

Улучшение функционального состояния пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы при эпидуральной электростимуляции: проспективное исследование

Щурова Е.Н.* Прудникова О.Г., Качесова А.А., Сайфутдинов М.С.,
 Тертышная М.С.

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, Курган, Россия

РЕЗЮМЕ

ВВЕДЕНИЕ. Эпидуральная электрическая стимуляция (ЭЭС), по данным литературы, обладает большим потенциалом для улучшения проводимости поврежденного спинного мозга и активизации компенсаторных механизмов нейронных связей. Однако использование ЭЭС при лечении пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы ограничивается вследствие отсутствия убедительных доказательств терапевтического эффекта.

ЦЕЛЬ. Оценить влияние комплексной реабилитации с использованием ЭЭС и активации проприоцептивного аппарата на показатели функционального состояния пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы при частичном повреждении спинного мозга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Проспективное исследование включало 29 пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы с частичным повреждением спинного мозга. Катанез составил $3,7 \pm 0,5$ года (1,5–8 лет). Распределение по уровню повреждения позвоночника: шейный отдел — 11 случаев, грудной — 9, груднопоясничный — 9. Тип неврологических нарушений по ASIA: тип В определялся у 23 пациентов, тип С — у 6. Комплексная реабилитация включала ЭЭС по имплантируемому электроду и локомоторные тренировки по активации проприоцептивной рецепции. Производился анализ неврологического (шкала ASIA) и функционального (шкала CSIM III) статуса пациента. Двигательную функцию исследовали с помощью 10-метрового Walk-теста. С помощью электромиографии оценивали М-ответы мышц конечностей, эстезиометрии — температурно-болевою чувствительность.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Выявлено увеличение силы мышц и М-ответов мышц конечностей, нормализация индекса моторного дефицита, уменьшение времени Walk-теста, увеличение скорости передвижения и показателя независимости пациента, что свидетельствует об улучшении функциональных возможностей двигательной сферы пациентов. Отмечается улучшение тактильной, механической болевой и температурно-болевой чувствительности на уровне травмы и в дерматомах, расположенных дистально. Эффект снижается в дерматомах, удаленных от уровня установки эпидурального электрода, но с увеличением количества курсов проявляет тенденцию к повышению.

ОБСУЖДЕНИЕ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данный комплекс реабилитации, включающий ЭЭС, оказывает положительное влияние на функционирование как двигательной, так и чувствительной сфер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование ЭЭС и активации проприоцептивного аппарата улучшает функциональное состояние сенсорной сферы при отдаленных последствиях позвоночно-спинномозговой травмы с частичным повреждением спинного мозга. Количество курсов реабилитации сопряжено с кумулятивным эффектом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отдаленные последствия позвоночно-спинномозговой травмы, травматическая болезнь спинного мозга, функциональное состояние, временная эпидуральная электростимуляция, активация проприоцептивного аппарата.

Для цитирования / For citation: Щурова Е.Н., Прудникова О.Г., Качесова А.А., Сайфутдинов М.С., Тертышная М.С. Улучшение функционального состояния пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы при эпидуральной электростимуляции: проспективное исследование. Вестник восстановительной медицины. 2023; 22(6):28-41. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41> [Shchurova E.N., Prudnikova O.G., Kachesova A.A., Saifutdinov M.S., Tertyshnaya M.S. Improvement of Functional State of Patients after Spinal Cord Injury During Epidural Electrical Stimulation: Prospective Study. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2023; 22(6):28-41. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41> (In Russ.)]

* **Для корреспонденции:** Щурова Елена Николаевна, E-mail: elena.shurova@mail.ru, office@rncvto.ru

Статья получена: 28.09.2023
Статья принята к печати: 04.12.2023
Статья опубликована: 15.12.2023

Improvement of Functional State of Patients after Spinal Cord Injury During Epidural Electrical Stimulation: Prospective Study

 Elena N. Shchurova*,  Oxana G. Prudnikova,  Anastasiia A. Kachesova,
 Marat S. Saifutdinov,  Marina S. Tertyshnaya

National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics named after academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. The use of EPS in the treatment of patients with the consequences of spinal cord injury is limited due to the lack of convincing evidence of a therapeutic effect.

AIM. To evaluate the effect of complex rehabilitation using EPS and activation of the proprioceptive apparatus on the indicators of the functional state of patients with long-term consequences of spinal cord injury with partial spinal cord injury.

MATERIALS AND METHODS. A prospective study was conducted with the participation of 29 patients with long-term consequences of spinal cord injury with partial spinal cord injury. The catamnesis of the disease was 3.7 ± 0.5 years. Comprehensive rehabilitation included epidural electrical stimulation by implantable electrode and activation of the proprioceptive apparatus. The neurological (ASIA scale) and functional (CSIM III scale) status of the patient was analyzed. Motor function was evaluated using 10-meter Walk test; M-responses of limb muscles — using electromyography, temperature and pain sensitivity — using esthesiometry.

RESULTS. An increase in muscle strength and M-response of the muscles of the extremities, normalization of the motor deficit index, reduction of the walking test time, increase in movement speed and the patient's independence index were revealed. There is an improvement in temperature and pain sensitivity at the level of damage and in the dermatomes located distally. The effect decreases in dermatomes far from the level of the electrode installation; but with increase in the number of courses the effect increases.

DISCUSSION. The results obtained indicate that this rehabilitation complex, including UES, has a positive effect on the functioning of both the motor and sensitive spheres.

CONCLUSION. Application of EES and activation of the proprioceptive apparatus improves the functional condition of sensorimotor sphere in the long-term consequences of spinal cord injury with partial spinal cord damage. Repeated rehabilitation courses have cumulative effect.

KEYWORDS: long-term consequences of spinal cord injury, traumatic disease of the spinal cord, functional condition, temporary epidural electrical stimulation, activation of the proprioceptive apparatus.

For citation: Shchurova E.N., Prudnikova O.G., Kachesova A.A., Saifutdinov M.S., Tertyshnaya M.S. Improvement of Functional State of Patients after Spinal Cord Injury During Epidural Electrical Stimulation: Prospective Study. Bulletin of Rehabilitation Medicine. 2023; 22(6):28-41. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2023-22-6-28-41> (In Russ.).

* **For correspondence:** Elena N. Shchurova, E-mail: elena.shurova@mail.ru, office@rncvto.ru

Received: 28.09.2023

Accepted: 04.12.2023

Published: 15.12.2023

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелая позвоночно-спинномозговая травма приводит к необратимым изменениям двигательных, чувствительных и вегетативных функций, формируя серьезные изменения функционального состояния пациентов [1, 2]. В отдаленный период после травмы восстановление проводимости спинного мозга затрудняется сформированными морфофункциональными изменениями на уровне повреждения с клиническими проявлениями грубых неврологических и функциональных нарушений. Несмотря на наличие фундаментальных прикладных и клинических исследований, отсутствует как единая концепция реабилитации, так и тенденция к эффективному улучшению функциональных результатов у таких пациентов [3].

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 в перспективе могут обеспечить восстановление функций посредством ЭЭС [4–6]. Несмотря на потенциальные возможности ЭЭС, ее ис-

пользование ограничивается недостаточным опытом применения у пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы и анализом ее эффективности [4, 5]. Наиболее оптимальным уровнем стимуляции определен конус спинного мозга с локализованным там центром двигательной активности [7, 8]. Изолированное применение ЭЭС дает временный эффект. Для формирования устойчивых супраспинальных связей необходимо ее сочетание данного метода реабилитации с тренировкой проприоцепции [9, 10].

Кроме того, проблемой оценки исходного функционального статуса и результатов лечения и реабилитации является отсутствие шкал и опросников, чувствительных для данной категории больных. Применение инструментальных методов исследований позволит верифицировать даже минимальные изменения функциональных нарушений и проводить более точный анализ используемых методов реабилитации [3].

