С.С. Клещунов,
С.М. Чечельницкая

Вертикализация пациентов с травматической болезнью спинного мозга

В статье описывается опыт обучения пациентов с травматической болезнью спинного мозга пользованию медицинским экзоскелетом «ExoAtlet® I» российской фирмы «ExoAtlet». Приводятся результаты 10-дневной тренировки. Показано, что правильно выполненная процедура вертикализации больного позволяет достаточно быстро освоить навыки удержания равновесия и ходьбы в экзоскелете.

Ключевые слова: травматическая болезнь спинного мозга; травма спинного мозга; вертикализация больных с ТБСМ; экзоскелеты.

Введение

Травматическая болезнь спинного мозга (ТБСМ) — одна из наиболее сложных и актуальных проблем реабилитологии и, в частности, нейрореабилитации [1; 3; 5; 8].

Травмы позвоночника занимают одно из ведущих мест по частоте встречаемости (0,7–6,8 % от всех травм опорно-двигательного аппарата) и, как правило, сопровождаются повреждением спинного мозга с развитием грубых нарушений функций опорно-двигательного аппарата, сенсорными и вегетативными расстройствами, утратой контроля тазовых функций [2; 9].

Люди с ТБСМ подвергаются риску формирования вторичных патологий, несущих угрозу для жизни, например, тромбоза глубоких вен, инфекций мочевыводящих путей, пролежней и респираторных осложнений [6; 7]. При этом наиболее частые причины преждевременной смерти связаны с длительным лежачим положением больного.

В связи со сказанным перевод больного с ТБСМ в вертикальное положение признается одной из важнейших задач реабилитации.

По данным исследователей, занимающихся проблемами реабилитации больных с ТБСМ, вертикализация вызывает адаптивную пластическую перестройку нейронального взаимодействия моторной и вестибулярной систем и тем самым способствует восстановлению моторных функций конечностей [11].

Вертикализация создает условия для применения методов «замещающих компенсаций» [4; 10], в основе которых лежит увеличение двигательных возможностей больного за счет сегментов спинного мозга, частично сохранивших свою структуру и ранее в этих движениях не участвовавших, а также вовлечение в двигательные акты ослабленных мышц переходной зоны выше уровня травмы совместно со здоровыми мышечными группами.

Для того чтобы пациенты могли преодолеть силы гравитации и принять вертикальное положение, необходима поддержка внешней структуры. На сегодняшний день в реабилитологии хорошо освоены и широко применяются столы-вертикализаторы с динамической подставкой для ног. Тренировки на столах-вертикализаторах позволяют сократить время пребывания пациентов в отделении реанимации, уменьшают вентиляционные нарушения, препятствуют развитию пролежней, оказывают положительное влияние на уровень мотивации пациентов к дальнейшему восстановлению [7].

Следующим серьезным шагом в осуществлении качественной вертикализации больных с ТБСМ стало появление роботизированных реабилитационных комплексов — экзоскелетов [11–14].

Термин этот образован древнегреческими корнями и в переводе на русский означает «внешний скелет». Устройство предназначено для восполнения утраченных функций человека с двигательными нарушениями. Экзоскелет — это приспособление, которое пристегивается к талии и бедрам больного и приводится в движении при помощи двух моторов, расположенных по бокам. Экзоскелет увеличивает мышечную силу и расширяет амплитуду движений, он способен повторить биомеханику человека. Устройство типичного экзоскелета весьма просто. Это набор несущих элементов (аналогия с костными элементами человека), шарниров (имитируют суставы человека) и механизмов, приводящих конструкцию в движение (рис. 1).

Рис. 1. Внешний вид экзоскелета[1]

[1] Фотография взята с сайта: RoboTrends.ru — ваш гид в мире роботов и дронов в России и в мире. URL: http://robotrends.ru

Изобретателем экзоскелета был наш соотечественник, талантливый инженер-самоучка Николай Ягн, еще в конце XIX века спроектировавший ЭС-подобную конструкцию для быстрой ходьбы (эластипед).

