

ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

УДК 612.825.1

**КОРТИКОСПИНАЛЬНАЯ ВОЗБУДИМОСТЬ ЧЕЛОВЕКА ПРИ
ПРЕДСТАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЙ В СОПРЯЖЕНИИ
С ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИЕЙ****Л.В. Яковлев^{1,*}, Н.В. Сыров¹, Е.Ю. Морозова¹, А.Я. Каплан^{1,2}**

¹*Кафедра физиологии человека и животных, биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119234,
г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12;*

²*Центр биоэлектрических интерфейсов, институт когнитивных нейронаук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 101000, г. Москва, Мясницкая, 13, стр. 4
e-mail: lejackovlev@gmail.com

В исследовании с участием 18 здоровых испытуемых-добровольцев изучалось влияние функциональной электростимуляции, вызывающей сгибание кисти, на кортикоспинальную возбудимость при представлении движений и в состоянии покоя. Было показано, что совместное действие функциональной электростимуляции и кинестетического представления движений приводит к увеличению амплитуд моторных ответов, вызванных одиночной транскраниальной магнитной стимуляцией. При этом в состоянии двигательного покоя данного эффекта получено не было. Поскольку изменение кортикоспинальной возбудимости на корковом уровне может влиять на процессы пластической реорганизации, необходимые для восстановления двигательных функций после инсультов и иных нейротравм, результаты данной работы имеют прямой практический потенциал. В частности, обсуждается возможность создания эффективных тренажерных комплексов для восстановления двигательных функций на базе интерфейсов мозг-компьютер, основанных на представлении движений с функциональной электростимуляцией в качестве сенсомоторной обратной связи. Проведение реабилитации с использованием таких тренажерных комплексов поможет пролить свет на механизмы двигательного восстановления, в основе которых лежат явления нейропластичности, обусловленные изменением уровня возбудимости нейронов сенсомоторных областей коры.

Ключевые слова: *транскраниальная магнитная стимуляция, представление движений, кортикоспинальная возбудимость, функциональная электростимуляция, нейрореабилитация, моторные вызванные потенциалы*

Известно, что мысленное представление движения тем или иным образом облегчает формирование двигательных координаций — по крайней мере, на корковом уровне [1]. Этот эффект в виде идеомоторных тренировок используется в тренировочном процессе в спорте и для восстановления движений в реабилитационной медицине [2–4]. Однако исследования, проводимые в данной области, показывают, что эти тренировки далеко не всегда являются эффективными для достижения спортивных или терапевтических результатов [5, 6]. В немалой степени это связано с трудностью для многих людей сохранять яркость и устойчивость мысленных образов при многократном их воспроизведении, а нередко и при самом выборе мыс-

ленного образа движения [7]. В этой связи актуальными являются поиски методик дополнительной потенциации кортикоспинальной возбудимости для повышения эффективности идеомоторных тренировок. Одним из таких подходов может быть сопряженная с представлением движения, например, правой рукой, функциональная электростимуляция (ФЭС) той же руки, приводящая к реальному движению, подобному воображаемому [8]. Основанием к такому аддитивному эффекту ментальной и физической «стимуляции» может быть и существование «зеркальных систем» нейронов, активирующихся при одном только наблюдении за движением [9], и запуск обратной афферентации от мышечных веретен и кожных рецепто-

ров при движениях, вызванных электростимуляцией [10]. Однако сама способность к мысленному воспроизведению движения, по-видимому, связана с тактильной и проприорецептивной афферентацией от представляемой конечности. Так, в одной из работ [11] было показано, что при длительном неиспользовании конечности у пациентов с параличом плечевого сплетения наблюдается снижение способности к представлению движений паретичной конечностью, вызванное именно отсутствием афферентации. Отсюда следует, что ФЭС, воздействуя на кожные и мышечные рецепторы, может повлиять также и на процесс формирования мысленного образа движения, причем как «положительным» образом (активация афферентного потока от конечности под действием ФЭС может способствовать увеличению яркости кинестетического образа движения), так и «отрицательным», мешая испытуемому сконцентрироваться на данном образе [12].

