

Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга в двигательной реабилитации пациентов с травмой спинного мозга

Т. Р. Мошонкина^{✉1}, М. А. Погольская^{1,2}, З. В. Виноградская², П. К. Лихачева²,
Ю. П. Герасименко¹

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

² ООО «ЭйрМЕД», 197136, Россия, Санкт-Петербург, ул. Всеволода Вишневецкого, д. 10

Сведения об авторах

Татьяна Ромульевна Мошонкина,
SPIN-код: 8537-6871,
ResearcherID: Q-2141-2018,
ORCID: 0000-0002-8934-5253,
e-mail: moshonkina@infran.ru

Мария Алексеевна Погольская,
e-mail: info@eirmed.ru

Злата Всеволодовна
Виноградская,
e-mail: info@eirmed.ru

Полина Константиновна
Лихачева,
e-mail: info@eirmed.ru

Юрий Петрович Герасименко,
SPIN-код: 1433-9271,
ResearcherID: A-3655-2017,
e-mail: gerasimenko@infran.ru

Для цитирования:

Мошонкина, Т. Р.,
Погольская, М. А.,
Виноградская, З. В. и др.
(2020) Чрескожная электрическая
стимуляция спинного мозга
в двигательной реабилитации
пациентов с травмой спинного
мозга. *Интегративная
физиология*, т. 1, № 4, с. 351–365.
DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-
4-351-365

Получена 5 сентября 2020;
прошла рецензирование
18 сентября 2020; принята
9 ноября 2020.

Права: © Авторы (2020).
Опубликовано Российским
государственным педагогическим
университетом им. А. И. Герцена.
Открытый доступ на условиях
лицензии CC BY-NC 4.0.

Аннотация. Ранее было показано, что метод чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧССМ), разработанный для фундаментальных исследований спинного мозга здорового человека, может быть использован для увеличения мышечной силы, инициации и улучшения произвольных движений у пациентов с хроническим повреждением спинного мозга. В настоящей работе приведены результаты использования ЧССМ в двигательной реабилитации пациентов, репрезентативно представляющие совокупность пациентов с травмой спинного мозга (ТСМ). Представлены результаты одной процедуры ЧССМ у 60 пациентов с ТСМ вследствие травмы позвоночника на верхнешейном (n = 6), на шейно-грудном (n = 23), на грудном (n = 28) и пояснично-крестцовом (n = 3) уровнях. Все пациенты имели серьезные двигательные нарушения, у многих были осложнения ТСМ. Стимуляция в области шейного и поясничного утолщений спинного мозга одиночными и ритмическими (15–50 Гц) импульсами у 59 пациентов вызывала двигательные реакции (движения пальцев стоп и/или рук, сокращение мышц ног и др.). Наблюдали также изменение спастичности, увеличение кожного кровотока, уменьшение хронической боли, появление чувствительности. 50 из 60 пациентов прошли курс двигательной реабилитации с применением ЧССМ (~12 процедур по ~2 ч). Для каждого пациента была определена реабилитационная цель (сидеть без опоры, увеличить силу захвата кисти, пересаживаться с инвалидной коляски на кушетку и т. д.). В результате улучшение двигательных функций было зарегистрировано у всех пациентов, реабилитационная цель достигнута у 70 % пациентов. В статье описаны клинические случаи пациентов с разной тяжестью двигательных нарушений; для них показаны записи кинематики движений, демонстрирующие значительную нормализацию функции поддержания позы сидя и стоя после курса. В результате показано, что реабилитация с использованием ЧССМ приводит к восстановлению утраченных двигательных навыков. Также зарегистрированы значительные изменения висцеральных функций, что требует дополнительного исследования.

Ключевые слова: электрическая стимуляция, травма спинного мозга, реабилитация, двигательные навыки, трансляционная медицина.

Transcutaneous spinal cord electrical stimulation in motor rehabilitation of patients with spinal cord injury

T. R. Moshonkina^{✉1}, M. A. Pogolskaya^{1,2}, Z. V. Vinogradskaya², P. K. Likhacheva², Yu. P. Gerasimenko¹

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

² EirMED LLC, 10 Vsevolod Vishnevsky Str., Saint Petersburg 197136, Russia

Authors

Tatiana R. Moshonkina,
SPIN: 8537-6871,
ResearcherID: Q-2141-2018,
ORCID: 0000-0002-8934-5253,
e-mail: moshonkina@infran.ru

Maria A. Pogolskaya,
e-mail: info@eirmed.ru

Zlata V. Vinogradskaya,
e-mail: info@eirmed.ru

Polina K. Likhacheva,
e-mail: info@eirmed.ru

Yuri P. Gerasimenko,
SPIN: 1433-9271,
ResearcherID: A-3655-2017,
e-mail: gerasimenko@infran.ru

For citation:

Moshonkina, T. R.,
Pogolskaya, M. A.,
Vinogradskaya, Z. V. et al.
(2020) Transcutaneous spinal cord electrical stimulation in motor rehabilitation of patients with spinal cord injury. *Integrative Physiology*, vol. 1, no. 4, pp. 351–365.
DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-4-351-365

Received 5 September 2020;
reviewed 18 September 2020;
accepted 9 November 2020.

Copyright: © The Authors (2020).
Published by Herzen State
Pedagogical University of Russia.
Open access under CC BY-NC
License 4.0.

Abstract. It was previously demonstrated that the transcutaneous electrical spinal cord stimulation (TESCS) can be used to increase muscle strength, to initiate and improve voluntary movements in patients with chronic spinal cord injury (SCI). The paper focuses on the use of TESCS in motor rehabilitation of SCI patients. It presents the results of a single TESCS treatment in a representative sample 60 patients with SCI after a spinal injury at the upper cervical, cervicothoracic, thoracic, and lumbosacral levels. All patients had severe movement disorders, and many had SCI complications. The stimulation above the cervical and lumbar thickening of the spinal cord by single and rhythmic impulses resulted in motor reactions in 59 patients (movements of toes and / or fingers, contraction of leg muscles, etc.). Changes in spasticity, an increase in cutaneous blood flow, chronic pain decrease, and sensitivity improvement were also observed. 50 out of 60 patients underwent a course of motor rehabilitation with TESCS. A rehabilitation goal was defined for each patient (sitting without support, increased handgrip strength, moving from a wheelchair to a couch, etc.). Motor function improvements were recorded for all the patients, while 35 patients achieved the rehabilitation goal. The paper presents case reports of patients with different severity of movement disorders. The study includes records of the kinematics of movements demonstrating normalization of the sitting and standing posture after the course. As a result, the study has shown that the rehabilitation with TESCS facilitates the restoration of motor skills. The study has also revealed significant changes in visceral functions, which requires additional research.

Keywords: electrical stimulation, spinal cord injury, rehabilitation, motor skills, translational medicine.

Введение

В фундаментальных исследованиях с участием пациентов с травмой спинного мозга (ТСМ) доказано, что у человека в спинном мозге существует нейронная сеть, способная инициировать шагательные движения (Dimitrijevic et al. 1998). Это открытие легло в основу концепции спинальной регуляции локомоции — внешнего управления активностью локомоторной нейронной сети с помощью ее неспецифической активации, фармакологической модуляции сенсорно-моторного обучения (Gerasimenko et al. 2008). Основным методом исследования был метод электрической эпидуральной стимуляции

спинного мозга; все данные, которые стали основой концепции, были получены в клинических исследованиях на пациентах с ТСМ.

Для изучения регуляции нейронных спинальных сетей здорового человека был разработан метод неинвазивной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (ЧССМ) (Gorodnichev et al. 2012). Было показано, что ЧССМ с частотой 5–30 Гц в области T11–T12 позвонков вызывает непровольные шагательные движения. Позднее были опубликованы результаты исследования, в котором показано, что у пациентов с двигательным параличом в течение 2–6 лет вследствие ТСМ ЧССМ в области T11–L1 позвонков вызывает шагательные дви-

жения, а после 4-недельного курса реабилитации с применением ЧССМ у 5 пациентов из 5 наблюдали значительное облегчение вызванных шагательных движений при произвольных усилиях (Gerasimenko et al. 2015). Этот результат показал хорошие перспективы для использования ЧССМ в реабилитации пациентов с параличом вследствие ТСМ и способствовал трансляции новых знаний о функционировании нейронных сетей спинного мозга человека в сферу клинических исследований.

