

РИТМИЧЕСКАЯ ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ПЕРВИЧНОЙ МОТОРНОЙ КОРЫ ИЗБИРАТЕЛЬНО ВЛИЯЕТ НА УСВОЕНИЕ НОВЫХ СЛОВ В РАЗНЫХ СРЕДАХ ОБУЧЕНИЯ

© 2023 г. Е. И. Перикова¹ *, Е. Н. Блинова¹, Е. А. Андрющенко¹,
Е. Д. Благовещенский^{1,2}, О. В. Щербакова¹, 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: e.perikova@spbu.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Моторная кора головного мозга (ГМ) человека задействуется на различных этапах речевого научения в том случае, если оно происходит одновременно с совершением двигательной активности. Однако в исследованиях, направленных на поиск причинно-следственных связей между активацией первичной моторной коры (М1) и эффективностью выполнения речевых задач, обнаруживаются противоречивые результаты, что, возможно, обусловлено различиями в средах обучения и характере двигательной активности, задействованной в экспериментальной процедуре. Целью данной работы стало исследование влияния активности моторной коры на эффективность запоминания новых слов при варьировании условий обучения и способа совершения моторного ответа. Активность моторной коры модулировалась при помощи ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС) ГМ. После рТМС зоны М1 либо применения контрольных условий (плацебо-ТМС, активный контроль) участники исследования ($n = 96$) выполняли задания на усвоение новых слов посредством установления ассоциаций между визуально представленными изображениями предметов и аудиально предложенными словоформами в двух обучающих средах: при помощи компьютерного монитора либо в интерфейсе виртуальной реальности. В каждом условии испытуемым предъявлялись восемь новых слов с семантической привязкой и вопросом о визуальных характеристиках стимулов. Ответы на обучающие задания участники давали посредством выполнения дистальных высокоамплитудных движений рукой или проксимальных низкоамплитудных движений пальцами кисти. В качестве показателя эффективности усвоения новых слов использовалась правильность воспроизведения изученных слов сразу после обучения и на следующий день. В обеих средах обучения были обнаружены значимые различия в успешности воспроизведения новых слов сразу после стимуляции и на следующий день для испытуемых, получивших рТМС зоны М1 первичной моторной коры, в тех случаях, когда они давали ответы посредством совершения низкоамплитудных движений пальцами. Полученные результаты позволяют сделать вывод об участии моторной коры в речевом научении при интерактивном взаимодействии субъекта с обучающим материалом.

Ключевые слова: ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция, усвоение языка, речевое научение, речь, мозг, моторная кора, воплощенное познание, виртуальная реальность.

DOI: 10.31857/S0131164622600896, **EDN:** GEOSNG

Речь играет ключевую роль во всех сферах деятельности человека, а нарушения в системе обработки речевой информации значительно снижают качество жизни. Поэтому механизмы, лежащие в основе понимания и усвоения речи, являются предметом внимания специалистов различных направлений: нейробиологии, психологии и лингвистики.

Обращаясь к методологии изучения познавательных процессов в целом и языковых механизмов в частности, важно отметить, что в рамках традиционных теорий познания когнитивные и двигательные системы мозга рассматривались как независимые друг от друга в отношении реализуемых ими функций [1]. Однако становится все более очевидным, что двигательная активность является не просто следствием познавательной

деятельности человека, а скорее ее неотъемлемой частью [2]. Согласно теориям воплощенного познания, когнитивные процессы находятся в неразрывной связи с телесной организацией человека [2, 3]. Исследователи отмечают, что физическое взаимодействие человека со средой не только находится под контролем когнитивных функций, но и первоначально выступает в качестве основы их формирования [2].

Известно, что простое движение тела, такое как взмах руки или ноги, может оставлять значимый для системы памяти мнемический след и интегрироваться с когнитивными процессами, протекающими одновременно с совершением такого движения [4, 5]. Так, в ряде исследований у участников наблюдалось меньшее время реакции, когда им было необходимо оценивать глаголы, обозначающие движения руками, с помощью движений рук, в сравнении с ситуацией, когда эту же оценку нужно было осуществить, выполнив движение ногой [6]. Это позволяет предположить, что когнитивная обработка слова, обозначающего движение, требует задействования тех же моторных ресурсов, что и его реальное выполнение [7].

Результаты психофизиологических исследований показывают, что моторные зоны коры головного мозга (ГМ) принимают участие в различных этапах научения [8, 9]. В частности, в многочисленных работах показано существование функциональной связи между областью проекции руки в первичной моторной коре и нейрональными сетями, отвечающими за обработку речи [10]. Однако вопрос о характере связи речевых процессов и мозговых структур, отвечающих за двигательную активность, остается открытым.

Одним из способов уточнения природы таких взаимосвязей является использование методов неинвазивной стимуляции мозга, позволяющих выявить причинно-следственные отношения между изменением возбудимости различных областей ГМ и поведенческими эффектами. Наиболее распространенным методом неинвазивного воздействия на кору ГМ считается транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС), преимущество которой заключается в анатомической точности воздействия на мозг [11, 12]. Одним из наиболее эффективных протоколов ТМС, используемых для кратковременного локального изменения возбудимости коры ГМ, является ритмическая ТМС (pTMS) при помощи т.н. тета-вспышек (*continuous theta-burst stimulation, cTBS*), приводящая к снижению возбудимости моторной коры [13].

