



## Транскраниальная магнитная и чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга в коррекции ходьбы у пациентов после инсульта: слепое клиническое рандомизированное исследование

Ананьев С.С.<sup>1,2,\*</sup>, Павлов Д.А.<sup>1</sup>, Якупов Р.Н.<sup>1</sup>, Голоднова В.А.<sup>1</sup>, Балыкин М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН», Санкт-Петербург, Россия

### РЕЗЮМЕ

**ВВЕДЕНИЕ.** Нарушение функции двигательной системы вследствие инсульта часто приводит к зависимости пациентов от посторонней помощи. В настоящее время в восстановлении нарушенных функций центральной нервной системы (ЦНС) широко применяется методика ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС). В последние годы появились сведения об использовании чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) в коррекции двигательных функций при нарушениях ЦНС различного генеза.

**ЦЕЛЬ.** Оценить возможность комбинированного использования транскраниальной магнитной и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга в коррекции локомоторных функций у пациентов после ишемического инсульта.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** В слепом клиническом рандомизированном исследовании приняли участие пациенты после ишемического инсульта. Участники исследования случайным образом распределены на контрольную ( $n = 12$ ) и экспериментальную ( $n = 9$ ) группы. Пациенты контрольной группы получали стандартизированные методики нейрореабилитации. Участникам экспериментальной группы предлагались стандартизированные методики нейрореабилитации, совмещенные с рТМС и ЧЭССМ. Высоочастотная рТМС проводилась в проекции сенсорно-моторной коры на стороне поражения, в области иннервации нижней конечности. ЧЭССМ проводили с использованием стимулирующего электрода на уровне Th11–Th12. Возбудимость нейронных сетей поясничного утолщения спинного мозга определяли с использованием ЧЭССМ (уровень T11–T12), с электромиографической регистрацией вызванных моторных ответов мышц нижних конечностей. Динамика неврологического дефицита оценивалась с использованием шкалы реабилитационной маршрутизации, индекса мобильности Ривермид, теста баланса Берга и шестибалльной шкалы оценки мышечной силы.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Сочетанное применение рТМС и ЧЭССМ в реабилитации пациентов в острый период после ишемического инсульта приводит к увеличению возбудимости нейронных сетей поясничного утолщения спинного мозга, снижению порогов активации мышц RF, BF, TA и GM пораженной конечности (на 7,7 мА, 18,3 мА, 24,8 мА и 14,2 мА соответственно). Включение в реабилитационный курс рТМС и ЧЭССМ приводит к достоверному улучшению показателей по шкале реабилитационной маршрутизации (на 2 балла), индекса мобильности Ривермид (на 5,8 балла), функций статокINETического контроля (баланс Берга на 12 баллов) и увеличению мышечной силы нижних конечностей (сгибателей на 5,1 балла, разгибателей на 6,2 балла).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование рТМС и ЧЭССМ может быть использовано как дополнительное воздействие в рамках реабилитационных мероприятий в острый период после ишемического инсульта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инсульт, транскраниальная магнитная стимуляция, чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, нейрореабилитация.

**Для цитирования / For citation:** Ананьев С.С., Павлов Д.А., Якупов Р.Н., Голоднова В.А., Балыкин М.В. Транскраниальная магнитная и чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга в коррекции ходьбы у пациентов после инсульта: слепое клиническое рандомизированное исследование. Вестник восстановительной медицины. 2023; 22(4):14-22. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-4-14-22> [Ananyev S.S., Pavlov D.A., Yakupov R.N., Golodnova V.A., Balykin M.V. Transcranial Magnetic and Transcutaneous Spinal Cord Electrical Stimulation a Stroke-Patients Walking Correction: Blinded Clinical Randomised Study. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2023; 22(4):14-22. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-4-14-22> (In Russ.)]

\* Для корреспонденции: Ананьев Сергей Сергеевич, E-mail: [sergananev13@gmail.com](mailto:sergananev13@gmail.com); [ananevss@infran.ru](mailto:ananevss@infran.ru)

Статья получена: 18.05.2023

Статья принята к печати: 01.08.2023

Статья опубликована: 31.08.2023

# Transcranial Magnetic and Transcutaneous Spinal Cord Electrical Stimulation a Stroke-Patients Walking Correction: Blinded Clinical Randomised Study

 Sergey S. Ananyev<sup>1,2,\*</sup>,  Denis A. Pavlov<sup>1</sup>,  Rafail N. Yakupov<sup>1</sup>,  
 Valentina A. Golodnova<sup>1</sup>,  Mikhail V. Balykin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup> Pavlov Institute of Physiology, RAS, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**INTRODUCTION.** The impairment of motor system function due to stroke often leads to patients' dependence on external assistance. The technique of rhythmic transcranial magnetic stimulation (rTMS) is now widely used in the restoration of impaired central nervous system (CNS) function. In recent years, there has been information about the use of transcutaneous electrical spinal cord stimulation (TSCS) in the correction of motor functions in CNS disorders of various genesis.

**AIM.** To evaluate the possibilities of combined use of transcranial magnetic and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in the correction of locomotor functions in patients after ischemic stroke.

**MATERIALS AND METHODS.** The conducted blind clinical randomized study involved patients who had an ischemic stroke. Study participants were randomly divided into control ( $n = 12$ ) and experimental ( $n = 9$ ) groups. Patients in the control group received standardized neurorehabilitation techniques. The participants of the experimental group were offered standardized neurorehabilitation techniques combined with rTMS and TSCS. High-frequency rTMS was performed in the projection of the sensory-motor cortex on the side of the lesion, in the area of innervation of the lower limb. During TSCS, a stimulating electrode was placed between Th11–Th12, indifferent electrodes were placed in the region of the iliac crests, and the lumbar enlargement of the spinal cord was stimulated. The dynamics of neurological deficit was assessed using the rehabilitation routing scale, the Rivermead mobility index, the Berg balance scale, and a six-point scale for assessing muscle strength. The excitability of the neural networks of the spinal cord was determined using TSCS at the T11–T12 level, with electromyographic recording of the evoked motor responses of the muscles of the lower extremities.