В обзоре (Megía García et al. 2020) проанализированы 13 публикаций о клинических исследованиях эффективности ЧССМ в двигательной реабилитации пациентов с ТСМ. Общая выборка составила 55 пациентов. Численность пациентов в каждом исследовании — от 1 до 15 человек (среднее 4, медиана 3). Уровень ТСМ — от С2 до L1. Функциональные возможности пациентов — от минимальной утраты двигательных функций ниже уровня травмы до полного паралича. В обзоре не проанализированы две последние публикации на эту тему, в которых показана хорошая эффективность использования ЧССМ в восстановлении двигательных навыков (Al'joboori et al. 2020) и мышечной активности (Sharikova et al. 2020), которые были выполнены с участием 5 и 19 пациентов соответственно. Авторы (Megía García et al. 2020) не включили в обзор аналогичные русскоязычные публикации (Мошонкина и др. 2016; Виссарионов и др. 2016; Савенкова и др. 2019; Баиндурашвили и др. 2020). В русскоязычных исследованиях общее число пациентов, проходивших реабилитацию с использованием ЧССМ — 19, число пациентов в каждом исследовании — от 1 до 10 (среднее и медиана — 4). Уровень ТСМ — от Т5 до L1. Функциональные возможности пациентов — от минимальной утраты двигательных функций до паралича. Все клинические исследования продемонстрировали инициацию двигательной активности в нижних и верхних конечностях при расположении стимулирующих электродов между позвонками Т11–Т12 и С4–С7 (над поясничным и шейным утолщениями спинного мозга) соответственно. Во всех исследованиях сообщалось о возникновении или увеличении произвольной двигательной реакции, об увеличении силы мышц после курса с использованием ЧССМ. Таким образом, в разных исследовательских центрах на небольших группах пациентов продемонстрировано, что нейромодуляторное свойство ЧССМ может быть использовано для увеличения мышечной силы, инициации и улучшения произвольных движе-

ний у пациентов с хроническим повреждением спинного мозга.

Задачей настоящей работы было сделать экспертную оценку использования ЧССМ в практике двигательной реабилитации пациентов с ТСМ на стадии амбулаторной реабилитации. Показано, что более 70 % пациентов с ТСМ страдают множественными травмами, что способствует высокому уровню сопутствующих осложнений в долгосрочной фазе лечения (Hebert, Burnham 2000). В настоящем исследовании проанализированы результаты реабилитации пациентов, репрезентативно представляющие совокупность пациентов с ТСМ, у которых проблемы недостаточности движений, вызванные травмой, осложнены сопутствующими заболеваниями.

Методы и материалы

Проанализированы результаты реабилитации пациентов, которые проходили лечение в реабилитационном центре «ЭйрМЕД» (Санкт-Петербург) с ноября 2018 до декабря 2019. Медицинскую помощь пациентам оказывали амбулаторно, в помещениях реабилитационного центра, а также выездной бригадой дома у пациента. Выборка состояла из пациентов, самостоятельно обратившихся в реабилитационный центр с целью улучшения двигательных функций, соответствовавших критериям проведения реабилитационных процедур с использованием ЧССМ и не имевших абсолютных противопоказаний для ЧССМ.

Критерии оказания реабилитационной помощи с применением ЧССМ: ТСМ с давностью от полугода и дольше, затруднения в движении вследствие ТСМ, мотивированность пациента и/или его родственников на восстановление самостоятельных движений, наличие реабилитационного потенциала, выявленного по записям в медицинских документах и при осмотре во время комплексного первичного приема (КПП) с использованием ЧССМ.

Абсолютные противопоказания к использованию ЧССМ: острая соматическая патология или обострение хронического заболевания, эпилепсия в анамнезе, психические заболевания, повреждение кожных покровов (незажившие пролежни, язвы) в местах наложения электродов, гнойные воспалительные процессы.

Относительные противопоказания: ЧССМ одиночными импульсами не вызывает двигательный ответ, уровень спастичности 4–5 баллов по шкале Эшворта, имплантированные стимуляторы. Возможность пренебречь относитель-

ными противопоказаниями, определялась в процессе КПП. В частности, если степень спастичности уменьшалась на фоне стимуляции, то пациенту назначали реабилитацию с ЧССМ.

В процессе КПП для каждого пациента определяли реабилитационную цель (научиться сидеть без опоры, или увеличить силу захвата кисти, или научиться пересаживаться с инвалидной коляски на кушетку и т. п.); проводили неврологический осмотр, при необходимости подбирали технические средства реабилитации (ТСР), используемые для компенсации или устранения стойких ограничений жизнедеятельности; назначали, если необходимо, дополнительные исследования и консультации у специалистов, без решения которых невозможно достичь реабилитационной цели; определяли режимы стимуляции ЧССМ и направления работы с ЛФК.

Режимы и локусы стимуляции ЧССМ выбирали в зависимости от реабилитационных целей с учетом результатов всех опубликованных ранее исследований (Megía García et al. 2020; Мошонкина и др. 2016; Виссарионов и др. 2016; Савенкова и др. 2019; Баиндурашвили и др. 2020).

Для активации работы рук катод размещали в области С5–С6 позвонков, пару анодов — над ключицами. Для активации мышц туловища — катоды в области С5–С6 и/или Т11–Т12, аноды над гребнями подвздошных костей. Для активации мышц ног — катоды в области Т11–Т12 и/или L1–L2 позвонков, пару анодов — над гребнями подвздошных костей. Если место стимуляции спинного мозга, соответствующее ранее описанному в публикациях, совпадало с местом травмы и/или там располагалась фиксирующая металлоконструкция, то подбирали иное место, при стимуляции которого можно было вызвать двигательную реакцию.

Первичную ЧССМ начинали одиночными прямоугольными импульсами длительностью 1 мс при положении пациента лежа на спине. Частота следования импульсов < 0,5 Гц. Интенсивность тока постепенно увеличивали от 0 мА, наблюдая за двигательными и иными реакциями.

Определив минимальную интенсивность тока, вызывающую двигательный ответ (пороговый ток) на одиночные импульсы, подбирали параметры ЧССМ для непрерывной ритмической стимуляции. Задача — подобрать режим, оптимально соответствующий реабилитационной цели. Ритмическую ЧССМ проводили монополярными или биполярными прямоугольными импульсами с частотой следования импульсов — 5 кГц, частотой модуляции — 15–50 кГц.

При выборе частоты модуляции ориентировались на опубликованные ранее данные (Megía García et al. 2020; и др.); частоту модуляции уменьшали относительно выбранной, если с такой частотой увеличивалась спастичность. Интенсивность стимуляции — пороговая или надпороговая, вызывающая субмаксимальный двигательный ответ.

Для ЧССМ использовали стимулятор Нео-Стим-5 (ООО Косима), электроды (WFB02 QWER, Китай; BF4, LEAD-LOC, Inc., США). Катоды круглые, диаметром 2,5–3 см, с адгезивным токопроводящим слоем. Аноды прямоугольные, с адгезивным токопроводящим слоем, размером 5 × 10 см². Подробно техника ЧССМ описана ранее (Савенкова и др. 2019).

Курс реабилитации состоял из 11–19 процедур (среднее и медиана 12) длительностью до 2-х часов. Процедуры проходили ежедневно, 5–6 раз в неделю. Процедура состояла из ЛФК, ЧССМ в сочетании с ЛФК, эрготерапии, периодов отдыха между воздействиями. Длительность ЧССМ варьировала от 20 мин до 1 ч и увеличивалась в течение курса. Параметры ЧССМ, подобранные во время первой процедуры, корректировали, оставаясь в диапазоне параметров, при которых ЧССМ вызывала субмаксимальный двигательный ответ. Если стимуляция в процессе ЛФК вызывала болезненные ощущения, стимулировали с подпороговой интенсивностью. ЛФК состояла из упражнений, готовящих к выполнению навыков, выбранных в качестве реабилитационной цели. При проведении ЛФК в помещении реабилитационного центра использовали комплекс «Хабилект» (ООО «Хабилект»), который позволяет корректировать движения пациента при помощи зрительной обратной связи. Также этот комплекс использовали для количественной оценки кинематики движений, которые проводили до и после курса.

Результаты реабилитации определяли на следующий день после завершения всех процедур: проводили неврологический осмотр, определяли степень достижения реабилитационной цели, формулировали следующую реабилитационную цель, обучали пациента самостоятельным упражнениям ЛФК для закрепления достигнутой цели, назначали, при необходимости, ТСР.