Результаты проведенных исследований речевой функции с использованием ТМС моторной коры демонстрируют противоречивые данные. В то время как в одних работах обнаруживаются связи между стимуляцией первичной моторной коры и эффективностью выполнения речевых за-

дач [10, 14], авторы других исследований не находят такой закономерности [15]. При этом результаты многих исследований показывают влияние стимуляции первичной моторной коры на эффективность выполнения речевых заданий только при определенных условиях, связанных с конкретным типом задач и наличием/отсутствием двигательной активности в процессе обучения. Так, *B. Tomasino et al.* [16] обнаружили, что ТМС первичной моторной коры влияла на обработку глаголов, обозначающих телесные действия, когда испытуемых прямо просили их прочитать, а затем представить, что они выполняют соответствующее действие, и оценить, требует ли оно вращения рукой (например, глаголы “гладить” или “хлопать”), в то время как при выполнении чисто речевых задач (только чтение) данный эффект не проявился. Аналогично, *J.K. Witt et al.* [17] пришли к выводу, что моторная система играет важную роль в назывании объектов, которыми можно манипулировать. Участникам исследования предлагалось сжимать мяч правой или левой рукой, и одновременно с этим им визуально предъявлялись изображения объектов на правой или левой половине монитора. В случае совпадения руки, сжимающей мяч, и стороны предъявления изображения испытуемые чаще ошибались и медленнее называли объекты. Однако в исследовании *N. Vukovic et al.* [10] было показано, что pTMS первичной моторной коры влияет на скорость поведенческих реакций при обработке не только глаголов, обозначающих телесные действия (например, “рисовать”), но и абстрактных глаголов (например, “веровать”), при этом эффект был обнаружен исключительно при выполнении испытуемыми семантического задания, но отсутствовал в случае выполнения более “низкоуровневой” задачи лексического решения.

Другим важным направлением исследований речевых функций, связанным с двигательной активностью, сенсорным опытом и кодированием информации в процессе обучения, является использование виртуальной реальности (VR) [18]. Исследования с использованием этой технологии показали ее большую эффективность в усвоении слов в сравнении с обучением посредством предъявления стимулов на мониторе компьютера [19–21] или на бумажных носителях [22]. В контексте теории воплощенного познания использование VR дает более широкие возможности для задействования разных способов двигательной активности в процессе научения по сравнению с традиционными методиками. Исследования, посвященные роли движений в усвоении речевой информации в VR среде, показали положительный эффект данной технологии [20, 23]. В исследовании *N. Vukovic et al.* [24] стимуляция первичной моторной коры была применена до выполнения испытуемыми заданий на усвоение новых слов в VR-сре-

де. Авторы пришли к выводу о том, что уменьшение возбудимости первичной моторной коры может отрицательно влиять на успешность усвоения слов, а также предотвращать микроструктурные изменения в областях коры ГМ, связанных с обработкой речи, формированием следов памяти и исполнительным контролем. Несмотря на свою актуальность, исследования с применением ВР на данный момент малочисленны; насколько нам известно, до настоящего момента не было проведено экспериментов, направленных на прямое сравнение влияния ТМС на эффективность обучения в ВР и традиционных средах.

Таким образом, целью данного исследования стало выявление влияния рТМС первичной моторной коры ГМ на эффективность усвоения новых слов при варьировании условий обучения и способа моторного ответа. Анализ литературных источников позволил выдвинуть предположение о том, что первичная моторная кора включена в процесс речевого научения в том случае, если субъект осуществляет двигательное взаимодействие с обучающим материалом. Для проверки этого предположения был использован протокол рТМС первичной моторной коры, применявшийся перед выполнением испытуемыми заданий на усвоение новых слов при варьировании условий обучения (при помощи традиционной среды — компьютерного монитора, либо ВР-среды), а также способа ответа на речевые задания (высокоамплитудные движения рукой, либо низкоамплитудные движения пальцами). Рабочая гипотеза исследования состояла в том, что испытуемые, получившие рТМС первичной моторной коры, будут воспроизводить большее количество слов в результате речевого научения с использованием низкоамплитудных движений пальцами в традиционной среде и высокоамплитудных движений рукой в ВР-среде, чем при использовании высокоамплитудных движений рукой в традиционной среде и низкоамплитудных движений пальцами в ВР-среде, соответственно. Контроль экспериментальных эффектов выполнялся при участии двух групп испытуемых, получавших плацебо-стимуляцию и стимуляцию срединной теменной области ГМ. Можно предположить, что в контрольных группах описанные ранее эффекты не будут обнаружены.

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 96 испытуемых в возрасте от 18 до 35 лет (средний возраст 22.5 ± 4.4 ; 69 женщин). Все испытуемые были право-руки (доминирующую руку определяли при помощи Эдинбургского опросника [25]) носителями русского языка как единственного родного с нормальным или скорректированным до нормального зрением, не имевшими в анамнезе травм го-

ловы и неврологических или психиатрических заболеваний. С помощью процедуры псевдорандомизации испытуемые были распределены в три группы (по 32 чел. в каждой), получавшие разные типы рТМС: 1) реальную стимуляцию первичной моторной коры левого полушария ГМ, 2) реальную стимуляцию срединной теменной области ГМ в качестве т.н. активного контрольного условия и 3) плацебо-стимуляцию первичной моторной коры левого полушария ГМ — т. н. пассивный контроль. Экспериментальные группы значимо не различались по полу ($\chi^2(2) = 2.16$, $p = 0.34$), возрасту ($H(2) = 0.007$, $p = 0.99$) и уровню вербального ($F(2, 96) = 0.491$, $p = 0.61$) и невербального интеллекта, измеренного с помощью теста структуры интеллекта Р. Амтхауэра [26] ($F(2, 96) = 0.205$, $p = 0.81$). 52% испытуемых отметили, что не имели опыта работы с ВР до участия в эксперименте, 39% — что имели однократный опыт, а 9% — что использовали ВР с периодичностью раз в год.

Стимульный материал исследования был представлен набором визуальных стимулов и аудиозаписей, включавших в себя ранее неизвестные словоформы (псевдослова) и контекстные предложения для их семантизации. В эксперименте использовали 16 псевдослов, разработанных на основе реально существующих трехфонемных существительных русского языка и имеющих аналогичную данным существительным фонетическую структуру (согласный—гласный—согласный; например, *няч*). Семантическими референтами для них послужили наборы изображений (по 5 для каждого псевдослова) малоизвестных предметов быта и инструментов. Связь между псевдословами (далее — словами) и изображениями устанавливали посредством предложений, содержащих наименование предмета и вопрос, касающийся одной из его визуальных характеристик (например, *Это няч. Металлический ли он?*). Соответствие стимульных слов и изображений было уникальным для каждого испытуемого и определялось с помощью процедуры псевдорандомизации. Подробное описание процедуры разработки стимульного материала представлено в предыдущих работах авторов (см. например [27]).

