

Восстановление ходьбы у пациентов со спастическим гемипарезом: новые возможности

Коваленко А.П.¹, Родионов А.С.¹, Кремлёв Д.И.¹, Аверкиев Д.В.¹, Лобзин В.Ю.^{1,2,3}, Гусева А.В.⁴

¹ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова», Санкт-Петербург;

²ФГБУ «Детский научно-клинический центр инфекционных болезней ФМБА России», Санкт-Петербург;

³ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург; ⁴Санаторно-курортный комплекс «Приволжский» Минобороны России, Самара

¹Россия, 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, 6; ²Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 9; ³Россия, 191015, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, 41;

⁴Россия, 443029, Самара, ул. Седьмая просека

Нарушения ходьбы являются частым следствием инсульта. Новые технологии, например применение экзоскелетов (ЭС), могут помочь в восстановлении, но их эффективность еще недостаточно доказана.

Цель исследования — оценка эффективности применения медицинских ЭС и лечения спастичности для восстановления ходьбы у пациентов с последствиями острого повреждения головного мозга в виде спастического гемипареза.

Пациенты и методы. Обследовано 42 пациента с последствиями инсульта давностью от 1,5 года до 4 лет, выражающимися в спастичности и нарушениях ходьбы. Использовались шкалы: Тардье (TS), модифицированная Эшворта (MAS), Ренкин, визуальная аналоговая шкала (ВАШ); тесты комфортной ходьбы на 10 м (10MWT) и баланса Берга (BBT), индекс мобильности Ривермид (RMI). Пациенты были разделены на две репрезентативные группы (22 и 20 человек). Пациенты 1-й группы в течение 10 дней занимались в ЭС EchoAtlet (применялись оригинальные методики и методика дифференцировки усилия), 2-й группе были назначены занятия лечебной физкультурой на тот же срок. Затем всем было введено под контролем ультразвука 300–400 Ед ботулинического нейротоксина (БонТ) в спастичные мышцы нижней конечности. Обследование проводилось по трем контрольным точкам (КТ): 1-й (1-я), 12-й (2-я) и 33-й день (3-я).

Результаты и обсуждение. Сравнение обеих групп на 2-й КТ показало значимо ($p < 0,05$) лучшие результаты в 1-й группе: 10MWT (0,43 и 0,47 м/с), BBT (42 и 44,5), оценка по TS мышц задней поверхности бедра — хамстрингов (132° и 137,5°). Скорость ходьбы, очевидно, увеличилась из-за тренировки баланса, коррекции пострурально-фобических расстройств, растяжения спастичных мышц и угнетения стретч-рефлекса. На 2-й КТ проведены инъекции инкоботулоксина (Ксеомин®). На 3-й КТ получены значимо ($p < 0,05$) лучшие результаты в 1-й группе по тестам: 10MWT (0,49 и 0,56 м/с), BBT (46 и 49), TS (144° и 155°). При сравнении групп по разнице между 1-й и 3-й КТ обнаружены абсолютные приросты показателей тестов ($p < 0,01$): 10MWT (0,07 и 0,12 м/с), BBT (3,5 и 8,5), TS (14,5° и 22°). Улучшение показателей ходьбы на 3-й КТ демонстрирует потенцирующий эффект инъекций БонТ и занятий в ЭС.

Заключение. Использование ЭС EchoAtlet является перспективной методикой для восстановления ходьбы: совместное использование экзоскелета и БонТ дает выраженный потенцирующий эффект.

Ключевые слова: нарушение ходьбы; спастичность; постинсультная реабилитация; экзореабилитация; экзоскелет EchoAtlet; ботулинический нейротоксин; инкоботулоксин (Ксеомин®).

