



ДИНАМИКА НЕЗАВИСИМОСТИ И ЛОКОМОТОРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИ ТРЕНИРОВКАХ ХОДЬБЫ В ЭКЗОСКЕЛЕТЕ У ПАЦИЕНТОВ С ТЯЖЕЛОЙ ХРОНИЧЕСКОЙ ПОЗВОНОЧНО-СПИННОМОЗГОВОЙ ТРАВМОЙ

Е.Ю. Шапкина^{1, 2}, Д.В. Емельяников¹, Ю.Е. Ларионова¹, Н.А. Купреев¹, Е.В. Григорьева¹

¹Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург, Россия

²Институт трансляционной биомедицины, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Цель исследования. Оценка эффективности комплексной реабилитации с применением тренировки ходьбы в экзоскелете «ExoAtlet» у пациентов с тяжелыми хроническими параплегиями, вызванными травмой грудного и верхнепоясничного отделов позвоночника. **Материал и методы.** Дизайн: проспективное моноцентровое исследование. Пятидесяти пациентам с тяжелыми повреждениями спинного мозга (ASIA: A – 36, B – 10, C – 4; Frankel: A – 24, B – 16, C – 10) с давностью от 6 мес. до 23 лет после осложненной позвоночно-спинномозговой травмы грудного и верхнепоясничного отделов проведено два интенсивных курса комплексной нейро-реабилитации, включающих 36 тренировок/часов ходьбы в экзоскелете. Для анализа выбраны три направления, наиболее важные для пациента: изменение независимости пациентов (оценка по шкале SCIM III), локомоторных возможностей (индекс мобильности Хаузера и тетрапедальные тесты), а также показателей силы и чувствительности (стандарт ASIA). Тестирование проведено до начала и через месяц после окончания второго курса. Изучены частота позитивных сдвигов по каждому направлению и их зависимость (ANOVA) от полноты поражения спинного мозга и давности травмы.

Результаты. Увеличение независимости отмечено у 46/50 пациентов, в том числе на 1–3 балла SCIM – у 14 (28 %), на 4–9 баллов – у 20 (40 %), на 10 баллов и выше – у 12 (24 %). Локомоторные возможности улучшили 84 % пациентов за счет сокращения времени выполнения тестов и снижения потребности в помощи. Прогресс чувствительности ниже зоны поражения не менее чем на 1 балл выявлен у 80 % пациентов (в среднем на 6 баллов AIS), в том числе у 68 % по тактильной и у 54 % по болевой чувствительности. Прирост силы мышц отмечен у 7 (14 %) пациентов с неполным поражением спинного мозга (в среднем на 3,5 балла AIS). В пределах исследованной группы установлено отсутствие зависимости достигнутого прогресса в независимости, локомоторных возможностях и чувствительности от полноты поражения спинного мозга и срока после травмы.

Заключение. Реабилитация с применением повторных интенсивных курсов тренировок ходьбы в экзоскелете увеличивает независимость, расширяет локомоторные возможности и улучшает чувствительность ниже зоны поражения у большинства пациентов с полным и неполным поражением спинного мозга при разных сроках после травмы.

Ключевые слова: спинно-мозговая травма, реабилитация, экзоскелет для тренировки ходьбы, шкала независимости при спинальной патологии SCIM III, локомоторные возможности, тетрапедальные тесты, классификация ASIA/Frankel.

Для цитирования: Шапкина Е.Ю., Емельяников Д.В., Ларионова Ю.Е., Купреев Н.А., Григорьева Е.В. Динамика независимости и локомоторных возможностей при тренировках ходьбы в экзоскелете у пациентов с тяжелой хронической позвоночно-спинномозговой травмой // Хирургия позвоночника. 2020. Т. 17. № 4. С. 54–67.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2020.4.54-67>.

DYNAMICS OF INDEPENDENCE AND LOCOMOTOR CAPABILITIES CAUSED BY POWERED EXOSKELETON-INDUCED WALK TRAINING IN PATIENTS WITH SEVERE CHRONIC SPINAL CORD INJURY

E.Yu. Shapkova^{1, 2}, D.V. Emelyannikov¹, Yu.E. Larionova¹, N.A. Kupreev¹, E.V. Grigoreva¹

¹St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, St. Petersburg, Russia

²Institute of Translational Biomedicine, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Objective. To evaluate the effectiveness of complex rehabilitation with walk training induced by powered exoskeleton ‘ExoAtlet’ for the patients with severe chronic paraplegias caused by thoracic or upper lumbar spine injuries.

Material and Methods. Design: prospective monocenter study. Fifty patients with severe spinal cord injuries (ASIA: A – 36, B – 10, C – 4; Frankel: A – 24, B – 16, C – 10) from 6 months to 23 years after complicated thoracic or upper lumbar spine injury underwent two intensive courses of complex neurorehabilitation including 36 sessions/hours of powered exoskeleton-induced walk training. Three areas mostly important for the patients were chosen for the analysis: changes in patient independence (assessed by the SCIM III scale), loco-

motor capabilities (Hauser's Ambulation Index and tetrapedal tests), and strength and sensitivity indicators (AIS scales). Testing was carried out before and one month after the end of the second course. The frequency of positive changes in each area and their dependence (ANOVA) on the completeness of the spinal cord injury and the duration of the injury were studied.

Results. The increase in independence was observed in 46/50 patients, including by 1–3 SCIM points in 14 (28 %), by 4–9 points in 20 (40 %), and by 10 points and above in 12 patients (24 %). Locomotor capabilities improved in 84 % of patients due to reducing test execution time and the need for care. Progress in sensitivity below the affected area by at least 1 point was detected in 80 % of patients (on average by 6 AIS points), including in 68% in tactile and in 54 % in pain sensitivity. The muscle strength gain was recorded in 7 (14%) patients with incomplete paraplegia (on average by 3.5 AIS points). Within the study group, it was found that the progress achieved in independence, locomotor capabilities and sensitivity did not depend on the completeness of the spinal cord injury as well as on the period after injury.

Conclusion. Rehabilitation with repeated intensive courses of powered exoskeleton-induced walk training increases independence, expands locomotor capabilities and improves sensitivity below the affected area in most patients with complete and incomplete spinal cord injury at different periods after injury.

Key Words: spinal cord injury, rehabilitation, powered exoskeleton for walk training, Spinal Cord Independence Measure SCIM III, locomotor capabilities, tetrapedal tests, ASIA/Frankel classification.

Please cite this paper as: Shapkova EYu, Emelyannikov DV, Larionova YuE, Kupreev NA, Grigoreva EV. Dynamics of independence and locomotor capabilities caused by powered exoskeleton-induced walk training in patients with severe chronic spinal cord injury. *Hir. Pozvonoc.* 2020; 17(4):54–67. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2020.4.54-67>.

Заболевания и повреждения спинного мозга представляют комплексную медико-социальную проблему, решение или снижение бремени которой связано с огромными материальными затратами. Повреждение спинного мозга в мире ежегодно регистрируют у 250 000–500 000 человек, что соответствует от 40 до 80 случаев на миллион жителей, причем до 90 % пораженных обусловлены травмами [1]. Около 80 % выживших становятся инвалидами 1–2-й группы [2].

Клинические проявления повреждений спинного мозга включают частичную/полную утрату сенсорной или двигательной функции конечностей и тела, нарушения регуляции работы мочевого пузыря, желудочно-кишечного тракта, дыхания, сердечно-сосудистой деятельности. Высокий риск вторичных осложнений – тромбоза глубоких вен, инфекции дыхательных и мочевыводящих путей, остеопороза, пролежней, хронических болевых синдромов. До 30 % пациентов с последствиями травмы спинного мозга имеют симптомы депрессии, а уровень безработицы среди них превышает 60 % [1].

Хирургическое лечение позвоночно-спинномозговой травмы (ПСМТ) должно быть поддержано реабилитационными мероприятиями на всех этапах травматической болезни. После ее перехода в хроническую стадию

не принято ожидать существенной положительной неврологической динамики: в этих случаях задачами реабилитации становятся расширение независимости пациента и профилактика вторичных осложнений, связанных с гиподинамией.

До недавнего времени золотым стандартом реабилитации больных с поражениями спинного мозга считались тренировки ходьбы в стационарном роботизированном аппарате (Lokomat и аналоги) с дозированной вертикальной разгрузкой [3]. Логическим продолжением этой технологии стала ходьба в экзоскелетах – активных ассистивных роботических ортезах, обеспечивающих вертикальную позу и реальное передвижение парализованного человека в пространстве [4–7]. К настоящему времени разработаны десятки моделей экзоскелетов [8–10], а в систематических обзорах отмечены безопасность их применения [11], эффективность в расширении независимости передвижения и некоторое улучшение показателей здоровья [5, 12, 13]. Тем не менее эффективность тренировок ходьбы в экзоскелете при реабилитации пациентов со спинальной травмой остается дискуссионной [14–17], хотя и признается потенциально перспективной [18].