Эти устройства имеют ряд преимуществ по сравнению со столами-вертикализаторами. Прежде всего – портативность, которая позволяет использовать их в амбулаторных условиях на более поздних этапах реабилитации [11; 13].

Организация и методы исследования

Процедуры тренировок в экзоскелете больных, длительно находившихся в лежачем или сидячем положении, требуют серьезной подготовки с участием врачей и методистов ЛФК, так как в многочисленных исследованиях описаны патологические реакции на переход в вертикальное положение: ортостатический коллапс и симптомы низкого кровяного давления, включая головные боли, головокружение и усталость (Dunn et al., 1998, Faghri et al., 2001, Liu, 2008, Sergeeva et al., 1978, Walicka-Cuprys и др., 2007), симптомы вегетативной дисрефлексии (Ogata et al., 2012), предобморочные состояния (Chelvarajah, 2009) и др. [11].

В работах ряда авторов описаны отдельные приемы, позволяющие предупредить развитие патологических реакций, однако, судя по доступной нам литературе, подготовка больных к использованию экзоскелета пока недостаточно разработана и требует дальнейших исследований [12].

Целью нашего исследования мы определили разработку методики подготовки больных с ТБСМ к процедурам вертикализации и физической реабилитации с применением экзоскелета.

Исследование проводилось на базе Реабилитационного центра «Преодоление», который стал пилотной площадкой для апробации активного экзоскелета «ExoAtlet® I» российской фирмы «ExoAtlet».

В исследовании приняли участие 9 пациентов с ТБСМ вследствие травмы позвоночника на уровне грудного и поясничного отдела и 1 пациент с последствиями травмы шейного отдела. Средний возраст испытуемых составил 30 лет, давность ТБСМ — не менее 1 года. В анамнезе у всех участников эксперимента операции по декомпрессии спинного мозга и стабилизации позвоночника.

На момент начала исследования у всех больных отмечались явления параплегии нижних конечностей.

В Реабилитационном центре пациентам проводилось комплексное восстановительное лечение, состоящее из лечебной физической культуры, механотерапии, физиотерапии, лечебного плавания, массажа, иглорефлексотерапии, социальной адаптации и эрготерапии – по показаниям.

Тренировочный процесс с применением активного экзоскелета «ExoAtlet® I» проводился в течение 15 дней. Занятия проходили ежедневно, длительность занятия — 1 час 15 мин, из них около 45 минут непосредственно тренировки. Первые 10 занятий были посвящены обучению пользованию активным экзоскелетом, включая его надевание и снимание, соблюдение техники безопасности,

выполнение основных локомоторных актов, контроль вертикальной позы и др. Последние 5 занятий проводились в тренажерном зале.

Тренировочный процесс сопровождался мониторингом функционального состояния пациента, для чего применялись функциональные пробы: пассивная ортостатическая проба и проба Игнатовского. Пульс и артериальное давление измерялись до начала пробы (базовые показатели), сразу после выполнения пробы (реакция) и через 3–5 минут — восстановительный период.

Состояние опорно-двигательного аппарата оценивалось по следующим шкалам: тонус мышц нижних конечностей (MAS); сила мышц нижних конечностей (AMI); баланс сидя BBS3; индекс ежедневной активности (FIM m).

На первом занятии осуществлялась «подгонка» системы фиксации экзоскелета под размеры пилота (так называют исследователи ЭкзоАтлета пациентов, работающих в экзоскелете). Для этого у пациента измерялись длины и окружности сегментов нижних конечностей, путем подтягивания ремней и лямок воспроизводилась геометрическая модель тела конкретного человека и производилась примерка. Процесс мог потребовать нескольких итераций. Окончательные размеры ремней и лямок заносились в карточку пилота и использовались на всех последующих занятиях, что серьезно облегчало процедуру одевания.