Контакты: Александр Павлович Коваленко; kvlnko73@gmail.com

Для ссылки: Коваленко АП, Родионов АС, Кремлёв ДИ и др. Восстановление ходьбы у пациентов со спастическим гемипарезом: новые возможности. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2021;13(2):56–64. DOI: 10.14412/2074-2711-2021-2-56-64

Gait rehabilitation in patients with spastic hemiparesis: new opportunities

Kovalenko A.P.¹, Rodionov A.S.¹, Kremlyov D.I.¹, Averkiev D.V.¹, Lobzin V.Yu.^{1,2,3}, Guseva A.V.⁴

¹S.M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, Saint Petersburg; ²Pediatric Research and Clinical Center for Infectious Diseases, Federal Medical Biological Agency, Saint Petersburg; ³I.I. Mechnikov North-Western State Medical University, Ministry of Health of Russia, Saint Petersburg; ⁴Privolzhskiy therapeutic resort complex, Ministry of Defense of Russia, Samara

¹6, Academician Lebedev St., Saint Petersburg 194044, Russia; ²9, Professor Popov St., Saint Petersburg 197022, Russia;

³41, Kirochnaya St., Saint Petersburg 191015, Russia; ⁴Sedmaya prosoka St., Samara 443029, Russia

Gait disturbances are a common consequence of stroke. New technologies, such as exoskeletons (ESs), may aid recovery, but their effectiveness has not yet been proven enough.

Objective: to evaluate the effectiveness of medical ESs and spasticity treatment for gait rehabilitation in patients with spastic hemiparesis due to acute stroke.

Patients and methods. The study included 42 patients with spasticity and gait disturbances who has had a stroke 1.5–4 years ago. Clinical assessment included: Tardieu scale (TS), Modified Ashworth scale (MAS), Rankin Scale, Visual Analogue Scale (VAS); 10 Meter Walk Test (10MWT) and Berg balance scale (BBT), Rivermead Mobility Index (RMI). The patients were divided into two representative groups (22 and

20 participants). Patients of the 1st group were training in the ES ExoAtlet for 10 days (original method and method of differentiation of efforts were used), the 2nd group was assigned to physical therapy for the same period. Then all patients received an injection of 300–400 U of botulinum neurotoxin (BNT) under ultrasound control into the spastic muscles of the lower limb. The examination was carried out at three control points (CPs): 1st day (1st), 12th day (2nd), and 33rd day (3rd).

Results and discussion. Comparison of both groups on the 2nd CT showed significantly ($p < 0.05$) better results in the 1st group: 10MWT (0.43 and 0.47 m/s), BBT (42 and 44.5), muscles of the back of the thigh — hamstrings assessed by TS (132° and 137.5°). Gait speed apparently increased due to balance training, correction of postural-phobic disorders, stretching of spastic muscles, and suppression of the stretch reflex. At the 2nd CPs, injections of incobotulinum toxin (Xeomin®) were performed. On the 3rd CP, significantly ($p < 0.05$) better results were obtained in the 1st group according to tests: 10MWT (0.49 and 0.56 m/s), BBT (46 and 49), TS (144° and 155°). Comparison of group differences between the 1st and 3rd CPs showed an absolute increase in test results ($p < 0.01$): 10MWT (0.07 and 0.12 m/s), BBT (3.5 and 8.5), TS (14.5° and 22°). Improvement in gait indicators on the third CP demonstrates the potentiating effect of BONT injections and ES exercises.

Conclusion. ES ExoAtlet use is a promising technique for restoring gait: the combined use of an exoskeleton and BONT gives a pronounced potentiating effect.

Keywords: gait disturbances; spasticity; post-stroke rehabilitation; exorehabilitation; exoskeleton ExoAtlet; botulinum neurotoxin; incobotulinum toxin (Xeomin®).

Contacts: Alexander Pavlovich Kovalenko; kvlnko73@gmail.com

For reference: Kovalenko AP, Rodionov AC, Kremlev DI, et al. Gait rehabilitation in patients with spastic hemiparesis: new opportunities. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika* = *Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*. 2021;13(2):56–64. DOI: 10.14412/2074-2711-2021-2-56-64

Инвалидизация на фоне повреждений головного мозга разнообразной этиологии в подавляющем большинстве случаев связана с нарушением движения. По разным оценкам, нарушениями ходьбы страдают от 460 тыс. до 1,5 млн из 12 млн инвалидов, проживающих в Российской Федерации [1]. Длительный неврологический дефицит в основном сохраняется при последствиях острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) и черепно-мозговой травмы (ЧМТ), которые чаще всего характеризуются формированием спастического гемипареза. При этом реабилитационный подход, лежащий в основе Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ; International Classification of Functioning, Disability and Health, ICF, 2001), позволяет рассматривать проблемы пациентов синдромально, вне зависимости от этиологии повреждения головного мозга [2].