Статистический анализ всех полученных данных был невозможен из-за неоднородности сравниваемых групп (по количеству, по уровню и степени тяжести травмы, по давности травмы и т. д.), многие показатели не были нормально распределены. Нормальность распределения величин пороговых токов и токов

непрерывной стимуляции была проверена, для статистического анализа этих значений был применен критерий Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Пациенты

Представлены результаты 60 пациентов с ТСМ вследствие травмы позвоночника на верхнешейном (СI–СIV), на шейно-грудном (CV–CVIII и TII–TIII), на грудном (TII–ТХII) и пояснично-крестцовом (LI–LV, SI–SII) уровнях. Численность групп была неоднородной. Доля пациентов с травмой на уровне СI–СIV составляла 10 % от общего числа пациентов, на уровне CV–TII — 38 %, на уровне TII–ТХII — 47 %, на уровне LI–SII — 5 % (табл. 1). Такое распределение соответствует частоте встречаемости травм в разных отделах позвоночника, описанной для России (Норкин и др. 2014) и США (Chen et al. 2016). Травмы позвоночника на двух уровнях имели 8 пациентов (рис. 1А). Металлоконструкции, стабилизирующие позвоночник, были установлены у 45 пациентов (рис. 1А). Хирургические операции, как правило, были проведены в короткие сроки после ТСМ:

в группе пациентов с травмой на уровне СI–СIV медиана составляла 4 дня после ТСМ, в группе CV–TII — 1 день, в группе TII–ТХII — 2 дня, в группе LI–SII — 1 день.

Численность мужчин в каждой группе составляла не меньше ½ (табл. 1). Средний возраст пациентов составил 32 года (диапазон 15–52 года), средний срок после травмы — 4,8 года (диапазон 0,5–23 года) (рис. 1В, 1С). Самые частые причины травмы: ДТП, ныряние на мелководье, падение с высоты.

Основная причина, из-за которой пациенты обратились в реабилитационный центр, была связана с серьезной двигательной дисфункцией, среди частых диагнозов — тетрапарез разной степени, верхний парапарез, нижняя параплегия, нарушение глубокой и поверхностной чувствительности (табл. 1). Средний уровень спастичности мышц нижних конечностей во всей группе пациентов — ~1,5 балла по шкале Эшворта, минимальная спастичность была у пациентов с травмой на уровне LI–SII (< 1 балла), в остальных группах спастичность заметно не отличалась (рис. 1D).

Функционально значительные неврологические нарушения у разных пациентов проявлялись

Табл. 1. Клинические характеристики пациентов
Table 1. Clinical characteristics of patients

Уровень травмы (n ¹ /m ²)	Диагнозы	Функциональные ограничения
СI–СIV (6/5)	Верхний смешанный парапарез, нижняя параплегия; нарушение глубокой и поверхностной чувствительности; НФТО ³	Отсутствие самостоятельной ходьбы, отсутствие позы стоя, самостоятельное поддержание позы сидя, ограничение функций верхних конечностей, ограничение самообслуживания; ощущение позыва за минуту до мочеиспускания; НФТО
CV–TII (23/16)	Тетрапарез легкой степени; верхний вялый парапарез, нижняя спастическая параплегия; нижний парапарез; нарушение глубокой и поверхностной чувствительности; НФТО	Отсутствие самостоятельной ходьбы, отсутствие позы стоя, возможно самостоятельное поддержание позы сидя без опоры или отсутствие удержания позы сидя без опоры, ограничение функций верхних конечностей, ограничение самообслуживания; НФТО
TII–ТХII (28/22)	Нижний парапарез; нижняя параплегия; нарушение глубокой и поверхностной чувствительности; НФТО	Отсутствие самостоятельной ходьбы, отсутствие позы стоя, НФТО
LI–SII (3/2)	Нижняя параплегия; нижний парапарез; контрактуры голеностопных суставов; гипотрофия мышц голени; НФТО	Самостоятельная ходьба только с ТСР ⁴ ; затруднение ходьбы; разница в длинах ног; отсутствие функций голеностопных суставов; функции малого таза снижены

¹ n — пациентов в группе

² m — мужчин в группе

³ НФТО — недостаточность функций тазовых органов

⁴ ТСР — техническое средство реабилитации

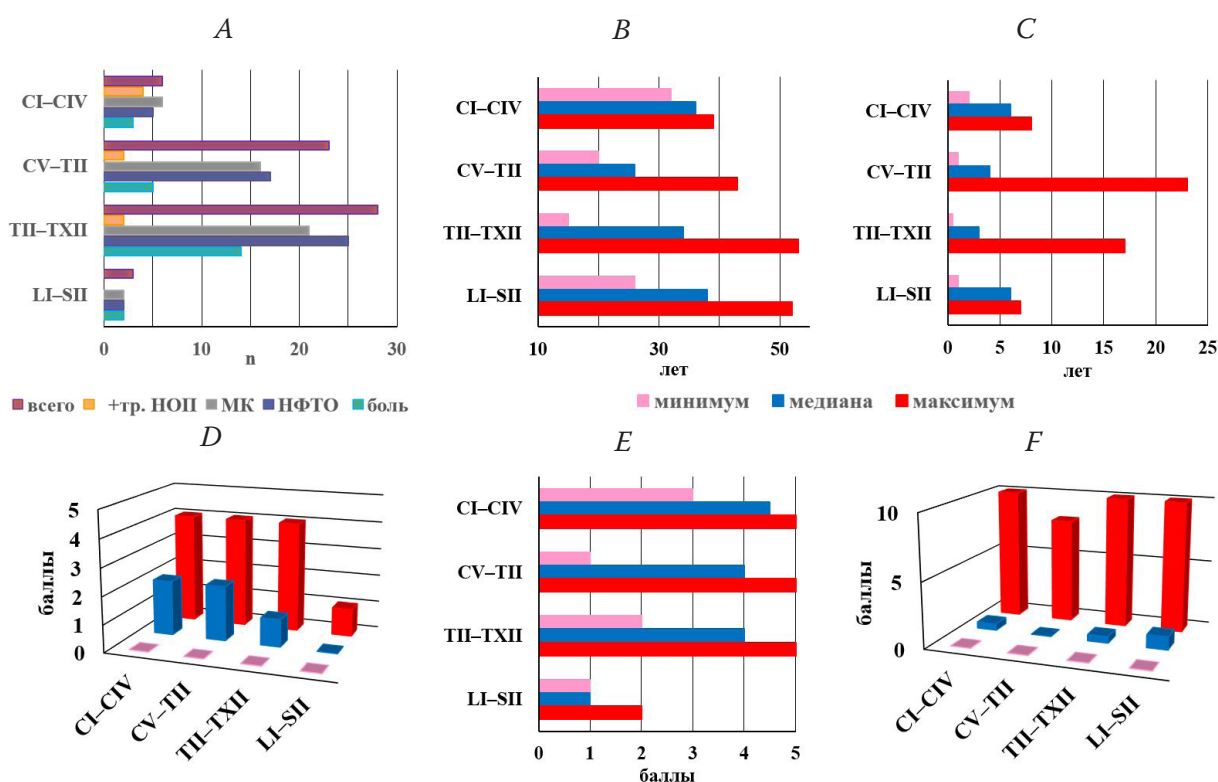


Рис. 1. Клинико-демографические характеристики пациентов (N = 60) в зависимости от уровня травмы спинного мозга. CI–CIV, CV–TII, TII–TXII, LI–SII — позвонки. А: число пациентов с ТСМ на указанном уровне (всего), с дополнительной травмой в нижележащем отделе позвоночника (+ тр. НОП), со стабилизирующей позвоночник металлоконструкцией (МК), с нарушением функций тазовых органов (НФТО), с хронической болью (боль). В: возраст. С: срок после травмы. D: спастичность мышц нижних конечностей по шкале Эшворта. E: степень инвалидизации по шкале Рэнкина. F: интенсивность боли по 10-балльной шкале.

Fig. 1. Clinical and demographic characteristics of patients (N = 60) relative to the level of spinal cord injury. CI–CIV, CV–TII, TII–TXII, LI–SII — vertebrae. A: the number of patients with SCI at the indicated level (total), multilevel injury (+L), with spine stabilization devices (SD), with the pelvic organs dysfunction (PO), with chronic pain (pain). B: age. C: period after injury. D: spasticity of the muscles of the lower extremities, Ashworth scale. E: the disability degree, Rankin scale. F: pain, a 10-point scale.

по-разному: в отсутствии или затрудненности самостоятельной ходьбы, в отсутствии позы стоя, невозможности поддержания позы сидя, в ограничении функций верхних конечностей и т. п. (табл. 1). Функциональные ограничения приводили к серьезным затруднениям в самообслуживании. Средняя степень инвалидизации среди пациентов составила ~3,6 баллов по шкале Рэнкина, наименьшая инвалидизация (~1 балла) была в группе пациентов с травмой на уровне LI–SII, в остальных группах степень инвалидизации заметно не отличалась (рис. 1E).