Процедура исследования включала в себя следующие этапы: А) сессию транскраниальной магнитной стимуляции, Б) обучающую экспериментальную серию и В) проверку эффективности усвоения новых слов. Далее представлено подробное описание всех блоков экспериментальной процедуры, а схема реализации ее первого и второго этапов отражена на рис. 1.

После подписания информированного согласия каждый испытуемый проходил сессию *транскраниальной магнитной стимуляции* по установленному для его группы протоколу. Стимуляцию осуществляли с помощью аппарата *MagPro X100*

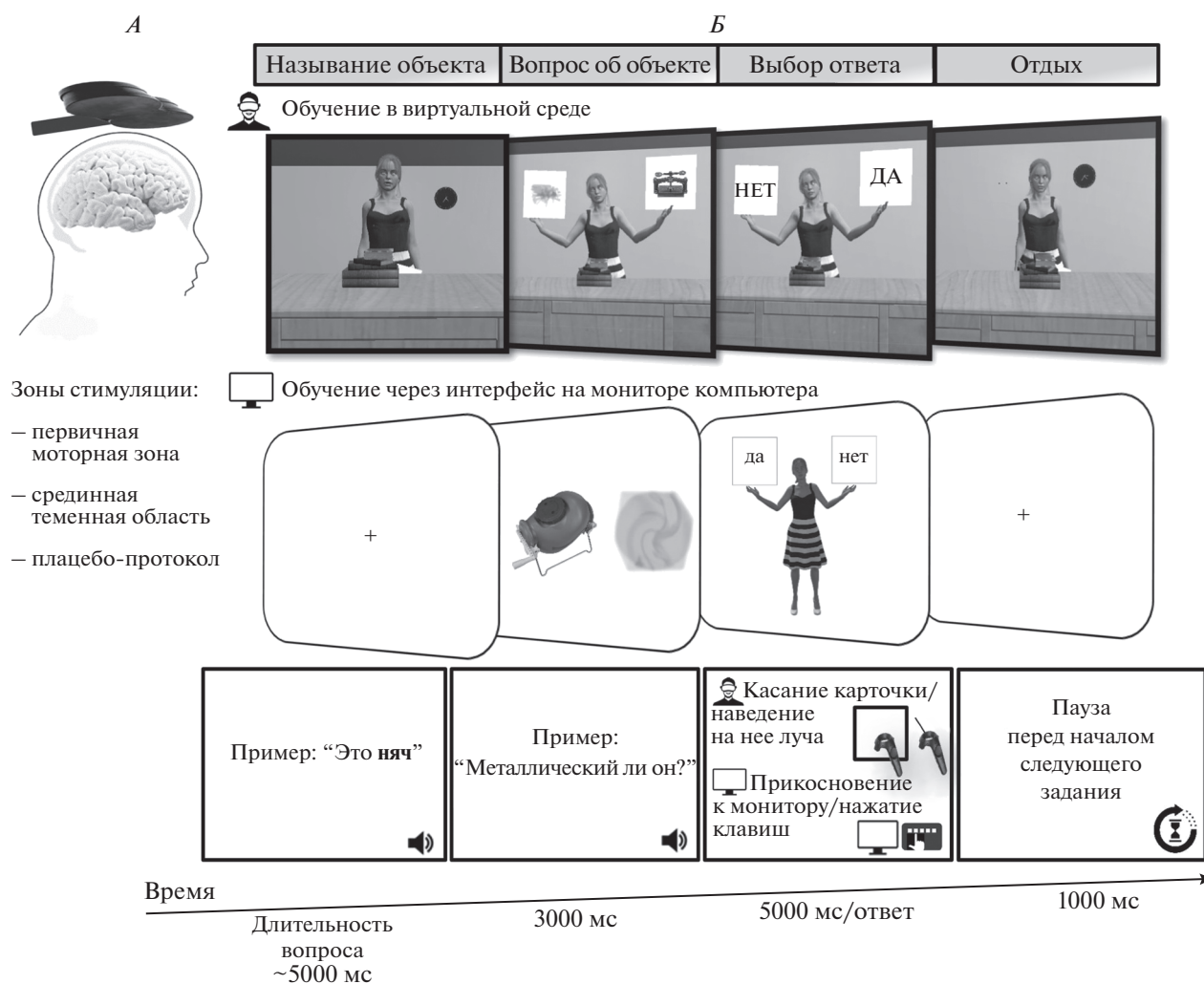


Рис. 1. Экспериментальная процедура исследования.

Этап А включал определение амплитуды моторного порога и типа стимуляции в зависимости от группы. Этап Б включал серии обучающих заданий в виртуальной реальности и за монитором компьютера.

(MagVenture A/S, Дания), снабженного 8-образным индуктором. Во время сеанса испытуемые находились в положении сидя в удобном кресле в экранированной и звукоизолированной комнате (Нейроиконика, Россия) с приглушенным освещением. Сеанс включал стимуляцию 200 тета-вспышками на протяжении 40 с с частотой 5 Гц, при этом каждая вспышка состояла из трех импульсов, повторяемых с частотой 50 Гц (итого 600 импульсов [13]). Протокол рТМС был выбран в связи с достаточной длительностью его эффекта после прекращения стимуляции (до 60 мин), а также успешным опытом применения в моторных обучающих задачах [9, 13]. Амплитуду магнитного поля устанавливали на 80% от предварительно определенного для каждого испытуемого порога моторного ответа, т.е. минимального по интенсивности одиночного магнитного импульса, производимого в области нейрональной ре-

презентации мышцы, сгибающей указательный палец правой руки (*musculus flexor digitorum*), и вызывающего сокращение соответствующей мышцы, т.е. вызванный моторный ответ (ВМО). Для оценки амплитуды ВМО были использованы наконечники электромиографические электроды и усилитель *actiChamp* (BrainProducts GmbH, Германия).