Особенности саногенеза повреждений центральной нервной системы (ЦНС), связанные с процессами нейропластичности, приводят к формированию в раннем восстановительном периоде компенсаторных функциональных систем, которые в дальнейшем затрудняют восстановление движения. Одна из них — патологический стереотип ходьбы, непосредственными причинами которого являются слабость мышц и нарушение проприоцепции, приводящие к нарушениям схемы тела и постуральной устойчивости, развитию спастичности и постуральному тревожно-фобическому расстройству [3, 4].

Популярное утверждение о том, что «ходьба тренируется только в ходьбе», позволяет побудить пациента к занятиям с использованием ходунков, роллаторов и брусьев, что, к сожалению, не позволяет заново сформировать правильный образ ходьбы с коррекцией патологических стереотипов и синдромов [4–7]. Специалисты лечебной физкультуры (ЛФК) не имеют физической возможности одновременно контролировать позицию таза, спины, бедра, голени и стопы для восстановления физиологического паттерна ходьбы, поэтому занятия ЛФК зачастую восстанавливают возможность передвижения, но через формирование и закрепление патологических стереотипов — как единст-

венно возможного варианта на данном этапе саногенеза и реабилитации. В настоящее время существует ограниченное количество методов, способных создать перманентную систему коррекции, функционирующую непосредственно во время ходьбы и оказывающую нейромодулирующий эффект, — это коррекция тонуса мышц при лечении спастичности, тейпирование и применение функциональной электростимуляции.

Лечение спастичности с помощью ботулинического нейротоксина (БоНТ) в настоящее время является наиболее очевидной и доступной методикой, ставшей за последние 3–4 года полноценной медицинской технологией. В нее вошли оригинальные методики: мануального мышечного тестирования спастичности, комплексной оценки спастичности и пареза по Шкале Тардые (TS), таргетного введения БоНТ с использованием ультразвуковой (УЗ) и электромиографической навигации [8–10]. При этом ботулинотерапия, раздвигая рамки «реабилитационного окна», открывает возможности дальнейшей реабилитации, но не может ее заменить [11].

Длительность адаптации, физические и финансовые затраты на ведение пациента, нехватка персонала и ограничения сроков госпитализации обуславливают растущие потребности в разработке новых эффективных средств и методов реабилитации [12]. Одной из таких возможностей является разработка и создание роботизированных систем. В последнее десятилетие для восстановления ходьбы все активнее применяются локомоторные ассистирующие роботы (экзоскелеты — ЭС), в основу работы которых положен метод внешней реконструкции ходьбы с широкими возможностями моделирования движений пациента в реальном времени [13–18]. В настоящее время в нейрореабилитации нарабатывается практика использования двух типов ЭС, предназначенных для восстановления функции нижних конечностей, — стационарных и мобильных.

Наиболее известной среди стационарных систем является Lokomat (Носома AG, Швейцария). Ходьба в этом ЭС производится по движущейся поверхности фиксированными нижними конечностями в соответствии с физио-

логическими движениями тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, с разгрузкой массы тела и ограниченным или полным отсутствием перемещения центра массы тела. Это не позволяет осуществлять сложную координированную деятельность мышц туловища, тазового пояса и конечностей, что ограничивает восстановление их взаимодействия, недостаточно влияет на проприоцепцию, а это, в свою очередь, осложняет восстановление баланса, мышечного контроля, равновесия и схемы тела. Пациент в процессе тренировки полностью зависит от экзоконструкции, что не оставляет ему возможности преодоления сложностей ходьбы, восстановления уверенности в собственных силах и повышения мотивации. В стационарной системе отсутствуют визуально-пространственные изменения при ходьбе, это ограничивает смысловую значимость тренировки, что особенно важно для реабилитации, т. е. отсутствует основной биологический смысл ходьбы — «дойти до цели».