В России в 2013 г. группой «Экзо-Атлет» начата разработка первого экзоскелета. В 2016 г. он зарегистри-

рован в качестве медицинского изделия и начал применяться в клиниках. С 2017 по 2019 г. Минздрав России в рамках мультицентрового исследования провел клиническую апробацию протокола 2017-7-11 «Метод реабилитации пациентов с травмой грудного отдела позвоночника и повреждением спинного мозга», разработанного в Новосибирском НИИТО им. Я.Л. Цивьяна. Авторы основным целевым показателем эффективности выбрали независимость пациентов, оцененную по шкале SCIM III, со среднегрупповым приростом на 4 балла, дополнительными – возможности передвижения, оцененные по индексу мобильности Хаузера [19], и изменения неврологических характеристик, оцененных по шкалам AIS [20].

В данном исследовании мы сознательно отказались от представления полного объема проведенных тестирований, включая шкальные и инструментальные (нейрофизиологические и биомеханические), чтобы сосредоточить внимание на значимых для пациента показателях. Учитывая направленность реабилитации на тренировку ходьбы, мы дополнительно контролировали локомоторные возможности пациентов по тетрапедальным тестам [21, 22]. В качестве факторов анализа эффективности нас интересовали полнота пораже-

ния спинного мозга (тип по Frankel) и давность травмы. Фактически исследование должно ответить на вопрос: что дают тренировки ходьбы в экзоскелете пациентам с тяжелым хроническим поражением спинного мозга с разной полнотой поражения и при разных сроках после травмы?

Цель исследования – оценка эффективности комплексной реабилитации с применением тренировки ходьбы в экзоскелете «EcoAtlet» у пациентов с тяжелыми хроническими параплегиями, вызванными травмой грудного и верхнепоясничного отделов позвоночника.

Материал и методы

Дизайн исследования: проспективная моноцентровая клиническая серия.

Критерии включения: пациенты в возрасте от 18 до 55 лет с ПСМТ, перенесенной не менее 6 мес. назад; неврологический статус, оцененный как типы А, В или С по стандарту ASIA; возможность нахождения в вертикальном положении не менее 30 мин без патологических ортостатических реакций; рост от 160 до 190 см, вес до 95 кг (технические регламентации экзоскелета).

Критерии не включения 1 (общесоматические): избыточный вес, тяжелые формы артериальной гипертензии, артериальная гипотензия, гиперкоагуляция, эритремия, эритроцитоз, нестабильное течение сахарного диабета, беременность или лактация, почечная недостаточность, злокачественные опухоли, цитотоксическая и иммуносупрессивная терапия.

Критерии не включения 2 (специфические для тренировок в экзоскелете): клинически значимая неустраненная механическая нестабильность позвоночника, непереносимость физических нагрузок, включающих вертикализацию; наличие пролежней или склонность к их формированию; грубые контрактуры в суставах ног, препятствующие шаганию; наличие острых или обострение хронических воспалительных заболеваний; переломы костей нижних конечностей в период после ПСМТ; неконсолидированные переломы; тромбозы, наличие флотирующего тромба; отказ пациента от сотрудничества.

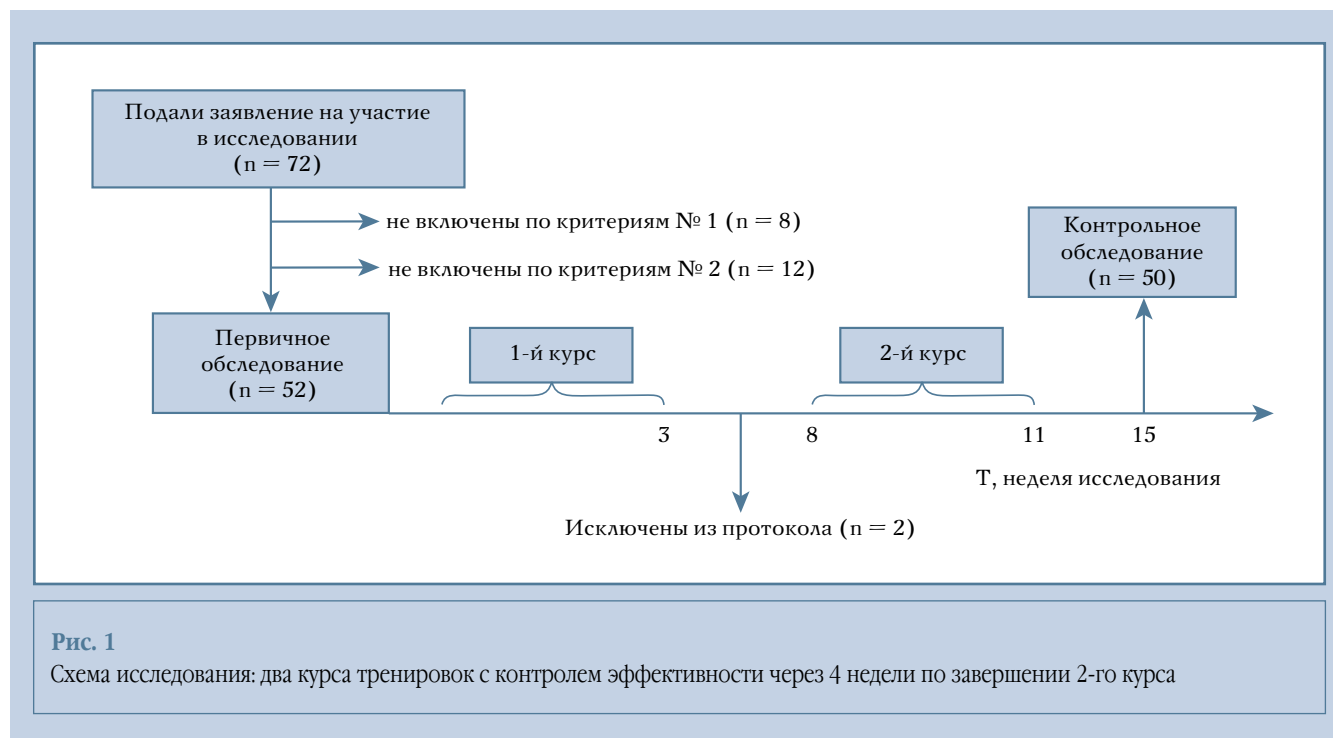
Критерии исключения пациентов: развитие осложнений, соответствующих критериям не включения, а также нарушение пациентом режима участия в исследовании.

Общая продолжительность наблюдений за пациентом составила 15 недель, включая два стационарных курса реабилитации с перерывом в 4 недели и 4-недельную паузу перед итоговым тестированием. Реабилитацию проходили группами по 5–7 человек.

Эффективность реабилитации оценивали, сравнивая показатели до начала 1-го курса и через месяц после окончания 2-го курса. Схема исследования представлена на рис. 1. Причины исключения двух пациентов из исследования: обострение хронического двустороннего гонита (1) и невозможность соблюдения графика исследования из-за участия в спортивных соревнованиях (1).

Исследование одобрено Научной проблемной комиссией, разрешено Этическим комитетом Минздрава России (Протокол № 3 от 17.04.2017). В соответствии с положениями стандарта «Надлежащая клиническая практика» (GCP) все пациенты были ознакомлены с содержанием исследования и дали письменное согласие на участие.

Характеристика пациентов. В исследовании приняли участие 26 мужчин и 24 женщины 18–54 лет (средний возраст – $33,1 \pm 8,9$ года),



в том числе 37 с травмой грудного отдела позвоночника (Th_1 – Th_{12}), 7 – грудопоясничного (Th_{12} – L_1) и 6 – верхнепоясничного (L_1 – L_2). При среднем сроке после травмы 7,4 года (от 6 мес. до 32 лет) у 8 пациентов этот показатель составил менее 2 лет (6–18 мес.), у 23 – от 2 до 5 лет, у 19 – свыше 5 лет. Таким образом, согласно периодизации травматической болезни спинного мозга, 8 пациентов могут быть отнесены к ее поздней стадии, а 42 – к последствиям со стойко установившимся уровнем неврологической симптоматики [23, 24].

К началу реабилитации все пациенты передвигались с помощью инвалидной коляски, из них 10 могли выполнять шаги с внешними приспособлениями и дополнительной опорой.

Оценка патологии, функциональных возможностей пациента и эффективности лечения. Неврологический статус участников оценивали по Международным стандартам неврологической классификации травмы спинного мозга (International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury, ISNCSCI), разработанным Американской ассоциацией спинальной травмы (ASIA) [20, 25], в том числе силу произвольных движений/напряжений ног – по 10 ключевым сегментам спинного мозга, иннервирующим ноги (max 50 баллов); болевую и тактильную чувствительность – по 28 сегментам (max 112 баллов).

Полноту поражения спинного мозга классифицировали как по ASIA, базирующейся на сохранности/отсутствии произвольной и рефлексорной активности ануса и чувствительности в анальной зоне, так и по Frankel (1978), ориентированной на произ-

вольные движения и чувствительность по отношению к зоне поражения [26].