ЦЕЛЬ

Оценить влияние комплексной реабилитации с использованием ЭЭС и активации проприоцептивного

аппарата на показатели функционального состояния пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы при частичном повреждении спинного мозга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании принимали участие 29 пациентов в возрасте 18–61 (35,3 ± 0,5) года. Преобладали мужчины: 26 : 3. Все пациенты имели длительный катамнез: 3,7 ± 0,5 (1,5–8) года. Распределение по уровню повреждения позвоночника было следующим: шейный отдел — 11 случаев, грудной — 9, грудопоясничный (Th12–L1) — 9. Тип неврологических нарушений по шкале ASIA соответствовал частичному повреждению спинного мозга: тип В — 23 пациента, тип С — 6. В неврологическом статусе диагностированы тетрапарез ($n = 2$), верхний парапарез и нижняя параплегия ($n = 9$), нижний парапарез ($n = 18$). Степень выраженности двигательных нарушений варьировала от грубой до умеренной. Сенсорные нарушения проявлялись в виде снижения тактильной, болевой и проприоцептивной чувствительности ниже уровня повреждения. У всех пациентов диагностированы нарушения функции тазовых органов по центральному типу. Функциональные возможности пациентов были значительно снижены: передвижение на кресле ($n = 11$), использование ортезов нижних конечностей и вспомогательных средств опоры (ходунки) ($n = 18$).

Определить виды применяемых ранее методов реабилитации не представлялось возможным, поскольку каждый пациент получал лечение как на базе лечебных учреждений, так и самостоятельно.

Курс комплексной реабилитации включал ЭЭС по имплантируемому электроду с локомоторными тренировками, направленными на активизацию проприоцептивной чувствительности. Имплантацию электрода проводили пункционно под рентгенологическим контролем в проекции центра двигательной активности конуса спинного мозга, при травме шейного отдела позвоночника дополнительно устанавливали электрод в проекции очага повреждения. 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, продолжительность процедуры составляла 10 минут. Электростимуляцию осуществляли 2 раза в день на протяжении 10 дней. ЭЭС проводилась курсами: 2 тестовых курса с интервалом в 3–4 месяца, при наличии критериев эффективности — повторные 3 курса с интервалом в 6 месяцев. Для формирования устойчивых супраспинальных связей и длительного эффекта ЭЭС ее сочетали с тренировками проприоцептивной чувствительности через механизмы обратной связи. Для этого в комплекс лечения включены вертикализаторы, роботизированные тренажеры и тренировки по отработке ходьбы. В зависимости от функционального состояния пациент во время ЭЭС либо вертикализировался с опорой на вес тела (тетрапарез, верхний парапарез, нижняя параплегия), либо ходил с помощью динамического параподиума, экзоскелета

(нижняя параплегия, нижний грубый парапарез) или передвигался с опорой на ходунки с произвольной скоростью (нижний легкий, умеренный, грубый парапарез).

Критериями оценки были: шкала ASIA, функциональный статус: шкала Spinal Cord Independence Measure (CSIM III), 10-метровый Walk-тест, электромиография (ЭМГ), эстезиометрия.

Методом ЭМГ с использованием цифровой системы Viking EDX (Natus Medical Incorporated, США) оценивали амплитуды моторных ответов (M-ответов) от мышц верхних и нижних конечностей: *m. deltoideus* (C5), *m. biceps br.* (C6), *m. triceps br.* (C7), *m. flex. car. rad.* (C7), *mm. thenar* (C7–Th1), *m. flex. car. uln.* (C7), *mm. hypothenar* (C8–Th1), *m. ext. digit.* (C6–7), *m. tib. anter.* (L5), *m. gastrocnem.* (S1), *m. rectus fem.* (L4), *m. ext. digit. br.* (L5), *m. flex. digit. br.* (S1). Рассчитывали индекс моторного дефицита (ИМД) [11] по формуле:

$$\text{ИМД} = \frac{1}{N} \sum_{i=N}^{i=1} \frac{A_i}{A_{\text{норма}}} \times 100\%$$

где A_i — амплитуда M-ответа i -й мышцы, нормированная по среднему значению данного параметра у здоровых испытуемых $A_{\text{норма}}$; N — количество тестируемых мышц.

Двигательную функцию исследовали с помощью 10-метрового Walk-теста. Пациенты ходили 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 м. Рассчитывалась скорость ходьбы (м/с).

Температурно-болевою чувствительность оценивали с помощью электрического эстезиометра (термистор фирмы EPCOS Inc., Германия). Определяли температуру кожи в исследуемой области, порог тепловой и болевой (от горячего) чувствительности (в градусах).

Пациентов обследовали при первичном поступлении, перед каждым новым курсом (1, 2, 3-м курсом) и после него. Была обследована группа здоровых добровольцев (32 субъективно здоровых испытуемых в возрасте от 17 до 24 лет), чьи показатели были приняты за норму.

Данное исследование проводилось в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации с последующими изменениями. Всеми пациентами или их законными представителями было подписано информированное согласие на публикацию данных, полученных в результате исследований, без идентификации личности.

Статистический анализ

Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета для анализа данных Microsoft Excel 2010 с надстройкой Attestat. Нормальность распределения данных проверялась с помощью критерия Шапиро — Уилка и Колмогорова — Смирнова. При нормальном типе распределений данные представлены в виде средних значений (M) и стандартной

ошибки (m), в остальных случаях в виде медианы (Me), первого ($Q1$) и третьего ($Q3$) квартилей. Значимость изменений, соответственно, оценивалась с помощью t -критерия Стьюдента и непараметрических критериев: знаковых рангов Вилкоксона для связанных выборок и U -критерия Манна — Уитни для несвязанных выборок. Критический уровень значимости при проверке статистических результатов принимался равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После комплексных реабилитационных мероприятий клинический анализ состояния пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы показал достоверное увеличение силы мышц конечностей разной степени выраженности.

При травме шейного отдела после 1 и 2–3-го курсов комплексной реабилитации наблюдается увеличение или тенденция к увеличению клинически оцененной силы мышц верхних конечностей. В среднем по выборке в сила мышц плеча справа статистически достоверно возрастала на 10 % ($p = 0,012$) после первого курса реабилитации и на 38,5 % ($p = 0,038$) после второго и третьего. На левой конечности наблюдалась тенденция к увеличению. В предплечье и кисти справа только после 2–3-й стимуляции регистрировался рост силы на 50 % ($p = 0,038$). На левой конечности отсутствовала достоверная динамика силы (рис. 1).

Ввиду того, что на нижних конечностях до начала реабилитационных мероприятий в мышцах бедра (46 % случаев) и в голени и стопах (90 %) сила мышц не регистрировалась, при исследовании динамики

функции мышц более показателен процент восстановления силы мышц. После 1-го курса в бедрах отсутствовала значительная динамика, после 2–3-го курса (50 % случаев) справа и слева появилась сила. Восстановление силы в голени и стопах после 1-го курса регистрировалось в 20 % случаев, после 2–3-го курса — в 40 %.

У пациентов с последствиями травм в грудном отделе до реабилитации в большинстве случаев сила мышц нижних конечностей не определялась. После первого курса ЭЭС наблюдалась положительная динамика, которая проявлялась либо в восстановлении силы (до 1–3 баллов), либо в увеличении имеющейся силы на 1–2 балла. После 2–3-й стимуляции (6 пациентов) сила в бедрах появилась в 4 случаях (справа и слева), в голени и стопах — также в 4 случаях.

При травме груднопоясничного отдела позвоночника после 1-го курса реабилитации в мышцах нижних конечностей (особенно в дистальных отделах) определялась сила мышц, первоначально не выявленная, — до 2–3 баллов, с последующим восстановлением до 3–4 баллов после 2–3-го курса лечения.