Все пациенты ранее проходили курсы комплексной реабилитации, были мотивированы на восстановление самостоятельных движений, их поддерживали родственники.

У 82 % пациентов ТСМ была осложнена нарушением функций тазовых органов (НФТО)

(рис. 1A). Это в ~3 раза превышает число таких осложнений у пациентов с ТСМ, указанное в одном из исследований (Норкин и др. 2014), где учтены пациенты, которые проходили лечение в стационарных условиях в крупном медицинском центре. Вероятно, различия в частоте осложнений в виде НФТО у пациентов связаны с разными причинами поступления пациентов в этот центр и в реабилитационный центр, на базе которого проведено настоящее исследование.

24 пациента испытывали хроническую боль, среднее ~4 баллов по 10-балльной аналоговой шкале боли (рис. 1A, 1F). Боль проявлялась при нагрузке, или присутствовала постоянно, или возникала во время ночного сна. Локализация боли: предплечья, ноги, поясница.

Все предшествовавшие исследования были проведены с участием небольших групп паци-

ентов, отобранных по жестким критериям включения и исключения, у них не было осложнений ТСМ, в то время как осложнения, как правило, сопровождают хроническую ТСМ (Hebert, Burnham 2000). Кроме серьезных двигательных нарушений, вызванных ТСМ, у них не было других заболеваний, влияющих на качество жизни и существенно ограничивающих возможности самообслуживания. Впервые мы исследуем возможность применения ЧССМ в двигательной реабилитации пациентов с хронической ТСМ, осложненной травмой в нижележащем отделе, с НФТО, с хронической болью.

Результаты единичной процедуры ЧССМ

Стимуляция одиночными импульсами у 59 пациентов из 60 вызвала двигательные реакции. Пороговый ток варьировал от пациента к пациенту, все значения находились в диапазоне 6–130 мА, для большинства пациентов одиночные импульсы интенсивностью ~30 мА вызвали двигательную реакцию (рис. 2А).

Характер двигательных реакций зависел от уровня стимуляции. В случае расположения катода в проекции шейного утолщения, анодов — над ключицами в ответ на каждый импульс наблюдали движения пальцев рук, или сокращения мышц рук, или сочетание этих двигательных реакций. При расположении катода над проекцией поясничного утолщения, а анодов — над гребнями подвздошных костей наблюдали сокращения мышц ног, или движения в голеностопных суставах, или подергивания одного или нескольких пальцев ног, или комбинацию этих движений. Весь спектр двигательных реакций в ответ на ЧССМ одиночными импульсами представлен в табл. 2.

Величина пороговых токов зависела от позиций электродов (рис. 2В). При расположении катода в области С1–С4 и С5–Т1 позвонков, а анодов над ключицами пороговые токи для активации мышц верхних конечностей составляли $21 \pm 6,5$ и $36 \pm 23,4$ мА соответственно.

При расположении катода в области С5–Т1, Т1–Т12 и L1–S2 позвонков, а анодов — над гребнями подвздошных костей, пороговые токи для активации мышц нижних конечностей составляли $23 \pm 14,6$, $34 \pm 21,3$ и $32 \pm 23,1$ мА соответственно.

При расположении анодов над гребнями подвздошных костей значения пороговых токов достоверно меньше ($p < 0,05$) при стимуляции в зоне С5–Т1 позвонков, чем при стимуляции в зоне Т1–Т12 и L1–S2. Также достоверно меньше пороговые токи в комбинации электродов «катод — С5–Т1, аноды — гребни подвздошных костей», чем в комбинации «катод — С5–Т1, аноды — ключицы». Мы связываем

ответы в мышцах ног при стимуляции шейного, верхнегрудного уровня со стимуляцией бедренного нерва под анодами.

Ритмическая ЧССМ с частотой 15–50 Гц вызвала движения в тех же суставах или сокращения тех же групп мышц, что и ЧССМ одиночными импульсами. Как было указано в разделе «Методика», для ритмической стимуляции подбирали параметры тока, при которых наблюдали субмаксимальный двигательный ответ. Интенсивность тока варьировала в диапазоне 10–90 мА, для большинства пациентов рабочие токи были ~40 мА (рис. 2С).

Кроме двигательных эффектов стимуляции, наблюдали изменение спастичности мышц, изменение температуры и цвета кожных покровов,

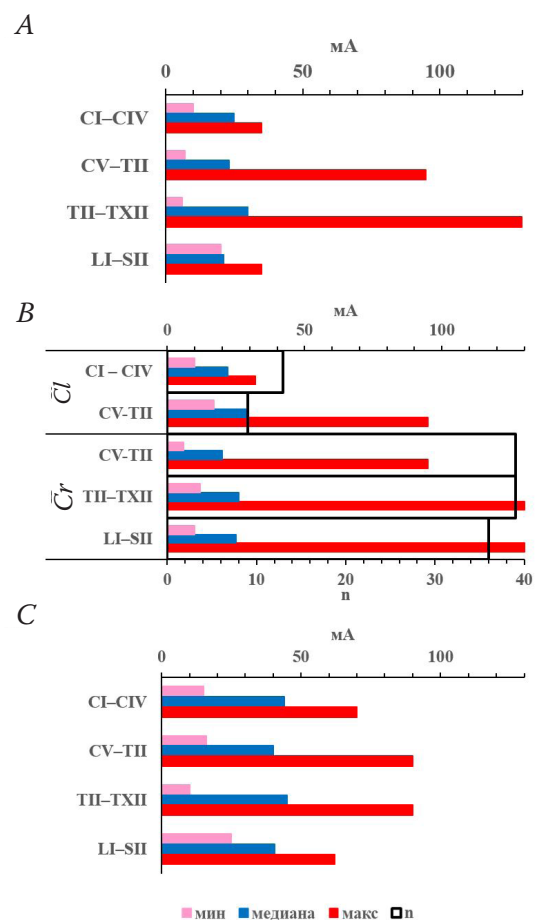


Рис. 2. Интенсивность тока при ЧССМ в зависимости от уровня травмы (А, С) и уровня стимуляции (В). С1–С4, С5–Т1, Т1–Т12, L1–S2 — позвонки. А, С: С1–S2 — уровни ТСМ. В: С1–S2 — положение катода; Cl — аноды на уровне ключиц; Cr — катоды на уровне гребней подвздошных костей; n — число случаев.

Fig. 2. The TESCS current relative to the injury level (A, C) and the stimulation level (B). C1–C4, C5–T1, T1–T12, L1–S2 — vertebrae. A, C: C1–S2 — SCI level. B: C1–S2 — cathode position; Cl — anodes at the level of the clavicles, Cr — anodes at the level of the iliac crests; n — the number of cases.

Табл. 2. Результаты единичной процедуры ЧССМ

Table 2. The results of a single TESCS treatment

Уровень травмы позвоночника	Уровни ЧССМ ⁵	Реакции на ЧССМ	
		двигательные	иные
СI–СIV	С2, С6, Т5, Т12, L1	Движения пальцев стоп и/или рук, сокращение мышц бедра	Уменьшение спастичности; потепление стоп и кистей; уменьшение боли
СV–ТII	С4–С5, С7–Т1, Т12–L1, L1–L2	Сокращения разгибателей предплечья, сокращение мышц брюшного пресса; движение большого пальца правой руки; двигательный ответ мышц бедра; двигательная реакция крупных мышц одной ноги	Усиление спастичности мышц ног; исчезновение болевых ощущений; ощущения пальцев стоп; ощущение полностью ног; ощущение ладоней
ТII–ТXII	С7–Т1, Т12–L1, L3–L4, L5–S1	Движения в ГЛС ⁶ ; движения пальцев стоп; движения пальца стопа; сокращение мышц голени и поочередное сгибание пальцев стоп; синхронная двигательная реакция крупных мышц ног	Снижение спастичности мышц голени; ощущение жжения от поясницы и ниже до ягодичной зоны, ощущение левой ноги; ощущение стоп и пальцев стоп; появление перистальтики кишечника
LI–SII	С7, Т5, Т11, L1, S1	Двигательный ответ пальца/пальцев ног	Теплее стали голени, появление чувствительности до середины голени или до ГЛС

⁵ Позвонки, на уровне которых помещали катоды

⁶ ГЛС — голеностопный сустав

уменьшение или исчезновение хронической боли, появление чувствительности (табл. 2). Следовательно, процедура ЧССМ воздействует не только на соматические, но и на висцеральные функции.