Процедура рТМС в целом была идентичной для трех групп, за исключением места стимуляции: месторасположение катушки стимулятора для групп реальной и плацебо-рТМС первичной моторной коры (М1) уточняли индивидуально при помощи ТМС по отклику большого пальца правой кисти, а для группы реальной стимуляции срединной теменной области ГМ (активный контроль) — на основе локализации отведения *Pz* по системе 10–20%. В ходе эксперимента испытуе-

мые не были осведомлены о типе получаемой ими стимуляции.

Далее испытуемые переходили к выполнению *обучающей серии эксперимента*, направленной на усвоение новых слов. На данном этапе слова предъявляли в контексте семантизирующих предложений совместно с изображениями объектов. Каждый объект демонстрировали испытуемым в течение 3 с, после чего им было необходимо в течение 5 с ответить на вопрос о свойствах этого объекта. Изображения объектов предъявляли испытуемым в паре с нецелевыми визуальными стимулами (семантически ненагруженными масками или ранее известными испытуемым предметами) для обеспечения большей когнитивной нагрузки на испытуемого в рамках комплексного задания, приближенного к естественным условиям языкового научения [27].

В ходе проведения обучающей серии варьировались два фактора: среда обучения и способ двигательного ответа на поставленный вопрос. Половина слов изучалась каждым испытуемым в ВР-интерфейсе, а половина — при работе за монитором компьютера. При этом изображения стимульных объектов и карточки с вариантами ответа (“Да” или “Нет”) на вопросы об их визуальных характеристиках предъявлялись испытуемым виртуальным учителем — девушкой, образ которой при работе за монитором компьютера был двухмерным, а в среде ВР — трехмерным и анимированным.

Для выбора ответа на поставленный вопрос в обеих средах испытуемым было необходимо совершить либо низкоамплитудное, либо высокоамплитудное движение левой рукой. В ВР-условии эти движения были представлены нажатием на курок джойстика при наведении луча и вытягиванием руки для касания таблички с подходящим ответом, соответственно. При работе за монитором компьютера низкоамплитудное движение было представлено нажатием необходимой кнопки на специальном пульте (*RB-740, Cedrus Corp.*, США), а высокоамплитудное — касанием рукой таблички на сенсорном экране компьютера (*PHILIPS 222B9T*, Нидерланды).

Последовательность обучения в двух средах определялась с помощью процедуры контрбалансировки. Экспериментальная парадигма исследования была разработана при использовании программных сред *Presentation 21.1 (Neurobehavioral Systems, США)* и *Unity (Unity Technologies, США)*. Обучающая серия с использованием ВР-технологии была реализована при использовании системы *VIVE Pro Full Kit (HTC Corporation, Тайвань)*, обучение на мониторе компьютера проходило в той же экранированной и звукоизолированной комнате, что и процедура рТМС.

После прохождения процедуры обучения, на завершающем этапе эксперимента, осуществляли *оценку эффективности усвоения новых слов* испытуемыми. Для достижения этой цели использовали задание свободного воспроизведения, при выполнении которого испытуемым было необходимо самостоятельно написать в окне текстового редактора все слова из обучающей сессии, которые им удалось запомнить. Данную проверку осуществляли дважды: 1) непосредственно после прохождения обучающей процедуры и 2) на следующий день.

Для оценки ответов применяли схему нахождения наиболее полного соответствия. Так, испытуемый мог получить 3 балла за слово в случае его полного фонетического соответствия одному из экспериментальных стимулов (например, полностью соответствующими слову “ляч”/[л’ач’] ответами могли быть признаны следующие: “ляч”/[л’ач’], “лач”/[лач’]). В случае неполного фонетического соответствия испытуемый получал за свой ответ 2 балла (например, слова “лям”/[л’ам] и “ляд”/[л’ат] совпадают со словом “ляч”/[л’ач’] частично). Итоговую сумму баллов для каждого испытуемого пересчитывали в процентную долю от максимально возможной, и данный показатель правильности ответов использовали при дальнейшей статистической обработке данных.

Статистический анализ данных выполняли с использованием программного обеспечения *SPSS Statistics v.26.0 (IBM Inc., США)*. В качестве показателя эффективности усвоения новых слов использовали правильность их свободного воспроизведения.

Для оценки воздействия стимуляции на успешность свободного воспроизведения выученных слов был использован факторный дисперсионный анализ (*ANOVA*) с межгрупповым фактором **ГРУППЫ СТИМУЛЯЦИИ**, а также *ANOVA* смешанного дизайна с повторными измерениями, в котором помимо межгруппового фактора в качестве внутригрупповых были использованы факторы **СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА** (2 уровня: высокоамплитудное движение руки/низкоамплитудное движение пальцами), **СРЕДА ОБУЧЕНИЯ** (2 уровня: ВР/монитор компьютера) и **ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ** (2 уровня: первый/второй день). В случае нахождения значимых эффектов и взаимодействий проводили апостериорное сравнение средних значений воспроизведенных слов с использованием *t*-критерия Стьюдента. Для коррекции уровня статистической значимости на множественные сравнения применяли поправку Бонферрони. В соответствии со стандартной для психолингвистических исследований процедурой статистический анализ был проведен как по испытуемым (далее обозначен индексом 1), так и по словам (индекс 2) [28].