**RESULTS AND DISCUSSION.** The combined use of rTMS and TSCS in the rehabilitation of patients in the acute period after ischemic stroke leads to an increase in the excitability of neuronal networks of the lumbar thickening of the spinal cord, a decrease in the activation thresholds of the RF, BF, TA and GM muscles of the affected limb (by 7.7 ma, 18.3 ma, 24.8 ma and 14.2 ma, respectively). Inclusion of rTMS and TSCS in the rehabilitation course leads to a significant improvement in the rehabilitation routing scale (by 2 points), Rivermead mobility index (by 5.8 points), statokinetic control functions (balance-Berg by 12 points) and an increase in lower limb muscle strength (flexors by 5.1 points, extensors by 6.2 points).

**CONCLUSION.** The use of rTMS and TSCS can be used as an additional effect within the framework of rehabilitation measures in the acute period after ischemic stroke.

**KEYWORDS:** stroke, transcranial magnetic stimulation, transcutaneous electrical spinal cord stimulation, neurorehabilitation.

**For citation:** Ananyev S.S., Pavlov D.A., Yakupov R.N., Golodnova V.A., Balykin M.V. Transcranial Magnetic and Transcutaneous Spinal Cord Electrical Stimulation a Stroke-Patients Walking Correction: Blinded Clinical Randomised Study. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2023; 22(4):14-22. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-4-14-22> (In Russ.).

\* **For correspondence:** Sergey S. Ananyev, E-mail: [sergananev13@gmail.com](mailto:sergananev13@gmail.com); [ananevss@infran.ru](mailto:ananevss@infran.ru)

**Received:** 18.05.2023

**Accepted:** 01.08.2023

**Published:** 31.08.2023

## ВВЕДЕНИЕ

Острые нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) занимают лидирующие позиции среди причин инвалидизации населения и сопряжены с множественными нарушениями двигательных, когнитивных, сенсорных и вегетативных функций организма, которые сопровождаются ограничениями в передвижении, самообслуживании, социальной адаптации [1, 2]. Имеются сведения, что использование существующих методов восстанов-

ления после ОНМК лишь в 20 % случаев приводит к возвращению больных к трудовой деятельности [3]. В этой связи совершенствование существующих и поиск новых методик коррекции и восстановления нарушенных после инсульта функций остается актуальной проблемой реабилитационной медицины.

Методика ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС) широко используется в неврологической практике и основана на действии магнитной ин-

дукции на различные отделы головного мозга. Существует ряд работ, которые свидетельствуют о положительном влиянии магнитной стимуляции головного мозга на изменения пластичности, экспрессии генов и на нейротрофические процессы в структурах ЦНС [4, 5]. В клинической практике рТМС используется для восстановления нарушенных функций ЦНС различного генеза [6, 7].

Одной из эффективных методик нейромодуляции нейронных сетей является чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ). Использование ЧЭССМ позволяет воздействовать на нейронные сети спинного мозга и инициировать реализацию локомоторных функций [8–11]. Установлено, что ЧЭССМ позволяет активировать локомоторные функции у пациентов с травматическими повреждениями спинного мозга [12, 13]. В последние годы появились сведения об использовании, чрескожной электрической стимуляции спинного мозга в коррекции локомоторных функций в период восстановительного лечения после инсульта [14] и в реабилитации детей с церебральным параличом [15].

## ЦЕЛЬ

Оценить возможности комбинированного использования транскраниальной магнитной и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга в коррекции локомоторных функций у пациентов после ишемического инсульта.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на базе первичного сосудистого отделения ЦКМСЧ им. В.А. Егорова, г. Ульяновска, в первой половине дня, в условиях температурного комфорта, после получения методических показаний по проведению процедур и регистрации показателей. В исследовании приняли участие 21 пациент в возрасте от 43 до 72 лет, в острый период восстановления после перенесенного ишемического инсульта, подтвержденного магнитно-резонансной томографией. У всех пациентов присутствовали двигательные нарушения в виде лево- или правосторонних гемипарезов вялого типа. Критериями для включения пациентов в исследование служили: острый период восстановления, после перенесенного инсульта; наличие умеренного или выраженного гемипареза; способность к поддержанию вертикальной позы стоя; способность к передвижению с помощью вспомогательных средств (трость, катящиеся ходунки); стабильное состояние пациента; отсутствие психических расстройств или наркотической зависимости; подписание информированного согласия. Критерии исключения: противопоказания к проведению ТМС; непереносимость электрической стимуляции; наличие инвазивных стимуляторов; проявление состояний, требующих экстренной медицинской помощи; отклонения от протокола в виде пропуска двух и более сеансов ТМС и ЧЭССМ.

Согласно принципам слепого рандомизированного исследования, пациенты были поделены на 2 группы:

1. Контрольная группа включала 12 пациентов: 9 мужчин в возрасте от 43 до 72 лет и 4 женщины в возрасте от 45 до 70 лет. У 6 пациентов наблюдался левосторонний гемипарез вялого типа, у 6 пациентов — правосторонний гемипарез вялого типа. В контрольной группе применялись стандартные средства медицинской реабилитации

(медикаментозное лечение, физиотерапевтические процедуры, массаж и процедуры кинезотерапии);

2. Экспериментальная группа включала 9 пациентов: 8 мужчин в возрасте 59–67 лет и женщина 62 лет. У семи пациентов в неврологическом статусе отмечался левосторонний гемипарез вялого типа, у двух — правосторонний гемипарез вялого типа. Пациентам экспериментальной группы, наряду со стандартными методиками медицинской реабилитации, предлагался 10-дневный курс ЧЭССМ в сочетании с рТМС. Курс реабилитации включал 20 сеансов, которые проводились 2 раза в день — утром и во второй половине дня.

