

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТА С ПОСЛЕДСТВИЯМИ ПОЗВОНОЧНО-СПИННОМОЗГОВОЙ ТРАВМЫ ПОСЛЕ ЭПИДУРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ, СОЧЕТАЮЩЕЙСЯ С АКТИВАЦИЕЙ ПРОПРИОРЕЦЕПТОРНОГО АППАРАТА: СЛУЧАЙ ИЗ ПРАКТИКИ

Качесова А.А.¹, Щурова Е.Н.¹, Прудникова О.Г.¹, Ерохин А.Н.², Насыров М.З.¹, Тertyshnaya M.S.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Курган, e-mail: office@rncvto.ru;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Тюмень, e-mail: tgm@tyumsmu.ru

Одним из методов реабилитации пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы является эпидуральная электростимуляция (ЭЭС). Несмотря на многообещающие потенциальные возможности этого метода в восстановлении функций, в настоящее время использование ЭЭС ограничивается недостаточными исследованиями ее эффективности у пациентов с травматической болезнью спинного мозга. Изолированная эпидуральная электростимуляция носит временный эффект. Для формирования устойчивых супраспинальных связей требуется сочетание ЭЭС с тренировкой проприоцептивной рецепции. В данной работе представлен клинический случай пациента с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. Мужчина в возрасте 35 лет с травматической болезнью спинного мозга (поздний период), последствиями перелома L₁ позвонка, нижним грубым парапарезом и нарушением функции тазовых органов. Пациенту была произведена имплантация временного эпидурального электрода на уровне поясничного утолщения спинного мозга, проведен курс электростимуляции, сочетающейся с активацией проприорецепторного аппарата. С помощью комплекса клинико-инструментальных методов исследования была тщательно проанализирована динамика состояния пациента. В ближайший и отдаленный период наблюдения регистрировалась положительная динамика в двигательной и чувствительной сферах, наблюдалось увеличение уровня независимости пациента и улучшение функции мочевого пузыря.

Ключевые слова: последствия позвоночно-спинномозговой травмы, травматическая болезнь спинного мозга, кратковременная (периодическая) эпидуральная электростимуляция, активация проприорецепторного аппарата, функциональное состояние.

EVALUATION OF THE FUNCTIONAL STATE DYNAMICS IN THE PATIENT WITH THE SPINE AND SPINAL CORD INJURY CONSEQUENCES AFTER EPIDURAL ELECTRICAL STIMULATION COMBINED WITH ACTIVATION OF THE PROPRIOCEPTOR APPARATUS: CASE REPORT

Kachesova A.A.¹, Shchurova E.N.¹, Prudnikova O.G.¹, Erokhin A.N.², Nasyrov M.Z.¹, Tertyshnaya M.S.¹

¹Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" Ministry of Health of the Russian Federation, Kurgan, e-mail: office@rncvto.ru;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Tyumen, e-mail: tgm@tyumsmu.ru

Epidural electrical stimulation (EES) is one of the methods of rehabilitation of patients with the consequences of spinal cord injury. Despite the promising potentials of this method in restoring function, currently, the application of EES is limited by insufficient research in people with traumatic spinal cord disease. There is still a need to check-up its efficiency. Isolated epidural electrical stimulation has temporal effect. The formation of stable supraspinal links requires a combination of EES with training of proprioceptive reception. This paper presents case from practice in the patient with the consequences of spine and spinal cord injury. A 35-year-old man with a traumatic disease of the spinal cord (late period), consequences of a fracture of the L₁ vertebra, coarse lower paraparesis, and dysfunction of the pelvic organs. The patient underwent implantation of temporary epidural electrodes at the level of the lumbar enlargement of the spinal cord and a course of electrical stimulation combined with activation of the proprioceptor apparatus. With the help of a complex of clinical and instrumental research methods, the dynamics of the patient's condition was carefully analyzed. In the immediate

and long-term follow-up periods, positive dynamics were recorded in the motor and sensory areas, an increase in the level of the patient's independence, and an improvement in urinary function.

Keywords: Consequences of spine and spinal cord injury, traumatic spinal cord disease, short-term (periodic) epidural electrical stimulation, activation of the proprioceptor apparatus, functional condition.