Распределение пациентов по тяжести поражения спинного мозга по обеим шкалам представлено в табл. 1.

Независимость оценивалась каждым пациентом субъективно по четырем разделам шкалы SCIM III (Spinal Cord Independence Measure) [27–29]: уход за собой, контроль дыхания и сфинктеров, мобильность в помещении и вне помещения (при максимальной сумме в 100 баллов). Детализация каждого навыка, предусмотренная ключом SCIM III (<https://docplayer.ru/68086380-Izmeritel-nezavisimosti-pri-povrezhdeniyah-spinnogo-mozga-scim-iii-spinal-cord-independence-measure-iii.html>), позволяет точно оценить самостоятельные возможности пациента в быту и их динамику (табл. 2).

Локомоторные возможности пациентов оценивали по индексу мобильности Хаузера (Ambulation Index, AI, табл. 3), включающему 10 рангов [19], характеризующих возможности перемещения: в коляске, выполняя шаги с одно- и двусторонней поддержкой с учетом времени преодоления расстояния 8 м и утомляемости при ходьбе. К началу исследования 40 из 50 участников передвигались только в инвалидной коляске (AI 8); среди пациентов с приспособительной бипедальной ходьбой рангам AI 7 соответствовали 7 участников, AI 6 – 1, AI 5 – 2.

Тесты с тетрапедальной ходьбой включали преодоление дистанции 4 м вперед и назад [22] с контролем затраченного времени, количества шагов и самостоятельности выполнения задания. Все тесты документировались видеозаписью. Потреб-

ность в помощи оценивали в баллах: минимальная помощь для частичной разгрузки или облегчения движений одной ноги – 1 балл; существенная помощь одного человека – 2 балла; существенная помощь одного или двух человек с прохождением менее 4 м – 3 балла; полностью пассивное/невозможность выполнения теста – 4 балла. Значимым улучшением считали сокращение времени самостоятельного выполнения теста на 15 % и более от исходного; для выполняющих тесты посредством уменьшения помощи на 1 балл.

Статистическая обработка данных включала в себя оценку описательных статистик по объему выполненной нагрузки и дисперсионный анализ (ANOVA) измеряемых показателей в начале и конце исследования, анализ частоты позитивных неврологических сдвигов по фактору «полнота поражения спинного мозга». В связи с несбалансированностью выборки использована универсальная линейная модель в программе Minitab 16. Уровень значимости различий определен как $p = 0,05$. По фактору «полнота поражения спинного мозга» использовали 2 уровня: полное поражение – тип А по Frankel и неполное – типы В и С. По фактору «срок после травмы» пациентов ранжировали на 3 уровня: до 2 лет (фактически 6–18 мес.), от 2 до 5 лет, свыше 5 лет после травмы.

Методы реабилитации. Экзоскелет «ЕхoAtlet» с электрическими приводами обеспечивает возможность вставать из положения сидя, стоять, ходить на месте и с продвижением вперед, ходить змейкой и с поворотами, при определенном мастерстве – подниматься и спускаться по ступеням. Пациент в экзоскелете опирается на костыли с локтевой опорой типа канадки, координируя их перестановку с движениями ног. Помощь в сохранении равновесия обеспечивает прошедший специальную подготовку ассистент, осуществляющий страховку сзади (рис. 2). Внешние параметры ходьбы задаются программно с регулировкой высоты и длины шага, паузы между шагами (0,1–1 с) или ее

Таблица 1

Распределение пациентов по тяжести поражения спинного мозга

Тяжесть поражения	Классификация ASIA	Классификация Frankel
Тип А	36	24
Тип В	10	16
Тип С	4	10

Таблица 2

Протокол оценки независимости при спинальной патологии SCIM III (Spinal Cord Independence Measure)

Раздел	Оцениваемая функция	Баллы
Уход за собой	1. Питание	0–3
	2А. Умывание (верхняя часть тела)	0–3
	2Б. Умывание (нижняя часть тела)	0–3
	3А. Одевание (верх)	0–4
	3Б. Одевание (низ)	0–4
	4. Прическа, бритье, макияж	0–3
	Сумма	0–20
Контроль дыхания и сфинктеров	5. Дыхание	0–10
	6. Контроль мочеиспускания	0–15
	7. Контроль дефекации	0–10
	8. Интимная гигиена	0–5
	Сумма	0–40
Мобильность (комната, туалет)	9. В кровати	0–6
	10. Пересаживание кровать — кресло	0–2
	11. Пересаживание кресло — туалет, адаптация кресла	0–2
Мобильность в/вне помещения	12. Передвижение в помещении	0–8
	13. Передвижение 10–100 м	0–8
	14. Более 100 м	0–8
	15. Преодоление ступенек	0–3
	16. Пересаживание кресло — машина	0–2
	17. Пересаживание с пола в кресло	0–1
	Сумма	0–40
Общая сумма		0–100

Таблица 3

Индекс мобильности Хаузера (The Ambulation Index)

Ранг AI	Критерий оценки	Время прохождения 8 м
AI 0	Ходьба без ограничений	—
AI 1	Ходьба в полном объеме. Утомляемость при спортивных или иных физических нагрузках	—
AI 2	Нарушения походки или эпизодические нарушения равновесия	10 с и быстрее
AI 3	Ходьба без посторонней помощи и вспомогательных средств	20 с и быстрее
AI 4	Ходьба с односторонней поддержкой	25 с и быстрее
AI 5	Ходьба с двусторонней поддержкой	25 с и быстрее
AI 6	Ходьба с односторонней поддержкой	Более 25 с
AI 6	Ходьба с двусторонней поддержкой, пользование инвалидной коляской	Более 25 с
AI 7	Несколько шагов с двусторонней поддержкой, пользование коляской	—
AI 8	Перемещение только в инвалидной коляске, пользуется ею самостоятельно	—
AI 9	Перемещение только в инвалидной коляске с внешней помощью	—

отсутствием. Управление экзоскелетом осуществляет с планшета оператор (в рамках исследования задачи самостоятельной ходьбы пациентов не ставили, несмотря на техническую возможность управления экзоскелетом самим пациентом с помощью экрана на костыле). Экзоскелет настраивали индивидуально по антропометрическим данным участника перед каждой тренировкой – ширине и глубине таза, длине и периметрам бедра и голени для каждой стороны.

Обучение ходьбе начинали с вставания из положения сидя, стояния с опорой на костыли типа канадки, ходьбы на месте. На освоение ходьбы с внешней страховкой требовалось от 1 до 5 занятий. К концу курса технические возможности участников расширялись за счет поворотов в ходьбе и ходьбы по сложной траектории. Конструкция, настройка и методика обучения ходьбе в экзоскелете данной модели подробно описаны [30].



Рис. 2
Внешний вид экзоскелета «ExoAtlet»

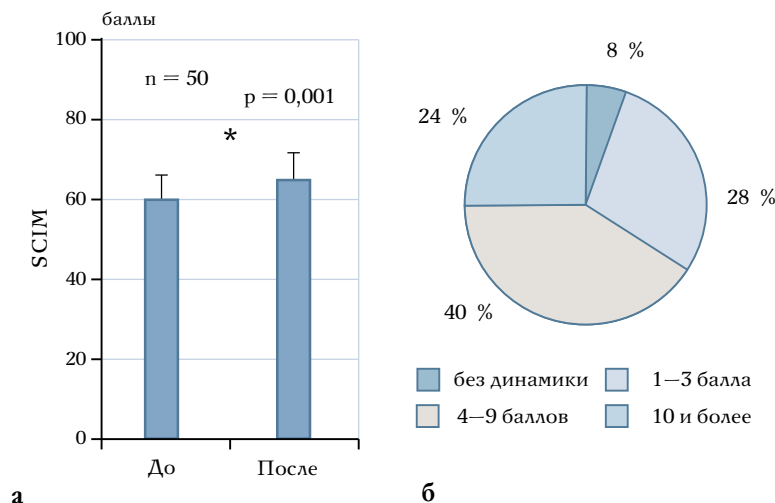


Рис. 3
Динамика среднегрупповых (а) и индивидуальных (б) показателей независимости при спинальной патологии SCIM в ходе реабилитации с применением экзоскелета

Объем и содержание программы реабилитации. Программа включала 2 стационарных курса по 22–24 дня, каждый содержал не менее 18 тренировок ходьбы в экзоскелете (сум-

марно 36 ч). Дополнительно проводили тренировку вертикальной позы с электростимуляцией мышц – 2 × 20 сеансов × 30 мин (20 ч), пневмостимуляцию опорных зон стопы 2 × 20 сеан-

сов × 30 мин (20 ч), групповые занятия лечебной гимнастикой (33 ч), общий и лимфодренажный массаж (по 24 процедуры). Активные методы тренировки составляли около 140 мин/день, пассивные 60–80 мин/день; ходьбу в экзоскелете проводили с кратностью 6, остальные процедуры – 5 раз в неделю. Средняя продолжительность реабилитационных процедур для каждого пациента за два курса составила около 141 ч.

