

ВЛИЯНИЕ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА И МЕХАНОСТИМУЛЯЦИИ МЫШЦ НОГ НА СИСТЕМНУЮ ГЕМОДИНАМИКУ ПРИ СОХРАННЫХ И НАРУШЕННЫХ СУПРАСПИНАЛЬНЫХ СВЯЗЯХ

Р.Н. Якупов* ORCID: [0000-0002-8105-6799](https://orcid.org/0000-0002-8105-6799)

Д.А. Павлов* ORCID: [0000-0001-7593-7138](https://orcid.org/0000-0001-7593-7138)

С.С. Ананьев* ORCID: [0000-0001-9757-7946](https://orcid.org/0000-0001-9757-7946)

В.А. Голоднова* ORCID: [0000-0002-0929-176X](https://orcid.org/0000-0002-0929-176X)

М.В. Балыкин* ORCID: [0000-0002-2086-4581](https://orcid.org/0000-0002-2086-4581)

*Ульяновский государственный университет
(г. Ульяновск)

Изучено влияние мультисегментарной чрескожной электростимуляции спинного мозга и механостимуляции мышц ног на системную гемодинамику у здоровых лиц с сохранными двигательными функциями и пациентов с нарушенными двигательными функциями после ишемического инсульта. Установлено, что у представителей обеих групп чрескожная электростимуляция спинного мозга не влияет на тонус вегетативных центров и показатели системной гемодинамики. Механостимуляция в сочетании с чрескожной электростимуляцией спинного мозга приводит к повышению частоты сердечных сокращений, ударного и минутного объема кровообращения у лиц с сохранными и нарушенными супраспинальными связями. Таким образом, сочетание чрескожной электростимуляции спинного мозга с механостимуляцией может использоваться для воздействия на сердечно-сосудистую систему при реабилитации пациентов с нарушениями двигательных функций после перенесенного инсульта.

Ключевые слова: чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, механостимуляция мышц ног, системная гемодинамика, ишемический инсульт, реабилитация, супраспинальные связи.

Вопрос о возможностях чрескожной электростимуляции спинного мозга (ЧЭССМ) в инициации произвольных шагательных движений активно обсуждается в последние годы в отечественной и зарубежной литературе [1–5]. Исследования, проведенные нами ранее, пока-

зали возможность вызова шагательных движений и улучшение локомоторных функций у пациентов с двигательными нарушениями после перенесенного инсульта при ЧЭССМ [6]. Цель данной работы – оценить влияние мультисегментарной ЧЭССМ, механостимуляции мышеч-

Ответственный за переписку: Якупов Рафаиль Наильевич, адрес: 432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42; e-mail: rafail89@mail.ru

Для цитирования: Якупов Р.Н., Павлов Д.А., Ананьев С.С., Голоднова В.А., Балыкин М.В. Влияние неинвазивной электростимуляции спинного мозга и механостимуляции мышц ног на системную гемодинамику при сохранных и нарушенных супраспинальных связях // Журн. мед.-биол. исследований. 2020. Т. 8, № 3. С. 319–323. DOI: 10.37482/2687-1491-Z024

ного аппарата ног и их сочетания на показатели системной гемодинамики в условиях сохраненных и нарушенных супраспинальных связей.

В исследовании приняли участие две группы испытуемых: 1) 10 добровольцев мужского пола без отклонений в состоянии здоровья (средний возраст $35,6 \pm 8,4$ лет); 2) 10 пациентов мужского пола (средний возраст $60,0 \pm 3,3$ лет) с двигательными нарушениями после перенесенного ишемического инсульта, в раннем восстановительном периоде (3–5 месяцев). Испытуемые 2-й группы имели признаки нарушения двигательных функций центрального генеза в виде парезов разной степени, которые сопровождались изменениями тонуса мышц ног. В соответствии с принципами Хельсинкской декларации, у всех испытуемых было получено информированное письменное согласие на участие в исследованиях.