Мобильный ЭС фиксируется на пациенте, снабжен собственным процессором, который обрабатывает сигналы от датчиков и формирует управляющие сигналы на приводы ЭС. В отличие от стационарных систем, мобильный ЭС имеет принципиальные конструктивные и пользовательские преимущества [19]. Одним из примеров подобных устройств является оригинальный ЭС отечественного производства ExoAtlet (ООО «ЭкзоАтлет», Россия), который в настоящее время внедряется в реабилитационную практику в Российской Федерации и предназначен для социальной реадaptации и медицинской реабилитации пациентов с нарушениями ходьбы [16, 17, 20, 21].

Цель исследования — оценка эффективности применения медицинских экзоскелетов и лечения спастичности для восстановления ходьбы у пациентов с последствиями острого повреждения головного мозга в виде спастического гемипареза.

Пациенты и методы. Исследовалось влияние нового реабилитационного оборудования на восстановление ходьбы у пациентов с гемипарезом и его комбинированное применение с лечением спастичности препаратами БоНТ. Использовались: ЭС мобильного типа отечественного производства (ExoAtlet); занятия лечебной гимнастикой по восстановлению ходьбы (ЛФК); БоНТ (инкоботулотоксин — Ксеомин®).

Критерии включения и исключения были определены в соответствии с целями исследования и инструкцией к ЭС ExoAtlet. Также на этапе отбора больных учитывали результаты клинических испытаний и накопленный опыт работы с оборудованием ExoAtlet, отраженный в публикациях научного и методического характера [13–15, 22–25]. Основанием для **включения** в исследование являлось наличие последствий ОНМК с развитием гемипареза и нарушением ходьбы. К **критериям исключения** относились: наличие суставных контрактур; разница в длине ног >2 см; непереносимость или наличие противопоказаний для физических нагрузок, включающих вертикализацию; выраженный остеопороз; <24 баллов по Краткой шкале оценки психического статуса; парез в ноге <2 баллов по пятибалльной шкале оценки мышечной силы Комитета медицинских исследований (Medical Research Council's Scale, MRCS); парез в руке <3 баллов по MRCS; спастичность в руке >2 баллов по Модифицированной шкале Эшворта (Modified Ashworth Scale, MAS).

В исследование были включены 42 пациента [35 мужчин (83%) и 7 женщин (17%)] в возрасте от 47 до 75 лет (средний возраст — $61,2 \pm 8,6$ года), перенесшие ОНМК от 1,5 года до 4 лет назад (средний период после ОНМК — $2,8 \pm 1,1$ года) и имевшие спастический гемипарез и нарушения ходьбы.

Работа представляла собой открытое контролируемое исследование с выделением основной ($n=22$) и контрольной ($n=20$) групп методом простой рандомизации и с прямым анализом. Пациенты основной группы получали занятия в ЭС, контрольной — занятия лечебной гимнастикой с обучением ходьбе (ЛФК). По окончании 10-дневного курса тренировок пациентам обеих групп было проведено лечение спастичности инъекцией БоНТ.

Обследование проводилось по трем контрольным точкам (КТ): 1-я КТ (1-й день) — исходное обследование и начало курса лечения и реабилитации; 2-я КТ (12 ± 2 дня) — оценка эффективности 10-дневного курса занятий (основной группы — в ЭС ExoAtlet, контрольной группы — ЛФК) и введение от 300 до 400 Ед инкоботулотоксина под УЗ-наavigацией в спастичные мышцы ноги (дозировка определялась индивидуально после мануального мышечного теста); 3-я КТ (33 ± 2 дня) — итоговые оценки комплексного применения метода реабилитации (ЭС или ЛФК) и ботулинотерапии и оценка эффективности лечения спастичности (23 ± 2 дня после введения БоНТ).