Целью настоящего исследования было проверить гипотезу о возможном взаимодействии процессов формирования мысленного образа движения руки и ФЭС той же руки на уровне нейронов сенсомоторных корковых областей, приводящей к потенциации кортикоспинальной возбудимости.

Материалы и методы

Участники исследования. В исследовании приняло участие 18 здоровых испытуемых-добровольцев, как уже участвовавших в тестированиях с представлением движений [13–15], так и не имевших такого опыта. Испытуемые, имеющие навык мысленного представления движений, участвовали в одной экспериментальной сессии продолжительностью до 3 ч. Участники, не имеющие предварительного опыта в представлении движений, обучались кинестетическому представлению движений в двух дополнительных сессиях по 40–60 мин. Протокол исследования получил одобрение, комиссии по биоэтике биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Обучение. В обучающих сессиях испытуемые должны были многократно выполнять упражнение на представление движений пальцами под контролем экспериментатора, оценивающего результативность тренинга по постепенному снижению электромиографической (ЭМГ) активности соответствующей мышцы и по устойчивой депрессии сенсомоторного ритма (десинхронизации) в центральной группе электроэнцефалографических (ЭЭГ) отведений. В конечном счете у испытуемых вырабатывался навык представления движения пальцев при

полном отсутствии их реального движения. В ходе тренировки испытуемые обучались мысленно представлять как целевое движение (сгибание кисти), используемое в экспериментальной парадигме, так и движение, представляющее собой последовательный произвольный перебор пальцами правой руки [16].

Структура экспериментальной сессии. Оценка кортикоспинальной возбудимости проводилась по амплитуде моторных вызванных потенциалов (МВП) в ЭМГ поверхностного сгибателя пальцев правой руки в ответ на транскраниальную магнитную стимуляцию (ТМС) первичной моторной коры одиночными импульсами (см. ниже). Измерения МВП проводились: а) на фоне представления движений сжатия кисти правой руки при предъявлении изображения руки на экране монитора; б) на фоне рассматривания на экране монитора невербализуемого изображения; в) то же, что а) и б), но за 2–3 с до и в течение 1 с после полного окончания движения, вызываемого ФЭС правой руки. Экспериментальные условия а) и б) были взяты для оценки базового уровня возбудимости в состоянии покоя и при представлении движений соответственно. Измерения базового уровня проводились в начале и конце экспериментальной сессии и не выявили существенной динамики амплитуды МВП в ходе исследования. Схема экспериментальной сессии представлена на рис. 1.

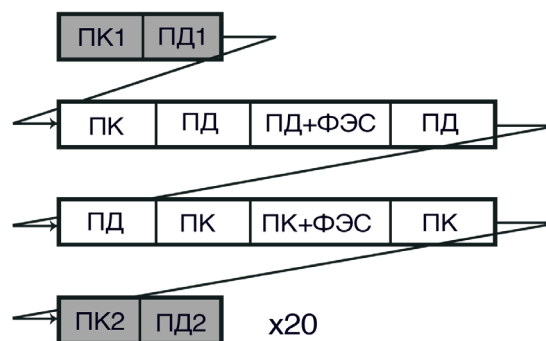


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной сессии. Каждый сегмент характеризует экспериментальное условие. ПК – состояние покоя, ПД – представление движений, ПД+ФЭС – представление движения до и после ФЭС; ПК+ФЭС состояние покоя до и после ФЭС. Индексами 1, 2 обозначены начало и конец экспериментальной сессии соответственно. Для каждого экспериментального условия $n=20$

Регистрация ЭЭГ осуществлялась в 30 отведениях (система 10/10) при помощи усилителя NVX-52 («МКС», Зеленоград) с частотой оцифровки 500 Гц. Использовались пассивные Ag/Cl-электроды, измерения производили относи-

тельно референтного электрода CP10, расположенного над мастоидным отростком левой височной кости. Контактное сопротивление для каждого из электродов не превышало 20 кОм. Сигнал фильтровался в диапазоне 0,1–60 Гц с применением фильтра-режектора сетевой наводки (50 Гц). Визуализация и регистрация ЭЭГ-сигнала, а также предъявление стимулов осуществлялись в программной среде BCI-2000 [17].