У пациента с ТСМ на уровне С7–Т1 и давностью травмы 2 года ритмическая стимуляция вызвала увеличение спастичности мышц ног, это было расценено как нежелательное явление, поэтому пациенту не проводили реабилитационные процедуры с ЧССМ. Также не рекомендовали спинальную стимуляцию и пациенту (ТСМ на уровне С6, давность травмы 2 года), у которого ЧССМ одиночными импульсами не вызвала двигательные реакции при всех возможных позициях стимулирующих электродов.

Результаты курса реабилитации с использованием ЧССМ

Реабилитационный курс с применением ЧССМ прошли 50 человек из всех пациентов, которые прошли КПП. Группа уменьшилась не только за счет 2 пациентов, которым была назначена реабилитация без ЧССМ, но и за счет 8 пациентов, которые по личным причинам отложили реабилитацию на более поздний срок. Из исследования выбыл 1 пациент с травмой

на уровне СI–СIV, 3 — на уровне СV–ТII, 5 — на уровне ТII–ТXII и 1 — на уровне LI–SII; все выбывшие — мужчины. У 12 % пациентов, прошедших реабилитационный курс, ТСМ была на двух уровнях (рис. 3). НФТО были у 4, 16, 20 и 2 пациентов из групп с травмой на уровне СI–СIV, СV–ТII, ТII–ТXII и LI–SII соответственно.

У всех пациентов, независимо от уровня ТСМ, в результате курса было получено улучшение двигательных функций по сравнению с результатами, зарегистрированными во время КПП (табл. 3). Это улучшение проявилось в увеличении мышечной силы, увеличении длительности выполнения значимых поз (поза сидя без опоры на руки, вертикальная стойка), изменении качества выполнения поз (например, замыкание коленных суставов в вертикальной стойке с возможностью баланса в стойке). Реабилитационных целей (табл. 3) достигли 65–100 % пациентов в зависимости от уровня ТСМ (рис. 3). Для достижения целей они восстановили двигательные навыки: переход из положения лежа на спине в положение сидя, ходьба на четвереньках, в положении сидя без опоры взять бутылку воды и пить без посторонней помощи, в вертикальной стойке перенос центра тяжести с одной ноги на другую с поочередным

Табл. 3. Результат реабилитационного курса с применением ЧССМ в зависимости от уровня травмы спинного мозга (изменения относительно результата, полученного во время первой процедуры)

Table 3. The result of the TESCOs rehabilitation relative to the injury level (changes in comparison with the results obtained after the first TESCO treatment)

Уровень травмы позвоночника	Цели реабилитации	Двигательные результаты	Изменения функций малого таза	Восстановленные навыки
С1–С4	Улучшение координации верхних конечностей; увеличение мышечной силы рук и туловища; удержание позы сидя с опорой / без опоры на руки; замыкание коленей в положении стоя; расширение зон чувствительности	Увеличение мышечной силы рук и ног; увеличение выносливости: длительность выполнения упражнений возросла в ~2 раза	Появление ощущения позывов к мочеиспусканию, дефекации	Поза сидя с опорой на руки до 1 мин 10 с; перемещение из положения сидя на полу, ноги прямые вперед, в положение сидя на полу, ноги согнутые; удержание вертикальной позы без опоры до 50 с
С5–Т1	Самостоятельные перевороты лежа; поза сидя с опорой на руки; поза сидя с прямой спиной без опоры на руки; ходьба на четвереньках; пересаживание с кушетки на коляску; улучшение позы стоя без опоры; ходьба с одной тростью	Удержание стабильной позы сидя без опоры увеличилась с 5–10 с до 50 с; удержание в позе стоя на коленях — с 10 с до ~2 мин; удержание вертикальной позы без опоры — с 2 до 20 мин; уменьшение спастичности на 1–2 балла	Учащение стула с 1 раза в 10 дней до 1 раза в 1–2 дня	Переход из положения лежа на спине в положение сидя; удержание позы сидя в корсете без опоры до 2 мин 40 с; ходьба на четвереньках вперед и назад; самостоятельно взять бутылку воды и пить без посторонней помощи
Т1–Т12	Перевороты лежа; удержание позы сидя без опоры; удержание позы на четвереньках; вертикальная поза стоя с опорой; замыкание коленей или одного колена в вертикальной стойке; ходьба с опорой на месте; ходьба по ровной поверхности с опорой на ходунки; снижение уровня спастичности; улучшение ощущения органов малого таза	Удержание позы сидя без опоры до 5 мин; уменьшение длительности ходьбы на четвереньках на 115 см с 6 мин до 2 мин 45 с; замыкание коленных суставов в позе стоя; увеличение длительности удержания позы сидя с упором ног в пол и без опоры на руки с 35 с до > 5 мин; увеличение длительности вертикальной стойки у шведской стенки с 5 с до 10 мин; увеличение длительности ходьбы с ходунками с 3 до 7 мин	Появление ощущения позывов к мочеиспусканию, дефекации	Может самостоятельно менять положение тела; поза сидя с ровной спиной без опоры на руки; ходьба на четвереньках до 15 мин; вертикальная стойка без опоры до 1 мин; перенос веса тела с одной ноги на другую в вертикальной стойке с попеременным замыканием коленных суставов
Л1–Л2	Укрепление мышц спины и нижних конечностей; поза стоя без опоры с замкнутыми коленями	Отрыв пятки от пола во время приседаний; появились движения в 1 пальце и 1 плюснефаланговом суставе ноги		Удержание баланса на одной ноге без опоры (5–10 мин)

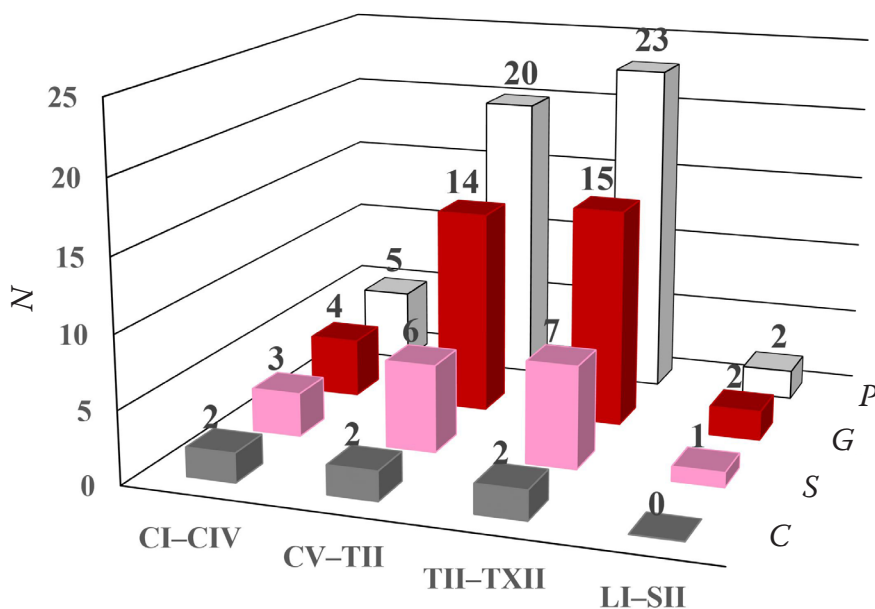


Рис. 3. Результат реабилитационного курса с применением ЧССМ в зависимости от уровня травмы спинного мозга (N = 50). Дополнение к табл. 3. Уровни ТСМ: как на рис. 1. P: количество пациентов с травмой в указанном отделе позвоночника, в том числе с сочетанной травмой в нижележащем отделе позвоночника (C). S: количество пациентов с диагностированным расширением зон чувствительности после курса. G: количество пациентов, у которых реабилитационная цель достигнута.

Fig. 3. The result of the TSCS rehabilitation relative to the injury level (N = 50). Supplement to Table 3. SCI levels as in Fig. 1. P: the number of patients with trauma in the specified spine level, including those with concomitant trauma in the lower spine (C). S: the number of patients diagnosed improvements in sensitivity after the rehabilitation. G: the number of patients who have achieved the rehabilitation goal.

замыканием коленных суставов и другие навыки (табл. 3).

Таким образом, использование ЧССМ для реабилитации тяжелых пациентов с ТСМ, у которых проблемы недостаточности движений, вызванные травмой, осложнены сопутствующими заболеваниями, приводит к восстановлению у них утраченных двигательных навыков, что улучшает их качество жизни, так как делает менее зависимыми от помощи окружающих.