Для оценки состояния пациента и эффективности реабилитационных мероприятий на КТ использовались: шкалы MRCS, MAS, TS; 10-метровый тест ходьбы (10 Metre Walk Test, 10MWT) и индекс мобильности Ривермид (Rivermead Mobility Index, RMI) — для оценки ходьбы и мобильности; Шкала баланса Берга (Berg Balance Scale, BBS) — для оценки баланса и равновесия; Модифицированная шкала Рэнкина (Modified Rankin scale, mRS) — для оценки активности и участия [26–33]. Для оценки удовлетворенности пациента результатами лечения была использована визуальная аналоговая шкала (ВАШ).

Следует отметить, что дизайн исследования не давал возможности специалистам ЛФК воспользоваться эффектом от введения БоНТ (БоНТ вводился после методов физического воздействия — занятий в ЭС или ЛФК). Такое построение исследования было необходимо для корректной оценки влияния физических методов лечения на спастичность.

В процессе 10-дневного курса занятий в соответствии с руководством по эксплуатации ЭС ExoAtlet использовались тренировочные режимы (пошаговый, непрерывный, по усилию) и следующие методики: 1) обучающая ходьба; 2) ритмичная непрерывная ходьба; 3) ходьба с напряжением в режиме по усилию; 4) поперечная ходьба. С учетом особенностей пациентов (гемипарез) впервые было применено программное обеспечение «дифференциации по усилию», учитывающее асимметричность движения и силы конечностей. Это позволило подобрать комбинацию режимов, предложить и апробировать оригинальную методику для занятий пациентов с гемипарезом.

Введение БоНТ на 2-й КТ осуществлялось в рамках разработанной технологии лечения спастичности, включающей в себя диагностику, методологию лечения и оценку его эффективности [8, 9]. В анализ данных включалась оценка по MAS и TS только хамстрингов — мышц задней

поверхности бедра, ответственных за укорочение шага при повышении в них тонуса и наиболее показательных для оценки влияния ЭС на спастичность.

Рабочей гипотезой возможного восстановления ходьбы при использовании мобильного ЭС EchoAtlet была следующая: проведение двухнедельного курса (10 занятий) по 1 ч в день в условиях реального передвижения по ровной поверхности с реальным переносом центра тяжести тела и двойным шагом заданных характеристик позволит реиндуцировать статический и статокинетический рефлекс, через механизмы интеро- и проприоцепции запустить механизмы восстановления образа схемы тела и поддержания баланса, разрушить патологический стереотип ходьбы и активизировать «люмбальный локомоторный центр» [34–37]. Механическое воздействие на мышечные контрактуры и ритмичное долговременное противодействие рефлексу растяжения (стретч-рефлекс) позволят повысить порог возбудимости мышечных веретен и интрафузальных волокон, что снизит проявления спастичности и позволит увеличить длину шага паретичной конечности. Последующее применение ботулинотерапии приведет к взаимному потенцированию эффекта через уменьшение активности малых α -мотонейронов путем блокирования выхода ацетилхолина, что создаст условия для закрепления и развития реабилитационного эффекта.

Данные заносили в индивидуальную регистрационную карту пациента. Формирование электронной базы данных, статистический анализ и построение диаграмм проводили с использованием пакетов прикладных программ MS Office 2010 и Statistica 8.0 for Windows (StatSoft Inc., США). Использовались: определение числовых характеристик переменных и показателей динамики изменений значений переменных, оценка нормального распределения по крите-

рию Шапиро–Уилка, Т-критерий Вилкоксона (Wilcoxon Matched Pairs Test), U-критерий Манна–Уитни (Mann-Whitney U-Test), коэффициент корреляции r Спирмена.

Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом Военно-медицинской академии. Обследованные были проинформированы о целях исследования и подписали информированное согласие.

Результаты. Пациенты в основной и контрольной группах были сопоставимы по полу, возрасту, сроку заболевания и исходным значениям оцениваемых параметров ($p < 0,05$). В рамках подтверждения рабочей гипотезы были сформированы следующие направления анализа полученных данных:

- 1) оценка эффективности применения медицинских ЭС в основной группе пациентов в сравнении с группой контроля (табл. 1);
- 2) оценка сочетанного эффекта применения ЭС и ботулинотерапии (табл. 2, 3);
- 3) оценка общей динамики восстановительного процесса в группах сравнения (табл. 4).