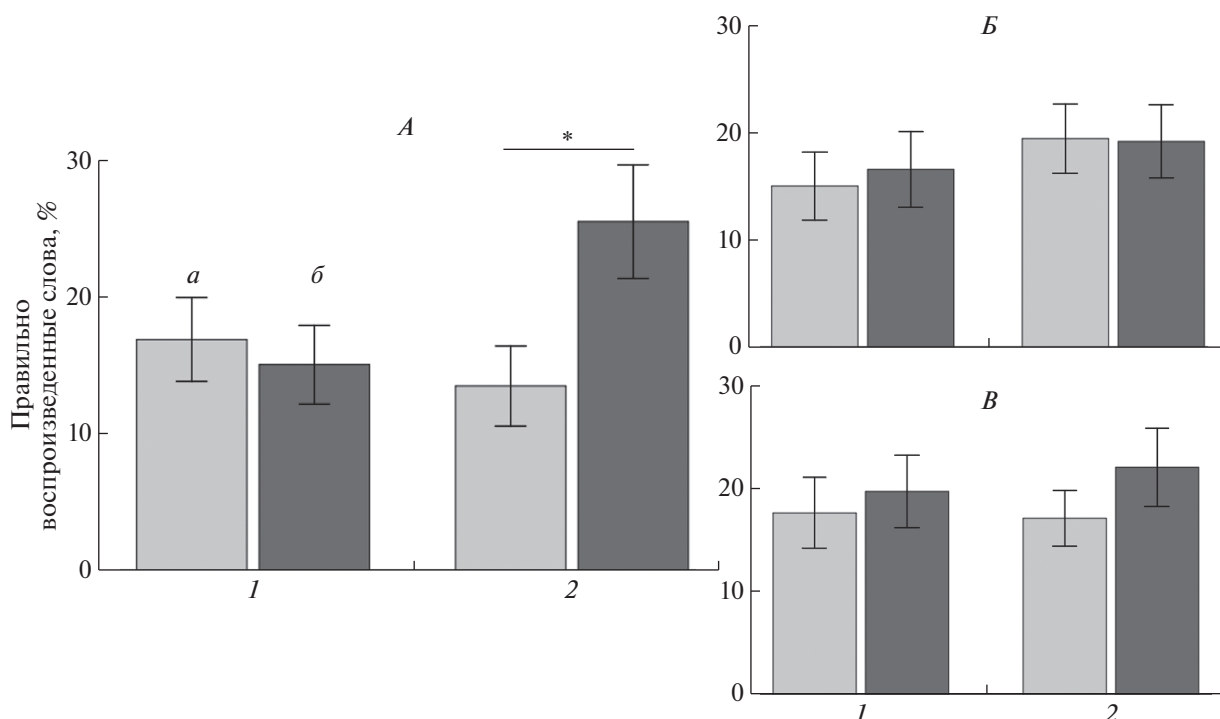


Рис. 2. Влияние факторов ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ и СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА на воспроизведение испытуемыми новых слов при разных типах стимуляции.

А – ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция (рТМС) первичной моторной коры головного мозга (ГМ), *Б* – плацебо-протокол, *В* – рТМС срединной теменной области коры ГМ. На графиках отражен процент правильно воспроизведенных слов и ошибка среднего. * – уровень статистической значимости различий <0.05 после введения поправки на множественные сравнения. *а* – первый день, *б* – второй день; *1* – высокоамплитудные движения рукой, *2* – низкоамплитудные движения пальцем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Не было обнаружено эффекта ГРУППЫ СТИМУЛЯЦИИ в отношении точности воспроизведения слов ни в первый ($F(1(2, 93) = 0.262, p = 0.770, \eta^2 = 0.006$; $F(2(2, 45) = 0.302, p = 0.74, \eta^2 = 0.013$), ни во второй день ($F(1(2, 93) = 0.319, p = 0.727, \eta^2 = 0.007$; $F(2(2, 45) = 0.714, p = 0.495, \eta^2 = 0.031$). Однако дисперсионный анализ с учетом дня воспроизведения позволил выявить близкий к значимому эффект взаимодействия факторов ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ $\times$ СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА $\times$ ГРУППА СТИМУЛЯЦИИ со средней величиной эффекта ($F(1(2, 93) = 2.639, p = 0.077, \eta^2 = 0.054$; $F(2(2, 45) = 3.077, p = 0.056, \eta^2 = 0.120$). Анализ данного взаимодействия на уровне групп стимуляции позволил обнаружить значимое взаимодействие факторов ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ $\times$ СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА только в группе рТМС первичной моторной коры ($F(1(1, 31) = 5.799, p = 0.022, \eta^2 = 0.158$; $F(2(1, 15) = 7.451, p = 0.016, \eta^2 = 0.332$). Апостериорный анализ показал, что слова, выученные при выполнении низкоамплитудных движений руки, во второй день вспоминаются лучше, чем в первый ($t(31) = -2.973, p = 0.012$,

$Cohen's d = 0.50$; $t(15) = -3.341, p = 0.008$, $Cohen's d = 0.83$). В обеих контрольных группах (т.е. при плацебо-стимуляции и рТМС срединной теменной области) влияние ни одного из факторов не оказалось статистически значимым – как и их взаимодействие (все $p > 0.1$). Результаты представлены на рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения роли моторной системы в речевом обучении, сопровождающемся совершением двигательной активности в различных обучающих средах, авторами настоящей статьи был создан сбалансированный экспериментальный дизайн с предъявлением стимулов в виртуальной реальности и на мониторе компьютера. В двух условиях испытуемым в ходе коротких обучающих сеансов было предложено выучить 8 слов при помощи контекстных аудиовизуальных ассоциаций; в процессе обучения испытуемым было необходимо оценить свойства изображенных объектов, выбрав нужный ответ посредством совершения низкоамплитудного движения пальцами или высокоамплитудного движения руки. Эффективность усвоения новых слов оценивалась с

помощью задания свободного воспроизведения, выполняемого испытуемыми непосредственно после обучения и на следующий день. В качестве контрольных условий использовались плацебо стимуляции и реальная стимуляция срединной теменной области ГМ.