С первое по третье занятие отрабатывался пошаговый перевод пациента из брусьев на костыли.

Главной задачей первых занятий была отработка исходных положений для обучения двигательным навыкам. Отрабатывались исходные положения для подъема в брусьях, стоя в брусьях, для ходьбы в брусьях, для посадки в брусьях. На фотографии представлен пилот, отрабатывающий исходное положение для подъема в брусьях.

Рис. 2. Пилот, отрабатывающий исходное положение для подъема в брусьях

Отдельно решались задачи обучения ходьбе в брусьях и переносу веса тела с ноги на ногу в брусьях.

В конце каждого занятия методист осматривал пилота на предмет появления травм/покраснений кожных покровов в зонах максимального соприкосновения с экзоскелетом.

С третьего по восьмое занятие формировались навыки ходьбы с костылями, в процесс тренировки включались различные упражнения для освоения навыков независимой ходьбы.

Для обучения ходьбе в экзоскелете отрабатывались специфические исходные положения:

- И.П — для подъема с костылями, в брусьях;
- И.П — стоя с костылями, в брусьях;
- И.П — для ходьбы с костылями, в брусьях;
- И.П — для посадки с костылями, в брусьях;
- И.П — для сброса ошибки экзоскелета (зависит от вынужденного положения).

На фотографии представлен пилот, отрабатывающий навыки ходьбы с костылями.

Рис. 3. Пилот, отрабатывающий навыки ходьбы с костылями

Основной задачей данного этапа тренировок является отработка навыка сохранения равновесия. Экзоскелет помогает пациенту удерживать тело в вертикальном положении и совершать шаги, но при этом ответственность за удержание равновесия остается за самим человеком. Эту функцию он обеспечивает при помощи костылей. Равновесие отрабатывается в положении стоя и при выполнении различных движений, в том числе ходьбы с изменением направления, ходьбы по неровной поверхности и др.

На фотографии представлен пилот, отрабатывающий навыки удержания равновесия при помощи костылей.

Рис. 4. Пилот, отрабатывающий навыки удержания равновесия

Девятое и десятое занятия были посвящены формированию навыков самостоятельного хождения и пользования «умным костылем». «Умный костыль» — это пульт управления, встроенный в костыль, который предназначен для управления движением экзоскелета. В положении стоя экзоскелета пилоту доступно управление 14 действиями — приседание, ходьба с различными паттернами шага, ходьба на месте, подъем и спуск по лестнице с разными условиями. В положении сидя экзоскелету доступно три действия — подготовка к вставанию со стула различной высоты (низкая, средняя, высокая посадка), после которой осуществляется непосредственно вставание.

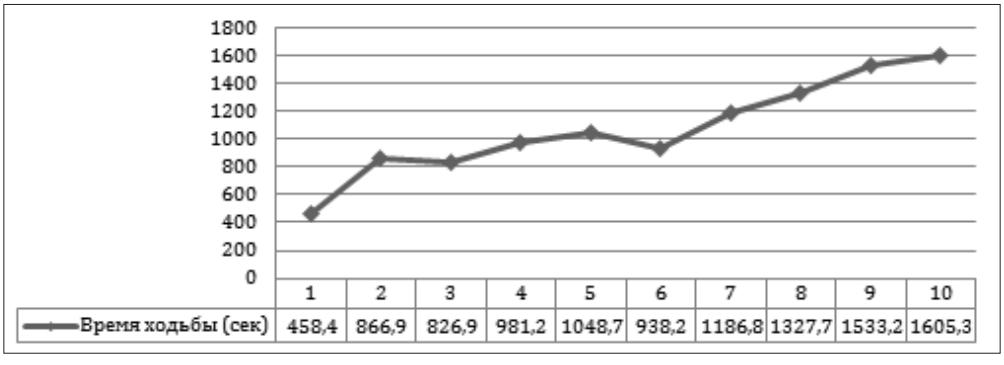
Рис. 5. Внешний вид пульта управления экзоскелетом — «умного костыля»