Реабилитационный сеанс состоял из трех последовательных этапов:

1. рТМС проводили с использованием магнитного стимулятора МС/Д («Нейрософт», Россия), с койлом в виде восьмерки (ИДУ-02-100-0). Койл накладывался в проекции первичной моторной коры головного мозга. Стимулировалась сенсорно-моторная кора в проекции иннервации ноги на контралатеральном полушарии от пораженной конечности. Пороговая интенсивность магнитного импульса, необходимая для вызова моторных ответов (ВМО) мышцы *Tibialis anterior* (TA), подбиралась перед каждой процедурой исходя из индивидуальных особенностей пациентов. Магнитная стимуляция включала в себя 1000 импульсов, с частотой 10 Гц, которые были разделены на 20 «пачек». Отдельная «пачка» включала в себя 50 импульсов продолжительностью 5 секунд каждая. Между «пачками» устанавливался 5-секундный интервал. Сила магнитной индукции при терапевтическом воздействии составляла 90 % от порога ВМО (ПВМО) мышцы TA, длительность стимуляции 3:13 минут;

2. Для ЧЭССМ использовали стимулятор спинного мозга КУЛОН (ГУАП, СПб). Для стимуляции использовали биполярные импульсы прямоугольной формы, длительностью 1 мс, которые заполнены высокочастотной составляющей в 5 кГц. Стимулирующий электрод накладывался между остистыми отростками 11-го и 12-го грудных позвонков (Th11–Th12), индифферентные электроды накладывались зеркально на кожу в области подвздошных костей. Стимуляция проводилась с частотой 5 Гц и силой тока 90 % от порога вызванного моторного ответа мышцы TA в течение 25 минут;

3. На третьем этапе, при аналогичном наложении электродов, проводилась ЧЭССМ с частотой 30 Гц и силой тока 90 % от порога вызванного моторного ответа мышцы TA в течение 25 минут.

На всем протяжении диагностических манипуляций и позже в процессе стимуляционных воздействий с терапевтической целью исследуемые располагались в исходном положении лежа с приподнятым головным концом.

Для клинической оценки степени выраженности двигательных нарушений использовались шкала реабилитационной маршрутизации (Rehabilitation routing scale), индекс мобильности Ривермид (Rivermead mobility index), тест баланса Берга (Berg Balance Test) и шестибальная шкала оценки мышечной силы (Six-point scale for evaluating muscle strength), результаты которой представлены в виде суммарной силы мышц сгибателей или разгибателей при тестировании трех суставов верхней конечности (лучезапястный, локтевой, плечевой) и нижней конечности (голеностопный, коленный, тазобе-

дренный). Обследование по клиническим шкалам проводилось до и после курса восстановительного лечения.

Для оценки возбудимости нейронных сетей поясничного утолщения спинного мозга и ВМО использовали ЧЭССМ. Для этого использовали монополярные импульсы прямоугольной формы с высокочастотной составляющей 5 кГц, при наложении стимулирующего электрода между остистыми отростками Th11–Th12. Индифферентные электроды накладывались на кожу в области подвздошных костей. Индивидуально у пациентов определяли пороги активации и амплитуду ВМО мышц нижних конечностей: бицепс бедра / Biceps femoris (BF); медиальная головка икроножной мышцы / Gastrocnemius medialis (GM); прямая головка четырехглавой мышцы бедра / Rectus femoris (RF); передняя большеберцовая мышца голени / Tibialis anterior (TA) (левой и правой ноги) с частотой стимуляции 0,3 Гц. Для регистрации ВМО использовали электронейромиограф Нейро-МВП 8 («Нейрософт», Россия). Чашечковые поверхностные биполярные электроды накладывали в проекции брюшек исследуемых мышц. Пороговая сила тока определялась у всех испытуемых для каждой мышцы индивидуально.

Для статистической обработки полученных данных использовалась программа Statistica 10.0. Данные представлены в виде среднегрупповых значений  $\pm$  стандартная ошибка. При анализе изменений неврологического дефицита до и после курса реабилитации использовалась методика непараметрического анализа по U-критерию Манна — Уитни. Характеристики электромиографической активности были обработаны с помощью однофакторного дисперсионного анализа Anova. Статистически значимыми изменениями считались при ошибке  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе предварительного обследования у пациентов выявлены двигательные нарушения, результаты которых представлены в табл. 1.

При оценке шкалы реабилитационной маршрутизации установлено, что пациенты контрольной и экспериментальной групп имели выраженные нарушения жизнедеятельности на уровне 3,9 и 4 балла соответственно. Уровень нарушения мобильности, который оценивался

по индексу Ривермид, составил 4,3 и 4,8 балла для контрольной и экспериментальной групп. Определение исходного состояния пациентов по тесту Берга свидетельствует о выраженных нарушениях равновесия и статокINETических функций в момент выполнения двигательных действий. При оценке мышечного тонуса по шестибальной шкале установлено, что у пациентов обеих групп имеются схожие исходные показатели мышечной силы пораженных конечностей (табл. 2).

В интактных конечностях сила мышц сгибателей и разгибателей в обеих группах ниже границ нормы (15 баллов). В контрольной группе при передвижении 8 из 12 пациентов использовали вспомогательные средства (трость с широким основанием, катящиеся ходунки). В экспериментальной группе вспомогательными средствами пользовались 7 из 9 пациентов. Остальные пациенты обеих групп могли передвигаться по ровной поверхности без использования дополнительных средств.