Попарные сравнения эффективности запоминания новых слов между тремя группами ТМС в первый и во второй день не показали каких-либо значимых различий. Однако учет таких параметров, как день воспроизведения, способ моторного ответа, а также группа стимуляции позволил обнаружить эффект более успешного усвоения слов, выученных при выполнении низкоамплитудных движений пальцами. Этот эффект проявился в увеличении количества правильных ответов во второй день по сравнению с первым после рТМС первичной моторной коры — при отсутствии аналогичных эффектов в обеих контрольных группах. Данные результаты подтверждают гипотезу о значимой роли моторной системы в усвоении новой речевой информации, хотя и не позволяют конкретизировать характер ее влияния при варьировании условий обучения и способа моторного ответа. При этом важно отметить, что полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований в отношении увеличения времени выполнения двигательной задачи в процессе обучения [9] и уменьшения скорости ответа при выполнении речевой задачи, связанной с представлением телесного действия и оценки необходимости вращения руки при его выполнении непосредственно после рТМС первичной моторной коры [16].

Тот факт, что влияние рТМС первичной моторной коры проявилось именно при низкоамплитудных движениях пальцами во время обучающей сессии, может быть связан с тем, что в нашем исследовании осуществлялась стимуляция той области моторной коры ГМ (M1), которая отвечает за дифференцированные нейрональные репрезентации кисти и пальцев руки [29], в то время как представительства дистальных мышц, преимущественно участвующих в высокоамплитудных движениях всей руки, имеют другую (более дорзальную) локализацию с гораздо меньшей дифференциацией и общим объемом задействованного серого вещества [30]. Так, рТМС M1 оказывала наиболее сильное влияние именно на проксимальные низкоамплитудные движения в течение обучающей сессии, что непосредственно сказалось на качестве усвоения слов в рамках использованной нами контекстной интерактивной обучающей задачи.

Альтернативным объяснением данного результата может быть разница в скорости и доступности обратной связи при низкоамплитудных и высокоамплитудных движениях. Первичная мотор-

ная кора тесно связана с принятием решений [31] и считается восприимчивой к обратной связи [24, 32]. Кроме того, она расположена в непосредственной близости от префронтальных ассоциативных зон коры, напрямую вовлеченных в осуществление контроля над данными процессами [33]. Таким образом, нельзя исключать возможность того, что в качестве побочного эффекта применявшегося нами протокола рТМС также произошла стимуляция и этих префронтальных участков. В экспериментальной серии испытуемые в начале каждой пробы принимали решение о том, понадобится ли им выполнять низкоамплитудные или высокоамплитудные движения для ответа на вопрос. Это означает, что сама специфика экспериментального задания способствовала активации системы принятия решений в процессе научения в обоих условиях. Однако обратная связь (в виде исчезновения карточек и начала следующего задания) быстрее поступала при совершении низкоамплитудных движений, что могло создать устойчивые нейронные связи с моторной корой, проявившиеся в более успешном воспроизведении слов во второй день. Данный феномен может быть связан с новизной задачи двигательного ответа с помощью руки в ситуации взаимодействия с виртуальным агентом на мониторе компьютера и ВР-среде и, как следствие, большей вовлеченностью испытуемых в ее выполнение. Данная гипотеза находит подтверждение в исследовании *R.C.A. Barrett et al.* [34], где участники значительно медленнее манипулировали геометрическими 3D-фигурами в ВР-пространстве и на мониторе компьютера с помощью контроллера и джойстика, чем 2D-фигурами с помощью того же джойстика на мониторе компьютера. При этом анализ глазодвигательной активности показал более длительную продолжительность фиксаций в первых двух условиях [34].

Лучшее воспроизведение новых слов во второй день, чем в первый, вероятно, связано с эффектом консолидации знаний в ходе ночного сна [35]. Задания эксперимента представляли собой эксплицитное речевое научение [36], характеризующееся постепенным закреплением ассоциаций, присущим декларативной памяти [37]. Возможно, именно этим объясняется тот факт, что наиболее заметные эффекты научения проявились только на второй день.

Отдельного внимания заслуживает отсутствие значимого влияния среды обучения на усвоение речевой информации, в том числе при учете группы стимуляции, свидетельствующее об одинаково успешном обучении в обоих условиях. Эти данные противоречат результатам, ранее полученным другими исследовательскими группами и описывающим значимые различия при использовании разных сред обучения [19, 20], однако соответствуют результатам, которые мы получили в

ходе проведения пилотажного этапа исследования [25]. Вероятно, это объясняется более высокой, чем в предыдущих исследованиях, сбалансированностью двух условий в нашем эксперименте по ряду параметров: идентичности обучающих заданий, характеру двигательной активности и наличию виртуального агента. В пользу данной гипотезы говорят результаты *K. Papin* и *R. Kaplan-Rakowski* [38], показавшие большую эффективность речевого научения на мониторе компьютера с возможностью свободной навигации и звуковым сопровождением (ВР с низким уровнем погружения) — по сравнению с аналогичным нашему исследованию условием ВР с высоким уровнем погружения (ВР-очками). Авторы отмечают, что в условиях созданной ими парадигмы различия в уровнях интерактивности и погружения в двух обучающих средах были нивелированы. Другим объяснением может быть эффект новизны ВР-пространства, способствующий отвлечению внимания и, как следствие, снижению эффективности ВР до уровня обучения с использованием монитора компьютера [23]. Согласно проведенному нами опросу, опыт использования ВР среди участвовавших в эксперименте испытуемых был минимален. Однако на данном этапе эти предположения носят скорее предварительный характер, и их еще предстоит проверить в будущих исследованиях.

ВЫВОДЫ

1. В исследовании не было обнаружено достоверного влияния среды обучения (виртуальной реальности и монитора компьютера) на успешность свободного воспроизведения новых слов, усвоенных испытуемыми, прошедшими процедуру рТМС с использованием различных протоколов. Можно предположить, что при выполнении сложных лингвистических заданий двигательная и когнитивная системы обработки информации одинаково успешно функционируют в разных средах обучения при условии сбалансированности прочих параметров.