Экспериментальные воздействия включали 5-минутные сеансы ЧЭССМ, механостимуляции мышц нижних конечностей и их сочетание [6]. Для вызова шагательной ритмики применялась мультисегментарная ЧЭССМ на уровне позвонков T11-T12 и L1-L2 между остистыми отростками, которая проводилась с помощью стимулятора УЛС-2С (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения) с частотами 30 и 5 Гц соответственно [5]. Механостимуляция включала выполнение пассивных шагательных движений с заданной амплитудой и частотой движения ног с помощью аппаратно-программного комплекса для ЧЭССМ и механотерапии (ООО «Косима»). Для оценки реактивности сердечно-сосудистой системы у испытуемых определялись ударный (УОК) и минутный (МОК) объем кровообращения, общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС), частота сердечных сокращений (ЧСС) с помощью реографа РГПА-6/12 («Реан-Поли», Россия), артериальное систолическое ($АД_c$) и диастолическое ($АД_d$) давление.

Статистический анализ полученных данных проводили с использованием программы Statistica 6.0. Для статистического сравнительного анализа использовались парный t -критерий Стьюдента для зависимых совокупностей при нормальном распределении число-

вых значений и непараметрический критерий Вилкоксона при условии ненормального распределения. Проверка на нормальность распределения переменных осуществлялась на основе теста Шапиро–Уилка. Статистически значимыми считались различия при $p < 0,05$.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что у здоровых испытуемых (1-я группа) при моторных ответах мышц ног, вызванных мультисегментарной ЧЭССМ в проекции T11-T12 и L1-L2 при частотах 30 и 5 Гц, значимых изменений со стороны системной гемодинамики не происходит (см. таблицу). Эти данные показывают, что режим ЧЭССМ, который является эффективным для вызова моторных ответов мышц ног, не оказывает выраженного влияния на возбудимость вегетативных центров спинного мозга, в частности – не меняет характер вегетативных тропных влияний на сердечно-сосудистую систему.

При механостимуляции отмечается статистически значимое повышение МОК при умеренном увеличении ЧСС и УОК. Очевидно, эти изменения связаны с активацией мышечных насосов во время пассивных движений, ростом венозного возврата и реализацией собственных кардиальных рефлексов (рефлекс Бейнбриджа, механизм Франка–Старлинга), обеспечивающих инотропные реакции сердца и увеличение сердечного выброса. При этом $АД_c$ и $АД_d$ практически не изменяются, что, по-видимому, связано с реактивным повышением числа функционирующих сосудов микроциркуляции и тенденцией к снижению общего периферического сопротивления.

Синхронизация ЧЭССМ и механостимуляции мышц ног усиливает этот эффект. У испытуемых статистически значимо снижается $АД_d$. При этом УОК и МОК повышаются в большей степени, чем при отдельных стимулах. Можно полагать, что на фоне пассивных движений электростимуляция нейронных сетей активирует дополнительные моторные пулы, что приводит к увеличению амплитуды и силы мышечных сокращений [7], способствует улучшению кровотока и, соответственно, венозного возврата.

Анализ полученных данных показал, что в состоянии относительного покоя средне-статистические показатели гемодинамики во 2-й группе находятся в пределах возраст-

**ИЗМЕНЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ГЕМОДИНАМИКИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА
У ЗДОРОВЫХ ЛИЦ И ПАЦИЕНТОВ С ДВИГАТЕЛЬНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ
ПОСЛЕ ПЕРЕНЕСЕННОГО ИНСУЛЬТА ($M \pm m$)**

