unseen or unheard novel words: lexical consolidation across modalities // *J. Mem. Lang.* 2014. V. 73. № 1. P. 116.
 37. *Partanen E., Leminen A., de Paoli S. et al.* Flexible, rapid and automatic neocortical word form acquisition mechanism in children as revealed by neuromagnetic brain response dynamics // *Neuroimage*. 2017. V. 155. P. 450.
 38. *Vasilyeva M.J., Knyazeva V.M., Aleksandrov A.A., Shtyrov Y.* Neurophysiological correlates of fast mapping of novel words in the adult brain // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 304.
 39. *Ihara A.S., Mimura T., Soshi T. et al.* Facilitated lexical ambiguity processing by transcranial direct current stimulation over the left inferior frontal cortex // *J. Cogn. Neurosci.* 2015. V. 27. № 1. P. 26.
 40. *Kurmakaeva D., Blagovechchenski E., Gnedykh D. et al.* Acquisition of concrete and abstract words is modulated by tDCS of Wernicke's area // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. № 1. P. 1508.
 41. *Haro J., Guasch M., Vallès B., Ferré P.* Is pupillary response a reliable index of word recognition? Evidence from a delayed lexical decision task // *Behav. Res. Methods*. 2017. V. 49. № 5. P. 1930.
 42. *Perea M., Rosa E., Gómez C.* The frequency effect for pseudowords in the lexical decision task // *Percept. Psychophys.* 2005. V. 67. № 2. P. 301.
 43. *Monaghan J., Ellis A.W.* What exactly interacts with spelling-sound consistency in word naming? // *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 2002. V. 28. № 1. P. 183.
 44. *Troche J., Crutch S., Reilly J.* Clustering, hierarchical organization, and the topography of abstract and concrete nouns // *Front. Psychol.* 2014. V. 5. P. 360.
 45. *Paivio A.* Mental representations: a dual coding approach. N. Y.: Oxford University Press, 1986. 322 p.
 46. *Руководство по функциональной межполушарной асимметрии.* М.: Научный мир, 2009. 836 с. Guide to functional hemispheric asymmetry. M.: "Scientific World" Publishing House, 2009. 836 p.
 47. *Nazarova M., Blagovechchenski E.* Modern brain mapping – what do we map nowadays? // *Front. Psychiatry*. 2015. V. 6. P. 89.

The Involvement of Broca's Area and Its Right-Hemispheric Homologue in Acquiring Abstract and Concrete Semantics: Transcranial Direct-Current Stimulation Study

D. S. Gnedykh^{a, *}, E. D. Blagovechtchenski^b, S. N. Kostromina^a, N. A. Mkrtychian^a, Y. Y. Shtyrov^c

^a*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

^b*Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg, Russia*

^c*Aarhus University, Aarhus, Denmark*

**E-mail: d.gnedyh@spbu.ru*

The study compared effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) of Broca's area and of its right-hemispheric homologue on the acquisition of novel concrete and abstract words. Word/concept acquisition was achieved through reading sets of sentences, which incorporated novel words, gradually revealing their meaning through context. Before the learning session, a 15-minute anodal or cathodal stimulation of one of the target areas was applied. Lexical decision task was used to assess the learning outcomes immediately after the learning session and 24 hours later. The results showed a larger number of correct responses after right-hemispheric tDCS, in comparison with that of Broca's area in the left hemisphere. These results suggest that the right-hemispheric counterpart of Broca's areas is involved in the processing and acquisition of new concrete and abstract semantics. Furthermore, they demonstrate facilitatory effects of tDCS on the processes of overnight consolidation of newly formed word memory traces.

Keywords: transcranial direct current stimulation (micropolarization), Broca's area, Broca's area right-hemispheric homologue, concrete concepts, abstract concepts, word acquisition, learning, brain, language (speech), right hemisphere.