2. Продemonстрировано возможное участие первичной моторной коры в процессах речевого научения, проявившееся во влиянии рТМС данной коры ГМ на количество правильных ответов в задаче свободного воспроизведения новых слов. Интересно, что данный эффект проявился в отношении существительных, семантика которых не была связана с совершением движений, в то время как предыдущие исследования, в первую очередь, подчеркивали роль моторной коры в обработке глаголов, обозначающих телесные действия.

3. рТМС первичной моторной коры способствовала воспроизведению большего количества слов во второй день в сравнении с первым, что,

возможно, указывает на влияние данного типа стимуляции на процессы консолидации памяти.

4. Эффект рТМС проявился только для низкоамплитудных движений, совершаемых пальцами, что может быть связано как с высоким уровнем дифференциации и общим размером их репрезентации в моторной коре ГМ, так и с вовлечением данной зоны (и/или смежных зон) в механизмы принятия решений и получения обратной связи.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Этическим комитетом Санкт-Петербургского психологического общества (Санкт-Петербург) (протокол № 9 от 07.10.2021).

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 за счет гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук № 075-15-2021-355 (проект МК-2021.2021.2).

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

Вклад авторов в публикацию. Е.И. Перикова — разработка дизайна исследования, сбор и анализ полученных данных, написание текста рукописи; Е.Н. Блинова — сбор и анализ данных, координация исследования, оформление рукописи; Е.А. Андрущенко — сбор и анализ данных, координация исследования, оформление рукописи; Е.Д. Благовещенский — участие в планировании исследования, редактирование статьи; О.В. Щербакова — участие в разработке стимульного материала, редактирование статьи; Ю.Ю. Штыров — идея, разработка дизайна и координация исследования, разработка концепции статьи, редактирование статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tulving E.* Precise of Episodic Memory // *Behav. Brain Sci.* 1984. V. 7. № 2. P. 223.
2. *Barsalou L.W.* Grounded cognition // *Annu. Rev. Psychol.* 2008. V. 59. P. 617.
3. *Pulvermüller F.* Brain mechanisms linking language and action // *Nat. Rev. Neurosci.* 2005. V. 6. № 7. P. 576.
4. *Matheson H.E., Barsalou L.W.* Embodiment and Grounding in Cognitive Neuroscience / *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive*

- Neuroscience (4th ed.) // Eds. Wixted J.T., Phelps E.A., Davachi L. Wiley, 2018. P. 1.
5. Ведысова О.А., Моренова К.А., Павленко С.И. Электроэнцефалографические и вегетативные корреляты воображаемых и реальных движений ног у правшей и левшей // Физиология человека. 2022. Т. 48. № 5. С. 38.
Vedyasova O.A., Morenova K.A., Pavlenko S.I. Electroencephalographic and autonomic correlates of imaginary and real movements of legs in right-handers and left-handers // *Human Physiology*. 2022. V. 48. № 5. P. 516.
 6. Buccino G., Riggio L., Melli G. et al. Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: A combined TMS and behavioral study // *Cogn. Brain Res.* 2005. V. 24. № 3. P. 355.
 7. Taylor L.J., Zwaan R.A. Action in cognition: The case of language // *Lang. Cogn.* 2009. V. 1. № 1. P. 45.
 8. Postle N., McMahon K.L., Ashton R. et al. Action word meaning representations in cytoarchitecturally defined primary and premotor cortices // *Neuroimage*. 2008. V. 43. № 3. P. 634.
 9. Clark G.M., Barham M.P., Ware A.T. et al. Dissociable implicit sequence learning mechanisms revealed by continuous theta-burst stimulation // *Behav. Neurosci.* 2019. V. 133. № 4. P. 341.
 10. Vukovic N., Feurra M., Shpektor A. et al. Primary motor cortex functionally contributes to language comprehension: An online rTMS study // *Neuropsychologia*. 2017. V. 96. P. 222.
 11. Нарышкин А.Г., Галанин И.В., Егоров А.Ю. Управляемая нейропластичность // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 2. С. 112.
Naryshkin A.G., Galanin I.V., Egorov A.Yu. Controlled Neuroplasticity // *Human Physiology*. 2020. V. 46. № 2. P. 216.
 12. Jannati A., Oberman L.M., Rotenberg A., Pascual-Leone A. Assessing the mechanisms of brain plasticity by transcranial magnetic stimulation // *Neuropsychopharmacology*. 2023. V. 48. № 1. P. 191.
 13. Huang Y.Z., Edwards M.J., Rounis E. et al. Theta burst stimulation of the human motor cortex // *Neuron*. 2005. V. 45. № 2. P. 201.
 14. Repetto C., Colombo B., Cipresso P., Riva G. The effects of rTMS over the primary motor cortex: The link between action and language // *Neuropsychologia*. 2013. V. 51. № 1. P. 8.
 15. Murteira A., Sowman P.F., Nickels L. Does TMS disruption of the left primary motor cortex affect verb retrieval following exposure to pantomimed gestures? // *Front. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 920.
 16. Tomasino B., Fink G.R., Sparing R. et al. Action verbs and the primary motor cortex: A comparative TMS study of silent reading, frequency judgments, and motor imagery // *Neuropsychologia*. 2008. V. 46. № 7. P. 1915.
 17. Witt J.K., Kemmerer D., Linkenauer S.A., Culham J. A functional role for motor simulation in identifying tools // *Psychol. Sci.* 2010. V. 21. № 9. P. 1215.
 18. Xie Y., Chen Y., Ryder L.H. Effects of using mobile-based virtual reality on Chinese L2 students' oral proficiency // *Comput. Assist. Lang. Learn.* 2021. V. 34. № 3. P. 225.
 19. Ковалев А.И., Роголева Ю.А., Егоров С.Ю. Сравнение эффективности применения технологий виртуальной реальности с традиционными образовательными средствами // Вестник Московского университета. Сер. 14: Психология. 2019. № 4. С. 44.
Kovalev A.I., Rogoleva Yu.A., Egorov S.Yu. A Comparison of the effectiveness of learning using virtual reality and traditional educational methods // *Moscow University Psychology Bulletin*. 2019. № 4. P. 44.
 20. Legault J., Zhao J., Chi Y.A. et al. Immersive Virtual Reality as an Effective Tool for Second Language Vocabulary Learning // *Languages*. 2019. V. 4. № 1. P. 13.
 21. Repetto C., Di Natale A.F., Villani D. et al. The use of immersive 360° videos for foreign language learning: a study on usage and efficacy among high-school students // *Interact. Learn. Envir.* 2021.
<https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1863234>
 22. Alfadil M. Effectiveness of virtual reality game in foreign language vocabulary acquisition // *Computers & Education*. 2020. V. 153. P. 103893.
 23. Vázquez C., Xia L., Aikawa T., Maes P. Words in motion: Kinesthetic language learning in virtual reality / 2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies. 09-13 July, 2018. P. 272.
 24. Vukovic N., Hansen B., Lund T.E. et al. Rapid microstructural plasticity in the cortical semantic network following a short language learning session // *PLoS Biol.* 2021. V. 19. № 6. P. e3001290.
 25. Oldfield R.C. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory // *Neuropsychologia*. 1971. V. 9. № 1. P. 97.
 26. Ясюкова Л.А. Тест Амтхауэра. Диагностика структуры интеллекта. СПб.: Питер, 2007. 80 с.
 27. Перикова Е.И., Блинова Е.Н., Андрищенко Е.А. Влияние обучающей среды на имплицитное и эксплицитное научение новым словам: результаты пилотажного исследования // Сибирский психологический журн. 2022. № 85. С. 174.
Perikova E.I., Blinova E.N., Andriushchenko E.A. The Influence of the Learning Environment on Fast Mapping and Explicit Encoding of New Vocabulary: Results of a Pilot Study // *Siber. J. Psychol.* 2022. № 85. P. 174.
 28. Clark H.H. The language-as-fixed-effect fallacy: A critique of language statistics in psychological research // *J. Verbal Learning Verbal Behav.* 1973. V. 12. P. 335.
 29. Penfield W., Boldrey E. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation // *Brain J.* 1937. V. 60. № 4. P. 389.
 30. Yousry T.A., Schmid U.D., Alkadhi H. et al. Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. A new landmark // *Brain*. 1997. V. 120. Pt. 1. P. 141.
 31. Cisek P., Pastor-Bernier A. On the challenges and mechanisms of embodied decisions // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 2014. V. 369. № 1655. P. 20130479.
 32. Derosiere G., Zénon A., Alamia A., Duque J. Primary motor cortex contributes to the implementation of implicit value-based rules during motor decisions // *Neuroimage*. 2017. V. 146. P. 1115.