Уменьшение спастичность мышц нижних конечностей после курса наблюдали у 2 пациентов с ТСМ на уровне CVI–TIII (с 2 до 1 балла по шкале Эшворта) и у 1 пациента с ТСМ на уровне TII–TXII (с 4 до 3 баллов).

У 34 % пациентов после курса отмечено улучшение поверхностной и глубокой чувствительности (рис. 3).

По 2 пациента из групп с ТСМ на уровнях C1–C4 и TII–TXII стали ощущать позывы к мочеиспусканию и дефекации. У 1 пациента с последствиями ТСМ на уровне CVI–TIII (давность травмы 23 года) в ходе курса отмечено значительное учащение дефекации и мочеиспускания (табл. 3).

Следовательно, двигательная реабилитация с применением ЧССМ приводит к существенным изменениям не только соматических, но и висцеральных функций, что требует дополнительного изучения. Такое развитие событий соответствует идеологии трансляционной медицины — стремление к излечению должно дополняться стремлением понять человеческие болезни и их сложности, и одним из важных аспектов трансляционной медицины является возвращение от «постели больного» в научные лаборатории для получения новых знаний (Mankoff et al. 2004).

В ходе курса было зарегистрировано 1 нежелательное явление. У пациента с ТСМ на уровне T5–T7 с 6 по 9 процедуру наблюдали увеличение спастичности с 2 до 3 баллов по шкале Эшворта. При выяснении обстоятельств пребывания пациента вне реабилитационного центра оказалось, что, начиная с 6 процедуры, пациент проходит курс иглорефлексотерапии по назначению других специалистов. В связи с этим трудно определить причину увеличения спастичности. Реабилитацию с применением ЧССМ остановили после 9 процедуры.

Клинические случаи

На примере трех пациентов показано, что использование ЧССМ в двигательной реабилитации, нацеленной на решение индивидуальных двигательных задач, приводит к решению этих задач. Клинические случаи представлены в порядке уменьшения тяжести двигательных нарушений, от пациента, неспособного самостоятельно без опоры сидеть, до пациента, не удерживающего физиологически нормальную вертикальную стойку и неспособного физиологически правильно идти. В каждом случае инструментальными методами продемонстрировано, что реабилитационные цели были достигнуты.

Пациент 1

История болезни № 036/19. Женщина, 26 лет, состояние после закрытого перелома остистых отростков С6–С7 и осложненного компрессионного перелома-вывиха Т6, Т7 вследствие ДТП, ушиб и сдавление спинного мозга на уровне Т6–Т7, множественные переломы поперечных отростков грудного отдела давностью 2,5 года. Прооперирована на 10 сутки, произведена резекция тел позвонков Т6–Т7, металлоостеосинтез раздвижным имплантатом и задняя комбинированная фиксация. Нижняя параплегия, нарушение поверхностной и глубокой чувствительности, НФТО. Функционально: трудности в поддержании позы сидя без опоры (< 1,5 мин), отсутствие возможности пересаживаться в коляску, отсутствие активных движений нижних конечностей. Спастичность отсутствует. Степень инвалидизации 4 балла по шкале Рэнкина.

Первая процедура ЧССМ. Катоды между позвонками С7–Т1, Т12–L1 и аноды — над гребнями подвздошных костей. Двигательная реакция на одиночные импульсы от мышц голени и стоп, пороговый ток 13 и 23 мА (С7 и Т12 соответственно). Реакция на ритмическую ЧССМ (20 мин) — видимое сокращение мышц голени и стопы, более выраженное справа. Максимальный ответ при ЧССМ с параметрами 16 мА, 10 Гц, биполярная форма импульсов на уровне С7 и 30 мА, 10 Гц, монополярная форма импульсов на уровне Т12.

12 процедур с целью укрепления мышц спины и пресса, с тренировкой навыка поддержания самостоятельной позы сидя без опоры с прямой спиной, без запрокидывания головы, с прямыми ногами на кушетке или с ногами с опорой в пол. В результате увеличено время удержания позы сидя без опоры на руки с ногами в пол

до 4 мин. Стабилометрическое исследование демонстрирует (рис. 4А) стабилизацию позы сидя после курса (уменьшение площади статокинезиограммы (ПС) в ~3 раза и уменьшение смещения центра давления (ЦД) вправо с ~10 см до ~1 см). Появились самостоятельные приведения и отведения бедра правой нижней конечности в позе сидя с порой на руки и ногами, вытянутыми перед собой. Совершила 2 самостоятельных пересаживания с кушетки в коляску с использованием доски для пересаживания. Расширение зоны глубокой чувствительности по задней поверхности до уровня середины бедра и до нижней трети бедра по передней поверхности.

Пациент 2

История болезни № 0103/19. Мужчина, 42 года, состояние после компрессионного перелома С6–С7 позвонков, давность травмы 5 лет. Прооперирован в день травмы, произведен передний спондилодез С6–С7, металлоостеосинтез С5–С7. Нижняя спастическая параплегия, слабо выраженный парез пальцев кисти, нарушение поверхностной и глубокой чувствительности, НФТО. Функционально: трудности в поддержании стабильной позы сидя без опоры (< 20 сек), снижена мелкая моторика, ограничено самостоятельное перемещение в виде пересаживания в коляску с кровати, пересаживания на пол или мат для выполнения упражнений, может стоять, держась за опору (> 30 мин) с гиперизгибами позвоночника. Спастичность мышц нижних конечностях 3 балла по шкале Эшворта. Степень инвалидизации 4 балла по шкале Рэнкина.

Первая процедура ЧССМ. Катоды между позвонками С3–С4 и Т12–L1, аноды — над гребнями подвздошных костей. Реакция на одиночные импульсы — сокращение мышц бедра, пороговый ток ~20 мА. Реакция на непрерывную ЧССМ (20 Гц, 20 мин) — последовательное сокращение мышц сверху вниз.

12 процедур с тренировкой навыка поддержания самостоятельной позы сидя без опоры на руки с ногами в пол и вертикализацией. Увеличена длительность удержания позы сидя без опоры на руки с ногами в пол в > 7 раз (до 140 сек). Стабилометрическое исследование позы сидя (рис. 4В) показывает увеличение устойчивости позы (смещение ЦД вправо уменьшилось с ~20 см до ~1 см). Достигнуто качественное улучшение баланса в позе сидя без опоры (может оказывать сопротивление на внешние толчки), что расширило возможности самообслуживания во время одевания/