Результаты исследования и их обсуждение

Все пилоты, прошедшие курс обучения работе в экзоскелете, положительно оценили методику вертикализации. Ни в одном случае мы не отметили негативных ощущений, описываемых в научной литературе. Среди трудностей, которые отметили испытуемые, на первое место можно поставить сложность удержания равновесия в экзоскелете при ходьбе по прямой линии и при выполнении поворотов. Эту сложность отметили семеро пилотов из десяти. Практически все пилоты испытали утомление на 3 и 6 день занятий (восемь из десяти пилотов). Потребность в дополнительных упражнениях для укрепления силовой выносливости мышц верхних конечностей ощутили пятеро из десяти пилотов.

Мониторинг функционального состояния испытуемых подтвердил физиологичность предложенного метода обучения. За весь период тренировки у пациентов сохранялось достаточно стабильное артериальное давление, показатели ортостатических проб. Не претерпели значимых изменений показатели состояния опорно-двигательного аппарата.

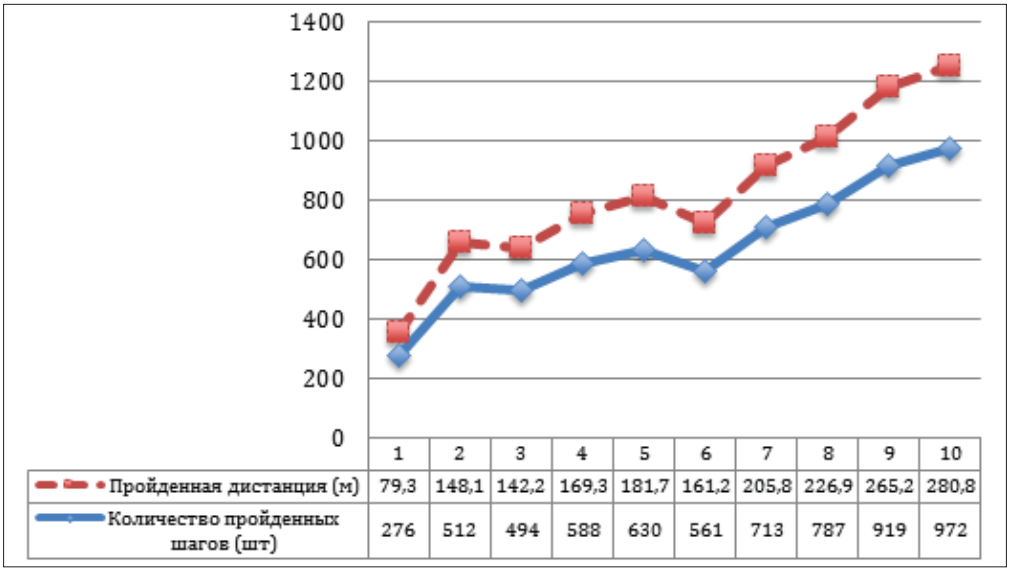
Эффективность предложенной методики обучения, на наш взгляд, подтвердили показатели двигательной активности, достигнутые за период испытания. Так, у всех пилотов отмечалось увеличение продолжительности непрерывной ходьбы от занятия к занятию (рис. 7), выраженный прирост отмечался от первого ко второму дню, что объясняется высоким тренировочным эффектом пошагового обучения технике перехода в вертикальное положение. Со второго по шестой день мы отметили монотонное повышение двигательной активности, так как в этот период пилоты отрабатывали более сложные навыки — ходьбу в брусьях и переход на костыли. И, наконец, начиная с седьмого дня испытаний продолжительность непрерывной ходьбы нарастала достаточно выраженно, что указывает на сформированный навык удержания равновесия.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время ходьбы (сек)	458,4	866,9	826,9	981,2	1048,7	938,2	1186,8	1327,7	1533,2	1605,3