Позвоночно-спинномозговая травма почти в 100% случаев сопровождается серьезными осложнениями и инвалидностью. Ежегодно во всем мире происходит около 750 000 новых травм позвоночника [1]. В 60-80% случаев она является прерогативой лиц от 16 до 45 лет [2], и почти в 90% - мужчин [2; 3]. В отдаленный период после травмы позвоночника и спинного мозга формируется стойкий комплекс грубых функциональных и неврологических нарушений [4]. Одним из методов реабилитации данной категории пациентов является эпидуральная электростимуляция (ЭЭС). За последние несколько лет в области нейромодуляции спинного мозга были получены многообещающие результаты, которые потенциально могут обеспечить восстановление функций посредством эпидуральной электростимуляции (ЭЭС) [5]. Однако ЭЭС восстанавливает локомоцию на экспериментальных моделях повреждения спинного мозга, а у людей она менее эффективна [6]. Периодическая стимуляция не допускает блокировки проприоцептивной информации и обеспечивает надежный контроль над активностью двигательных нейронов. Это свидетельствует о важности определения протоколов стимулирования, учитывающих сохранение проприоцептивной информации [6; 7]. Несмотря на потенциальные возможности ЭЭС в восстановлении функций, в настоящее время использование ЭЭС ограничивается недостаточными исследованиями на людях с травматической болезнью спинного мозга и требует дальнейшей проверки эффективности [5]. Изолированная эпидуральная электростимуляция носит временный эффект. Для формирования устойчивых супраспинальных связей необходимо сочетание ЭЭС с тренировкой проприоцептивной рецепции.

Целью данного исследования являлся анализ динамики функционального состояния пациента с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы после курса эпидуральной электростимуляции, сочетающейся с активацией проприорецепторного аппарата.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе представлен клинический случай пациента в отдаленном периоде позвоночно-спинномозговой травмы: мужчина 35 лет с последствиями перелома L₁ позвонка, травматической болезнью спинного мозга (поздний период), нижним грубым парапарезом и нарушением функции тазовых органов. Для оценки состояния пациента использовали шкалу SCIM III (Spinal Cord Independence Measure). Анализ нейромышечного аппарата осуществлялся посредством регистрации амплитуды моторных ответов (М-ответов)

мышц нижних конечностей (цифровой электромиографической системы Viking EDX, Natus Medical Incorporated, США). Исследование силовых характеристик мышц бедра осуществляли с использованием динамометрического стенда [8]. Двигательную функцию и общее качество походки оценивали с помощью 10-метрового Walk-теста. Пациент ходил со вспомогательными средствами опоры (ходунки) с предпочтительной скоростью ходьбы по 10-метровой дорожке без какого-либо перерыва до конечной точки. Определялось время на промежуточных 6 метрах. Рассчитывалась скорость ходьбы (м/сек.).

С помощью электрического эстезиометра (термистор EPCOS Inc., Германия), производили исследование температурно-болевого чувствительности в дерматомах L₁-S₁.

Имплантиацию временного эпидурального электрода осуществляли мини-инвазивно на уровне поясничного утолщения спинного мозга. Накожный электрод располагали в проекции заинтересованной мышечной группы. Электростимуляцию проводили посредством нейромышечного стимулятора «РехаБраво» (MTR⁺ Vertriebs GmbH, Германия), в режиме Continuous (непрерывный), с длительностью импульсов 450 мкс и частотой следования 5 Гц. Силу тока подбирали индивидуально до появления парестезий и/или безболезненных сокращений группы заинтересованных мышц, продолжительность процедуры составляла 10 мин. Электростимуляцию осуществляли 2 раза в день на протяжении 10 дней. Процедуры эпидуральной стимуляции сопровождалась активацией проприорецепторного аппарата (ходьба с опорой на ходунки с произвольной, предпочтительной скоростью). Кроме того, в течение данного лечебно-реабилитационного периода проводилась лечебная физкультура (2 раза в день по 30 минут), которая включала изометрическую, корректирующую, координационную гимнастику и лечебный массаж нижних конечностей.