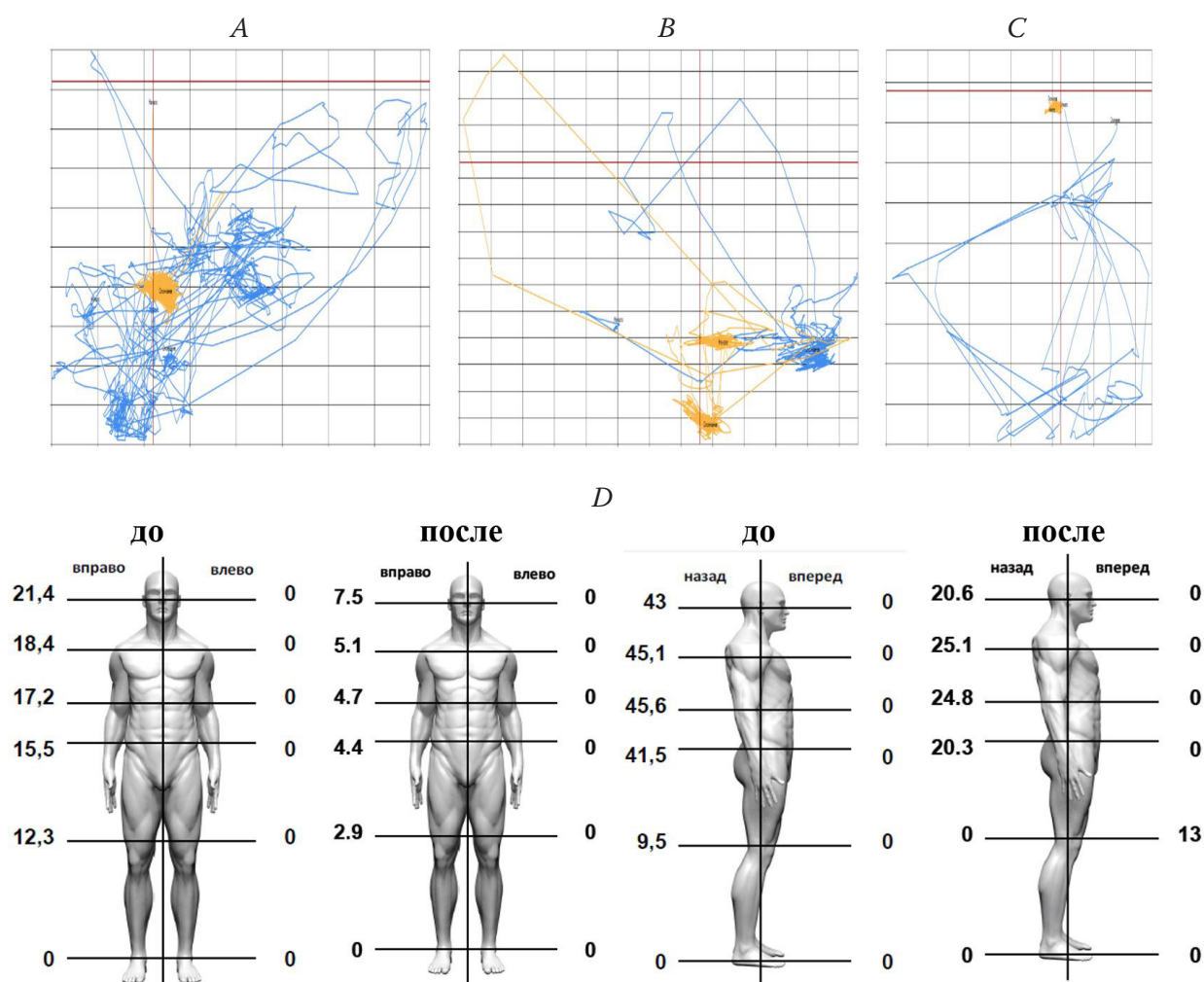


Рис. 4. Визуализация изменений позы пациентов до и после реабилитационного курса. А, В, С: стабилограммы до (синий) и после (желтый) курса; регистрация в положении сидя, ступни в пол, руки прямо перед собой у пациентов 1 и 2 (А и В соответственно) и в вертикальной стойке с опорой на ходунки у пациента 3 (С): длительность регистрации ~150 с; сетка 5 × 5 см²; красные линии: проекции сагиттальной и фронтальной плоскостей, проходящих посередине между стопами и через межлодыжечную линию соответственно (по: Скворцов 2010); смещение вперед соответствует верху на рисунке. D: среднее смещение положения тела (см) пациента 2 в вертикальной стойке; длительность регистрации 180 с (до) и 166 с (после).

Fig. 4. Visualization of changes in the patient posture before and after the rehabilitation. A, B, C: stabilograms before (blue) and after (yellow) the course; records in a sitting position, feet on the floor, hands straight in front of oneself in patients 1 and 2 (A and B, respectively) and in an upright stand with a walker in patient 3 (C); records ~150 s; scale grid 5×5 cm²; red lines: projections of the sagittal and frontal planes passing in the middle between the feet and across the interleolar line, respectively (Skvortsov 2010); the forward shift is the top of the figure. D: average displacement of the body position (cm) of patient 2 in an upright stand; records for 180 s (before) and 166 s (after).

раздевания и проведения бытовых манипуляций. Получено качественное улучшение позы стоя, держась за опору, с компенсацией гиперизгибов позвоночника без изменения длительности стойки (рис. 4D). Спастичность мышц нижних конечностей снижена до 1,5 баллов.

Пациент 3

История болезни № 059/19. Мужчина, 33 года, состояние после взрывного перелома тела

и задних элементов Т8 позвонка с отрывом головок ребер слева. Компрессионно-оскольчатый перелом тела Т12 с сужением позвоночного канала. Прооперирован в первые сутки, металлоостеосинтез на уровне Т7–Т10. Давность 14 месяцев. Нижний парапарез, НФТО. Функциональные ограничения: умеренно-выраженная трудность контроля активных движений нижних конечностей в области тазобедренных суставов, интенсивно выраженная трудность активных

движений коленных суставов и отсутствие контролируемых движений стоп. Поза стоя с опорой на ходунки с компенсацией удержания баланса за счет усиления грудного кифоза, переразгибания поясничного лордоза и помощи движениями головой, при исправлении компенсирующего положения пациент теряет равновесие и падает, шаг с опорой на ходунки производится за счет компенсирующих движений в поясничном отделе позвоночника и поворота таза, без сгибания/разгибания тазобедренных суставов. Спастичность мышц нижних конечностях 1 балл по шкале Эшворта. Степень инвалидизации 3 балла по шкале Рэнкина.

Первая процедура ЧССМ. Катоды между позвонками С7–Т1, Т12–L1 и L1–L2, аноды — над гребнями подвздошных костей. Реакция на одиночные импульсы — двигательный от мышц стоп, сгибание/разгибание первых-вторых пальцев стоп. Пороговый ток ~30 мА на всех уровнях стимуляции. Реакция на непрерывную ЧССМ (20 Гц, 20 мин) — сокращение мышц нижних конечностей целиком и ощущение пациентом «мурашек» на стопах.

12 процедур с тренировкой навыка поддержания позы стоя с опорой на ходунки, ровной спиной и контролем баланса положения тела, а также тренировка управляемых движений голени и стопами. В результате: устойчивая поза стоя с опорой на ходунки с ровной спиной и центральным положением головы. Результат стабилметрического исследования в позе стоя (рис. 4С) — уменьшение ПС в ~5 раза и умень-

шение смещения ЦД назад с ~15 см до ~2 см. Достигнута способность ходьбы на месте без потери контроля положения, с движениями в тазобедренных суставах.

Выводы

Впервые показано, что ЧССМ может быть использована в курсе двигательной реабилитации тяжелых пациентов с осложнениями после ТСМ.

Использование ЧССМ в краткосрочном курсе двигательной реабилитации позволяет восстанавливать двигательные навыки, утраченные вследствие ТСМ.

Использование ЧССМ, разработанной для исследования локомоторных нейронных сетей спинного мозга человека, поднимает на новый уровень реабилитацию после ТСМ.

ЧССМ в процедуре двигательной реабилитации приводит к существенным изменениям не только соматических, но и висцеральных функций.

Необходимо получение новых знаний о механизмах регуляции висцеральных функций с помощью неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга.

Благодарности

Авторы благодарят Наталью Крутикову, генерального директора ООО «ЭйрМЕД», за помощь в организации исследования и Алексея Козлова, генерального директора ООО «Хабилект», за помощь в демонстрации стабилотрамм.

Литература

- Баиндурашвили, А. Г., Виссарионов, С. В., Белянчиков, С. М. и др. (2020) Комплексное лечение пациента с осложненной травмой грудного отдела позвоночника с использованием методики чрескожной электрической стимуляции спинного мозга (клиническое наблюдение). *Гений ортопедии*, т. 26, № 1, с. 79–88. DOI: 10.18019/1028-4427-2020-26-1-79-88
- Виссарионов, С. В., Солохина, И. Ю., Икоева, Г. А. и др. (2016) Двигательная реабилитация пациента с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы методом неинвазивной электростимуляции спинного мозга в сочетании с механотерапией. *Хирургия позвоночника*, т. 13, № 1, с. 8–12. DOI: 10.14531/ss2016.1.8-12
- Мошонкина, Т. Р., Шапкова, Е. Ю., Сухотина, И. А. и др. (2016) Исследование сочетания неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга и активации серотониновых рецепторов у пациентов с хроническим поражением спинного мозга. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*, т. 161, № 6, с. 700–705.
- Норкин, И. А., Баратов, А. В., Федонников, А. С. и др. (2014) Значимость анализа медико-социальных параметров травм позвоночника в организации специализированной медицинской помощи. *Хирургия позвоночника*, № 3, с. 95–100. DOI: 10.14531/ss2014.3.95-100
- Савенкова, А. А., Сарана, А. М., Щербак, С. Г. и др. (2019) Неинвазивная электрическая стимуляция спинного мозга в комплексной реабилитации больных со спинномозговой травмой. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*, т. 96, № 5, с. 11–18. DOI: 10.17116/kurort20199605111
- Скворцов, Д. В. (2010) *Стабилметрическое исследование: краткое руководство*. М.: Маска, 172 с.
- Al'joboori, Y., Massey, S. J., Knight, S. L. et al. (2020) The effects of adding transcutaneous spinal cord stimulation (tSCS) to sit-to-stand training in people with spinal cord injury: A pilot study. *Journal of Clinical Medicine*, vol. 9, no. 9, article 2765. DOI: 10.3390/jcm9092765