Результаты

Динамика показателей функциональной независимости (SCIM). Среднее значение интегрального показателя независимости пациентов до начала исследования составило $60,9 \pm 12,0$ балла, через месяц после прохождения двух реабилитационных курсов – $67,7 \pm 12,7$ (рис. 3а), различия статистически значимы ($p = 0,001$). Среди 50 участников улучшение независимости на 1–3 балла наблюдалось у 14 (28 %), на 4–9 баллов – у 20 (40 %), на 10 баллов и выше – у 12 (24 %), динамики не выявлено лишь у 4 (8 %) (рис. 3б).

Анализ частоты приростов SCIM среди пациентов в зависимости от длительности периода после травмы (рис. 4а) и полноты поражения спинного мозга (рис. 4б) статистически значимых различий не выявил ($p > 0,5$).

После первого курса прирост показателей независимости SCIM выявлен у 44 % участников, после второго – у 70 %, различия результативности 1-го и 2-го курсов достоверны ($p = 0,008$; $F = 7,26$; рис. 4в).

Динамика локомоторных возможностей. Бипедальная ходьба. Все 10 пациентов, исходно способные выполнить несколько шагов, улучшили локомоторные возможности: у 6 это подтверждено изменением индекса мобильности Хаузера, у 4 – сокращением времени преодоления тестовой дистанции 8 м без изменения АИ, у 6 – изменением характера дополнительной опоры, у 1 – освоением ходьбы по лестнице (табл. 4). Изменения

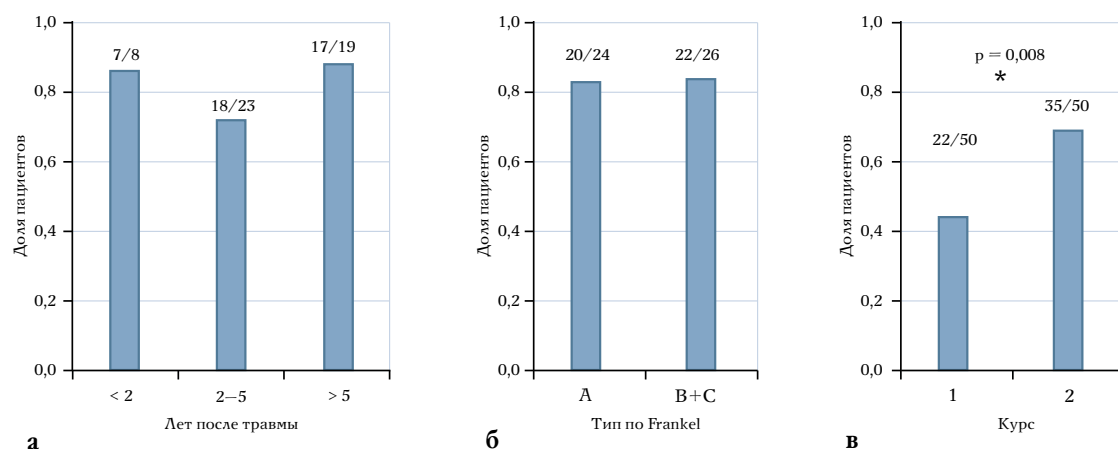


Рис. 4

Динамика SCIM у пациентов с разным сроком поражения (а), у пациентов с полными и неполными парезами (б) и в ходе 1-го и 2-го курсов реабилитации (в)

Таблица 4

Динамика локомоторных возможностей в ходе реабилитации с применением экзоскелета у пациентов, сформировавших компенсаторную бипедальную ходьбу

Пациенты	Пол	Возраст, лет	Уровень поражения		Давность травмы, лет	AIS	Frankel	AI	Изменение опоры	Сокращение времени прохождения дистанции 10 м	Увеличение проходимой дистанции
			позвоночника	спинного мозга							
P3	М	32	Th ₁	D ₃	4	C	C	7/7	Переход на канадки	С 112 с до 83 с	—
P5	Ж	51	L ₁ –L ₃	D ₄	24	A	C	7/5	Переход на канадки, отказ от коляски	С 5 м за 49 с до 10 м за 20 с	С 5 м до ходьбы без ограничений
P8	М	44	Th ₁₂	L ₃	6	C	C	7/6	Переход на канадки, освоение ходьбы по лестнице вверх и вниз, отказ от коляски	42 с	С 25 м до 150–200 м
P9	М	33	Th ₁₂ –L ₁	L ₂	15	C	C	7/6	—	С 152 до 136 с	С 3 до 10 м
P12	М	38	Th ₁	D ₃	10	B	B	7/6	Ходунки	139 с	С 4 до 10 м
P15	М	38	Th ₁₂	L ₄	10	A	A	5/5	Ходунки	18–16 с	С 10 до 30 м
P25	Ж	21	Th ₁₁ –L ₁	D ₅	4	A	B	7/6	Ходунки	С 86 до 82 с	С 10 до 30 м
P28	М	45	Th ₁₂	L ₂	3	A	C	7/6	Переход на канадки	С 48 до 40 с	—
P45	М	39	Th ₁₂ –L ₁	L ₃	5	B	C	5/5	Переход на канадки	15–13 с	С 30 до 200 м
P48	Ж	31	Th ₁₂	D ₁₂	1,5	A	B	6/6	Переход на канадки	52 с	С 1,5 до 10 м

Канадки — костыли с локтевым упором.

наблюдались в каждом курсе и сохранялись при контрольном тестировании через месяц. Пример значительного расширения локомоторных возможностей представлен в разделе клинических наблюдений (в приложении 1 к электронной версии статьи).

Тетрапедальная ходьба. К тестам с тетрапедальной ходьбой были допущены 45 пациентов; пятерых не тестировали из-за оссификата в области бедра (1), недавно проведенной стабилизации позвоночника (1), ожога (1) и мацерации кожи в области колена (2). Двое из допущенных пациентов не могли выполнить оба теста даже со значительной помощью.

Самостоятельно тетрапедальную ходьбу вперед исходно выполняли 30 человек, назад – 23 (рис. 5а). Время выполнения тестов сильно варьировало – вперед от 4 до 202 с (в среднем

40,6 с), назад от 5 до 147 с (в среднем 50,5 с). При контрольном тестировании время выполнения теста вперед сократилось у 22/30 человек (в среднем на 41 %), назад – у 18/23 человек (в среднем на 51 %). Изменения выявили высокую статистическую значимость для обоих тестов ($p < 0,03$; рис. 5б).

При первичном обследовании нуждались в помощи при выполнении тетрапедальных тестов вперед 13 человек, назад – 20. Потребность в помощи снизили при тетрапедальной ходьбе вперед 9 пациентов, назад – 11, из них 3 и 5 соответственно перешли к самостоятельной ходьбе. Суммарный объем помощи, оцененный в баллах, при контрольном тестировании уменьшился вдвое (рис. 5в).

По данным тетрапедальных тестов, значимое расширение локомоторных

возможностей выявлено у 38/45 пациентов, что составило 84 %. Минимальные улучшения (2) и отсутствие динамики (3) отмечено у пятерых пациентов. Видеоиллюстрация динамики локомоторных возможностей в ходе курса представлена в прил. 2 к электронной версии статьи.

Динамика неврологических показателей. Динамика тактильной и болевой чувствительности за период наблюдений выявлена соответственно у 54 и 68 % пациентов, в то время как прирост силы мышц – у 7 (14 %) пациентов с неполной пlegией (табл. 5).

Частоту появления сдвигов тактильной и болевой чувствительности анализировали по изменениям тяжести/полноты поражения спинного мозга (рис. 6а) и срокам после травмы (рис. 6б).