В среднем, с учетом всех уровней повреждения и стороны исследования, восстановление клинически определяемой силы мышц нижних конечностей наблюдалось после 1-го курса в 0–100 % случаев (в среднем $62,5 \pm 12,8$ %), после 2–3-го курса — в 40–100 % (в среднем $65,2 \pm 12,3$ %).

Клинический анализ изменений чувствительности производился отдельно, в зависимости от уровня повреждений. В среднем с учетом всех уровней повреждения снижение уровня нарушений чувствительности после 1-го и 2–3-го курсов реабилитации достоверно

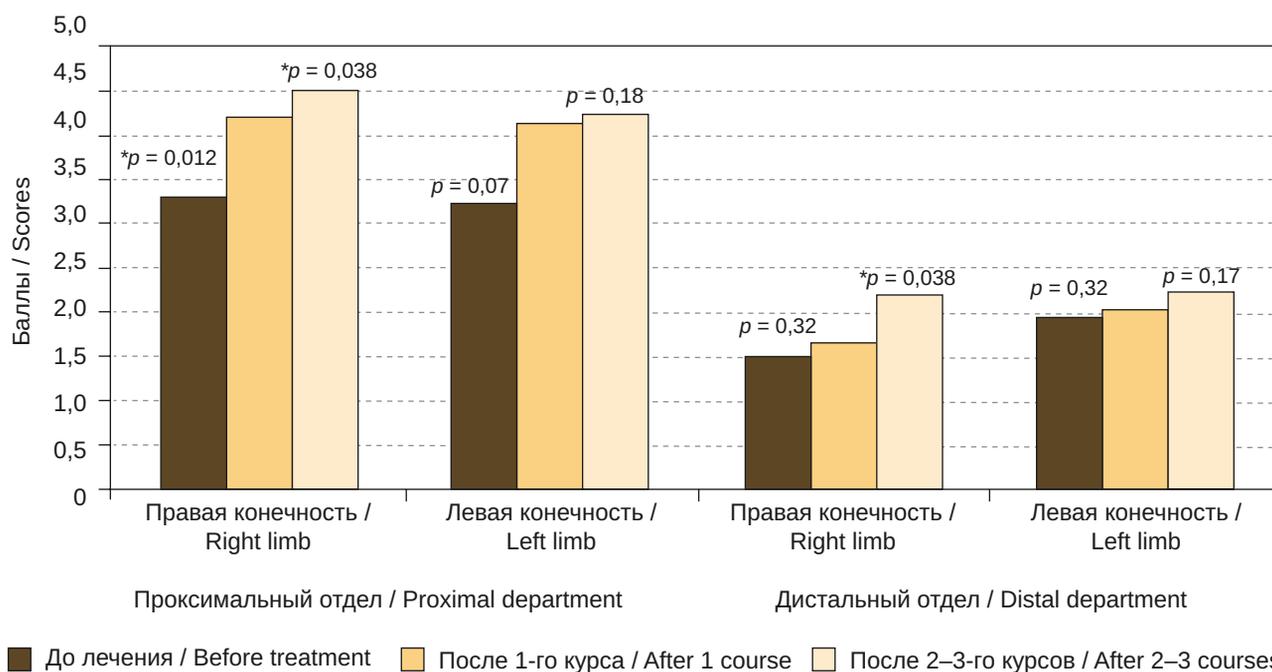


Рис. 1. Оценка силы мышц верхних конечностей (в баллах) пациентов с отдаленными последствиями травмы шейного отдела позвоночника до и после комплексной реабилитации

Fig. 1. Assessment of upper limb muscle strength (in points) in patients with long-term consequences of cervical spine injury before and after comprehensive rehabilitation

Примечание: * — достоверность изменения относительно исходного уровня ($p < 0,05$).

Note: * — the reliability of the change relative to the initial level ($p < 0,05$).

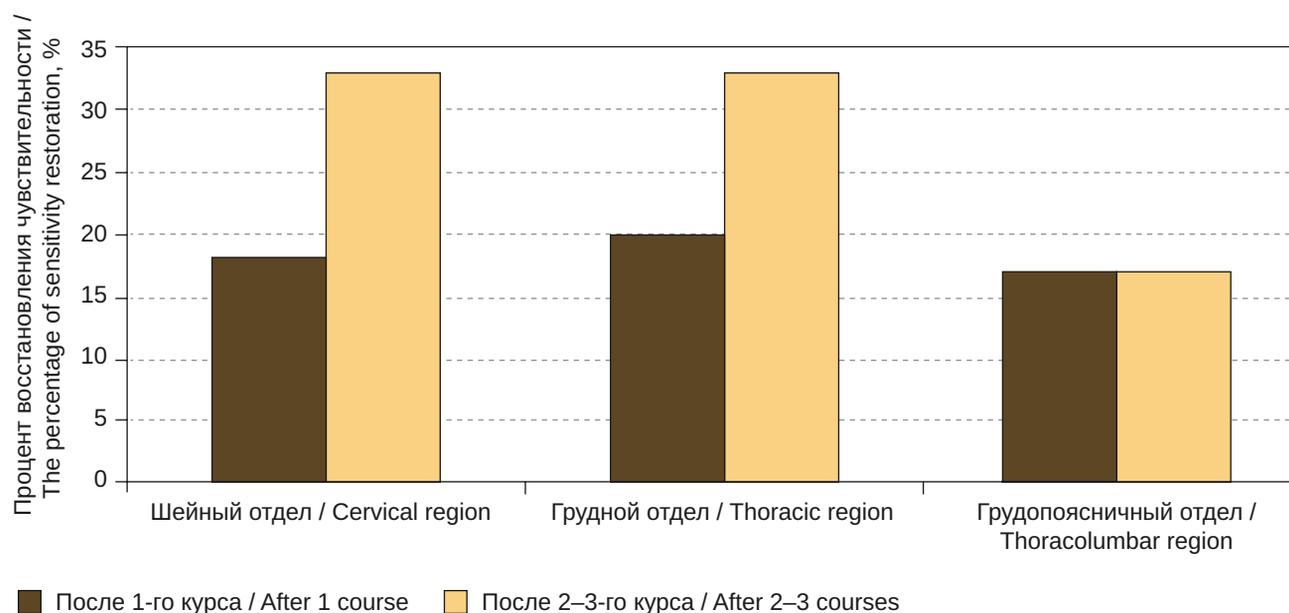


Рис. 2. Процент восстановления чувствительности после комплексной реабилитации
Fig. 2. The percentage of sensitivity restoration after comprehensive rehabilitation

не отличалось и составило соответственно 2 [1; 4] и 2 [1; 3] дерматома ($p = 0,620$). Процент восстановления чувствительности составлял 19 [17; 33] % (рис. 2).

Исследование состояния независимости пациентов по шкале SCIM III до и после комплексной реабилитации (табл. 1) показало, что после первого курса только у пациентов с последствиями травмы шейного отдела наблюдалось достоверное увеличение данного показателя на $24,0 \pm 4,7$ % ($p = 0,0001$).

В грудном и груднопоясничном отделах была отмечена лишь тенденция к увеличению. После 2–3-го курса — на всех уровнях повреждения было зарегистрировано достоверное увеличение степени независимости обследованных пациентов. В шейном отделе величина оценки увеличилась на $53,3 \pm 12,8$ % ($p = 0,028$), в груд-

ном отделе — на $64,0 \pm 24,0$ % ($p = 0,027$), в груднопоясничном отделе — на $35,0 \pm 9,6$ % ($p = 0,006$).