Предварительное тестирование возбудимости нейронных сетей поясничного утолщения спинного мозга и оценка ВМО свидетельствуют о выраженных различиях на стороне интактных и паретичных конечностей (табл. 3). Так, в контрольной группе пороги ВМО в мышцах RF, BF, TA и GM пораженной конечности на 8,2 мА, 15,2 мА, 27,7 мА и 28,1 мА выше, чем интактной. При тестировании пациентов экспериментальной группы установлены схожие результаты: пороги ВМО в мышцах RF, BF, TA и GM интактной конечности на 5 мА, 16,2 мА, 21,5 мА и 20,7 мА были ниже, чем в соответствующих мышцах паретичной конечности. Очевидно, эти различия связаны с изменениями центральных тормозных влияний на мотонейронные сети поясничного утолщения спинного мозга.

Результаты повторного тестирования по шкале ШПМ в контрольной группе (см. табл. 1) свидетельствуют о положительной динамике показателей, однако эти данные статистически не достоверны. При индивидуальном рассмотрении двигательных возможностей установлено, что три пациента улучшили свои способности при выполнении бытовых функций, у девяти пациентов выраженных изменений не отмечалось. Анализ динамики локомоторной активности по индексу мобильности Ривермид показал, что локомоторные функции пациентов

**Таблица 1.** Динамика клинических показателей у пациентов после ишемического инсульта (M  $\pm$  SD)

**Table 1.** Dynamics of clinical indicators in patients after ischemic stroke (M  $\pm$  SD)

| Показатели /<br>Indicators  | Контрольная группа /<br>Control Group |                | Экспериментальная группа /<br>Experimental Group |                 |
|---|---------------------------------------|----------------|--|-----------------|
|   | до / before                           | после / after  | до / before                                      | после / after   |
| Шкала маршрутизации реабилитации, балл /<br>Rehabilitation routing scale, score | 3,9 $\pm$ 0,1                         | 3,1 $\pm$ 0,3  | 4 $\pm$ 0  | 2 $\pm$ 0,4*    |
| Индекс мобильности Ривермид, балл /<br>Rivermead mobility index, score          | 4,3 $\pm$ 1,4                         | 6,3* $\pm$ 1,5 | 4,8 $\pm$ 1,7                                    | 10,6 $\pm$ 1,7* |
| Испытание на равновесие по Бергу, балл /<br>Berg Balance Test, score            | 34,6 $\pm$ 6,18                       | 40 $\pm$ 6,3   | 33,1 $\pm$ 2,3                                   | 45,1 $\pm$ 1,9* |

**Примечание:** До — до реабилитации; после — после реабилитации; \* — достоверность показателей до и после курса реабилитации ( $p < 0,05$ ).

**Note:** Before — before rehabilitation; after — after rehabilitation; \* — reliability of indicators before and after the rehabilitation course ( $p < 0.05$ ).

**Таблица 2.** Динамика показателей мышечной силы по шестибалльной шкале у пациентов после ишемического инсульта (M ± SD)

**Table 2.** Dynamics of muscle strength indicators on a six-point scale in patients after ischemic stroke (M ± SD)

| Показатели /<br>Indicators                         | Контрольная группа /<br>Control Group      |  | Экспериментальная группа /<br>Experimental Group |  |
|--|--|--|--|--|
|  | Пораженная<br>конечность /<br>Paretic limb | Здоровая<br>конечность /<br>Healthy limb | Пораженная<br>конечность /<br>Paretic limb       | Здоровая<br>конечность /<br>Healthy limb |
| Сгибатели рук /<br>Hand flexor (до / before)       | 7,2 ± 0,3                                  | 12,3 ± 0,3                               | 8,2 ± 0,2  | 12,9 ± 0,2                               |
| Сгибатели рук /<br>Hand flexor (после / after)     | 9,3 ± 0,2                                  | 13,2 ± 0,2                               | 9,6 ± 0,3  | 13,2 ± 0,2                               |
| Разгибатели рук /<br>Hand extensor (до / before)   | 7,5 ± 0,3                                  | 13,5 ± 0,4                               | 8,4 ± 0,4  | 13,2 ± 0,3                               |
| Разгибатели рук /<br>Hand extensor (после / after) | 9,9 ± 0,4                                  | 13,5 ± 0,5                               | 10,1 ± 0,5                                       | 13,2 ± 0,2                               |
| Сгибатели ног /<br>Leg flexors (до / before)       | 7,8 ± 0,4                                  | 12,1 ± 0,4                               | 7,5 ± 0,3  | 13,8 ± 0,2                               |
| Сгибатели ног /<br>Leg flexors (после / after)     | 9,9 ± 0,6                                  | 14,1 ± 0,3                               | 12,6 ± 0,4*                                      | 14,1 ± 0,1                               |
| Разгибатели ног /<br>Leg extensors (до / before)   | 8,1 ± 0,4                                  | 12,2 ± 0,5                               | 7,3 ± 0,7  | 14,4 ± 0,2                               |
| Разгибатели ног /<br>Leg extensors (после / after) | 10,5 ± 0,5                                 | 14,1 ± 0,3                               | 13,5 ± 0,2*                                      | 14,1 ± 0,2                               |

**Примечание:** До — до реабилитации; после — после реабилитации; \* — достоверность показателей до и после курса реабилитации ( $p < 0,05$ ).

**Note:** Before — before rehabilitation; after — after rehabilitation; \* — reliability of indicators before and after the rehabilitation course ( $p < 0.05$ ).

контрольной группы достоверно улучшились в среднем на 2 балла. Положительная динамика статокинетических функций и функции равновесия после стандартного курса реабилитации подтверждает, что пациенты стали более устойчивы при поддержании позы стоя, при совершении простых двигательных действий (пересаживание со стула на стул), однако остаются ограничены в выполнении специфических действий (подъем предмета с пола, удержание позы стоя с закрытыми глазами и подъем на степ платформу), о чем свидетельствует рост показателей по тесту Берга на 5,4 балла. При оценке мышечной силы (см. табл. 2) у пациентов контрольной группы отмечается тенденция к увеличению силовых характеристик рук и ног (сгибание, разгибание) пораженных конечностей. При этом отмечается и улучшение силовых характеристик здоровых конечностей. Установлено, что у пациентов контрольной группы после курса реабилитации пороги ВМО не меняются в пораженных и здоровой конечностях (см. табл. 3).