ТМС осуществлялась с использованием транскраниального магнитного стимулятора НейроМС/Д («Нейрософт», Иваново). Для оценки уровня кортикоспинальной возбудимости одиночные бифазные магнитные стимулы наносились в область левой первичной моторной коры (M1) в точку с максимальной амплитудой МВП. Стимуляция осуществлялась с интенсивностью, равной 120% относительно порога возникновения моторного ответа в состоянии покоя для поверхностного сгибателя пальцев правой руки. Определение порога возникновения моторных ответов осуществлялось индивидуально при подготовке к экспериментальной сессии.

ЭМГ регистрировалась с целью измерения амплитуды ТМС-индуцированных моторных ответов. Для регистрации одного канала ЭМГ использовалась пара поверхностных Ag/Cl-электродов («ED6», EasyCap GmbH, Германия; биполярные отведения). Таким образом производилась 2-канальная регистрация электрической активности мышц поверхностного сгибателя пальцев (FDS, *flexor digitorum superficialis*) на внутренней стороне предплечья и общего разгибателя пальцев (EDC, *extensor digitorum communis*) на внешней стороне. Контактные значения сопротивлений не превышали 5 кОм для каждого из каналов. Регистрация производилась с частотой оцифровки 10000 Гц с использованием усилителя биопотенциалов NVX52 («МКС», Зеленоград) в специализированной программной среде «Resonanse» (разработчики Нуждин Ю.О., Васильев А.Н.). При записи сигнал подвергался частотной фильтрации в диапазоне 100–1000 Гц с использованием цифрового фильтра Баттерворта 4 порядка.

ФЭС осуществлялась одноканально, с использованием токового стимулятора «Нейро-МВП» («Нейрософт», Иваново) и пары одноразовых стимулирующих клейких электродов 5x5 см, устанавливаемых на поверхности руки испытуемого в области расположения целевой мышцы (поверхностный сгибатель пальцев правой руки). Для получения функционального сокращения мышц (сжатия кисти) использовалась ритмическая стимуляция с длительностью оди-

ночного стимула 30 мкс. Длительность стимуляции составила 3 с для каждой попытки. Амплитуда и частота стимуляции подбирались индивидуально для каждого испытуемого.

Анализ данных. Перед проведением группового анализа данные обрабатывались индивидуально для каждого испытуемого. Уровень кортикоспинальной возбудимости оценивался как амплитуда МВП (пик-пик) поверхностного сгибателя пальцев, вызываемых посредством ТМС. Значения амплитуд МВП для каждого из состояний ($n=20$) были представлены в милливольтках. Индивидуальные выборки для каждого из экспериментальных условий проверялись на наличие выбросов, после чего очищенные данные проходили тесты на нормальность распределения (Шapiro-Уилка, Колмогорова-Смирнова, Андерсона-Дарлинга и Пирсона). В случае, если было пройдено ($p>0,05$) два или более тестов, распределение считалось нормальным, и для последующих сравнений применялись параметрические критерии. В противном случае для сравнения использовались непараметрические критерии. Для сравнения базового уровня амплитуд МВП при представлении движений и покое использовались парные критерии для несвязанных выборок (t -тест, тест Манна-Уитни). Для сравнения амплитуд МВП до и после ФЭС по сравнению с референтным состоянием использовались методы однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с поправкой Данна на множественные сравнения. В случае непрохождения теста на нормальность распределения у испытуемых использовался непараметрический критерий Краскела-Уоллиса.