Электромиографические исследования состояния мышц конечностей показали, что после комплексной реабилитации наблюдалась общая тенденция к увеличению амплитуды М-ответов. В группе пациентов с последствиями травмы шейного отдела позвоночника (табл. 2) для шести мышц верхней конечности увеличение амплитуды М-ответов было статистически значимо: *m. deltoideus D.*, *m. triceps brachii S.*, *m. flexor carpi radialis D. S.*, *m. thenar D. S.*, *m. hypothenar S.*, *m. extensor digitorum D., S.* Кроме того, для 6 мышц наблюдалась тенденция к снижению асимметрии, а в двух мышцах она была статистически значимой: *m. triceps brachii* и *m. flexor carpi radialis*.

Таблица 1. Показатели оценки состояния независимости пациента по шкале SCIM III (баллы) до и после комплексной реабилитации у пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы

Table 1. Indicators for assessing the patient’s independence on the SCIM III scale (points) before and after complex rehabilitation in patients with long-term consequences of spinal cord injury

Уровень повреждения / Damage level	1-й курс / 1st course				2–3-й курс / 2–3 course			
	До / Before		После / After		До / Before		После / After	
	Me	[Q1; Q3]	Me	[Q1; Q3]	Me	[Q1; Q3]	Me	[Q1; Q3]
Шейный отдел / Cervical region (n = 11)	36,5	[20; 59]	45,5* $p = 0,005$	[30; 67]	20,5	[20; 29]	36,5* $p = 0,028$	[32; 40]
Грудной отдел / Thoracic region (n = 9)	40,0	[32,5; 36,5]	55,0 $p = 0,068$	[38,5; 47,5]	48,0	[27; 66]	67,0* $p = 0,027$	[55; 78]
Груднопоясничный отдел / Thoracolumbar region (n = 9)	42,5	[39,5; 47,5]	62,0 $p = 0,068$	[50; 64,5]	40,0	[39; 40]	65,0* $p = 0,006$	[63; 65]

Примечание: * — достоверность отличия от исходного уровня, $p < 0,05$.

Note: * — the reliability of the difference from the initial level, $p < 0.05$.

Таблица 2. Статистические характеристики амплитуды М-ответа (мВ) мышц верхних конечностей у пациентов с частичным повреждением шейного отдела спинного мозга в отдаленном периоде заболевания до и после комплексной реабилитации

Table 2. Statistical characteristics of the amplitude of the M-response (mV) of the muscles of the upper extremities in patients with partial damage to the cervical spinal cord in the long-term period of the disease before and after complex rehabilitation

Мышца (основ- ной корешок) / * Muscle (main spine)	Статистические характеристики М-ответа пациентов / Statistical characteristics M-response of patients (M ± m, n = 11)				Показатели здоровых обследуемых / Indicators of healthy subjects (n = 32)				
	До лечения / Before treatment		После лечения / After treatment		As (%)		M ± m		
	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	До / Before	После / After	As (%)
M. deltoideus (C5)	17,3 ± 4,1	19,4 ± 3,9	21,3 ± 2,9 *p = 0,02	21,3 ± 2,9 p = 0,21	16,4 ± 5,3	13,7 ± 3,7 p = 0,22	11,5 ± 1,6	12,0 ± 1,1	11,1 ± 2,5
M. biceps brachii (C6)	13,0 ± 3,7 [#]	15,2 ± 3,7 [#]	22,2 ± 2,7 p = 0,07	22,1 ± 1,9 p = 0,10	19,2 ± 7,5 [#]	15,7 ± 3,0 p = 0,35	25,0 ± 1,6	25,4 ± 1,3	9,4 ± 1,6
M. triceps brachii (C7)	12,1 ± 3,0 [#]	14,0 ± 3,8 [#]	22,3 ± 3,6 p = 0,061	24,7 ± 2,4 *p = 0,047	48,8 ± 5,0 [#]	19,0 ± 7,0 *p = 0,013	29,9 ± 1,3	30,7 ± 1,0	12,6 ± 1,5
M. flexor carpi radialis (C7)	9,7 ± 1,8 [#]	7,8 ± 1,9 [#]	16,5 ± 2,4 *p = 0,018	18,2 ± 2,3 *p = 0,02	40,6 ± 9,1 [#]	9,1 ± 2,9 *p = 0,015	26,0 ± 1,1	25,2 ± 1,1	12,4 ± 1,0
M. thenar (C7-Th1)	6,0 ± 1,0 [#]	3,8 ± 1,1 [#]	9,1 ± 0,8 *p = 0,034	10,5 ± 1,8 *p = 0,010	28,0 ± 8,4 [#]	22,3 ± 4,7 p = 0,61	18,0 ± 1,1	15,0 ± 1,2	11,3 ± 1,3
M. flexor carpi ulnaris (C7)	7,4 ± 1,5 [#]	7,1 ± 1,3 [#]	13,7 ± 4,7 p = 0,16	10,3 ± 0,9 p = 0,064	41,6 ± 10,5 [#]	48,5 ± 9,5 p = 0,49	14,4 ± 1,4	14,5 ± 1,5	11,1 ± 1,7
M. hypothenar (C8-Th1)	5,9 ± 1,0 [#]	3,2 ± 1,2 [#]	7,3 ± 1,6 p = 0,31	8,3 ± 2,1 *p = 0,043	42,7 ± 14,9 [#]	21,2 ± 5,9 p = 0,074	13,5 ± 0,6	13,8 ± 0,5	11,5 ± 1,4
M. extensor digitorum (C6-7)	5,5 ± 1,0 [#]	5,6 ± 1,0 [#]	11,5 ± 2,5 *p = 0,048	14,7 ± 20,7 *p = 0,013	9,7 ± 2,1	23,6 ± 8,3 p = 0,09	16,8 ± 1,0	15,1 ± 1,0	9,6 ± 1,0

Примечание: [#] — отмечено статистически значимое снижение амплитуды М-ответов относительно нормы; * — достоверность изменения относительно исходного уровня (p < 0,05); As — асимметрия.

Note: [#] — there was a statistically significant decrease in the amplitude of M-responses relative to the norm; * — the reliability of the change relative to the baseline level (p < 0.05); As — asymmetry.

Таблица 3. Статистические характеристики амплитуды М-ответа (мВ) мышц нижних конечностей у пациентов с частичным повреждением шейного отдела спинного мозга в отдаленном периоде заболевания до и после комплексной реабилитации

Table 3. Statistical characteristics of the amplitude of the M-response (mV) of the muscles of the lower extremities in patients with partial damage to the cervical spinal cord in the long-term period of the disease before and after complex rehabilitation

Мышца (основ- ной корешок) / * Muscle (main spine)	Статистические характеристики М-ответа пациентов / Statistical characteristics M-response of patients (M ± m, n = 11)				Показатели здоровых обследуемых / Indicators of healthy subjects (n = 32)			
	До лечения / Before treatment		После лечения / After treatment		As (%)		M ± m	
	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	До / Before	После / After
М. rectus femoris (L4)	13,5 ± 2,6 [#]	14,2 ± 2,3 [#]	15,7 ± 1,4 [#] p = 0,13	17,6 ± 1,4 [#] p = 0,14	21,1 ± 7,9	11,2 ± 2,7 p = 0,13	21,6 ± 3,7	21,7 ± 3,9
М. tibialis anterior (L5)	7,8 ± 3,7	8,0 ± 1,1 [#]	9,2 ± 1,7 p = 0,08	10,3 ± 1,9 *p = 0,043	11,1 ± 3,6	10,1 ± 1,4 p = 0,68	7,9 ± 1,7	7,6 ± 1,6
М. extensor digitorum brevis (L5)	1,7 ± 3,0 [#]	2,1 ± 0,6 [#]	3,7 ± 0,8 [#] p = 0,22	3,5 ± 1,4 [#] p = 0,23	54,5 ± 16,0 [#]	34,0 ± 13,0 p = 0,46	10,4 ± 3,9	10,9 ± 3,6
М. gastrocnemius (c. lat.) (S1)	16,7 ± 4,4 [#]	14,7 ± 3,0 [#]	18,2 ± 4,1 [#] p = 0,47	18,0 ± 2,5 [#] *p = 0,043	37,5 ± 9,5 [#]	25,0 ± 7,2 [#] p = 0,21	31,3 ± 7,8	31,9 ± 6,0
М. flexor digitorum brevis (S1)	11,8 ± 1,2 [#]	10,1 ± 1,5 [#]	13,8 ± 2,5 [#] p = 0,67	13,0 ± 2,1 [#] p = 0,18	18,4 ± 7,5 [#]	16,8 ± 3,9 [#] p = 0,75	16,1 ± 1,1	17,8 ± 1,2

Примечание: [#] — отмечено статистически значимое снижение амплитуды М-ответов относительно нормы; * — достоверность изменения относительно исходного уровня (p < 0,05); As — асимметрия.