Показатель	Контроль	ЧЭССМ	Механостимуляция	ЧЭССМ+механостимуляция
<i>Здоровые лица</i>				
АД _с , мм рт. ст.	120,5±3,5	122,3±2,3	125,7±4,2	128,8±2,5*
АД _д , мм рт. ст.	70,7±3,8	72,3±2,5	65,3±2,8	56,6±2,5*
ЧСС, уд./мин	66,3±3,7	68,5±3,2	73,3±4,3	75,2±6,6
УОК, мл	95,2±5,9	97,7±6,5	107,2±8,9*	112,5±5,7*
МОК, л/мин	6,2±0,3	6,6±0,4	7,5±0,4*	8,1±0,5*
ОПСС, дин·см/с	1101,1±59,5	1209,2±70,6	970,9±68,5	930,1±67,1*
<i>Пациенты с двигательными нарушениями</i>				
АД _с , мм рт. ст.	132,8±5,6	136,4±3,8	135,6±3,2	138,5±3,4
АД _д , мм рт. ст.	86,4±4,1	89,3±3,6	92,3±3,7	90,6±4,8
ЧСС, уд./мин	74,0±2,5	78,8±4,4	82,8±3,5*	85,9±4,7*
УОК, мл	69,1±3,5	77,6±3,3	78,8±3,1*	81,8±3,2*
МОК, л/мин	5,1±0,2	5,9±0,5	6,4±0,3*	7,0±0,4*
ОПСС, дин·см/с	1597,0±186,2	1419,0±145,9	1354,0±167,3	1253,0±116,1*

Примечание: * – различия по сравнению с контролем статистически значимы ($p \leq 0,05$).

ных норм (см. таблицу). При мультисегментарной ЧЭССМ в режиме стимуляции 30 и 5 Гц (Т11-Т12 и L1-L2) у всех пациентов были вызваны моторные ответы проксимальных и дистальных мышц в здоровых и паретичных конечностях. При этом значимых изменений со стороны основных показателей системной гемодинамики не установлено. Полученные результаты свидетельствуют, что, как и у лиц с сохраненными супраспинальными связями, используемые в исследовании режимы ЧЭССМ не оказывают существенного влияния на вегетативные центры, активность сердца и состояние периферических сосудов пациентов в ранний восстановительный период реабилитации после инсульта.

Вовлечение в работу интактных и паретичных мышц при механостимуляции приводит не только к активации проприоцептивного аппарата [8–10], но и улучшает периферическое кровообращение, способствует повышению венозного возврата на фоне компенсаторного увеличения сократительной активности сердца и изменений гемодинамики.

При сочетанном действии ЧЭССМ и механостимуляции у пациентов с двигательными нарушениями отмечается статистически значимое увеличение ЧСС и МОК, что свидетельствует о повышении роли ино- и хронотропных механизмов регуляции активности сердца. На этом фоне сравнительно высокий уровень ОПСС и изменения артериального давления, по-видимому, сопряжены с повышенным тонусом паретичных мышц ног.

Таким образом, исследование установило, что изолированная мультисегментарная ЧЭССМ не влияет на состояние вегетативных центров и не вызывает выраженных изменений гемодинамики в обеих группах. Сочетание ЧЭССМ с механостимуляцией приводит к умеренным реактивным изменениям системной гемодинамики и может использоваться для воздействия на сердечно-сосудистую систему при реабилитации пациентов с нарушениями двигательных функций после перенесенного инсульта.

Конфликт интересов. Возможность конфликта интересов отсутствует.