- Chen, Y., He, Y., DeVivo, M. J. (2016) Changing demographics and injury profile of new traumatic spinal cord injuries in the United States, 1972–2014. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 97, no. 10, pp. 1610–1619. DOI: 10.1016/j.apmr.2016.03.017
- Dimitrijevic, M. R., Gerasimenko, Yu., Pinter, M. M. (1998) Evidence for a spinal central pattern generator in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 860, no. 1, pp. 360–376. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1998.tb09062.x
- Gerasimenko, Yu. P., Lu, D. C., Modaber, M. et al. (2015) Noninvasive reactivation of motor descending control after paralysis. *Journal of Neurotrauma*, vol. 32, no. 24, pp. 1968–1980. DOI: 10.1089/neu.2015.4008
- Gerasimenko, Yu., Roy, R. R., Edgerton, V. R. (2008) Epidural stimulation: Comparison of the spinal circuits that generate and control locomotion in rats, cats and humans. *Experimental Neurology*, vol. 209, no. 2, pp. 417–425. DOI: 10.1016/j.expneurol.2007.07.015
- Gorodnichev, R. M., Pivovarova, E. A., Puhov, A. et al. (2012) Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: A noninvasive tool for the activation of stepping pattern generators in humans. *Human Physiology*, vol. 38, no. 2, pp. 158–167. DOI: 10.1134/S0362119712020065
- Hebert, J. S., Burnham, R. S. (2000) The effect of polytrauma in persons with traumatic spine injury: A prospective database of spine fractures. *Spine*, vol. 25, no. 1, pp. 55–60. DOI: 10.1097/00007632-200001010-00011
- Mankoff, S. P., Brander, C., Ferrone, S., Marincola, F. M. (2004). Lost in translation: Obstacles to translational medicine. *Journal of Translational Medicine*, vol. 2, no. 1, article 14. DOI: 10.1186/1479-5876-2-14
- Megía García, A., Serrano-Muñoz, D., Taylor, J. et al. (2020) Transcutaneous spinal cord stimulation and motor rehabilitation in spinal cord injury: A systematic review. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, vol. 34, no. 1, pp. 3–12. DOI: 10.1177/1545968319893298
- Shapkova, E. Y., Pismennaya, E. V., Emelyannikov, D. V., Ivannenko, Y. (2020) Exoskeleton walk training in paralyzed individuals benefits from transcutaneous lumbar cord tonic electrical stimulation. *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, article 416. DOI: 10.3389/fnins.2020.00416

References

- Al'joboori, Y., Massey, S. J., Knight, S. L. et al. (2020) The effects of adding transcutaneous spinal cord stimulation (tSCS) to sit-to-stand training in people with spinal cord injury: A pilot study. *Journal of Clinical Medicine*, vol. 9, no. 9, article 2765. DOI: 10.3390/jcm9092765 (In English)
- Baindurashvili, A. G., Vissarionov, S. V., Belyanchikov, S. M. et al. (2020) Kompleksnoye lecheniye patsiyenta s oslozhnennoy travmoy grudnogo otdela pozvonochnika s ispol'zovaniyem metodiki chreskozhnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga (klinicheskoye nablyudeniye) [Comprehensive treatment of a patient with complicated thoracic spine injury using percutaneous electrical spinal cord stimulation (case report)]. *Genij ortopedii*, vol. 26, no. 1, pp. 79–88. DOI: 10.18019/1028-4427-2020-26-1-79-88 (In Russian)
- Chen, Y., He, Y., DeVivo, M. J. (2016) Changing demographics and injury profile of new traumatic spinal cord injuries in the United States, 1972–2014. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 97, no. 10, pp. 1610–1619. DOI: 10.1016/j.apmr.2016.03.017 (In English)
- Dimitrijevic, M. R., Gerasimenko, Yu., Pinter, M. M. (1998) Evidence for a spinal central pattern generator in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 860, no. 1, pp. 360–376. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1998.tb09062.x (In English)
- Gerasimenko, Yu. P., Lu, D. C., Modaber, M. et al. (2015) Noninvasive reactivation of motor descending control after paralysis. *Journal of Neurotrauma*, vol. 32, no. 24, pp. 1968–1980. DOI: 10.1089/neu.2015.4008 (In English)
- Gerasimenko, Yu., Roy, R. R., Edgerton, V. R. (2008) Epidural stimulation: Comparison of the spinal circuits that generate and control locomotion in rats, cats and humans. *Experimental Neurology*, vol. 209, no. 2, pp. 417–425. DOI: 10.1016/j.expneurol.2007.07.015 (In English)
- Gorodnichev, R. M., Pivovarova, E. A., Puhov, A. et al. (2012) Transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord: A noninvasive tool for the activation of stepping pattern generators in humans. *Human Physiology*, vol. 38, no. 2, pp. 158–167. DOI: 10.1134/S0362119712020065 (In Russian)
- Hebert, J. S., Burnham, R. S. (2000) The effect of polytrauma in persons with traumatic spine injury: A prospective database of spine fractures. *Spine*, vol. 25, no. 1, pp. 55–60. DOI: 10.1097/00007632-200001010-00011 (In English)
- Mankoff, S. P., Brander, C., Ferrone, S., Marincola, F. M. (2004). Lost in translation: Obstacles to translational medicine. *Journal of Translational Medicine*, vol. 2, no. 1, article 14. DOI: 10.1186/1479-5876-2-14 (In English)
- Megía García, A., Serrano-Muñoz, D., Taylor, J. et al. (2020) Transcutaneous spinal cord stimulation and motor rehabilitation in spinal cord injury: A systematic review. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, vol. 34, no. 1, pp. 3–12. DOI: 10.1177/1545968319893298 (In English)
- Moshonkina, T. R., Shapkova, E. Yu., Sukhotina, I. A. et al. (2016) Issledovanie sochetaniya neinvazivnoy elektricheskoy stimulyatsii spinnogo mozga i aktivatsii serotoninovykh retseptorov u patsientov s khronicheskim porazheniem spinnogo mozga [Effect of combination of non-invasive spinal cord electrical stimulation and serotonin receptor

- activation in patients with chronic spinal cord lesion]. *Byulleten' eksperimental'noj biologii i mediciny*, vol. 161, no. 6, pp. 700–705. (In Russian)
- Norkin, I. A., Baratov, A. V., Fedonnikov, A. S. et al. (2014) Znachimost' analiza mediko-sotsial'nykh parametrov travm pozvonochnika v organizatsii spetsializirovannoj meditsinskoj pomoshchi [The importance of analysis of medical and social parameters of traumatic spine injuries for organization of specialized medical care]. *Hirurgiâ pozvonočnika — Spine Surgery*, no. 3, pp. 95–100. DOI: 10.14531/ss2014.3.95-100 (In Russian)
- Savenkova, A. A., Sarana, A. M., Shcherbak, S. G. et al. (2019) Neinvazivnaya elektricheskaya stimulyatsiya spinnogo mozga v kompleksnoj reabilitatsii bol'nykh so spinnomozgovoj travmoj [Noninvasive spinal cord electrical stimulation in the complex rehabilitation of patients with spinal cord injury]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kultury — Problems of Balneology, Physiotherapy, and Exercise Therapy*, vol. 96, no. 5, pp. 11–18. DOI: 10.17116/kurort20199605111 (In Russian)
- Shapkova, E. Y., Pismennaya, E. V., Emelyannikov, D. V., Ivannenko, Y. (2020) Exoskeleton walk training in paralyzed individuals benefits from transcutaneous lumbar cord tonic electrical stimulation. *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, article 416. DOI: 10.3389/fnins.2020.00416 (In English)
- Skvortsov, D. V. (2010) *Stabilometricheskoe issledovanie: kratkoe rukovodstvo [Stabilometric study: A short guide]*. Moscow: Maska Publ., 172 p. (In Russian)
- Vissarionov, S. V., Solokhina, I. Yu., Ikoeva, G. A. et al. (2016) Dvigatel'naya reabilitatsiya patsienta s posledstviyami pozvonochno-spinnomozgovoj travmy metodom neinvazivnoj elektrostimulyatsii spinnogo mozga v sochetanii s mekhanoterapij [Motor rehabilitation of patients with consequences of spinal cord injury using noninvasive electrical stimulation of the spinal cord combined with mechanotherapy]. *Hirurgiâ pozvonočnika — Spine Surgery*, vol. 13, no. 1, pp. 8–12. DOI: 10.14531/ss2016.1.8-12 (In Russian)