В результате проведения тестирований по неврологическим шкалам и тестам (см. табл. 1) было установлено, что в отличие от пациентов контрольной группы у пациентов экспериментальной группы имеется выраженная положительная динамика показателей по шкале реабилитационной маршрутизации, изменения по которой составили 2 балла ( $p < 0,05$ ). Это подтверждается улуч-

шением способности пациентов к самообслуживанию, выполнению бытовых функций, отказ от помощи третьих лиц в различных сферах жизнедеятельности. При оценке уровня мобильности по шкале Ривермид было выявлено достоверное повышение показателя на 5,8 балла. В результате чего 6 пациентов из 7, которые использовали средства дополнительной опоры, отказались от вспомогательных средств при передвижении, значительно улучшили способность к самостоятельному передвижению, в том числе по лестнице. Тестирование статокинетических функций показало значительное улучшение показателей статического и динамического баланса. Результаты по шкале Берга увеличились на 12 баллов ( $p < 0,05$ ). Это свидетельствует об улучшении функции статического баланса при удержании позы стоя, в том числе и закрытыми глазами, и динамического баланса при совершении двигательных задач в виде разворота через плечо без потери равновесия, поднятия предмета с пола и поочередной постановки ног на степ-платформу (имитация подъема по лестнице). При оценке силовых характеристик мышц пораженных конечностей установлено (см. табл. 2), что, как и у пациентов контрольной группы, достоверных изменений показателей мышц верхней конечности не отмечается. Определение силовых показателей мышц нижних конечностей у пациентов экспериментальной группы, в отличие от аналогичных показателей пациен-

**Таблица 3.** Динамика пороговых характеристик (ma) ВМО мышц нижних конечностей при ЧЭССМ в проекции Th11–Th12 (M ± SD)**Table 3.** Dynamics of threshold characteristics (ma) MEP of the lower limbs muscles in the case of TcSCS in the projection Th11–Th12 (M ± SD)

| Показатели / Indicators  | Контрольная группа / Control Group   |                                    | Экспериментальная группа / Experimental Group |                                    |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|
|  | Пораженная конечность / Paretic limb | Здоровая конечность / Healthy limb | Пораженная конечность / Paretic limb          | Здоровая конечность / Healthy limb |
| Конечность / Limb  |                                      |                                    |   |                                    |
| Прямая головка четырехглавой мышцы бедра / Rectus femoris (до / before)      | 18,6 ± 7                             | 10,4 ± 4,5                         | 16,5 ± 3,2                                    | 11,5 ± 3,5                         |
| Прямая головка четырехглавой мышцы бедра / Rectus femoris (после / after)    | 16,6 ± 7                             | 11,3 ± 4,5                         | 8,8* ± 2,1                                    | 10,4 ± 4,5                         |
| Бицепс бедра / Biceps femoris (до / before)                                  | 45,4 ± 3,9                           | 30,2 ± 5,3                         | 45,8 ± 7,4                                    | 29,6 ± 4,3                         |
| Бицепс бедра / Biceps femoris (после / after)                                | 44,1 ± 3,8                           | 32,6 ± 5,3                         | 27,5* ± 7,2                                   | 26,4 ± 5,3                         |
| Передняя большеберцовая мышца голени / Tibialis anterior (до / before)       | 130,3 ± 6,6                          | 102,6 ± 7,2                        | 126,0 ± 6,6                                   | 104,5 ± 6,7                        |
| Передняя большеберцовая мышца голени / Tibialis anterior (после / after)     | 124,7 ± 7,2                          | 101,1 ± 7,2                        | 101,2* ± 7,7                                  | 102,6 ± 7,2                        |
| Медиальная головка икроножной мышцы / Gastrocnemius medialis (до / before)   | 124,5 ± 4,9                          | 96,4 ± 6,5                         | 121,4 ± 10,9                                  | 99,7 ± 7,8                         |
| Медиальная головка икроножной мышцы / Gastrocnemius medialis (после / after) | 121,1 ± 4,8                          | 98,6 ± 6,5                         | 107,2 ± 12,7                                  | 96,4 ± 6,5                         |

**Примечание:** До — до реабилитации; после — после реабилитации; \* — достоверность показателей до и после курса реабилитации ( $p < 0,05$ ).

**Note:** Before — before rehabilitation; after — after rehabilitation; \* — reliability of indicators before and after the rehabilitation course ( $p < 0.05$ ).

тов контрольной группы, указывает на их выраженное увеличение. Так, сила мышц сгибателей ног увеличилась на 5,1, а мышц разгибателей — на 6,2 балла ( $p < 0,05$ ). Результаты исследования возбудимости нейронных сетей поясничного утолщения показали (см. табл. 3), что курс комбинированной ЧЭССМ и рТМС значительно повышает возбудимость нейронных сетей поясничного утолщения спинного мозга. Об этом свидетельствует достоверное снижение порогов ВМО мышц пораженных конечностей RF, BF и TA на 7,7 мА, 18,3 мА и 24,8 мА соответственно. В отличие от результатов, отмеченных у пациентов контрольной группы, в экспериментальной группе пороговые величины ВМО пораженной нижней конечности достигли пороговых значений мышц здоровой нижней конечности.

Таким образом, проведенное исследование показало, что включение в курс реабилитации комбинированной ЧЭССМ и рТМС (экспериментальная группа) приводит к выраженному улучшению жизнедеятельности, увеличению мобильности, улучшению функций баланса, повышению возбудимости двигательных нейронных сетей спинного мозга и увеличению силы мышц в острый период инсульта.