Список литературы

1. Minassian K., Persy I., Rattay F., Dimitrijevic M.R., Hofer C., Kern H. Posterior Root–Muscle Reflexes Elicited by Transcutaneous Stimulation of the Human Lumbosacral Cord // *Muscle Nerve*. 2007. Vol. 35, № 3. P. 327–336.
2. Roy F.D., Gibson G., Stein R.B. Effect of Percutaneous Stimulation at Different Spinal Levels on the Activation of Sensory and Motor Roots // *Exp. Brain Res.* 2012. Vol. 223, № 2. P. 281–289.
3. Городничев Р.М., Пивоварова Е.А., Пухов А., Моисеев С.А., Савохин А.А., Мошонкина Т.Р., Щербакова Н.А., Килимник В.А., Селионов В.А., Козловская И.Б., Эджертон Р., Герасименко Ю.П. Чрезкожная электрическая стимуляция спинного мозга: неинвазивный способ активации генераторов шагательных движений у человека // *Физиология человека*. 2012. Т. 38, № 2. С. 46–56.
4. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. Initiation and Modulation of Locomotor Circuitry Output with Multisite Transcutaneous Electrical Stimulation of the Spinal Cord in Noninjured Humans // *J. Neurophysiol.* 2015. Vol. 113, № 3. P. 834–842.
5. Sayenko D.G., Atkinson D.A., Floyd T.C., Gorodnichev R.M., Moshonkina T.R., Harkema S.J., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P. Effects of Paired Transcutaneous Electrical Stimulation Delivered at Single and Dual Sites over Lumbosacral Spinal Cord // *Neurosci. Lett.* 2015. Vol. 609. P. 229–234.
6. Балыкин М.В., Якупов Р.Н., Машин В.В., Котова Е.Ю., Балыкин Ю.М., Герасименко Ю.П. Влияние неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга на локомоторные функции пациентов с двигательными нарушениями центрального генеза // *Вопр. курортологии, физиотерапии и лечеб. физ. культуры*. 2017. Т. 94, № 4. С. 4–9. DOI: 10.17116/kurort20179444-9
7. Якупов Р.Н., Балыкин Ю.М., Котова Е.Ю., Балыкин М.В., Герасименко Ю.П. Изменение силовых показателей мышц нижних конечностей при чрезкожной электрической стимуляции спинного мозга // *Ульян. мед.-биол. журн.* 2015. № 4. С. 99–103.
8. Wirz M., Colombo G., Dietz V. Long Term Effects of Locomotor Training in Spinal Humans // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 2001. Vol. 71, № 1. P. 93–96.
9. Cheatwood J.L., Emerick A.J., Kartje G.L. Neuronal Plasticity and Functional Recovery After Ischemic Stroke // *Top. Stroke Rehabil.* 2008. Vol. 15, № 1. P. 42–50.
10. Dimyan M.A., Cohen L.G. Neuroplasticity in the Context of Motor Rehabilitation After Stroke // *Nat. Rev. Neurol.* 2011. Vol. 7, № 2. P. 76–81.

References

1. Minassian K., Persy I., Rattay F., Dimitrijevic M.R., Hofer C., Kern H. Posterior Root–Muscle Reflexes Elicited by Transcutaneous Stimulation of the Human Lumbosacral Cord. *Muscle Nerve*, 2007, vol. 35, no. 3, pp. 327–336.
2. Roy F.D., Gibson G., Stein R.B. Effect of Percutaneous Stimulation at Different Spinal Levels on the Activation of Sensory and Motor Roots. *Exp. Brain Res.*, 2012, vol. 223, no. 2, pp. 281–289.
3. Gorodnichev R.M., Pivovarova E.A., Pukhov A., Moiseev S.A., Savochin A.A., Moshonkina T.R., Shcherbakova N.A., Kilimnik V.A., Selionov V.A., Kozlovskaya I.B., Edgerton R., Gerasimenko Yu.P. Transcutaneous Electrical Stimulation of the Spinal Cord: A Noninvasive Tool for the Activation of Stepping Pattern Generators in Humans. *Hum. Physiol.*, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 158–167.
4. Gerasimenko Y., Gorodnichev R., Puhov A., Moshonkina T., Savochin A., Selionov V., Roy R.R., Lu D.C., Edgerton V.R. Initiation and Modulation of Locomotor Circuitry Output with Multisite Transcutaneous Electrical Stimulation of the Spinal Cord in Noninjured Humans. *J. Neurophysiol.*, 2015, vol. 113, no. 3, pp. 834–842.
5. Sayenko D.G., Atkinson D.A., Floyd T.C., Gorodnichev R.M., Moshonkina T.R., Harkema S.J., Edgerton V.R., Gerasimenko Y.P. Effects of Paired Transcutaneous Electrical Stimulation Delivered at Single and Dual Sites over Lumbosacral Spinal Cord. *Neurosci. Lett.*, 2015, vol. 609, pp. 229–234.
6. Balykin M.V., Yakupov R.N., Mashin V.V., Kotova E.Yu., Balykin Yu.M., Gerasimenko Yu.P. Vliyanie neinvazivnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga na lokomotornye funktsii patsientov s dvigatel'nymi narusheniyami tsentral'nogo geneza [The Influence of Non-Invasive Electrical Stimulation of the Spinal Cord on

the Locomotor Function of Patients Presenting with Movement Disorders of Central Genesis]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kul'tury*, 2017, vol. 94, no. 4, pp. 4–9. DOI: 10.17116/kurort20179444-9