Рис. 7. Динамика продолжительности непрерывной ходьбы в экзоскелете за период обучения

Пропорционально времени непрерывной ходьбы возрастало количество проходимых за тренировку шагов и увеличивались пройденные дистанции (см. рис. 8).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пройденная дистанция (м)	79,3	148,1	142,2	169,3	181,7	161,2	205,8	226,9	265,2	280,8
Количество пройденных шагов (шт)	276	512	494	588	630	561	713	787	919	972

Рис. 8. Динамика показателей ходьбы в экзоскелете за период обучения

В доступной нам литературе обсуждается применение шагового теста (6-минутного и 10-минутного) в качестве оценки показателя эффективности тренировок. Большинство авторов указывают, что скорость движения остается относительно стабильной. В нашем исследовании мы получили выраженный прирост скорости движения за короткий отрезок времени. Так, в первый день тренировки пациенты преодолевали в среднем 62,28 метров за 6 минут. Во второй день этот показатель несколько снизился и достиг 61,5 метров, отличие было статистически незначимо. К десятому дню тренировок показатель статистически значимо увеличился до 101,4 метров. На наш взгляд, в увеличении показателей шаговой пробы главная роль принадлежит тренировочному эффекту. По мере автоматизации ходьбы в экзоскелете динамика будет снижаться и достигнет своего плато.

Анализ полученных результатов выявил проблему, которую предстоит решать совместно с разработчиками экзоскелета. Длина шага здорового человека колеблется в диапазоне от 0,5 до 1 метра в зависимости от пола и роста и составляет в среднем 71 см. Средняя длина шага наших испытуемых на первом занятии составила 28,73 см и к концу обучения практически не увеличилась (28,8 см).

На данном этапе исследований преждевременно делать выводы о причинах столь короткого шага. С одной стороны, мы не можем исключить низкую амлитуду движений в тазобедренных суставах, провоцируемых экзоскелетом, с другой стороны — короткий шаг может отражать недостаточную автоматизацию навыков удержания равновесия и ходьбы, что приводит к неуверенности и автоматическому сокращению длины шага. В любом случае короткий шаг повышает энергетические затраты на перемещение тела в пространстве, что будет снижать эффективность реабилитации пациентов с ТБСМ.

Заключение

Таким образом, предпринятое нами исследование подтвердило высокую эффективность активного экзоскелета «ExoAtlet® I» в направлении повышения двигательной активности инвалидов по опорно-двигательному аппарату. Предложенная методика обучения пациентов ходьбе с постепенной вертикализацией позволила избежать негативных явлений адаптации к позе стоя, что расширяет возможности применения тренажера даже после длительного постельного режима.

Литература

1. *Буйлова Т.В.* Оценка качества жизни в процессе реабилитации больных с травматической болезнью спинного мозга / Т.В. Буйлова, Е.А. Северова // Медицинский альманах. 2013. № 2 (26) С. 145–147.

2. *Завгородняя А.Н.* Обзор методов двигательной реабилитации больных, перенесших позвоночно-спинномозговую травму / А.Н. Завгородняя // Газета «Новости медицины и фармации» Неврология (316). 2010 (тематический номер) / Вопросы реабилитации.

3. *Згуров А.С.* Современное состояние лечения позвоночно-спинномозговой травмы (научный обзор) / А.С. Згуров, А.В. Хрущ, А.С. Сон // Междунар. неврол. журн.; МНЖ. 2013. № 3 (57). С. 9–19.

4. *Зимина Е.В.* Роботизированная механотерапия в ранней реабилитации больных с травмой спинного мозга / Е.В. Зимина, А.В. Смоленский // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2010. № 8 (80). С. 41–44.