Существуют многочисленные сведения об использовании рТМС пораженной моторной коры у пациентов при реабилитации двигательных функций после острых нарушений церебрального кровообращения [16–18]. Было показано, что эффективность применения рТМС в реабилитации пациентов после инсульта снижается по мере увеличения сроков после перенесенного нарушения мозгового кровообращения [19]. В работе Bestmann et al. [20, 21] продемонстрировано, что рТМС не только влияет на свойства нейронов стимулируемой области, но и модулирует активность удаленных и взаимосвязанных центров двигательного контроля. Возможный механизм, лежащий в основе этого явления, заключается в активации пластических процессов и увеличении функциональных связей между стимулируемой областью и транссинаптической модуляцией активности удаленных двигательных областей, включая нейронные сети спинного мозга [22]. Проведенные нами исследования показали, что курс рТМС повышает возбудимость моторных сетей поясничного утолщения, о чем свидетельствует снижение порогов ВМО в мышцах пораженных конечностей. В этой связи можно полагать, что курсовое использование рТМС способствует формированию новых и актива-

ции сохранных супраспинальных связей, что является одной из причин повышения возбудимости нейронных сетей поясничного утолщения и снижения порогов ВМО всех исследуемых мышц нижних конечностей.

Особенностью метода коррекции двигательных функций пациентов в период восстановительного лечения после ишемического инсульта явилось комбинированное использование рТМС и ЧЭССМ. Используемые в проведенном исследовании параметры ЧЭССМ активируют моторные входы двигательных нейронных сетей поясничного утолщения и инициируют рефлекторные локомоторные ответы мышц нижних конечностей [8]. В ранее проведенном нами исследовании было установлено, что использование ЧЭССМ способствует повышению возбудимости нейронных сетей и локомоторных центров спинного мозга, улучшению двигательных функций при нарушениях центрального генеза, сопряженных с ишемическим инсультом [14]. Применение ЧЭССМ при травматических повреждениях спинного мозга показало возможности метода в восстановлении произвольных движений, удержании позы и локомоторной активности [12, 13, 23, 24]. В экспериментальных исследованиях на животных было показано, что при активации локомоторных центров спинного мозга сигналы передаются в мозжечок, который в свою очередь имеет связь с нейронами, дающими начало четырем основным двигательным путям, через которые головной мозг управляет работой спинного мозга [25]. Исходя из этого можно полагать, что стимуляция нейронных сетей и локомоторных центров поясничного отдела активирует не только спинальные двигательные рефлекторные ответы в пораженных мышцах нижних конечностей, но инициирует сенсорно-моторные входы и передачу возбуждения в центральные отделы нервной системы. Исходя из этого, включение в курс реабилитации ЧЭССМ может служить эффективным средством инициации восходящих путей и формирования пластичности нейронных сетей спинного мозга и вышерасположенных двигательных центров. Таким образом, рассмотренный методический подход комбинированного использования рТМС и ЧЭССМ предполагает направленное воздействие на центральные моторные центры, функции и связи которых нарушены в результате ишемического инсульта, активацию спинномозговых нейронных сетей и двигательных центров, инициирующих сенсорно-моторную афферентацию, формирование новых и активацию сохранных спинно-церебральных связей.

Подтверждением эффективности комбинированного использования транскраниальной магнитной и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга служат результаты тестирования пациентов контрольной и экспериментальной групп. Достоверное увеличение

силы мышц пораженной нижней конечности пациентов экспериментальной группы, по-видимому, является одной из причин улучшения дифференциации мышечных усилий и произвольных двигательных функций. После курса рТМС и ЧЭССМ у пациентов экспериментальной группы улучшилась функция равновесия и координации движений, что подтверждают литературные данные о том, что ЧЭССМ поясничного утолщения способствуют транссинаптической активации стволовых отделов регуляции равновесия и координации с последующей афферентацией в вышерасположенные центры регуляции двигательных функций, а рТМС инициирует нисходящие связи со спинальными центрами двигательного контроля. Результаты проведенного исследования показали, что у пациентов экспериментальной группы выражено улучшилась функция самостоятельной ходьбы, 6 пациентов из 7, которые использовали дополнительные средства при передвижении отказались от использования вспомогательных средств при передвижении. В контрольной группе лишь 3 человека из 8, которые использовали дополнительные средства при передвижении отказались от вспомогательных средств. В результате улучшения функций равновесия, координации, ходьбы и увеличения мышечной силы у пациентов экспериментальной группы произошло достоверное улучшение качества жизни, способность к самостоятельному передвижению, выполнению бытовых функций и возможностей самообслуживания, выраженных в большей степени, чем в контрольной группе. Требуется дальнейшее проведение исследований по оценке эффективности рТМС и ЧЭССМ на разных этапах реабилитации после ишемического инсульта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование свидетельствует, что сочетанное использование транскраниальной магнитной и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга способствует улучшению супраспинальных связей, активации пластических процессов в ЦНС, выраженному улучшению локомоторных функций. У пациентов экспериментальной группы отмечается увеличение возбудимости моторных центров пояснично-крестцового отдела спинного мозга, нервно-мышечных взаимодействий и силовых характеристик мышц нижних конечностей, улучшение статического и динамического равновесия, двигательных функций и способности к самообслуживанию. Полученные результаты указывают на возможность использования транскраниальной магнитной и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга для повышения эффективности реабилитационных мероприятий в острый период восстановительного лечения после ишемического инсульта.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Ананьев Сергей Сергеевич**, аспирант кафедры адаптивной физической культуры ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»; младший научный сотрудник лаборатории «Физиология движений» ФГБУН «Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН».