33. *Bhattacharjee S., Kashyap R., Abualait T. et al.* The role of primary motor cortex: more than movement execution // *J. Motor Behav.* 2021. V. 53. № 2. P. 258.
34. *Barrett R.C.A., Poe R., O'Camb J.W. et al.* Comparing virtual reality, desktop-based 3D, and 2D versions of a category learning experiment // *PLoS One.* 2022. V. 17. № 10. P. e0275119.
35. *Dumay N., Gaskell M.G.* Overnight lexical consolidation revealed by speech segmentation // *Cognition.* 2012. V. 123. № 1. P. 119.
36. *Shtyrov Y., Kirsanov A., Shcherbakova O.* Explicitly Slow, Implicitly Fast, or the Other Way Around? *Brain Mechanisms for Word Acquisition* // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 116.
37. *Васильева М.Ю., Князева В.М., Александров А.А., Штыров Ю.Ю.* Сверхбыстрое усвоение новой лексики: нейрофизиологические корреляты механизма "fast mapping" у детей и взрослых / От слова — к репрезентации. Нейрокогнитивные основы вербального научения. СПб.: Скифия-принт, 2022. С. 144.
38. *Papin K., Kaplan—Rakowski R.* A study of vocabulary learning using annotated 360° pictures // *Comput. Assist. Lang. Learn.* 2022. <https://doi.org/10.1080/09588221.2022.2068613>

Continuous Theta-Burst Stimulation of the Primary Motor Cortex Induces Specific Influence on Novel Vocabulary Acquisition in Different Learning Environments

E. I. Perikova^{a, *}, E. N. Blinova^a, E. A. Andriushchenko^a, E. D. Blagovechtchenski^{a, b},
O. V. Shcherbakova^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: e.perikova@spbu.ru*

The primary motor cortex takes part in various stages of language learning accompanied by human motor activity. However, previous studies of causal relationships between the activation of primary motor cortex and efficiency of language tasks reveal contradictory results, likely due to diverging learning environments and specific movement patterns required by different experimental designs. The goal of this research was to comprehensively investigate the effect of continuous theta-burst magnetic stimulation (cTBS) of the primary motor cortex on the acquisition of new words while modulating the learning environment and the motor response during the learning process. Following cTBS of the primary motor cortex or control conditions (sham and active control cTBS), the subjects ($n = 96$) completed a novel word learning task, which involved associating visually presented objects with spoken word forms using a virtual reality (VR) or conventional computer monitor environment. In each environment, the subjects were exposed to eight novel words embedded into questions about visual stimulus properties in order to prompt novel associations. Responses to these questions could be performed either by distal or by proximal hand movements. The outcome of the word acquisition was measured using a free recall task immediately after the training and on the next day. The results showed significant differences in the success of recalling new words immediately after the learning session and on the next day only in those subjects who received cTBS of the primary motor cortex; furthermore, this effect was specific to proximal movements in both learning environments. The results suggest that the motor cortex is directly involved in acquiring novel vocabulary during active interaction with the learning material.

Keywords: continuous theta-burst stimulation, word learning, language acquisition, language, brain, motor cortex, embodiment cognition, virtual reality.