При обработке ЭЭГ для каждого из состояний сигнал разделялся на эпохи ($n=200$) длительностью 2 с. В эпохах анализа применялось оконное преобразование Фурье со скользящим окном (ширина окна 1 с, перекрытие 90%). Индекс десинхронизации ЭЭГ рассчитывался на основании сравнения распределений спектральной плотности мощности мю-ритмики для состояний покоя и представления движений [14]. В данной работе достижение индекса десинхронизации ЭЭГ порогового уровня служило показателем выработки навыка представления движений в обучающих сессиях.

При групповом анализе значения амплитуд моторных ответов усреднялись для каждого из условий, после чего нормировались относительно референтного состояния. Сравнимые параметры выражались как изменение в долях относительно референтного состояния, принятого за единицу. При сравнении базового уровня амплитуд МВП в начале и конце эксперимента референтным состоянием был базовый уровень

амплитуды МВП в состоянии покоя в начале эксперимента. Для сравнений до и после ФЭС при представлении движений референтным состоянием было состояние покоя. Для сравнений до и после ФЭС в состоянии покоя референтным состоянием было состояние представление движений. Для сравнений базового уровня амплитуд МВП использовался дисперсионный анализ (критерий Фридмана) с поправкой Данна на множественные сравнения. Для парных сравнений «до–после» ФЭС был использован критерий Вилкоксона для несвязанных выборок. Статистический анализ производился при помощи программного пакета Prism 8 (GraphPad). Визуализация данных осуществлялась с использованием библиотеки Seaborn для языка программирования Python.

Результаты и обсуждение

При сравнении базовых уровней амплитуд МВП в начале и конце экспериментальной сессии показано наличие статистически значимых различий (критерий Фридмана, $p < 0,0001$). Парное сравнение амплитуд МВП в двух состояниях, при представлении движения и при рассмотрении невербализуемого изображения, показало, что воспроизведение движения руки в воображении приводит к существенному и статистически значимому увеличению амплитуды МВП (поправка Данна на множественные сравнения, $p < 0,0001$), вызванных ТМС моторной области коры (рис 2). При этом следует отметить, что эффект увеличения амплитуды МВП при представлении движения не зависел (поправка Данна на множественные сравнения, $p > 0,9999$) от того, в начале или в конце экспериментальной сессии производилось тестирование (рис. 2). Это свидетельствует о том, что в период проведения основного блока тестирования состояние испытуемого существенно не менялось. В настоящей работе этот эффект служил тестом на корректность воспроизведения уже известного из работ других авторов [13–15, 18, 19] феномена увеличения кортикоспинальной возбудимости на фоне мысленного воспроизведения движения. Основной целью данной работы было изучение влияния ФЭС на возбудимость при представлении движений. В первую очередь было необходимо оценить влияние ФЭС на амплитуды моторных ответов. При проведении парных сравнений (критерий Вилкоксона для связанных выборок, доверительный интервал 95%) амплитуд МВП до и после ФЭС в состоянии покоя статистически значимых различий получено не было ($p = 0,1928$). В тоже время, при проведении парных сравнений (критерий Вилкоксона для связанных выборок, дове-