Проведенное исследование было одобрено комитетом по этике ФГБУ «НМИЦ ТО им. академика Г.А. Илизарова» Минздрава России и проводилось в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации с последующими изменениями. Пациент подписал информированное добровольное согласие на публикацию данных, полученных в результате исследований, без идентификации личности.

Описание случая из практики

Пациент К., 35 лет, поступил в клинику Центра (26.11.2019) с жалобами на ограничение активных движений нижних конечностей, снижение чувствительности в нижних конечностях, нарушение функции тазовых органов. В неврологическом статусе был выявлен нижний грубый парапарез, гипестезия кожи с уровня L₁ дерматома. Мочеиспускание осуществлялось путем самокатетеризации, чувство наполнения мочевого пузыря отсутствовало. Стул был нерегулярным, со слабительным. Пациент, как правило,

самостоятельно не передвигался (кресло-каталка), вертикализировался с опорой на ходунки и фиксацией нижних конечностей ортезами (тип В по ASIA).

В анамнезе пациента присутствовала автодорожная травма (в 2016 году), после которой наблюдалась потеря активных движений и чувствительности в нижних конечностях. Была выполнена декомпрессивно-стабилизирующая операция на поясничном отделе позвоночника, после которой было отмечено появление силы в мышцах бедра.

При поступлении в клинику Центра показатель независимости пациента насчитывал 60 баллов. Величина 10-метрового Walk-теста достигала 35 сек. (ходьба с опорой на ходунки) и была на 75% выше нормы (20 секунд) (рис. 1). Скорость ходьбы составляла 0,17 м/сек.

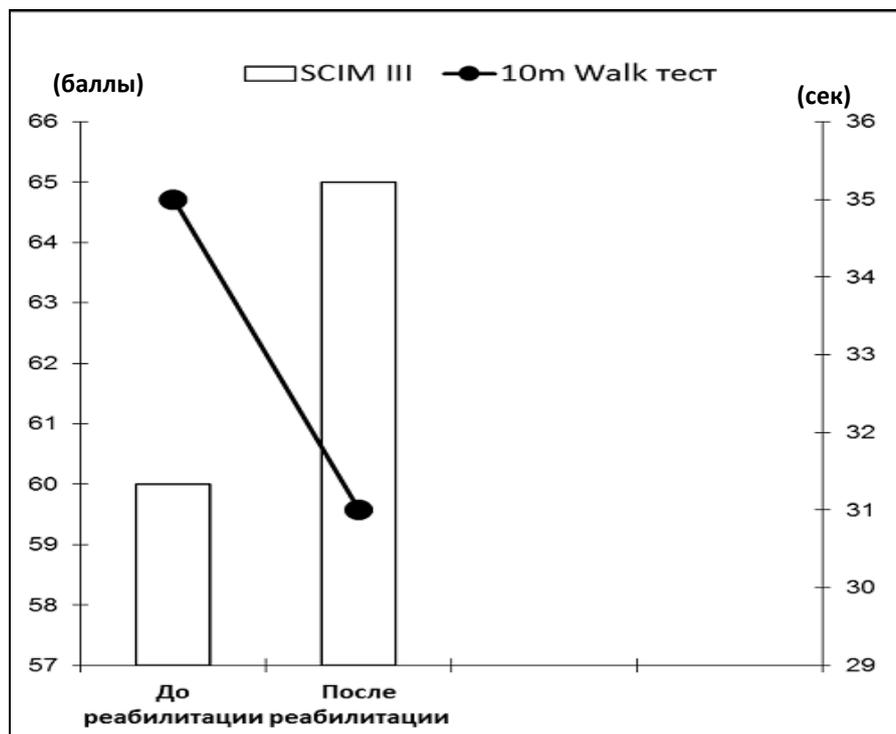


Рис. 1. Пациент К., 35 лет. Динамика показателя независимости при повреждениях спинного мозга (SCIMIII) и показателя 10-метрового Walk-теста до и после курса эпидуральной стимуляции, сочетающейся с активацией проприорецепторного аппарата (ходьба с опорой на ходунки)

Максимальные моменты силы мышц бедра были значительно снижены относительно нормы: разгибателей голени справа и слева – на 73,6% и 98,5% (норма - $186,2 \pm 5,6$ Н*м); сгибателей голени справа и слева на 98,4% (норма - $152,4 \pm 6,8$ Н*м) (рис. 2).