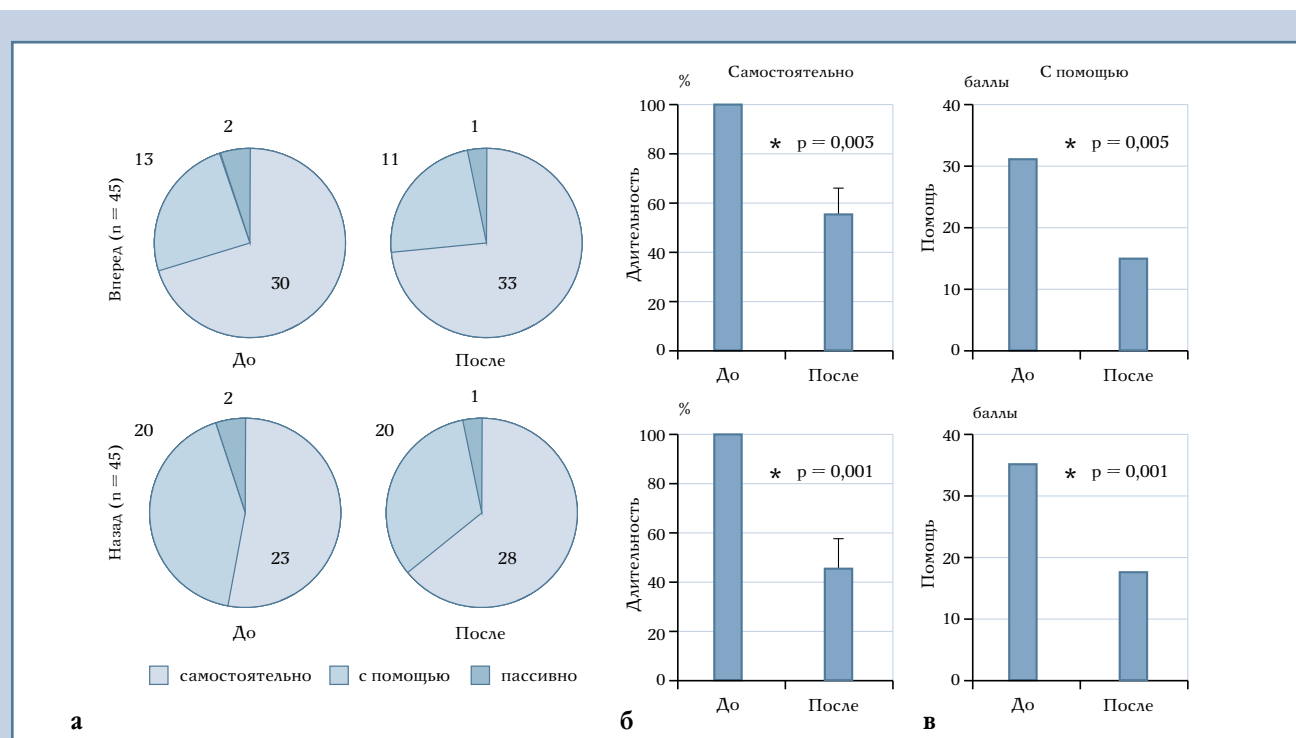


Рис. 5

Тесты с тетрапедальной ходьбой вперед и назад: **а** – на круговых диаграммах – количество и доля пациентов, выполнявших тетрапедальную ходьбу самостоятельно, с помощью и пассивно до начала и через месяц после двух курсов реабилитации с применением экзоскелета; **б** – сокращение длительности выполнения тетрапедальных тестов пациентами, не нуждающимися в помощи (представлена подгруппа со значимыми позитивными сдвигами); **в** – сокращение потребности в помощи при выполнении тетрапедальных тестов (сумма баллов суммарно по всей подгруппе)

Таблица 5

Динамика неврологических показателей за период наблюдения по шкале AIS

Неврологические показатели	Наблюдения с положительной динамикой, n (%)	Прирост AIS, баллы	
		диапазон	M ± m
Сила мышц	7 (14)	1–8	3,5 ± 2,6
Болевая чувствительность	27 (54)	1–28	6,2 ± 6,2
Тактильная чувствительность	34 (68)	1–16	5,7 ± 4,6

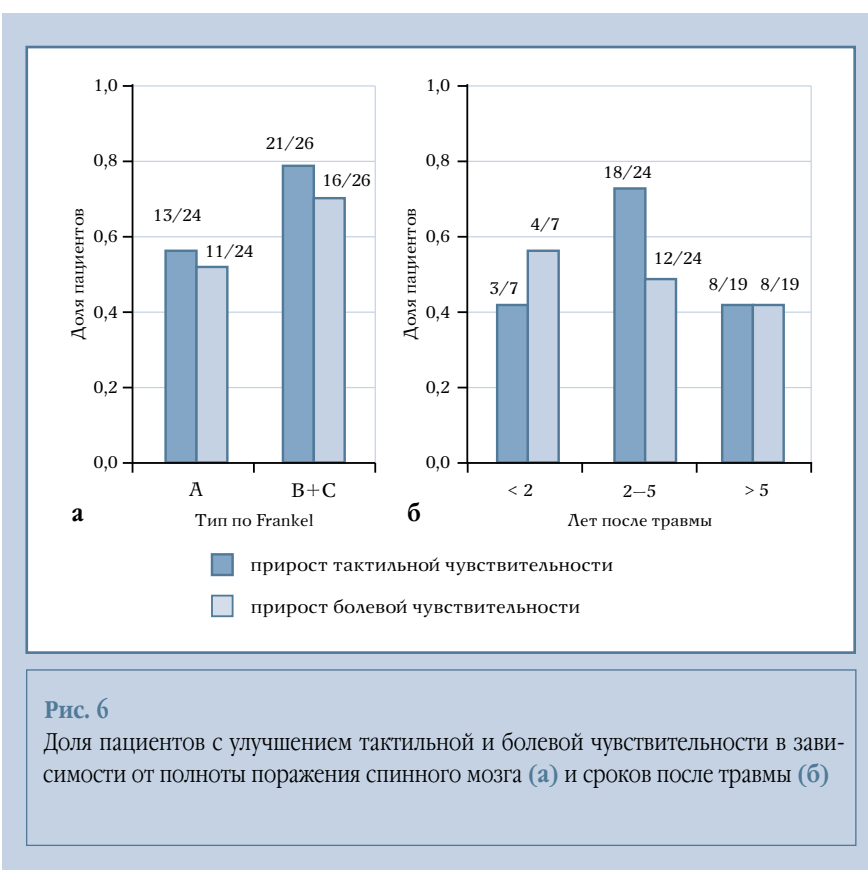


Рис. 6

Доля пациентов с улучшением тактильной и болевой чувствительности в зависимости от полноты поражения спинного мозга (а) и сроков после травмы (б)

Улучшение чувствительности чаще наблюдали у пациентов с неполными парезами, однако различия статистически не достоверны, различия при разных сроках травмы определенной тенденции не выявили.

Таким образом, комплексная реабилитация с применением тренировок в экзоскелете у пациентов с хроническим поражением спинного мозга привела к расширению независимости, оцененной по показателю SCIM, у абсолютного большинства участников, при этом расширение независимости оказалось не связано со сроком

после травмы и полнотой поражения спинного мозга.

Тренировки ходьбы в экзоскелете улучшили локомоторные возможности большинства пациентов с тяжелыми парезами. При бипедальной ходьбе эффект проявился сокращением времени прохождения тестовой дистанции либо изменением характера дополнительной опоры, при тетрапедальной ходьбе – сокращением времени выполнения в одном или обоих направлениях и уменьшением потребности во внешней помощи.

Улучшение чувствительности ниже зоны поражения выявлено у 80 %

пациентов (54 % – болевой, 68 % – тактильной); наши наблюдения не выявили статистической зависимости между частотой улучшения чувствительности, полнотой поражения спинного мозга и сроками после травмы. Прирост силы мышц наблюдали у 14 % пациентов, только при неполных парезах.

Клинические наблюдения, иллюстрирующие основные положения исследования, включая краткий анамнез, динамику исследуемых показателей и видеорегистрацию ходьбы в динамике у двух участников исследования (с полной и неполной парезией), представлены в приложениях к электронной версии статьи на сайте журнала.

Обсуждение

Основной вопрос данного исследования: какой эффект для больных с тяжелым хроническим посттравматическим поражением спинного мозга дают тренировки ходьбы в экзоскелете, и зависит ли он от тяжести/полноты поражения и сроков после травмы?

Эффективность. Для анализа выбраны три направления, наиболее значимые, на наш взгляд, для пациента: независимость в быту, локомоторные возможности и базовые неврологические характеристики – чувствительность и сила мышц. Исследование показало, что с помощью комплексной реабилитации с применением тренировок ходьбы в экзоскелете прогресс разной степени достижим по каждому направлению у большинства участников, за исключением прироста силы мышц. Основная задача реабилитации – расширение неза-

висимости пациента – достигнута; целевой показатель, заложенный в протоколе как среднегрупповой прирост SCIM на 4 балла, превышен на 75 %. Расширение независимости достигнуто у 92 % участников, причем у 64 % индивидуальный прирост SCIM достиг или превысил целевой показатель, а у 24 % прирост был очень высоким. Расширение локомоторных возможностей зарегистрировано у 84 % пациентов в виде сокращения времени выполнения тетрапедальных тестов или уменьшения потребности во внешней помощи. У всех участников, исходно способных к выполнению нескольких шагов, наблюдалось улучшение, в том числе двоим из 10 удалось отказаться от пользования коляской. Среди пациентов, передвигавшихся только на колясках, за период исследования случаев освоения бипедальной ходьбы не зарегистрировано, но через 3–6 мес. четверо пациентов сообщили о начале ходьбы в брусках или с ходунками. Прирост по одному или обоим видам чувствительности на 1 балл AIS и более зарегистрирован у 80 % участников, при этом средний прирост составил 5–6 баллов, а максимальный – 23 и 16 баллов AIS. Мы связываем этот эффект с мощной суммарной афферентной нагрузкой, полученной пациентами при принудительной ходьбе, пневмостимуляции опорных зон стопы [31] и тренировке вертикальной позы с электростимуляцией мышц. Вероятно, сочетание продолжительных тренировок ходьбы в экзоскелете (60 мин 6 раз в неделю) с большим объемом активных и пассивных воздействий (суммарно 141 ч) обеспечили интенсивность, необходимую для начала нейропластических перестроек.