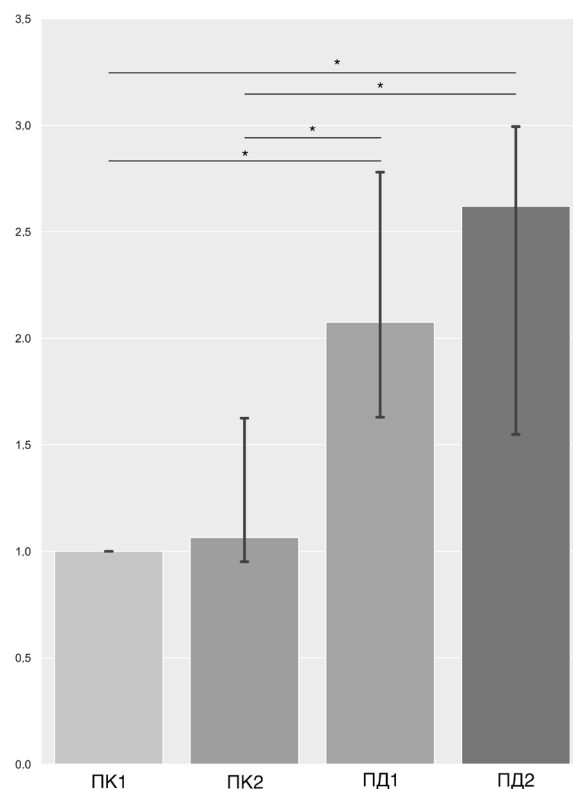


Рис. 2. Базовый уровень амплитуд МВП в покое и при представлении движений. Доли от состояния покоя (ПК1, взято за 1). ПК1, ПК2 – базовый уровень в состоянии покоя. ПД1, ПД2 – базовый уровень при представлении движений. Столбцы – медианные значения, планки погрешностей – доверительный интервал. * – критерий Фридмана с поправкой Данна на множественные сравнения, $p < 0,05$

рительный интервал 95%) до и после ФЭС на фоне представления движений были получены увеличенные ($p < 0,0001$) значения амплитуд МВП после стимуляции (рис. 3). Таким образом, можно сделать вывод о том, что представление движения совместно с ФЭС с большей эффективностью приводит к повышению кортикоспинальной возбудимости, чем изолированное воображение движения само по себе (рис. 2 и 3).

В исследовании Канеко и соавт. [8] были получены сходные результаты: чрескожная электрическая стимуляция мышц указательного пальца, сопряженная с мысленным актом представления движения, приводила к большему увеличению кортикоспинальной возбудимости, чем в каждом из условий по отдельности. Это в целом подтверждает наши данные, однако авторы указанной работы проверяли кортикоспинальную возбудимость на фоне нейро-мышечной стимуляции [8], тогда как в нашей работе возбудимость корковых нейронов оценивалась непосредственно до и после искусственной мышечной активации. Это принципиальное, на наш взгляд, методическое отличие позволило в

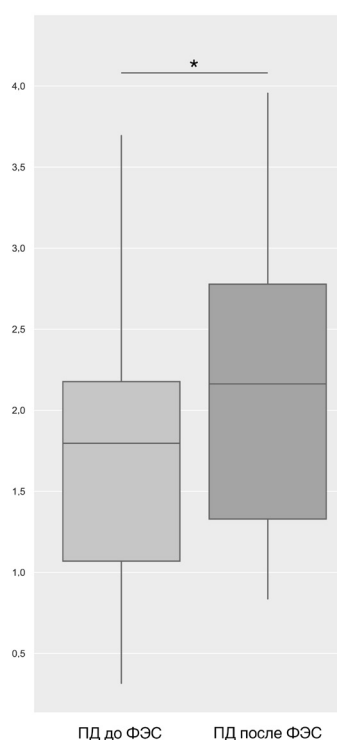


Рис. 3. Сравнение амплитуд МВП (доли от состояния покоя) при представлении движений, до и после ФЭС. Боксы — медианные значения, интерквартильный размах. Планки погрешностей — доверительный интервал. * — критерий Вилкоксона для связанных выборок, $p < 0,05$

настоящей работе установить, что аддитивное влияние представления движения и электрокожной стимуляции на возбудимость корковых нейронов формируется не за счет непосредственной периферической электрической активации эфферентно-афферентной двигательной системы, а в связи со следовыми процессами после этой стимуляции. Это обстоятельство позволяет надеяться, что многократные упражнения с представлением движения, сопряженные с предварительной электростимуляцией соответствующей конечности, могут не только усилить, но и существенно продлевать повышение состояния повышенной возбудимости

целевых корковых областей, что в свою очередь может способствовать пластическим перестройкам, способствующим процессам восстановления двигательных координаций.