5. *Карачинцева Н.В.* Возможности медицинской реабилитации пациентов с острой спинальной травмой / Н.В. Карачинцева, Е.В. Пестрякова, О.Ю. Тарасова, И.В. Иконникова, Ю.Я. Пестряков, Л.А. Жаркова, О.А. Журбенко // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23748

6. *Ляховецкая В.В.* Динамика двигательных функций пациентов в промежуточном периоде травматической болезни спинного мозга на фоне комплексного восстановительного лечения / В.В. Ляховецкая, С.Ю. Фроленко, Е.М. Васильченко // МвК. 2016. № 2. С. 32–36.

7. *Макарова М.Р.* Вертикализация как фактор ранней реабилитации больных травматической болезнью спинного мозга / М.Р. Макарова, О.В. Ромашин // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. М.: Медиа Сфера, 2013. Т. 90. № 4. С. 47–52.

8. *Миронов Е.М.* Реабилитация больных с последствиями позвоночно-спинномозговой травмы / Е.М. Миронов // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2012. № 2. С. 6–9.

9. *Морозов И.Н.* Эпидемиология позвоночно-спинномозговой травмы (обзор) / И.Н. Морозов, С.Г. Млявых // Медицинский альманах. 2011. № 4. С. 157–159.

10. *Штоколок В.С.* Применение методики обучения двигательной самореабилитации как способ восстановления больных после выписки из стационара / В.С. Штоколок // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2–1. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17226

11. *Calabrò R.S.* Do post-stroke patients benefit from robotic verticalization? A pilot-study focusing on a novel neurophysiological approach / R.S. Calabrò, A. Naro, M. Russo, A. Leo, T. Balletta, I. Saccá, R. de Luca, P. Bramanti // Restor Neurol Neurosci. 2015. № 33 (5). P. 71–81.

12. *Christian Fisahn.* The Effectiveness and Safety of Exoskeletons as Assistive and Rehabilitation Devices in the Treatment of Neurologic Gait Disorders in Patients with Spinal Cord Injury / Christian Fisahn, Mirko Aach, Oliver Jansen, Marc Moisi, Angeli Mayadev, Krystle T. Pagarigan, Joseph R. Dettori, Thomas A. Schildhauer // A Systematic Review. Global Spine J., 2016. № 6 (8). P. 822–841.

13. *Dennis R. Louie.* Gait speed using powered robotic exoskeletons after spinal cord injury: a systematic review and correlational study / Dennis R. Louie // Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation. 2015. [Электронный ресурс]. – URL: https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-015-0074-9

14. *Khaibullina Z.R.* Physical rehabilitation of patients recovering from spinal-spinal trauma / Z.R. Khaibullina // Bulletin of the International Scientific Surgical Association. 2009. Vol. 4. N. 2–3.

Literatura

1. *Bujlova T.V.* Ocenka kachestva zhizni v processe reabilitacii bol'ny'x s travmaticheskoj bolezn'yu spinnogo mozga / T.V. Bujlova, E.A. Severova // Medicinskij al'manax. 2013. № 2 (26) S. 145–147.

2. *Zavgorodnyaya A.N.* Obzor metodov dvigatel'noj reabilitacii bol'ny'x, perenesshix pozvonochno-spinnomozgovuyu travmu / A.N. Zavgorodnyaya // Gazeta «Novosti mediciny' i farmacii» Nevrologiya (316). 2010 (tematicheskij nomer) / Voprosy' reabilitacii.

3. *Zgurov A.S.* Sovremennoe sostoyanie lecheniya pozvonochno-spinnomozgovoj travmy' (nauchny'j obzor) / A.S. Zgurov, A.V. Xrushh, A.S. Son // Mezhdunar. nevrol. zhurn.; MNZh. 2013. № 3 (57). S. 9–19.

4. Zimina E.V. Robotizirovannaya mexanoterapiya v rannej reabilitacii bol'ny'x s travmoj spinnogo mozga / E.V. Zimina, A.V. Smolenskij // Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya medicina. 2010. № 8 (80). S. 41–44.