Установлено, что при повторных курсах тренировок ходьбы в экзоскелете в апробированном режиме сдвиги могут быть получены у значительной части пациентов, соответствующих критериям отбора. Очевидно, что умеренные позитивные сдвиги, наблюдавшиеся у большинства пациентов, не излечивают хронический паралич и не обеспечивают пациенту

самостоятельную ходьбу. Однако даже минимальные сдвиги за относительно короткий период после многолетнего отсутствия позитивной динамики демонстрируют возможность мобилизовать нейропластический потенциал и расширить функциональные возможности пациентов.

Вопреки нашим ожиданиям, исследование не выявило достоверных различий по основным контролируемым параметрам – частоте улучшений независимости, локомоторных возможностей и чувствительности между пациентами с полным и неполным поражением спинного мозга. Также не установлено зависимости этих показателей от сроков после травмы. Это дает повод к пересмотру традиционных представлений об ограниченных возможностях реабилитации при клинически полных параличах, а также при последствиях тяжелых повреждений спинного мозга с давностью более двух лет. Вероятно, традиционно применяемые методы реабилитации недостаточны для мобилизации нейропластического потенциала при хроническом поражении спинного мозга, что требует большего объема и интенсивности тренирующих воздействий, направленных на восстановление ходьбы.

Возникает кажущееся противоречие между установленным в нашем исследовании отсутствием зависимости эффективности реабилитации от сроков после травмы и доказанным в литературе преимуществом раннего начала реабилитации [32]. На наш взгляд, это объясняется составом участников, среди которых не было пациентов в остром периоде травматической болезни (до 3–5 мес. после травмы) и всего 7 – в промежуточном (до 2 лет). Возможно, начало реабилитации с применением экзоскелета в остром периоде травматической болезни могло быть еще более успешным.

Эффективность восстановления паттерна ходьбы отличается при использовании разных моделей экзоскелетов [33], что объясняется принципиальными различиями в их конструкции и орга-

низации управления [2, 18]. Успешность применявшейся технологии мы связываем с несколькими причинами. В первую очередь, это прогрессивная конструкция экзоскелета, обеспечивающая ходьбу, приближенную к естественной, с реальным перемещением человека в пространстве, смещением центра масс и необходимостью поддерживать равновесие. Именно неустойчивость мобилизует пациента и обеспечивает одновременно тренировку не только локомоторных, но и постуральных способностей. Во-вторых, имеет значение систематичность и комплексность тренировок, создающих продолжительное, регулярно повторяющееся воздействие на моторную и сенсорную части двигательной системы. В-третьих, перемещение в пространстве, возвращающее ощущения реальной ходьбы, и положительные функциональные сдвиги обеспечивают позитивный эмоциональный фон и мотивируют к дальнейшей активной реабилитации. В-четвертых, при отборе кандидатов для тренировок предпочтение отдавалось социально активным, мотивированным к функциональному восстановлению. Такой подход обеспечил активное участие пациентов в реабилитации и продолжение самореабилитации между курсами и по окончании программы.

Перспективы повышения эффективности. Единственной характеристикой, показавшей низкую частоту приростов за период наблюдения (7/50 случаев), была сила мышц. В недавних публикациях отмечена эффективность совмещения тренировок ходьбы в экзоскелете с функциональной электростимуляцией мышц [2, 34, 35], эпидуральной [36–38] и чрескожной [39] электростимуляцией спинного мозга. Дополнение навязанной экзоскелетом кинематики ходьбы искусственной активацией мышц представляется весьма перспективным.

Методы оценки эффективности. Несмотря на заведомый элемент субъективности при оценке независимости пациентов, применение шкалы SCIM III оказалось удобным

инструментом, за счет подробного ключа, исключающего неоднозначную трактовку освоенных навыков. Оценка локомоторных возможностей с помощью тестирования тетрапедальной ходьбы доступна для пациентов, не имеющих возможности к бипедальному передвижению за счет низкого центра масс, увеличенной площади опоры и отсутствия необходимости замыкать коленные суставы, простоты и воспроизводимости.

Неврологическая оценка. Количественная оценка силы мышц, болевой и тактильной чувствительности в баллах AIS стандарта ASIA является достаточно точным и наиболее рекомендуемым инструментом тестирования пациентов с повреждениями спинного мозга. Этот стандарт предполагает определение полноты поражения спинного мозга в зависимости от наличия/отсутствия произвольного либо рефлекторного сокращения ануса и чувствительности в анальной зоне как наиболее каудальной зоне спинального контроля, в отличие от классификации Frankel, определяющей полноту поражения по наличию/отсутствию движений и чувствительности ниже зоны поражения. В нашем исследовании при параллельном использовании двух методик оценки (стандарта ASIA и шкалы Frankel) 10 пациентов, исходно способных к ограниченной бипедальной ходьбе, согласно ASIA распределились как 5A : 2B : 3C (то есть большая часть пациентов, способных выполнить несколько шагов, соответствовала полному моторному и сенсорному перерыву), тогда как по Frankel распределение составило 1A : 3B : 6C (то есть у большей части этих пациентов поражение спинного мозга расценивалось как неполное, что представлялось более логичным). Отсутствие связи между классами по ASIA и прогнозом восстановления ходьбы отмечалось и другими авторами [40]. Мы пришли к мнению о неоправданно расширенной трактовке полного поражения спинного мозга в стандарте ASIA

и предпочтительности использования классификации Frankel для реабилитационных задач.

Риски. Начало активных тренировок ходьбы у пациентов с тяжелым повреждением спинного мозга сопряжено с риском тромбозов, артрозов суставов нижних конечностей, обусловленных остеопорозом переломов, частота которых может колебаться от 1 до 34 % [41]. Нами зарегистрировано 4 (8 %) серьезных нежелательных явления (обострение хронического гонита – 1, переломы костей стопы – 1, нижней трети бедра – 1), из них лишь в случае гонартроза установлена связь с тренировками. После сращения переломов пациенты закончили реабилитационную программу. Количество существенных нежелательных явлений не превысило числа осложнений, наблюдаемых при естественном течении посттравматической спинальной миелопатии. Безопасность метода обеспечили жесткое соблюдение критериев включения/невключения/исключения при отборе пациентов, наличие врачей-консультантов с опытом работы с парализованными пациентами, обученный немедицинский персонал, задействованный в сопровождении тренировок, а также регулярное техническое обслуживание экзоскелета.

Ограничения достоверности результатов сопряжены со шкальными методами оценивания, вносящими заведомый субъективизм. Вторым ограничением является предварительный отбор пациентов по возрасту, физической готовности и мотивации, в связи с чем результаты не могут аппроксимироваться на всю популяцию пациентов с тяжелыми посттравматическими миелопатиями. Кроме того, тренировки ходьбы в экзоскелете дополнялись процедурами, также направленными на активацию локомоторной (стимуляция опорных зон стопы) и постуральной (вертикализация с электро-стимуляцией мышц) активности,

и выделить вклад каждого метода при комплексной терапии не представляется возможным.

Заключение

Реабилитация с применением повторных интенсивных курсов тренировок ходьбы в экзоскелете увеличивает независимость, расширяет локомоторные возможности и улучшает чувствительность ниже зоны поражения у абсолютного большинства пациентов с тяжелым хроническим (0,5–23,0 года) посттравматическим поражением спинного мозга. В пределах исследованной группы ($n = 50$) не выявлено зависимости между эффективностью реабилитации и полнотой поражения спинного мозга, а также сроками после травмы. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности повторных интенсивных курсов тренировок ходьбы со значительным объемом локомоторных и нелокомоторных нагрузок, что позволяет рекомендовать метод для реабилитации пациентов с разной полнотой поражения спинного мозга и сроками после травмы, при условии высокой мотивации к восстановлению.

Благодарность

Мы благодарим за помощь в организации и проведении исследования руководителя Центра патологии позвоночника проф. А.Ю. Мушкина, канд. мед. наук Н.А. Прохорович, канд. мед. наук А.И. Бердеса, канд. мед. наук И.Г. Роднову, неврологов С.А. Кужлину, Ю.В. Диденко, канд. мед. наук Н.Ю. Басанцову, канд. мед. наук О.А. Шахметову и обеспечивавших безопасное сопровождение тренировок И.А. Юдина и А.В. Андронova. Благодарим всех наших пациентов за доверие, сотрудничество и оптимизм, помогавшие провести это исследование.