Таким образом, был продемонстрирован аддитивный эффект воздействия ФЭС на кортикоспинальную возбудимость при представлении движений. В дальнейшей работе необходимо провести анализ десинхронизации мю-ритма при представлении движений, ФЭС и их совместном воздействии, а также сопоставить данные об особенностях десинхронизации с имеющимися данными об изменении уровня возбудимости сенсомоторного тракта. Кроме того, необходимо провести контрольную серию экспериментов, в рамках которой проводить ФЭС без мысленного представления движений. Несмотря на ряд вопросов, необходимых для изучения, полученные результаты позволяют рекомендовать к разработке тренажерные комплексы для восстановления движений на основе идеомоторных тренировок, в том числе и в контексте ИМК, в сопряжении с ФЭС.

Авторский коллектив выражает благодарность Ю.А. Ли за помощь в подготовке данного материала, а также А.Н. Васильеву и Ю.О. Нуждину за подготовку и техническую поддержку программного обеспечения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ЭВРИКА (грант №003/Э/03/2018).

Протокол исследования получил одобрение комиссии по биоэтике биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pfurtscheller G., Neuper C. Motor imagery activates primary sensorimotor area in humans // *Neurosci. Lett.* 1997. Vol. 239. N 2–3. P. 65–68.
2. Lotze M., Halsband U. Motor imagery // *J. Physiol. Paris.* 2006. Vol. 99. N. 4–6. P. 386–395.
3. Mizuguchi N., Nakata, H., Uchida, Y., Kanosue, K. Motor imagery and sport performance // *Jpn. J. Phys. Fit. Sport.* 2012. Vol. 1. N. 1. P. 103–111.
4. Walsh N.E., Jones L., McCabe C.S. The mechanisms and actions of motor imagery within the clinical setting // *Textbook of neuromodulation* / Eds. H. Knotkova and D. Rasche. N.Y.: Springer, 2015. P. 151–158.
5. Guerra Z.F., Lucchetti A.L.G., Lucchetti G. Motor imagery training after stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled

- trials // *J. Neurol. Phys. Ther.* 2017. Vol. 41. N 4. P. 205–214.
6. Li R.Q., Li Z.M., Tan J.Y., Chen G.L., Lin W.Y. Effects of motor imagery on walking function and balance in patients after stroke: a quantitative synthesis of randomized controlled trials // *Complement. Ther. Clin.* 2017. Vol. 28. P. 75–84.
7. Kaplan A.Ya. Neurophysiological foundations and practical realizations of the brain-machine interfaces in the technology in neurological rehabilitation // *Human Physiology.* 2016. Vol. 42. N 1. P. 103–110.
8. Kaneko F., Hayami T., Aoyama T., Kizuka T. Motor imagery and electrical stimulation reproduce corticospinal excitability at levels similar to voluntary muscle contraction // *J. Neuroeng. Rehabil.* 2014. Vol. 11. N. 1: 94.

9. Vogt S., Di Rienzo F., Collet C., Collins A., Guillot A. Multiple roles of motor imagery during action observation // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. Vol. 7: 807.
10. Reynolds C., Osuagwu B.A., Vuckovic A. Influence of motor imagination on cortical activation during functional electrical stimulation // *Clin. Neurophysiol.* 2015. Vol. 126. N 7. P. 1360–1369.
11. Kurumadani H., Yoshimura M., Fukae A., Onishi K., Hayashi J., Shinomiya R., Sunagawa T. Long-term disuse of the hand affects motor imagery ability in patients with complete brachial plexus palsy // *Neuroreport.* 2019. Vol. 30. N 6. P. 452–456.
12. Saito K., Yamaguchi T., Yoshida N., Tanabe S., Kondo K., Sugawara K. Combined effect of motor imagery and peripheral nerve electrical stimulation on the motor cortex // *Exp. Brain Res.* 2013. Vol. 227. N. 3. P. 333–342.
13. Kaplan A., Vasilyev A., Liburkina S., Yakovlev L. Poor BCI performers still could benefit from motor imagery training // *Foundations of augmented cognition: neuroergonomics and operational neuroscience.* AC 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9743 / Eds. D. Schmorrow and C. Fidopiastis. Cham: Springer, 2016. P. 46–56
14. Vasilyev A., Liburkina S., Yakovlev L., Perepelkina O., Kaplan A. Assessing motor imagery in brain-computer interface training: psychological and neurophysiological correlates // *Neuropsychologia.* 2017. Vol. 97. P. 56–65.
15. Liburkina S.P., Vasilyev A.N., Yakovlev L.V., Gordleeva S.Y., Kaplan A.Y. A motor imagery-based brain-computer interface with vibrotactile stimuli // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2018. Vol. 48. N 9. P. 1067–1077.
16. Васильев А.Н., Либуркина С.П., Каплан А.Я. Латерализация паттернов ЭЭГ у человека при представлении движений руками в интерфейсе мозг-компьютер // *Ж. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2016. Т. 66. № 3. С. 302.
17. Schalk G., McFarland D.J., Hinterberger T., Birbaumer N., Wolpaw J.R. BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system // *IEEE T. Biomed. Eng.* 2004. Vol. 51. N 6. P. 1034–1043.
18. Hashimoto R., Rothwell J.C. Dynamic changes in corticospinal excitability during motor imagery // *Exp. Brain Res.* 1999. Vol. 125. N 1. P. 75–81.
19. Mokienko O., Chervyakov A., Kulikova S., Bobrov P., Chernikova L., Frolov A., Piradov M. Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects // *Front. Comput. Neurosci.* 2013. Vol. 7: 168.

Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

После доработки 19.07.2019 г.

Принята в печать 23.07.2019 г.

RESEARCH ARTICLE

THE CORTICOSPINAL EXCITABILITY INFLUENCED BY MOTOR IMAGERY AND SIMULTANEOUS ELECTRICAL STIMULATION

L.V. Yakovlev^{1,*}, N.V. Syrov¹, E.Y. Morozova¹, A.Y. Kaplan^{1,2}

¹*Department of Human and Animal Physiology, School of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye gory 1–12, Moscow, 119234, Russia;*

²*Center for Bioelectric Interfaces, Institute for Cognitive Neuroscience, National Research University Higher School of Economics, Myasnitskaya 13–4, Moscow, 101000, Russia*

*e-mail: lejackovlev@gmail.com

18 healthy volunteers were involved and the effect of functional neuromuscular electrical stimulation, which causes flexion of the hand, on the corticospinal excitability during motor imagery and resting state was investigated in this study. It was shown that the combined action of functional electrical stimulation and the kinesthetic representation of movements leads to an increase in the amplitudes of motor evoked potentials, caused by a single-pulse transcranial magnetic stimulation. At the same time, in the state of motor rest this effect was not obtained. Since a

change in corticospinal excitability at the cortical level may affect the processes of plastic reorganization necessary for the restoration of motor functions after strokes and other neurotraumas, the results of this work have a direct practical potential. In particular, the possibility of creating effective training complexes for the restoration of motor functions based on brain-computer interfaces, based on the presentation of movements with functional neuromuscular stimulation as a sensor-motor feedback, is discussed. Rehabilitation with the use of such training complexes will help to shed light on the mechanisms of motor recovery, which are based on the phenomena of neuroplasticity, due to changes in the level of excitability of the neurons of the sensorimotor cortex.

Keywords: *transcranial magnetic stimulation, motor imagery, corticospinal excitability, functional neuromuscular stimulation, neurorehabilitation, motor evoked potentials*

Сведения об авторах

Яковлев Лев Владимирович — аспирант лаборатории нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов кафедры физиологии человека и животных биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-13-73; e-mail: lejackovev@gmail.com

Сыров Николай Владимирович — аспирант лаборатории нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов кафедры физиологии человека и животных биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-13-73; e-mail: kolascoco@gmail.com

Морозова Екатерина Юрьевна — аспирант лаборатории нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов кафедры физиологии человека и животных биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-13-73; e-mail: katerinakry@mail.ru

Каплан Александр Яковлевич — докт. биол. наук, проф. кафедры физиологии человека и животных биологического факультета МГУ, зав. лабораторией нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов. Тел.: 8-495-939-13-73; e-mail: akaplan@mail.ru