Note: [#] — there was a statistically significant decrease in the amplitude of M-responses relative to the norm; * — the reliability of the change relative to the baseline level (p < 0.05); As — asymmetry.

Таблица 4. Статистические характеристики амплитуды М-ответа (mV) мышц нижних конечностей у пациентов с частичным повреждением грудного отдела спинного мозга в отдаленном периоде заболевания до и после 2–3-го курса комплексной реабилитации
Table 4. Statistical characteristics of the amplitude of the M-response (mV) of the muscles of the lower extremities in patients with partial damage to the thoracic spinal cord in the long-term period of the disease before and after 2–3 courses of complex rehabilitation

Мышца (основной корешок) / *Muscle (main spine)	Статистические характеристики М-ответа пациентов / Statistical characteristics M-response of patients (M ± m, n = 9)				Показатели здоровых обследуемых / Indicators of healthy subjects (n = 32)				
	До лечения / Before treatment		После лечения / After treatment		As (%)		M ± m		
	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	До / Before	После / After	As (%)
M. rectus femoris (L4)	13,7 ± 2,2 [#]	12,0 ± 1,5 [#]	15,0 ± 2,2 [#] p = 0,13	15,4 ± 1,4 *p = 0,033	16,8 ± 6,2	12,7 ± 3,5 p = 0,60	21,6 ± 3,7	21,7 ± 3,9	10,9 ± 1,5
M. tibialis anterior (L5)	5,0 ± 1,0 [#]	4,3 ± 0,6 [#]	8,5 ± 1,3 *p = 0,043	7,5 ± 0,7 *p = 0,016	30,0 ± 12,0 [#]	20,9 ± 3,8 [#] p = 0,35	7,9 ± 1,7	7,6 ± 1,6	9,4 ± 1,6
M. extensor digitorum brevis (L5)	1,3 ± 0,4 [#]	1,4 ± 0,8 [#]	2,8 ± 0,7 [#] p = 0,076	3,9 ± 1,2 [#] *p = 0,043	44,0 ± 11,6 [#]	27,2 ± 5,6 p = 0,60	10,4 ± 3,9	10,9 ± 3,6	10,9 ± 0,6
M. gastrocnemius (с. lat.) (S1)	11,3 ± 3,1 [#]	10,3 ± 3,2 [#]	14,6 ± 3,2 [#] p = 0,043	14,1 ± 3,2 [#] p = 0,08	18,3 ± 9,2	20,7 ± 5,0 p = 0,50	31,3 ± 7,8	31,9 ± 6,0	14,9 ± 0,9
M. flexor digitorum brevis (S1)	7,8 ± 1,3 [#]	9,2 ± 1,2 [#]	9,5 ± 1,7 [#] p = 0,08	11,5 ± 1,7 [#] p = 0,08	19,2 ± 4,7 [#]	18,9 ± 4,5 p = 0,50	16,1 ± 1,1	17,8 ± 1,2	9,2 ± 0,4

Примечание: [#] — отмечено статистически значимое снижение амплитуды М-ответов относительно нормы; * — достоверные изменения относительно исходного уровня (p < 0,05). As — асимметрия.

Note: [#] — there was a statistically significant decrease in the amplitude of M-responses relative to the norm; * — significant changes relative to the baseline level (p < 0.05). As — asymmetry.

Таблица 5. Статистические характеристики амплитуды М-ответа (мВ) мышц нижних конечностей у пациентов с отдаленными последствиями травмы грудного поясничного отдела позвоночника до и после 2–3-го курса комплексной реабилитации

Table 5. Statistical characteristics of the amplitude of the M-response (mV) of the muscles of the lower extremities in patients with long-term consequences of injury of the thoracolumbar spine before and after 2–3 courses of complex rehabilitation

Мышца (основной корешок) / *Muscle (main spine)	Статистические характеристики М-ответа пациентов / Statistical characteristics M-response of patients (M ± m, n = 9)				Показатели здоровых обследуемых / Indicators of healthy subjects (n = 32)				
	До лечения / Before treatment		После лечения / After treatment		As (%)		M ± m		
	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	Правая / Right	Левая / Left	До / Before	После / After	As (%)
M. rectus femoris (L4)	10,9 ± 1,4 [#]	8,0 ± 1,9 [#]	13,7 ± 1,7 [#] p = 0,15	10,8 ± 2,8 [#] p = 0,25	30,4 ± 10,1 [#]	31,8 ± 7,2 [#] p = 0,71	21,6 ± 3,7	21,7 ± 3,9	10,9 ± 1,5
M. tibialis anterior (L5)	5,0 ± 0,3 [#]	5,3 ± 0,7 [#]	7,6 ± 0,5 *p = 0,021	6,8 ± 0,7 p = 0,24	16,7 ± 4,6 [#]	17,3 ± 3,7 [#] p = 0,77	7,9 ± 1,7	7,6 ± 1,6	9,4 ± 1,6
M. extensor digitorum brevis (L5)	1,8 ± 0,5 [#]	2,0 ± 0,7 [#]	4,2 ± 0,9 [#] *p = 0,021	3,5 ± 0,7 [#] p = 0,083	27,5 ± 9,0 [#]	21,3 ± 6,7 [#] p = 0,77	10,4 ± 3,9	10,9 ± 3,6	10,9 ± 0,6
M. gastrocnemius (с. lat.) (S1)	7,0 ± 1,6 [#]	7,3 ± 1,7 [#]	8,4 ± 1,7 [#] p = 0,068	9,3 ± 1,6 [#] p = 0,068	23,0 ± 6,4 [#]	27,0 ± 7,0 [#] p = 0,71	31,3 ± 7,8	31,9 ± 6,0	14,9 ± 0,9
M. flexor digitorum brevis (S1)	5,6 ± 1,8 [#]	5,5 ± 1,6 [#]	7,7 ± 1,8 [#] p = 0,068	5,7 ± 0,9 [#] p = 0,71	17,4 ± 5,2 [#]	30,3 ± 5,8 [#] p = 0,14	16,1 ± 1,1	17,8 ± 1,2	9,2 ± 0,4

Примечание: [#] — отмечено статистически значимое снижение амплитуды М-ответов относительно нормы; * — достоверность изменения относительно исходного уровня (p < 0,05).

Note: [#] — there was a statistically significant decrease in the amplitude of M-responses relative to the norm; * — the reliability of the change relative to the baseline level (p < 0.05).

Для М-ответов мышц нижних конечностей пациентов этой группы также характерна тенденция увеличения амплитуды (табл. 3). Но только для 2 мышц эти изменения были статистически значимы: *m. tibial. ant. S.* — на 29 %, $p = 0,043$; *m. gastroc. lat. S.* — на 22,4 %, $p = 0,043$.