Как видно из табл. 1, можно выделить несколько блоков оценки жизнедеятельности и степени влияния на них ЭС и ЛФК:

- ходьба и баланс (10MWT, BBT) [27, 33];
- спастичность и мышечные контрактуры (MAS, TS) [9, 31];
- показатели мышечной силы (MRCS) [32];
- общая реабилитационная оценка (mRS, RMI) [28, 30];
- оценка пациентом проводимых мероприятий (ВАШ) [29].

Основными направлениями, по которым отмечены значимые улучшения, являлись показатели баланса, ходьбы и спастичности. При этом в случае, если баланс и ходьба имели положительные тенденции в обеих группах ($r = +0,65$) и при этом подтверждались более широкой оценкой по RMI ($r = +0,77$), показателям спастичности была свойственна большая вариабельность в ответ на применение ЭС. Особенно это было заметно по MAS, показатели которой имели минимальные изменения в контрольной группе.

Выраженность спастичности при этом являлась основным фактором, влияющим на баланс и ходьбу ($r = -0,82$ и $r = -0,51$ соответственно). Использование аппаратной реабилитации положительно влияло на растяжение мышц задней поверхности бедра (хамстрингов), что демонстрировала значимая ($p < 0,001$) динамика по MAS в ответ на применение ЭС. Отсутствие подобного эффекта в контрольной группе свидетельствовало о недостаточности возможностей обычного курса ЛФК в воздействии на мышечную контрактуру.

Оценка по TS позволила также исследовать реактивность хамстрин-

Таблица 1. Показатели мышечного тонуса, мышечной силы, функции ходьбы и функциональной независимости до (1-я КТ) и после (2-я КТ) курса реабилитации в обеих группах, Me [25-й; 75-й перцентили]

Table 1. Indicators of muscle tone, muscle strength, gait function and functional independence before (1st CP) and after (2nd CP) rehabilitation course in both groups, Me [25th; 75th percentile]

Оценочные шкалы	Основная группа		Контрольная группа	
	1-я КТ (n=22)	2-я КТ (n=22)	1-я КТ (n=20)	2-я КТ (n=20)
BBT, баллы	41,0 [37,0; 46,0] [†]	44,5 [39,0; 50,0] [†]	40,0 [36,5; 46,0]*	42,0 [37,5; 48,5]*
10MWT, м/с	0,4 [0,35; 0,46] [†]	0,47 [0,43; 0,53] [†]	0,39 [0,34; 0,46]*	0,43 [0,40; 0,50]*
MAS, баллы	2,5 [2,0; 3,0] [†]	2,0 [1,5; 2,0] [†]	2,0 [2,0; 3,0]	2,0 [2,0; 3,0]
TS (V ₃), градусы	229,5 [226,0; 233,0] [†]	237,5 [234,0; 241,0] [†]	228,0 [224,5; 233,0]	232,0 [230,0; 239,5]
MRCS, баллы	3,5 [3,0; 4,0]	4,0 [3,0; 4,0]	3,5 [3,0; 4,0]	4,0 [3,0; 4,0]
RMI, баллы	11,0 [9,0; 12,0] [†]	12,0 [10,0; 12,0] [†]	11,0 [9,0; 13,0]*	11,5 [10,0; 13,0]*
mRS, баллы	3,0 [2,0; 4,0]	3,0 [2,0; 3,0]	3,0 [2,0; 3,0]	3,0 [2,0; 3,0]
ВАШ, баллы	1,0 [1,0; 1,0] [†]	4,0 [4,0; 6,0] [†]	1,0 [1,0; 1,0]*	3,0 [2,0; 3,5]*

Примечание. Попарное сравнение до и после реабилитации в контрольной и основной группах;

* – $p < 0,05$, [†] – $p < 0,001$; Т-критерий Вилкоксона равен 0,00 во всех попарных измерениях.