Исследование температурно-болевого чувствительности показало, что в области дерматомов L₁ слева, L₂ справа она была в пределах нормы (табл. 1). В дерматоме L₁ справа – тепловая чувствительность отсутствовала, порог болевой соответствовал норме. В дерматоме L₂ слева, L₃ справа - тепловая чувствительность отсутствовала. Порог боли в

дерматомах L₂ слева, L₃ справа повышен на 2, 8 градусов соответственно. В дерматомах L₃ слева, L₄ справа и слева, L₅ справа и слева, S₁ справа и слева температурно-болевая чувствительность не определялась.

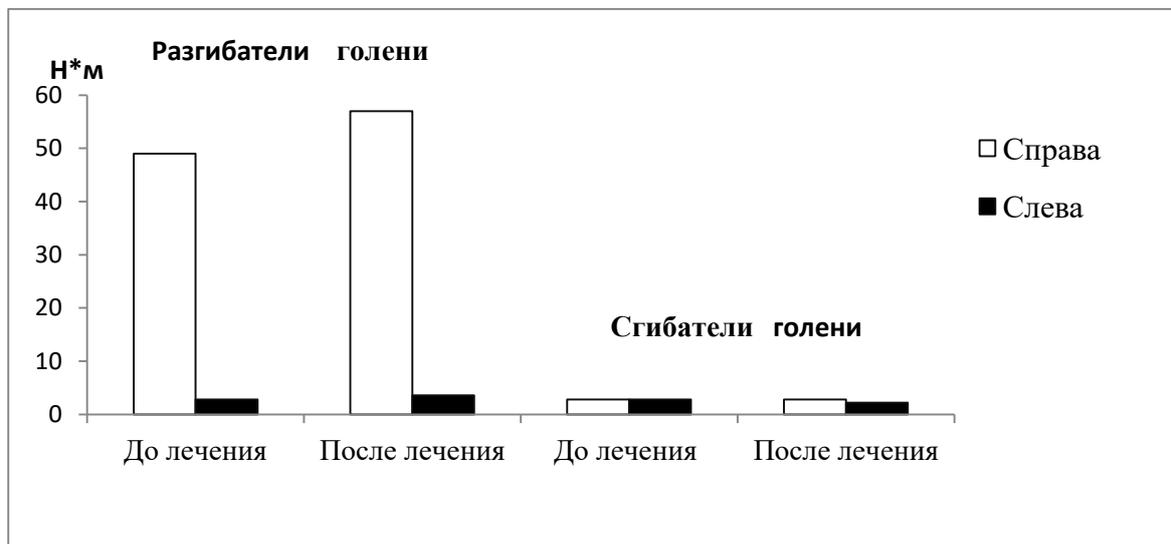


Рис. 2. Пациент К., 35 лет. Максимальные моменты силы (Н*м) разгибателей и сгибателей голени до и после реабилитационных мероприятий

Таблица 1

Показатели температурно-болевой чувствительности (град.) в дерматомах корешков конского хвоста пациента К., 35 лет, до реабилитационных мероприятий

Дерматома	Показатель температурно-болевой чувствительности (град.)								
	Контрольная группа			Справа			Слева		
	Т° кожи	Порог тепла	Порог боли	Т° кожи	Порог тепла	Порог боли	Т° кожи	Порог тепла	Порог боли
L ₁	31,1± 0,2	33,3± 0,4	42,4± 0,5	31,2	нет	40	31,4	34	40
L ₂	31,6± 0,2	33,1± 0,3	42,3± 0,2	31	31	40	31,2	нет	44
L ₃	31,7± 0,1	33,6± 0,4	41,5± 0,5	31,0	нет	50	31,0	нет	нет
L ₄	30,1± 0,3	32,3± 0,5	41,6± 0,2	30,6	нет	нет	30,8	нет	нет
L ₅	30,1± 0,2	32,2± 0,2	41,7± 0,1	31	нет	нет	31	нет	нет
S ₁	30,8± 0,4	32,5± 0,6	41,0± 0,8	29,2	нет	нет	29,2	нет	нет

Амплитуда М-ответа мышц нижних конечностей была снижена (на 26-98%) при исследовании всех обследуемых мышц нижних конечностей (табл. 2).