У пациентов с последствиями травмы грудного отдела после первого курса только в двух мышцах регистрировался достоверный рост показателей: *m. rectus femoris D.* — на 18 % ($p = 0,02$), *S.* — на 48,2 % ($p = 0,03$) и *m. tibialis anterior D.* — на 31 % ($p = 0,03$). После 2–3-го курса реабилитации сохранялась такая же тенденция для показателей, только количество мышц с достоверным увеличением амплитуды М-ответов возрастало до четырех (табл. 4): *m. rectus femoris S.*, *m. tibialis anterior D.*, *S.*, *m. extensor digitorum brevis S.*, *m. gastrocnemius (c. lat.) D.* Продолжилась тенденция к снижению асимметрии показателей, за исключением *m. gastrocnemius* и *m. flexor digitorum brevis*.

В группе пациентов с последствиями травмы груднопоясничного отдела по сравнению с предыдущими обследуемыми выраженность статистически достоверных

изменений показателей М-ответов мышц была меньше. Только на *m. extensor digitorum brevis D.* отмечено увеличение на 58 % ($p = 0,009$). Амплитуды М-ответов других мышц демонстрировали тенденцию к увеличению. После 2–3-го курса реабилитации регистрировалась аналогичная ситуация (табл. 5). Только в двух мышцах наблюдалась достоверная динамика: *m. tibialis anterior D.* и *m. extensor digitorum brevis D.* Асимметрия М-ответов сохранялась стабильной.

Уменьшение общего моторного дефицита свидетельствовало о положительной динамике двигательных нарушений при всех уровнях локализации повреждения (рис. 3).

ИМД после 2–3-го курса ЭЭС у пациентов с последствиями повреждения шейного отдела увеличился на 51 % ($p = 0,027$), грудного — на 43,2 % ($p = 0,043$), груднопоясничного — на 38,3 % ($p = 0,021$).

Динамика показателей 10-метрового Walk-теста после реабилитации прослежена у 7 пациентов: у 3 — с последствиями повреждения груднопоясничного отдела, 2 — шейного и 2 — грудного отдела позвоночника. Шесть человек

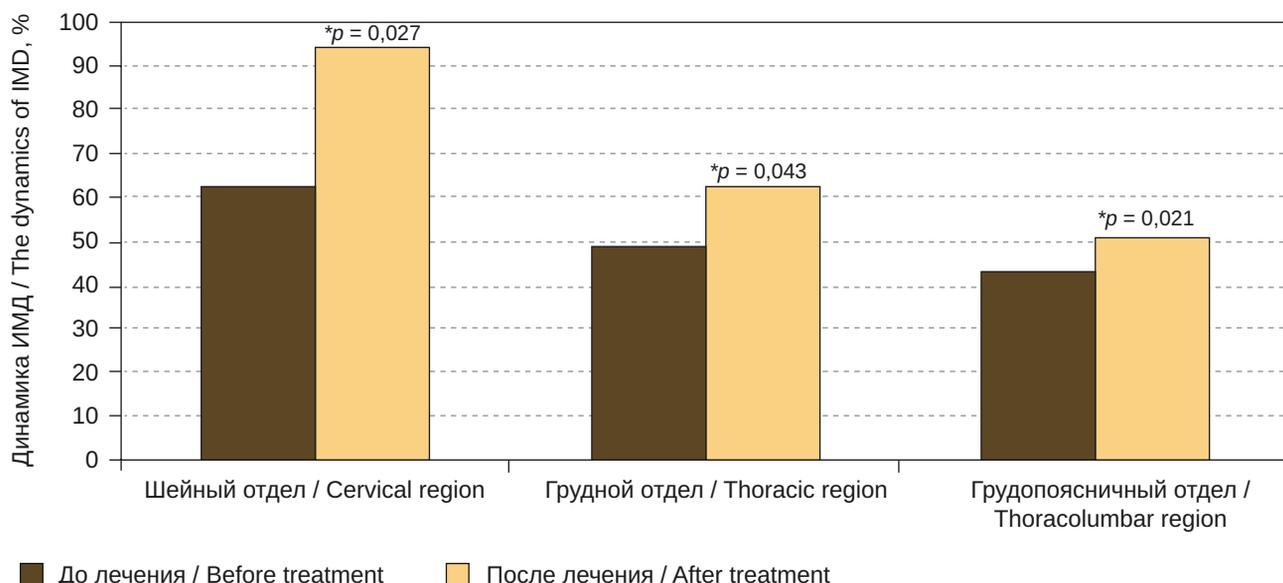


Рис. 3. Динамика ИМД после реабилитации
Fig. 3. The dynamics of IMD after rehabilitation

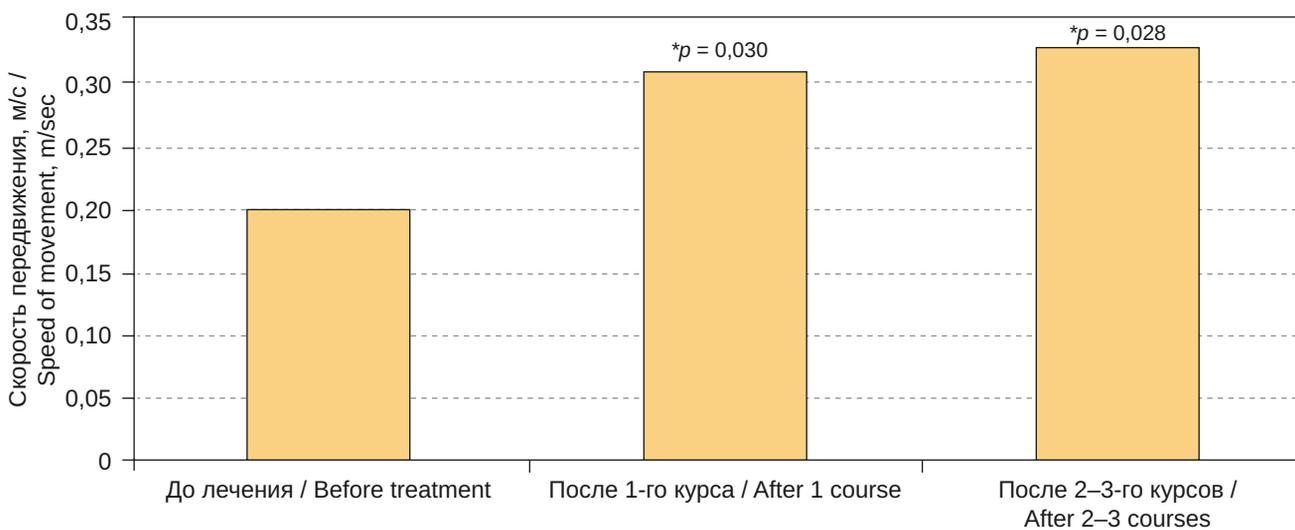


Рис. 4. Произвольная, комфортная скорость передвижения пациентов до и после реабилитации
Fig. 4. Arbitrary, comfortable speed of movement of patients before and after rehabilitation

передвигались самостоятельно с помощью вспомогательных средств опоры (ходунки). После 1-го курса реабилитации практически у всех пациентов уменьшалось время теста и увеличивалась скорость передвижения. Двое пациентов сменили ходунки на трость. Один пациент, который не ходил самостоятельно, стал передвигаться с помощью ходунков. При сравнении показателей до и после реабилитации определялось достоверное снижение времени Walk-теста на 23,2 [14; 34] % ($p = 0,0098$) и рост скорости передвижения на 34,5 [19; 47] % ($p = 0,03$) (рис. 4).

Инструментальное исследование температурно-болевой чувствительности показало, что у пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы различных отделов позвоночника результаты реабилитационных мероприятий неоднозначны.

У пациентов с последствиями травмы шейного отдела после первого курса реабилитации наблюдается снижение: 1) уровня нарушений температурно-болевой чувствительности в среднем на $2,3 \pm 0,5$ дерматома (на 1–4 дерматома); 2) уровня термоанестезии на $5,3 \pm 1,3$ дерматома (на 1–7 дерматомов); 3) уровня термоаналгезии на $3 \pm 0,2$ дерматома (на 1–6 дерматомов).