Исследование финансировалось Минздравом России в рамках клинической апробации протокола 2017-7-11 и частично грантом СПбГУ (проект № 51134206).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература/References

1. Всемирная организация здравоохранения: сайт. [World Health Organization: website]. URL: <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/spinal-cord-injury-20131202/ru>.
2. Даминов В.Д., Ткаченко П.В. Экзоскелеты в медицине: мировой опыт и клиническая практика Пироговского центра // Вестник национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. 2017. Т. 12. № 4. Ч. 2. С. 17–22. [Daminov VD, Tkachenko PV. Exoskeletons in medicine: world experience and clinical practice of the Pirogov center. Bulletin of Pirogov National Medical and Surgical Center. 2017;12(4). Pt 2:17–22. In Russian].
3. Nam KY, Kim HJ, Kwon BS, Park JW, Lee HJ, Yoo A. Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. *J Neuroeng Rehabil*. 2017;14:24. DOI:10.1186/s12984-017-0232-3.
4. Del-Ama AJ, Koutsou AD, Moreno JC, De-los-Reyes A, Gil-Agudo A, Pons JL. Review of hybrid exoskeletons to restore gait following spinal cord injury. *J Rehabil Res Dev*. 2012;49:497–514. DOI: 10.1682/jrrd.2011.03.0043.
5. Onose G, Cardei V, Craciunoiu T, Avramescu V, Opris I, Lebedev MA, Costantinescu MV. Mechatronic wearable exoskeletons for bionic bipedal standing and walking: a new synthetic approach. *Front Neurosci*. 2016;10:343. DOI: 10.3389/fnins.2016.00343.
6. Sylos-Labini F, La Scaleia F, d'Avella A, Pisotta I, Tamburella F, Scivoletto G, Molinari M, Wang S, Wang L, van Asseldonk E, van der Kooij H, Hoellinger T, Cheron G, Thorsteinsson F, Ilzkovitz M, Gancet J, Hauffe R, Zano F, Lacquaniti F, Ivanenko YP. EMG patterns during assisted walking in the exoskeleton. *Front Hum Neurosci*. 2014;8:423. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00423.
7. Mekki M, Delgado AD, Fry A, Putrino D, Huang V. Robotic rehabilitation and spinal cord injury: a narrative review. *Neurotherapeutics*. 2018;15:604–617. DOI: 10.1007/s13311-018-0642-3.
8. Sanchez-Villamanan MDC, Gonzalez-Vargas J, Torricelli D, Moreno JC, Pons JL. Compliant lower limb exoskeletons: a comprehensive review on mechanical design principles. *J Neuroeng Rehabil*. 2019;16:55. DOI: 10.1186/s12984-019-0517-9.
9. Bao G, Pan L, Fang H, Wu X, Yu H, Cai S, Bingqing Y, Wan Y. Academic review and perspectives on robotic exoskeletons. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2019;27:2294–2304. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2944655.
10. Shi D, Zhang W, Zhang W, Ding X. A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots. *Chin J Mech Eng*. 2019;32:74. DOI: 10.1186/s10033-019-0389-8.
11. He Y, Eguren D, Luu TP, Contreras-Vidal JL. Risk management and regulations for lower limb medical exoskeletons: a review. *Med Devices (Auckl)*. 2017;10:89–107. DOI: 10.2147/MDERS107134.
12. Kozlowski AJ, Bryce TN, Dijkers MP. Time and effort required by persons with spinal cord injury to learn to use a powered exoskeleton for assisted walking. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2015;21:110–121. DOI: 10.1310/sci2102-110.
13. Lebedev MA. Augmentation of sensorimotor functions with neural prostheses. *Opera Med Physiol*. 2016;2(3–4):211–227. DOI: 10.20388/OMP.003.0035.
14. Fisahn C, Aach M, Jansen O, Moisi M, Mayadev A, Pagarigan KT, Detto-ri JR, Schildhauer TA. The effectiveness and safety of exoskeletons as assistive and rehabilitation devices in the treatment of neurologic gait disorders in patients with spinal cord injury: a systematic review. *Global Spine J*. 2016;6:822–841. DOI: 10.1055/s-0036-1593805.
15. Contreras-Vidal JL, Bhagat NA, Brantley J, Cruz-Garza JG, He Y, Manley Q, Nakagome S, Nathan K, Tan SH, Zhu F, Pons JL. Powered exoskeletons for bipedal locomotion after spinal cord injury. *J Neural Eng*. 2016;13:031001. DOI: 10.1088/1741-2560/13/3/031001.
16. Mehrholz J, Harvey LA, Thomas S, Elsner B. Is body-weight-supported treadmill training or robotic-assisted gait training superior to overground gait training and other forms of physiotherapy in people with spinal cord injury? A systematic review. *Spinal Cord*. 2017;55:722–729. DOI: 10.1038/sc.2017.31.
17. Hornby TG, Reisman DS, Ward IG, Scheets PL, Miller A, Haddad D, Fox EJ, Fritz NE, Hawkins K, Henderson CE, Hendron KL, Holleran CL, Lynskey JE, Walter A. Clinical practice guideline to improve locomotor function following chronic stroke, incomplete spinal cord injury, and brain injury. *J Neurol Phys Ther*. 2020;44:49–100. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000303.
18. Gorgey AS. Robotic exoskeletons: the current pros and cons. *World J Orthop*. 2018;9:112–119. DOI: 10.5312/wjov.v9.i9.112.
19. Hauser SL, Dawson DM, Leichner JR, Beal MF, Kevy SV, Propper RD, Mills JA, Weiner HL. Intensive immunosuppression in progressive multiple sclerosis. A randomized, three-arm study of high-dose intravenous cyclophosphamide, plasma exchange, and ACTH. *N Engl J Med*. 1983;308:173–180. DOI: 10.1056/NEJM198301273080401.
20. American Spinal Injury Association. Standards for Neurological Classification of Spinal Injury Patients. Chicago, IL: American Spinal Injury Association. 1982. [Electronic resource]. URL: <https://asia-spinalinjury.org/international-standards-neurological-classification-sci-iscnsci-worksheet>.
21. Григорьева Е.В., Ларионова Ю.Е., Емельяников Д.В., Шапкова Е.Ю. Оценка динамики локомоторных возможностей пациентов с плегиями при тренировках ходьбы в экзоскелете «ЭкзоАтлет» // Новые подходы к изучению классических проблем: Материалы IX Всероссийской с международным участием конференции с элементами научной школы по физиологии мышц и мышечной деятельности, посвященной памяти Е.Е. Никольского. 2019. С. 45. [Grigorieva EV, Lariova YuE, Emelianikov DV, Shapko EYu. Dynamic assessment of locomotor capabilities of patients with plegias during gait training in the exoskeleton “Exoathlet”. New Approaches to Classical Problems: Materials of the 9th All-Russian Conference dedicated to the memory of E.E. Nikolsky. 2019:45. In Russian].
22. Ларионова Ю.Е., Купреев Н.А., Григорьева Е.В., Емельяников Д.В., Шапкова Е.Ю. Динамика локомоторных возможностей пациентов с плегиями при тренировках ходьбы в экзоскелете // Управление движением Motor Control 2020: Материалы VIII Российской с международным участием конференции по управлению движением. Петрозаводск, 2020. С. 76–77. [Lariova YuE, Kupreev NA, Grigorieva EV, Emelianikov DV, Shapko EYu. Dynamics of locomotor capabilities of patients with plegias during gait training in an exoskeleton. Motor Control 2020: Materials of 8th All-Russian Conference. Petrozavodsk, 2020:76–77. In Russian].
23. Коновалов А.Н., Лихтерман Л.Б., Потанов А.А. Нейротравматология. М., 1994. [Konovalov AN, Likhberman LB, Potanov AA. Neurotraumatology. Moscow, 1994. In Russian].
24. Амелина О.А. Травма спинного мозга // Клиническая неврология с основами медико-социальной экспертизы: под ред. А.Ю. Макарова. СПб., 1998. С. 232–248. [Amelina OA. Spinal cord injury. In: Clinical Neurology with the Basics of Medical and Social Expertise, ed. by A.Yu. Makarov. St. Petersburg. 1998:232–248. In Russian].
25. Schuld C, Franz S, Bruggemann K, Heutheaus L, Weidner N, Kirshblum SC, Rupp R. International standards for neurological classification of spinal cord injury: impact of the revised worksheet (revision 02/13) on classification performance. *J Spinal Cord Med*. 2016;39:504–512. DOI: 10.1080/10790268.2016.1180831.
26. Frankel HL, Hancock DO, Hyslop G, Melzak J, Michaelis LS, Ungar GH, Vernon JD, Walsh JJ. The value of postural reduction in the initial management of closed injuries of the spine with paraplegia and tetraplegia. I. Paraplegia. 1969;7:179–192. DOI: 10.1038/sc.1969.30.