5. *Karachinceva N.V.* Vozmozhnosti medicinskoj reabilitacii pacientov s ostroj spinal'noj travmoj / N.V. Karachinceva, E.V. Pestryakova, O.Yu. Tarasova, I.V. Ikonnikova, Yu.Ya. Pestryakov, L.A. Zharkova, O.A. Zhurbenko // Sovremenny'e problemy' nauki i obrazovaniya. 2015. № 6. [E'lektronny'j resurs]. – URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23748

6. *Lyaxoveczkaya V.V.* Dinamika dvigatel'ny'x funkcij pacientov v promezhutochnom periode travmaticheskoj bolezni spinnogo mozga na fone kompleksnogo vosstanovitel'nogo lecheniya / V.V. Lyaxoveczkaya, S.Yu. Frolenko, E.M. Vasil'chenko // MvK. 2016. № 2. S. 32–36.

7. *Makarova M.R.* Vertikalizaciya kak faktor rannej reabilitacii bol'ny'x travmaticheskoj bolezn'yu spinnogo mozga / M.R. Makarova, O.V. Romashin // Voprosy' kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoj kul'tury'. M.: Media Sfera, 2013. T. 90. № 4. S. 47–52.

8. *Mironov E.M.* Reabilitaciya bol'ny'x s posledstviyami pozvonochno-spinnomozgovoj travmy' / E.M. Mironov // Mediko-social'naya e'kspertiza i reabilitaciya. 2012. № 2. S. 6–9.

9. *Morozov I.N.* E'pidemiologiya pozvonochno-spinnomozgovoj travmy' (obzor) / I.N. Morozov, S.G. Mlyavy'x // Medicinskij al'manax. 2011. № 4. S. 157–159.

10. *Shtokolok V.S.* Primenenie metodiki obucheniya dvigatel'noj samoreabilitacii kak sposob vosstanovleniya bol'ny'x posle vy'piski iz stacionara / V.S. Shtokolok // Sovremenny'e problemy' nauki i obrazovaniya. 2015. № 2–1. [E'lektronny'j resurs]. – URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17226

11. *Calabrò R.S.* Do post-stroke patients benefit from robotic verticalization? A pilot-study focusing on a novel neurophysiological approach / R.S. Calabrò, A. Naro, M. Russo, A. Leo, T. Balletta, I. Saccá, R. de Luca, P. Bramanti // Restor Neurol Neurosci. 2015. № 33 (5). P. 71–81.

12. *Christian Fisahn.* The Effectiveness and Safety of Exoskeletons as Assistive and Rehabilitation Devices in the Treatment of Neurologic Gait Disorders in Patients with Spinal Cord Injury / Christian Fisahn, Mirko Aach, Oliver Jansen, Marc Moisi, Angeli Mayadev, Krystle T. Pagarigan, Joseph R. Dettori, Thomas A. Schildhauer // A Systematic Review. Global Spine J., 2016. № 6 (8). P. 822–841.

13. *Dennis R. Louie.* Gait speed using powered robotic exoskeletons after spinal cord injury: a systematic review and correlational study / Dennis R. Louie // Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation. 2015. [Электронный ресурс]. – URL: https://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12984-015-0074-9

14. *Khaibullina Z.R.* Physical rehabilitation of patients recovering from spinal-spinal trauma / Z.R. Khaibullina // Bulletin of the International Scientific Surgical Association. 2009. Vol. 4. N. 2–3.

S.S. Kleschunov,
S.M. Chechelnitskaya

Verticalization of Patients with Traumatic Spinal Cord Disease

The article describes the experience of teaching patients with traumatic spinal cord illness to use the medical exoskeleton "ExoAtlet® I" of the Russian company "ExoAtlet". The results of a 10-day training are given. It is shown that the correctly performed procedure of the patient's verticalization allows to quickly master the skills of maintaining balance and walking in the exoskeleton.

Keywords: traumatic spinal cord disease; spinal cord injury; verticalization of patients with traumatic spinal cord disease (TSCD); exoskeletons.