7. Yakupov R.N., Balykin Yu.M., Kotova E.Yu., Balykin M.V., Gerasimenko Yu.P. Izmenenie silovykh pokazateley myshts nizhnikh konechnostey pri chreskozhnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga [The Change in Strength of the Muscles of the Lower Limbs in Transcutaneous Electrical Stimulation of the Spinal Cord]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*, 2015, no. 4, pp. 99–103.

8. Wirz M., Colombo G., Dietz V. Long Term Effects of Locomotor Training in Spinal Humans. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 2001, vol. 71, no. 1, pp. 93–96.

9. Cheatwood J.L., Emerick A.J., Kartje G.L. Neuronal Plasticity and Functional Recovery After Ischemic Stroke. *Top. Stroke Rehabil.*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 42–50.

10. Dimyan M.A., Cohen L.G. Neuroplasticity in the Context of Motor Rehabilitation After Stroke. *Nat. Rev. Neurol.*, 2011, vol. 7, no. 2, pp. 76–85.

DOI: 10.37482/2687-1491-Z024

*Rafail' N. Yakupov** ORCID: [0000-0002-8105-6799](https://orcid.org/0000-0002-8105-6799)

*Denis A. Pavlov** ORCID: [0000-0001-7593-7138](https://orcid.org/0000-0001-7593-7138)

*Sergey S. Anan'ev** ORCID: [0000-0001-9757-7946](https://orcid.org/0000-0001-9757-7946)

*Valentina A. Golodnova** ORCID: [0000-0002-0929-176X](https://orcid.org/0000-0002-0929-176X)

*Mikhail V. Balykin** ORCID: [0000-0002-2086-4581](https://orcid.org/0000-0002-2086-4581)

*Ulyanovsk State University
(Ulyanovsk, Russian Federation)

EFFECT OF NONINVASIVE ELECTRICAL STIMULATION OF THE SPINAL CORD AND MECHANOSTIMULATION OF LEG MUSCLES ON THE CHANGES IN SYSTEMIC HAEMODYNAMICS AT PRESERVED AND DISRUPTED SUPRASPINAL CONNECTIONS

This paper studied the effect of multi-segmental transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord and mechanical stimulation of leg muscles on systemic haemodynamics in two groups of individuals – with preserved and impaired motor functions – after ischemic stroke. It was found that in both groups the transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord did not affect the tone of the autonomic centres and systemic haemodynamics. Mechanostimulation combined with transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord increased the heart rate, stroke volume and cardiac output in subjects with preserved and disrupted supraspinal connections. Thus, the combination of transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord and mechanical stimulation can be used to influence the cardiovascular system in rehabilitation of patients with impaired motor functions after a stroke.

Keywords: *transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord, mechanostimulation of leg muscles, systemic haemodynamics, ischemic stroke, rehabilitation, supraspinal connections.*

Поступила 31.01.2020

Принята 07.05.2020

Received 31 January 2020

Accepted 7 May 2020

Corresponding author: Rafail' Yakupov, address: ul. L'va Tolstogo 42, Ulyanovsk, 432017, Russian Federation; e-mail: rafail89@mail.ru

For citation: Yakupov R.N., Pavlov D.A., Anan'ev S.S., Golodnova V.A., Balykin M.V. Effect of Noninvasive Electrical Stimulation of the Spinal Cord and Mechanostimulation of Leg Muscles on the Changes in Systemic Haemodynamics at Preserved and Disrupted Supraspinal Connections. *Journal of Medical and Biological Research*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 319–323. DOI: 10.37482/2687-1491-Z024