Процент восстановления чувствительности в тех дерматомах, где она первоначально отсутствовала после комплексной реабилитации, с увеличением количества курсов растет, особенно в области дистальных дерматомов (табл. 6).

При травме грудного отдела после 1-го курса реабилитации отсутствовала направленная динамика показателей. Отсутствие изменений или ухудшение наблюдалось

Таблица 6. Процент восстановления температурно-болевой чувствительности после комплексной реабилитации у пациентов с отдаленными последствиями неполного повреждения шейного отдела спинного мозга

Table 6. The percentage of recovery of temperature and pain sensitivity after complex rehabilitation in patients with long-term consequences of incomplete damage to the cervical spinal cord

Дерматомы / Dermatomes	Тепловая чувствительность / Thermal sensitivity		Болевая чувствительность / Pain sensitivity	
	1-я стимуляция / 1st stimulation	2–3-я стимуляция / 2nd–3rd stimulation	1-я стимуляция / 1st stimulation	2–3-я стимуляция / 2nd–3rd stimulation
C5 (n = 10)	40	50	50	50
C6 (n = 10)	–	20	33	33
C7 (n = 10)	33	40	–	30
C8 (n = 10)	50	40	33	35
Th1 (n = 10)	55	55	20	20
Th2 (n = 10)	37,5	33	20	30
Th3 (n = 10)	33	33	25	25
Th4 (n = 10))	–	12	25	30
Th5 (n = 10)	–	–	25	30
Th6 (n = 10)	11	11	25	25
Th7 (n = 10)	–	12	25	30
Th8 (n = 10)	–	11	25	34
Th9 (n = 10)	–	9	25	30
Th10 (n = 10)	–	12	–	35
Th11 (n = 10)	–	11	–	30
Th12 (n = 10)	–	10	–	15
L1 (n = 10)	20	11	–	15
L2 (n = 10)	11	11	–	18
L3 (n = 10)	–	10	–	15
L4 (n = 10)	–	12	–	20
L5 (n = 10)	11	11	–	15
S1 (n = 10)	–	12	–	18

в сочетании с положительной динамикой (30 %) или гипестезией. На последующих этапах реабилитационного процесса данная тенденция сохранялась.

У пациентов с травмой грудно-поясничного отдела было определено, что после реабилитации в дерматомах Th12, L1, L2 увеличивалось количество случаев нормальных порогов тепловой (на 13 %) и болевой (на 50 %) чувствительности, наблюдалось снижение доли термоанестезии и термоаналгезии (на 13–50 %). Характерной особенностью изменений в дерматомах L3, L4, L5 являлось снижение доли термоаналгезии (на 12–37 %).

Оценка степени восстановления тепловой и болевой чувствительности в тех дерматомах, где она первоначально отсутствовала, показала, что дистальнее дерматома L3 этот процесс значительно уменьшался, а в области дерматома S1 отсутствовал.

ОБСУЖДЕНИЕ

Реабилитация пациентов с повреждением спинного мозга имеет отличия в зависимости от периода заболевания [3, 12, 13]. Отдаленный период травмы спинного мозга характеризуется сформированным неврологическим дефицитом, измененным функциональным статусом, наличием соматических и психологических проблем пациентов.

Восстановительное лечение пациентов в отдаленном периоде повреждения спинного мозга направлено в первую очередь на улучшение сформированного функционального статуса, изменение качества жизни в вопросах самообслуживания и передвижения.

Российские клинические рекомендации «Ведение больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы на втором и третьем этапах медицинской и медико-социальной реабилитации» определяют следующие виды восстановительной терапии: физиотерапия, механотерапия, кинезитерапия, психотерапия, трудотерапия, ЛФК — физические упражнения (гимнастические, спортивно-прикладные), прогулки, массаж, мануальная терапия [14]. По данным литературы, доказательная база по основным вопросам реабилитации при травме спинного мозга недостаточна, характер и содержание методов реабилитации должны варьировать в зависимости от многих факторов: периода заболевания, уровня повреждения, неврологического статуса [3].

Целью реабилитации является не только стимуляция проводниковой функции спинного мозга, активизировать которую в отдаленном периоде повреждения проблематично, но и формирование компенсаторно-приспособительных механизмов для изменения функционального статуса больных.

ЭЭС (хроническая, временная) широко применяется при лечении пациентов в отдаленном периоде позвоночно-спинномозговой травмы. Одним из механизмов восстановления двигательных функций при травме спинного мозга считается активизация супраспинальных нейронных связей [4, 5] и реорганизация остаточных нисходящих путей, восстановление двигательной активности за счет механизма проприоцептивной рецепции [4]. По данным литературы, ЭЭС в сочетании с тренировками проприоцептивной чувствительности может приводить к регрессу двигательных нарушений. При этом постоянное применение ЭЭС блокирует проприоцептивную чувствительность и угнетает восстановление спинальной

проводимости [5, 8]. Периодическая стимуляция не допускает блокирования проприоцептивной информации и тем самым обеспечивает надежный контроль над двигательной активностью нейронов [4].

Влияние ЭЭС на восстановление двигательной функции пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой описано в небольшом количестве исследований [3, 5]. Однако выборки пациентов в этих статьях малочисленны и не однородны.

Проблемой оценки исходного функционального статуса и результатов лечения пациентов с отдаленными последствиями повреждения спинного мозга и выраженными неврологическими нарушениями является отсутствие шкал и опросников, чувствительных для данной категории больных. Поэтому при анализе функционального состояния пациентов используются различные методы исследования.

В сообщениях по улучшению двигательной активности пациентов при ЭЭС показано изменение показателей ЭМГ, в 4 случаях — улучшение мышечной силы, у 11 пациентов оптимизация шаговых движений [5, 8, 15, 16]. При таком подходе к анализу результатов сложно оценить терапевтическую эффективность ЭЭС. Кроме того, остаются практически не освещенными изменения в чувствительной сфере пациентов [10, 17].

Результаты, полученные в нашей работе при оценке изменений двигательной функции после реабилитационных мероприятий, соотносятся с данными, представленными в литературе [8, 15, 16]. Так, после реабилитации было зарегистрировано увеличение силы мышц конечностей и в некоторых случаях ее восстановление, рост амплитуды М-ответов и изменение ИМД, увеличение скорости передвижения Walk-теста и показателя независимости пациента, что свидетельствует об улучшении функциональных возможностей пациентов.

В настоящий момент в литературе отсутствует описание изменений температурно-болевой чувствительности после применения ЭЭС у пациентов с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы. В нашей работе представлен процесс улучшения температурно-болевой чувствительности на уровне травмы и в дерматомах, расположенных дистально. С увеличением курсов реабилитации эффект воздействия усиливается в области дистальных дерматомов, наблюдается стойкий кумулятивный эффект.

Используемые в исследовании шкалы и методы обследования позволяют объективно оценить двигательную и чувствительную функции и могут применяться для анализа динамики функционального состояния пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы.

Ограничение исследования: отсутствие контрольной группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У пациентов с отдаленными последствиями позвоночно-спинномозговой травмы с частичным повреждением спинного мозга после комплексной реабилитации с использованием ЭЭС и активации проприоцептивного аппарата определяется улучшение функционального состояния двигательной и чувствительной систем, что приводит к изменениям функционального статуса.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Щурова Елена Николаевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России.