27. Spinal Cord Independency Measure – SCIM III. [Electronic resource]. URL: <https://docplayer.ru/68086380-Izmeritel-nezavisimosti-pri-povrezhdeniyah-spinnogo-mozga-scim-iii-spinal-cord-independence-measure-iii.html>.
28. Anderson KD, Acuff ME, Arp BG, Backus D, Chun S, Fisher K, Fjerstad JE, Graves D, Greenwald K, Groah S, Harkema SJ, Horton JA, Huang MN, Jennings M, Kelley KS, Kessler SM, Kirshblum S, Koltenuk S, Linke M, Ljungberg I, Nagy J, Nicolini L, Roach MJ, Salles S, Scelza WM, Read MS, Reeves RK, Scott MD, Tansey KE, Theis JL, Tolfio CZ, Whitney M, Williams CD, Winter CM, Zanca JM. United States (US) multi-center study to assess the validity and reliability of the Spinal Cord Independence Measure (SCIM III). *Spinal Cord*. 2011;49:880–885. DOI: 10.1038/sc.2011.20.
29. Catz A, Itzkovich M, Tesio L, Biering-Sorensen F, Weeks C, Laramée MT, Craven BC, Tonack M, Hitzig SL, Glaser E, Zeilig G, Aito S, Scivoletto G, Mecci M, Chadwick RJ, El Masry WS, Osman A, Glass CA, Silva P, Soni BM, Gardner BP, Savic G, Bergstrom EM, Bluvshstein V, Ronen J. A multicenter international study on the Spinal Cord Independence Measure, version III: Rasch psychometric validation. *Spinal Cord*. 2007;45:275–291. DOI: 10.1038/sj.sc.3101960.
30. Pais-Vieira C, Allahdad M, Neves-Amado J, Perrotta A, Morya E, Moiola R, Shapkova E, Pais-Vieira M. Method for positioning and rehabilitation training with the ExoAtlet © powered exoskeleton. *MethodsX*. 2020;7:100849. DOI: 10.1016/j.mex.2020.100849.
31. Григорьев А.И., Козловская И.Б., Шенкман Б.С. Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 5. С. 508–521. [Grigor'ev AI, Kozlovskaya IB, Shenkman BS. The role of support afferents in organization of the tonic muscular system. *Russ Fiziol Zh Im I M Sechenova*. 2004;90(5):508–521. In Russian].
32. Прудникова О.Г., Качесова А.А., Рябых С.О. Реабилитация пациентов в отдаленном периоде травмы спинного мозга: метаанализ литературных данных // Хирургия позвоночника. 2019. Т. 16. № 3. С. 8–16. [Prudnikova OG, Kachesova AA, Ryabikh SO. Rehabilitation of patients in late period after spinal cord injury: a meta-analysis of literature data. *Hir. Pozvonoc*. 2019;16(3):8–16. In Russian]. DOI: 10.14531/ss2019.3.8–16.
33. Guan X, Kuai S, Ji L, Wang R, Ji R. Trunk muscle activity patterns and motion patterns of patients with motor complete spinal cord injury at T8 and T10 walking with different un-powered exoskeletons. *J Spinal Cord Med*. 2017;40:463–470. DOI: 10.1080/10790268.2017.1319033.
34. Кастальский И.А., Хоружко М.А., Скворцов Д.В. Система функциональной электрической стимуляции мышц для интеграции в экзоскелете // Современные технологии в медицине. 2018. Т. 10. № 3. С. 104–109. [Kastalskiy IA, Khoruzhko MA, Skvortsov DV. A functional electrical stimulation system for integration in an exoskeleton. *Sovremennyye tehnologii v medicine*. 2018;10(3):104–109. In Russian]. DOI: 10.17691/stm2018.10.3.12.
35. Ekelem A, Goldfarb M. Supplemental stimulation improves swing phase kinematics during exoskeleton assisted gait of SCI subjects with severe muscle spasticity. *Front Neurosci*. 2018;12:374. DOI: 10.3389/fnins.2018.00374.
36. Gill ML, Grahn PJ, Calvert JS, Linde MB, Lavrov IA, Strommen JA, Beck LA, Sayenko DG, Van Straaten MG, Drubach DI, Veith DD, Thoreson AR, Lopez C, Gerasimenko YP, Edgerton VR, Lee KH, Zhao KD. Neuromodulation of lumbosacral spinal networks enables independent stepping after complete paraplegia. *Nat Med*. 2018;24:1677–1682. DOI: 10.1038/s41591-018-0175-7.
37. Wagner FB, Mignardot JB, Le Goff-Mignardot CG, Demesmaeker R, Komi S, Capogrosso M, Rowald A, Seanez I, Caban M, Pirondini E, Vat M, McCracken IA, Heimgartner R, Fodor I, Watrin A, Seguin P, Paoles E, Van Den Keybus K, Eberie G, Schurch B, Pralong E, Becce F, Prior J, Buse N, Buschman R, Neufeld E, Kuster N, Carda S, von Zitzewitz J, Delattre V, Denison T, Lambert H, Minassian K, Bloch J, Courtine G. Targeted neurotechnology restores walking in humans with spinal cord injury. *Nature*. 2018;563:65–71. DOI: 10.1038/s41586-018-0649-2.
38. Gorgey AS, Gill S, Holman ME, Davis JC, Atri R, Bai O, Goetz L, Lester DL, Trainer R, Lavis TD. The feasibility of using exoskeletal-assisted walking with epidural stimulation: a case report study. *Ann Clin Transl Neurol*. 2020;7:259–265. DOI: 10.1002/acn3.50983.
39. Shapkova EY, Pismennaya EV, Emelyannikov DV, Ivanenko Y. Exoskeleton walk training in paralyzed individuals benefits from transcutaneous lumbar cord tonic electrical stimulation. *Front Neurosci*. 2020;14:416. DOI: 10.3389/fnins.2020.00416.
40. Van Middendorp JJ, Hosman AJ, Pouw MH, van de Meent H. ASIA impairment scale conversion in traumatic SCI: is it related with the ability to walk? A descriptive comparison with functional ambulation outcome measures in 273 patients. *Spinal Cord*. 2008;47:555–560. DOI: 10.1038/sc.2008.162.
41. Schulte LM, Scully RD, Kappa JE. Management of lower extremity long-bone fractures in spinal cord injury patients. *J Am Acad Orthop Surg*. 2017;25:e204–e213. DOI: 10.5435/JAAOS-D-15-00686.

Адрес для переписки:

Шапкина Елена Юрьевна
Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт
фтизиопульмонологии,
194064, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32,
eyshapkova@gmail.com

Address correspondence to:

Shapkova Elena Yuryevna
St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology,
32 Politechnicheskaya str., St. Petersburg, 194064, Russia,
eyshapkova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23.11.2020

Рецензирование пройдено 04.12.2020

Подписано в печать 11.12.2020

Received 23.11.2020

Review completed 04.12.2020

Passed for printing 11.12.2020

Елена Юрьевна Шапкина, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, руководитель направления «нейрореабилитация» лаборатории нейрофизиологии и нейрореабилитационных технологий Центра патологии позвоночника, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32; ведущий научный сотрудник лаборатории нейротезов Института трансляционной биомедицины, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, ORCID: 0000-0002-1643-0326, eyshapkova@gmail.com;

Дмитрий Владимирович Емельяников, научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии и нейрореабилитационных технологий Центра патологии позвоночника, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32, ORCID: 0000-0002-0165-3236, tdk2000@mail.ru;

Юлия Евгеньевна Ларионова, научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии и нейрореабилитационных технологий Центра патологии позвоночника, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32, ORCID: 0000-0003-4809-2787, juliana.l.ru@mail.ru;

Никита Александрович Купреев, младший научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии и нейрореабилитационных технологий Центра патологии позвоночника, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32, ORCID: 0000-0002-3385-6660, kupreevnikita58@yandex.ru;

Екатерина Вячеславовна Григорьева, младший научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии и нейрореабилитационных технологий Центра патологии позвоночника, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Россия, 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 32, ORCID: 0000-0003-1180-4066, katiusha126@gmail.com.

Elena Yuryevna Shapkova, PhD in Biology, leading researcher, head of neurorehabilitation area, Laboratory of Neurophysiology and Technologies for Neurorehabilitation, Centre for Spinal Pathology, St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, 32 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 194064, Russia; leading researcher, Laboratory of Neuroprostheses, Institute of Translational Biomedicine, Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya naberezhnaya, St. Petersburg, 199034, Russia, ORCID: 0000-0002-1643-0326, eysbapkova@gmail.com;

Dmitry Vladimirovich Emelyannikov, researcher, Laboratory of Neurophysiology and Technologies for Neurorehabilitation, Centre for Spinal Pathology, St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, 32 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 194064, Russia, ORCID: 0000-0002-0165-3236, tdk2000@mail.ru;

Yulia Evgenyevna Larionova, researcher, Laboratory of Neurophysiology and Technologies for Neurorehabilitation, Centre for Spinal Pathology, St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, 32 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 194064, Russia, ORCID: 0000-0003-4809-2787, juliana.l.ru@mail.ru;

Nikita Aleksanrovich Kupreev, junior researcher, Laboratory of Neurophysiology and Technologies for Neurorehabilitation, Centre for Spinal Pathology, St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, 32 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 194064, Russia, ORCID: 0000-0002-3385-6660, kupreevnikita58@yandex.ru;

Ekaterina Vjacheslavovna Grigoreva, junior researcher, Laboratory of Neurophysiology and Technologies for Neurorehabilitation, Centre for Spinal Pathology, St. Petersburg Research Institute of Phthisiopulmonology, 32 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 194064, Russia, ORCID: 0000-0003-1180-4066, katiusha126@gmail.com.