E-mail: sergananev13@gmail.com; ananevss@infran.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9757-7946>

**Павлов Денис Анатольевич**, старший преподаватель кафедры адаптивной физической культуры ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7593-7138>

**Якупов Рафаиль Наильевич**, старший преподаватель кафедры адаптивной физической культуры ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8105-6799>

**Голоднова Валентина Александровна**, аспирант кафедры и старший преподаватель кафедры адаптивной физической культуры ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0929-176X>

**Балыкин Михаил Васильевич**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой адаптивной физической культуры ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2086-4581>

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают свое авторство в соответствии с международными критериями ICMJE (все авторы внесли значительный вклад в концепцию, дизайн исследования и подготовку статьи, прочитали и одобрили окончательный вариант до публикации). Наибольший вклад распределен следующим образом: Ананьев С.С. — разработка дизайна исследования, проведение исследования, интерпретация данных, написание текста рукописи; Павлов Д.А. — проведение исследования, сбор, обработка и анализ данных клинического про-

фия; Якупов Р.Н. — сбор, обработка и анализ электромиографических данных; Голоднова В.А. — обзор публикаций по теме статьи, проведение исследования; Балыкин М.В. — разработка дизайна исследования, редакция текста рукописи.

**Источник финансирования.** Данное исследование не поддержано никакими внешними источниками финансирования.

**Конфликт интересов.** Ананьев С.С., Павлов Д.А., Якупов Р.Н., Голоднова В.А., Балыкин М.В. являются авторами патента RU 2743222 C1 от 16.02.2021 «Способ коррекции локомоторных функций человека после нарушения церебрального кровообращения ишемического генеза».

**Этическое утверждение.** Участники исследования подписывали добровольное информированное согласие. Клиническое исследование соответствует нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъекта».

**Доступ к данным.** Данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить по обоснованному запросу у корреспондирующего автора.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Sergey S. Ananyev**, Postgraduate student of the Department of Adaptive Physical Culture, Ulyanovsk State University; Junior researcher, laboratory "Physiology of movements", Pavlov Institute of Physiology, RAS.

E-mail: [sergananev13@gmail.com](mailto:sergananev13@gmail.com), [ananevss@infran.ru](mailto:ananevss@infran.ru);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9757-7946>

**Denis A. Pavlov**, Senior Lecturer, Department of Adaptive Physical Culture, Ulyanovsk State University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7593-7138>

**Rafail N. Yakupov**, Senior Lecturer, Department of Adaptive Physical Culture, Ulyanovsk State University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8105-6799>

**Valentina A. Golodnova**, Postgraduate student and Senior Lecturer, Department of Adaptive Physical Culture, Ulyanovsk State University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0929-176X>

**Mikhail V. Balykin**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Adaptive Physical Culture, Ulyanovsk State University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2086-4581>

**Author Contributions.** All authors confirm their authorship according to the international ICMJE criteria (all authors contributed significantly to the conception, study design and preparation

of the article, read and approved the final version before publication). Special contribution: Ananyev S.S. — development of research design, conducting research, interpretation of data, writing of the manuscript text; Pavlov D.A. — conducting research, collection, processing and analysis of clinical profile data; Yakupov R.N. — collection, processing and analysis of electromyographic data; Golodnova V.A. — review of publications on the topic of the article, conducting research; Balykin M.V. — development of research design, revision of the text of the manuscript.

**Funding.** This study was not supported by any external funding sources.

**Disclosure.** Ananyev S.S., Pavlov D.A., Yakupov R.N., Golodnova V.A., Balykin M.V. are the authors of the patent RU 2743222 C1 dated 16.02.2021 "Method of correction of human locomotor functions after cerebral circulation disorder of ischemic genesis".

**Ethics Approval.** Study participants signed voluntary informed consent. Clinical trials meet the standards of the Declaration of Helsinki of the World Medical Association "Ethical principles for medical research with human subjects".

**Data Access Statement.** The data that support the findings of this study are available on reasonable request from the corresponding author.

## Список литературы / References

- Huang, L., Shi, X., Zhang, N. et al. Bibliometric analysis of trends and issues in traditional medicine for stroke research: 2004–2018. *BMC complementary medicine and therapies*. 2020; 20(1): 39. <https://doi.org/10.1186/s12906-020-2832-x>
- Cengic L., Vueletic V., Karlick M. et al. Motor and cognitive impairment after stroke. *Acta Clinica Croatica*. 2011; 50: 463–467.
- Дружинина В.В., Колупаев М.А., Мельчакова А.А. и др. Патопфизиология инсульта и его лечение. *Международный студенческий научный вестник*. 2018; 4(2): 228–231. [Druzhinina V.V., Kolupaev M.A., Melchakova A.A. Pathophysiology of stroke and its treatment. *International Student Scientific Bulletin*. 2018; 4(2): 228–231. (In Russ.)]
- Chervyakov A.V., Chernyavsky A.Y., Sinitsyn D.O., Piradov M.A. Possible Mechanisms Underlying the Therapeutic Effects of Transcranial Magnetic Stimulation. *Front Hum Neurosci*. 2015; 9 (7): 303. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00303>
- Kricheldorf J., Göke K., Kiebs M., et al. Evidence of Neuroplastic Changes after Transcranial Magnetic, Electric, and Deep Brain Stimulation. *Brain Science*. 2022; 12(7): 929. <https://doi.org/10.3390/brainsci12070929>
- Rossi S., Antal A., Bestmann S., Bikson M. et al. Safety and recommendations for TMS use in healthy subjects and patient populations, with updates on training, ethical and regulatory issues: Expert Guidelines. *Clinical Neurophysiology*. 2021; 132(1): 269–306. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.10.003>