После комплексного обследования пациента была произведена пункционная имплантация временного эпидурального электрода на уровне поясничного утолщения

спинного мозга. Курс эпидуральной электростимуляции сочетался с активацией проприорецепторного аппарата (ходьба с опорой на ходунки с произвольной, предпочтительной скоростью).

Таблица 2

Амплитуда М-ответа мышц нижних конечностей пациента К., 35 лет, до и после реабилитационных мероприятий

Мышца (основной корешок)	Амплитуда М-ответа (мВ)									
	До реабилитационных мероприятий				После реабилитационных мероприятий					
	справа		слева		справа			слева		
	мВ	% от нормы	мВ	% от нормы	мВ	% от нормы	Прирост т (%)	мВ	% от нормы	Прирост т (%)
m. rectus fem. (L4)	13,0	62	5,7	27	15,0	71%	16	6,6	31	15
m.tibialisant. (L5)	5,3	67	5,8	74	7,3	93%	26	5,8	74	10
m.ext.dig.br. (L5)	0,4	3,8	0,2	2	0,5	5%	25	0,7	6,6	250
m.gastr. (c.lat.) (S1)	7,5	24	11,5	37	6,7	21,3%	-11	14	44	20
m.flex.dig.br. (S1)	8,7	48	6,6	36	9,4	52	8	8,6	48	30

При обследовании через 9 месяцев после курса реабилитационных мероприятий пациент отмечал увеличение силы мышц бедер, появление мышечно-суставного чувства и поверхностной чувствительности в области стоп, голеней, голеностопных суставов, гиперестезию кожи тыльной поверхности стоп, возникновение чувства наполнения мочевого пузыря. Пациент передвигается только в ходунках, инвалидным креслом не пользуется, самостоятельно водит машину. Уровень независимости пациента увеличился на 8,5% и составил 65 баллов. Показатель 10-метрового Walk-теста уменьшился на 11,4% и достиг 31 сек. (рис. 1). Скорость ходьбы составляла 0,2 м/сек., что было больше на 17,7% относительно исходного уровня. Максимальные моменты разгибателей голени справа и слева увеличились на 16,3% и 28,6% соответственно. Сила мышц сгибателей голени значительно не изменялась (рис. 2).

В этот период наблюдения также отмечалось улучшение температурно-болевого чувствительности (табл. 3), которое выражалось в восстановлении тепловой чувствительности в дерматомах L₁ справа, L₂ слева, L₃ справа и слева и болевой чувствительности - L₃ слева.

Также определялось снижение порогов болевой чувствительности на 1 градус (L₂ слева, L₃ справа). Кроме того, определялась гиперестезия болевой чувствительности в дерматоме L₁ справа и слева.

Показатели температурно-болевого чувствительности (град.) в дерматомах корешков конского хвоста пациента К., 35 лет, после реабилитационных мероприятий

Дерматома	Показатель температурно-болевого чувствительности (град.)								
	Контрольная группа			Справа			Слева		
	Т° кожи	порог тепла	порог боли	Т° кожи	порог тепла	порог боли	Т° кожи	порог тепла	порог боли
L ₁	31,1± 0,2	33,3± 0,4	42,4± 0,5	33,0	31(в)	39	33,4	33	39
L ₂	31,6± 0,2	33,1± 0,3	42,3± 0,2	33,6	30	40	33,6	35 (в)	43
L ₃	31,7± 0,1	33,6± 0,4	41,5± 0,5	33,6	39 (в)	49	33,9	47 (в)	50 (в)
L ₄	30,1± 0,3	32,3± 0,5	41,6± 0,2	33,6	нет	нет	33,6	нет	нет
L ₅	30,1± 0,2	32,2± 0,2	41,7± 0,1	33,6	нет	нет	33,6	нет	нет
S ₁	30,8± 0,4	32,5± 0,6	41,0± 0,8	30,5	нет	нет	30,3	нет	нет

Примечание: (в) - восстановление чувствительности.