E-mail: elena.shurova@mail.ru, office@rncvto.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>

Прудникова Оксана Германовна, доктор медицинских наук, старший научный сотрудник, врач-ортопед, заведующая травматолого-ортопедическим отделением № 10, ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1432-1377>

Качесова Анастасия Анатольевна, аспирант, ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9065-7388>

Сайфутдинов Марат Саматович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7477-5250>

Тертышная Марина Сергеевна, врач травматолог-ортопед высшей категории, врач восстановительной медицины, ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2086-6931>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают свое участие 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: Щурова Е.Н. — анализ данных, написание и редактирование текста статьи; Прудникова О.Г. — методология, проведение исследований, дизайн исследований, проверка и редактирование рукописи; Качесова А.А. — проведение исследований, анализ данных, написание черновика рукописи; Сайфутдинов М.С. — анализ данных, редактирование рукописи; Тертышная М.С. — проведение исследований, редактирование рукописи.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

Этическое утверждение. Авторы заявляют, что все процедуры, использованные в данной статье, соответствуют этическим стандартам учреждений, проводивших исследование, и соответствуют Хельсинкской декларации в редакции 2013 г. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава РФ», Протокол № 4 (64) от 22.10.2019.

Доступ к данным. Данные подтверждающие выводы этого исследования можно получить по обоснованному запросу у корреспондирующего автора. Данные не являются общедоступными, поскольку содержат информацию, ставящую под угрозу конфиденциальность участников исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Elena N. Shchurova, Dr.Sci. (Biol.), leading researcher National Ilizarov Medical Research Centre for Orthopaedics and Traumatology.

E-mail: elena.shurova@mail.ru, office@rncvto.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0816-1004>

Oxana G. Prudnikova, Dr.Sci. (Med.), senior researcher, traumatologist-orthopedist, head of traumatological and orthopedic department No. 10 National Ilizarov Medical Research Centre for Orthopaedics and Traumatology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1432-1377>

Anastasiia A. Kachesova, postgraduate National Ilizarov Medical Research Centre for Orthopaedics and Traumatology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9065-7388>

Marat S. Saifutdinov, DSc in Biology, leading researcher National Ilizarov Medical Research Centre for Orthopaedics and Traumatology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7477-5250>

Marina S. Tertyshnaya, traumatologist-orthopedist of the highest category, doctor of rehabilitation medicine National Ilizarov Medical Research Centre for Orthopaedics and Traumatology.

Author Contributions. All authors confirm their participation in accordance with the ICMJE international criteria (all authors have made a significant contribution to the concept, design of the study and preparation of

the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: Shchurova E.N. — data analysis, writing and editing the text of the article; Prudnikova O.G. — methodology, research, research design, verification and editing of the manuscript; Kachesova A.A. — research, data analysis, writing a draft of the manuscript; Sayfutdinov M.S. — data analysis, manuscript editing; Tertyshnaya M.S. — research, manuscript editing.

Funding. The authors declare that there was no external funding for the study.

Disclosure. The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Ethics Approval. The authors declare that all procedures used in this article are in accordance with the ethical standards of the institutions that conducted the study and are consistent with the 2013 Declaration of Helsinki. The study was approved by the Ethics Committee of the National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after academician G.A. Ilizarov, Protocol No. 4 (64) dated October 22, 2019.

Data Access Statement. The data that support the findings of this study are available on reasonable request from the corresponding author. The data is not publicly available because it contains information that compromises the confidentiality of study participants.

Список литературы / References

1. Kumar R., Lim J., Mekary R.A., Rattani A., Dewan M.C., Sharif S.Y. et al. Traumatic spinal injury: global epidemiology and worldwide volume. *World Neurosurgery*. 2018; 113: e345–e363. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.02.033>
2. Mirzaeva L., Gilhus N., Lobzin S. et al. Incidence of adult traumatic spinal cord injury in Saint Petersburg, Russia. *Spinal Cord*. 2019; 57(8): 692–9. <https://doi.org/10.1038/s41393-019-0266-4>
3. Прудникова О.Г., Качесова А.А., Рябых С.О. Реабилитация пациентов в отдаленном периоде травмы спинного мозга: метаанализ литературных данных. *Хирургия позвоночника*. 2019; 16(3): 8–16. <https://doi.org/10.14531/SS2019.3.8-16> [Prudnikova O., Kachesova A.A., Ryabykh S.O. Rehabilitation of patients in late period after spinal cord injury: a meta-analysis of literature data. *Medicine*. 2019; 16(3): 8–16. <https://doi.org/10.14531/SS2019.3.8-16> (In Russ.).]
4. 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: Technology at the Neural Interface*. 2019; 22(3): 244–252. <https://doi.org/10.1111/ner.12938>
5. McHugh C., Taylor C., Mockler D., Fleming N. Epidural spinal cord stimulation for motor recovery in spinal cord injury: A systematic review. *NeuroRehabilitation*. 2021; 49 (1): 1–22. <https://doi.org/10.3233/nre-210093>
6. Wang S., Zhang L.C., Fu H.T. et al. Epidural electrical stimulation effectively restores locomotion function in rats with complete spinal cord injury. *Neural Regeneration Research*. 2021; 16(3): 573–579. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.290905>.
7. Formento E., Minassian K., Wagner F. et al. Electrical spinal cord stimulation must preserve proprioception to enable locomotion in humans with spinal cord injury. *Nature Neuroscience*. 2018; 21(12): 1728–1741. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0262-6>
8. Calvert J.S., Grahn P.J., Strommen J.A. et al. Electrophysiological Guidance of Epidural Electrode Array Implantation over the Human Lumbosacral Spinal Cord to Enable Motor Function after Chronic Paralysis. *Journal of Neurotrauma*. 2018; 3(5): 1–10. <https://doi.org/10.1089/neu.2018.5921>
9. Choi E.H., Gattas S., Brown N.J. et al. Epidural electrical stimulation for spinal cord injury. *Neural Regeneration Research*. 2021; 16(12): 2367–2375. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.313017>.
10. Wagner F.B., Mignardot J.B., Le Goff-Mignardot C.G. et al. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature*. 2018; 563(7729): 65–71. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0649-2>
11. Shein A.P., Krivoruchko G.A., Prudnikova O.G. Electroneuromyographic assessment of the effectiveness of temporal epidural electroneurostimulation combined with robotic kinesiotherapy in the treatment of patients suffering from the consequences of spinal cord injury. *Human Physiology*. 2015; 41: 196–201. <https://doi.org/10.1134/S0362119715010132>
12. Колышенков В.А., Еремускин М.А., Стяжкина Е.М. Перспективы развития систем виртуальной реальности в программах нейрореабилитации. *Вестник восстановительной медицины*. 2019; 1: 29–32. [Kolyshenkov V.A., Eremushkin M.A., Styazhkina E.M. Perspectives of the Development of Virtual Reality Systems on Neurorehabilitation Programs. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2019; 1: 29–32. (In Russ.).]
13. Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н. Роботизированные устройства в нейрореабилитации: состояние вопроса. *Вестник восстановительной медицины*. 2018; 2: 94–107. [Belova A.N., Borzikov V.V., Kuznecov A.N., Rukina N.N. Robotic Devices in Neurorehabilitation: Review. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2018; 2: 94–107. (In Russ.).]
14. Ведение больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы на втором и третьем этапах медицинской и медико-социальной реабилитации. *Клинические рекомендации*; 2017; 26. [Vedenie bol'nyh s posledstviyami pozvonочно-spinnomozgovej travmy na vtorom i tret'em etapah medicinskoj i mediko-social'noj reabilitacii. *Klinicheskie rekomendacii*. 2017; 26. (In Russ.).]
15. Ong B., Wilson J.R., Henzel M.K. Management of the patient with chronic spinal cord injury. *Medical Clinics of North America*. 2020; 104(2): 263–278. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2019.10.006>
16. Hachmann J.T., Yousak A., Wallner J.J. et al. Epidural spinal cord stimulation as an intervention for motor recovery after motor complete spinal cord injury. *Journal of Neurophysiology*. 2021; 126(6): 1843–1859. <https://doi.org/10.1152/jn.00020.2021>
17. Angeli C.A., Boakye M., Morton R.A. et al. Recovery of over-ground walking after chronic motor complete spinal cord injury. *The New England Journal of Medicine*. 2018; 379: 1244–1250. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1803588>