7. Lefaucheur J.-P., André-Obadia N., Antal A., et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). *Clinical Neurophysiology*. 2014; 125 (11): 2150-2206. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.05.021>
8. Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Pukhov A., Moiseev S.A. et al. Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: non-invasive tool for activation of locomotor circuitry in human. *Human Physiology*. 2012; 38 (2): 158–167. <https://doi.org/10.1134/S0362119712020065>
9. Мошонкина Т.Р., Мусиенко П.Е., Богачева И.Н. и др. Регуляция локомоторной активности при помощи эпидуральной и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга у животных и человека. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2012; 3: 129–137. [Moshonkina T.R., Musienko P.E., Bogacheva I.N. et al. Regulation of locomotor activity by epidural and percutaneous electrical stimulation of the spinal cord in animals and humans. *Ulyanovsk medico-biological journal*. 2012; 3: 129–137 (In Russ.)]
10. Якупов Р.Н., Балькин Ю.М., Котова Е.Ю. и др. Изменение силовых показателей мышц нижних конечностей при чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2015; 4: 99–103. [Yakupov R.N., Balykin Y.M., Kotova E.Y. et al. Changes in force indices of lower limb muscles during percutaneous electrical stimulation of the spinal cord. *Ulyanovsk medico-biological journal*. 2015; 4: 99–103. (In Russ.)]
11. Рощина Л.В., Маркевич В.В., Иванов С.М. и др. Влияние длительной электрической и кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга на параметры вызванных мышечных ответов человека. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2018; 2: 121–128. <https://doi.org/10.23648/UMBJ.2018.30.14055> [Roschina L.V., Markevich V.V., Ivanov S.M. et al. Effect of prolonged electrical and short-term electromagnetic stimulation of the spinal cord on the parameters of evoked human muscle responses. *Ulyanovsk medico-biological journal*. 2018; 2: 121–128. <https://doi.org/10.23648/UMBJ.2018.30.14055> (In Russ.)]
12. Gerasimenko Y.P., Lu D.C., Modaber M., Zdunowski S. et al. Noninvasive Reactivation of Motor Descending Control after Paralysis. *Journal of Neurotrauma*. 2015; 12: 1968-80. <https://doi.org/10.1089/neu.2015.4008>
13. Siu R., Brown E.H., Mesbah S. et al. Novel Noninvasive Spinal Neuromodulation Strategy Facilitates Recovery of Stepping after Motor Complete Paraplegia. *Journal of Clinical Medicin*. 2022; 11(13): 3670. <https://doi.org/10.3390/jcm11133670>
14. Balykin M.V., Yakupov R.N., Mashin V.V., Kotova E.Y. et al. The influence of non-invasive electrical stimulation of the spinal cord on the locomotor function of patients presenting with movement disorders of central genesis. *Vopr Kurortol Fizioter Lech Fiz Kult*. 2017; 94(4): 4–9. <https://doi.org/10.17116/kurort20179444-9>
15. Никитюк И.Е., Мошонкина Т.Р., Щербакова Н.А. и др. Влияние локомоторной тренировки и функциональной электромиостимуляции на постуральные функции у детей с тяжелыми формами детского церебрального паралича. *Физиология человека*. 2016; 42(3): 37–46. <https://doi.org/10.7868/S0131164616030127> [Nikityuk I.E., Moshonkina T.R., Scherbakova N.A. и др. Influence of locomotor training and functional electromyostimulation on postural functions in children with severe forms of infantile cerebral palsy. *Human Physiology*. 2016; 42(3): 37–46. <https://doi.org/10.7868/S0131164616030127> (In Russ.)]
16. Reis J., Robertson E., Krakauer J.W. et al. Can tDCS and TMS enhance motor learning and memory formation. *Brain Stimul*. 2008; 1(4) 10: 363–369. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2008.08.001>
17. Volz L.J., Rehme A.K., Michely J. et al. Shaping Early Reorganization of Neural Networks Promotes Motor Function after Stroke. *Cereb Cortex*. 2016; 26(6): 2882–2894. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw034>
18. Ackerley S.J., Stinear C.M., Barber P.A. et al. Combining theta burst stimulation with training after subcortical stroke. *Stroke*. 2010; 41(7): 1568-72. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.110.583278>
19. Talelli P., Wallace A., Dileone M. et al. Theta burst stimulation in the rehabilitation of the upper limb: a semirandomized, placebo-controlled trial in chronic stroke patients. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2012; 26(8): 976-87. <https://doi.org/10.1177/1545968312437940>
20. Bestmann S., Baudewig J., Siebner H.R. Subthreshold high-frequency TMS of human primary motor cortex modulates interconnected frontal motor areas as detected by interleaved fMRI-TMS. *Neuroimage*. 2003; 20(3): 1685-96. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.07.028>
21. Bestmann S., Baudewig J., Siebner H.R. et al. BOLD MRI responses to repetitive TMS over human dorsal premotor cortex. *Neuroimage*. 2005; 15(28) 1: 22-9. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.05.027>
22. Mori F., Codecà C., Kusayanagi H. et al. Effects of intermittent theta burst stimulation on spasticity in patients with multiple sclerosis. *European Journal of Neurology*. 2010; 17: 295–300. <https://doi.org/10.1111/j.1468-1331.2009.02806.x>
23. Sayenko D.G., Rath M., Ferguson A.R. et al. Self-Assisted Standing Enabled by Non-Invasive Spinal Stimulation after Spinal Cord Injury. *Journal of Neurotrauma*. 2019; 36 (9): 1435–1450. <https://doi.org/10.1089/neu.2018.5956>
24. Angeli C.A., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P., Harkema S.J. Altering spinal cord excitability enables voluntary movements after chronic complete paralysis in humans. *Brain*. 2014; 137(5) 4: 1394-409. <https://doi.org/10.1093/brain/awu038>
25. Orlovsky G.N., Deliagina T.G., Grillner S. *Neuronal Control of Locomotion*. Oxford University. 1999.