Показатели амплитуды М-ответов мышц на правой и левой нижних конечностях увеличивались на 10-250% (табл. 2). Исключение составляет *m. gastrocnemius* справа, где амплитуда М-ответа уменьшилась на 11%. При осмотре пациента через 1,5 года достигнутый результат лечения сохранялся.

Результаты исследования и их обсуждение

Несмотря на большое количество фундаментальных и клинических исследований, посвященных проблемам восстановления спинного мозга после травматического повреждения, значительное улучшение функциональных результатов в популяции больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы по-прежнему отсутствует [9].

Одним из методов реабилитации данной категории пациентов является эпидуральная электростимуляция (ЭЭС). В последние годы появились публикации, в которых были описаны случаи восстановления произвольного движения ног, стояния и осуществления шаговых движений при эпидуральной стимуляции спинного мозга, сочетающейся с двигательной тренировкой у пациентов с нижней параплегией [10].

M.L. Jones et al., на выборке, состоящей из 48 пациентов с неполным повреждением спинного мозга (тип С и D по ASIA) в отдаленном периоде травматической болезни, показал эффективность терапии двигательных тренировок в сочетании с функциональной электростимуляцией [11].

В нашей работе проанализирована динамика функционального состояния пациента с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы (тип В по ASIA) после однократного курса эпидуральной электростимуляции, сочетающейся с активацией проприорецепторного аппарата. Была определена позитивная динамика, которая выражалась в увеличении показателя независимости, скорости ходьбы, силы разгибателей голени, в уменьшении величины 10-метрового Walk-теста. Также наблюдались: положительная динамика температурно-болевой чувствительности, увеличение М-ответов почти всех исследуемых мышц нижних конечностей. Появилось чувство наполнения мочевого пузыря.

В настоящее время в литературе ряд авторов утверждает, что под воздействием ЭЭС оптимизируется функциональное состояние сегментарных интернейронных ансамблей и мотонейронных пулов, что восстанавливает их эффективное взаимодействие с системой супраспинальных связей, высшими отделами ЦНС [12], обеспечивает оптимизацию состояния проприорецептивной иннервации [6].

Афферентные сигналы от нижних конечностей при стоянии и ходьбе с весовой нагрузкой в сочетании с ЭЭС синергически (усиливая совместный эффект) модулируют спинальные двигательные схемы, что может позволить произвольно контролировать мышечную активность [13]. ЭЭС стимулируют сначала средние и толстые афферентные волокна заднего корешка [14], которые могут транссинаптически активировать моторные схемы, позволяя движению адаптироваться к поступающим сенсорным сигналам при положении стоя или ходьбе с опорой на вес тела. Сенсорная информация, связанная с нагрузкой на конечности и положением тела, играет решающую роль в эффективности ЭЭС у больных с позвоночно-спинномозговой травмой [15].

Кроме того, в литературе сообщалось об улучшении деятельности сердечно-сосудистой системы, дыхательной функции, положения тела и функции мочевыведения у больных с травматической болезнью спинного мозга после ЭЭС [5]. В нашей работе наблюдалось улучшение функции мочевыделительной системы.

Заключение

Таким образом, у пациента с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы после курса эпидуральной электростимуляции, сочетающейся с активацией проприорецепторного аппарата, в ближайший и отдаленный периоды наблюдения регистрировались положительная динамика в двигательной и чувствительной сферах, увеличение уровня независимости пациента, улучшение функции мочевыделительной системы.

Список литературы

1. Kumar R., Lim J., Mekary R.A., Rattani F., Dewan V.C., Sharif S.Y., Osorio-Fonseca E., Park K.B. Traumatic spinal injury: global epidemiology and worldwide volume. *World Neurosurgery*. 2018. vol. 113. P.e345–e363. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.02.033.
2. Spinal cord injury facts and figures at a glance. *The Journal of Spinal Cord Medicine*. 2014. vol. 37. no. 1. P. 117-118. DOI: 10.1179/1079026813Z.000000000249.
3. Baidurashvili A.G., Vissarionov S.V., Belianchikov S.M., Kartavenko K.A., Solokhina I.Iu., Kozyrev A.S., Pukhov A.M., Moshonkina T.R., Gerasimenko Iu.P. Comprehensive treatment of a patient with complicated thoracic spine injury using percutaneous electrical spinal cord stimulation (case report). *Genij Ortopedii*. 2020. vol. 26 (1). P. 79-88. DOI: 10.18019/1028-4427-2020-26-1-79-88.
4. Ong B., Wilson J.R., Henzel M.K. Management of the patient with chronic spinal cord injury. *The Medical Clinics North America*. 2020. vol. 104. no. 2. P. 263-278. DOI: 10.1016/j.mcna.2019.10.006.
5. Calvert J.S., Grahn P.J., Zhao K.D., Lee K.H. Emergence of Epidural Electrical Stimulation to Facilitate Sensorimotor Network Functionality After Spinal Cord Injury. *Neuromodulation*. 2019. vol. 22. is. 3. P. 244-252. DOI: 10.1111/ner.12938.
6. Formento E., Minassian K., Wagner F., Mignardot J.B., Goff-Mignardot C.G.L., Rowald A., Bloch J., Micera S., Capogrosso M., Courtine G. Electrical spinal cord stimulation must preserve proprioception to enable locomotion in humans with spinal cord injury. *Nature Neuroscience*. 2018. vol. 21. no. 12. P. 1728–1741. DOI: 10.1038/s41593-018-0262-6.
7. Shah P.K., Lavrov I.A. Spinal epidural stimulation strategies: clinical implications of locomotor studies in spinal rats. *The Neuroscientist*. 2017. vol. 23. no. 6. P. 664–680. DOI: 10.1177/1073858417699554.
8. Shchurov V.A., Dolganova T.I., Dolganov D.V. Femoral Muscle Dynamometer. *Biomedical Engineering*. 2014. vol. 48. no. 1. P. 30-32. DOI: 10.1007/s10527-014-9410-9.
9. Dietz V., Fouad K. Restoration of sensorimotor functions after spinal cord injury. *Brain*. 2014. vol. 137. pt. 3. P. 654–667. DOI: 10.1093/brain/awt262.
10. Gill M.L., Grahn P.J., Calvert J.S., Linde M., Lavrov I.A., Strommen J.A., Beck L.A., Sayenko D.G., Van Straaten M.G., Drubach D.I., Veith D.D., Thoreson A.R., Lopez C., Gerasimenko Yu.P., Edgerton V.R., Lee K.H., Zhao K.D. Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia. *Nature Medicine*. 2018. vol. 24. no. 11. P. 1677–1682. DOI: 10.1038/s41591-018-0175-7.
11. Jones M.L., Evans N., Tefertiller C., Backus D., Sweatman M., Tansey K., Morrison S. Activity-based therapy for recovery of walking in chronic spinal cord injury: Results from a

secondary analysis to determine responsiveness to therapy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2014. vol. 95. no. 12. P. 2247–2252. DOI: 10.1016/j.apmr.2014.07.401.

12. Taccola G., Sayenko D., Gad P., Gerasimenko Y., Edgerton V.R. And yet it moves: Recovery of volitional control after spinal cord injury. *Progress in Neurobiology*. 2018. vol. 160. P. 64–81. DOI: 10.1016/j.pneurobio.2017.10.004.

13. Rejc E., Angeli C., Harkema S. Effects of lumbosacral spinal cord epidural stimulation for standing after chronic complete paralysis in humans. *Public Library of Science One*. 2015. vol. 10. no. 7. P. 1–20. DOI: 10.1371/journal.pone.0133998.

14. Capogrosso M., Wenger N., Raspopovic S., Musienko P., Beuparlant J., Bassi Luciani L., Courtine G., Micera S. A computational model for epidural electrical stimulation of spinal sensorimotor circuits. *The Journal Neuroscience*. 2013. vol. 33. no. 49. P. 19326–19340. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1688-13.2013.

15. Harkema S.J., Hurley S.L., Patel U.K., Requejo P.S., Dobkin B.H., Edgerton V.R. Human lumbosacral spinal cord interprets loading during stepping. *The Journal Neurophysiology*. 1997. vol. 77. no. 2. P. 797–811. DOI: 10.1152/jn.1997.77.2.797.