гов на фоне провокации стретч-рефлекса [9]. Изменения показателей шкалы, очевидно, демонстрировали возвратное торможение рефлекса и повышение порога раздражения на фоне длительной его провокации при занятиях в аппарате. Предполагалось, что применение на 2-й КТ БоНТ усилит эти тенденции.

Улучшение баланса и равновесия имели более устойчивые и выраженные тенденции в основной группе ($Me=44,5$; $p<0,001$) по сравнению с контрольной ($Me=42,0$; $p<0,05$).

Кроме того, отмечалась положительная динамика в тестах 10MWT и RMI, а также в показателях ВАШ, которые напрямую соответствовали изменениям реальных возможностей пациента и отразились на оценке применяемых методов реабилитации ($Me=4$ и $Me=3$ соответственно; $p<0,001$).

Низкие значимость и динамика изменений по mRS в обеих группах были обусловлены тем, что в исследовании решали только одну из реабилитационных проблем — восстановление ходьбы, что не затрагивало другие аспекты деятельности человека, входящие в оценку по mRS [30]. Значимых различий выраженности пареза по MRCS [32] получено не было. Оценка динамики изменений по исследуемым шкалам представлена в табл. 2.

Анализ степени положительной динамики показателей оценочных шкал на 2-й КТ (см. табл. 2) подтверждает тенденции, отмеченные в межгрупповом анализе показателей (см. табл. 1). Основные направления, на которые может влиять ходьба в аппарате, а именно: уменьшение степени выраженности мышечных контра-

ктур в хамстрингах (на 0,5 vs 0,0; $p<0,05$), снижение рефлекторной мышечной реактивности хамстрингов (на 7 vs 4; $p<0,001$) и тренировка баланса в процессе движения (на 3 vs 2; $p<0,05$), реализовали себя через выраженное увеличение 10MWT (на 0,06 vs 0,04; $p<0,001$) и отразились на приросте RMI (на 1 vs 0; $p<0,05$).

Анализ изменений на 3-й КТ являлся результирующим в обеих группах как для лечения спастичности введением БоНТ, так и для использованных методик реабилитации. Все показатели на 3-й КТ, за исключением оценки по MRCS и mRS, демонстрировали выраженное превалирование положительной динамики в основной группе. Динамика показателей оценки баланса, ходьбы, спастичности в ос-

Таблица 2.

Результаты сравнения абсолютных приростов показателей оценочных шкал на 2-й и 3-й КТ в обеих группах, Me [25-й; 75-й перцентили]

Table 2.

Comparation of the absolute increases in the indices of the assessment scales on the 2nd CP and 3rd CP in both groups, Me [25th; 75th percentile]

Оценочные шкалы	Δ показателей между 1-й и 2-й КТ		Δ показателей между 1-й и 3-й КТ	
	основная группа (n=22)	контрольная группа (n=20)	основная группа (n=22)	контрольная группа (n=20)
BBT, баллы	3,0 [3,0; 3,0]	2,0 [2,0; 3,0]*	8,5 [6,5; 10,0]	3,5 [3,0; 5,0] [#]
10MWT, м/с	0,06 [0,05; 0,07]	0,04 [0,03; 0,05] [#]	0,12 [0,12; 0,19]	0,07 [0,05; 0,14] [#]
MAS, баллы	0,5 [0,0; 1,0]	0,0 [0,0; 0,5]*	1,0 [1,0; 1,0]	0,5 [0,0; 0,1] [#]
TS, градусы	7,0 [6,0; 8,0]	4,0 [3,0; 5,0] [#]	22,0 [17,0; 26,0]	14,5 [11,0; 17,5] [#]
MRCS, баллы	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 1,0]	1,0 [0,0; 1,0]	1,0 [0,0; 1,0]
RMI, баллы	1,0 [1,0; 2,0]	1,0 [0,0; 1,0]*	1,0 [1,0; 2,0]	1,0 [1,0; 2,0]*
mRS, баллы	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 1,0]	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 0,0]
ВАШ, баллы	3,0 [3,0; 5,0]	2,0 [1,0; 2,5] [#]	7,0 [6,0; 8,0]	4,0 [3,5; 5,0] [#]

Примечание. Значимость различий между основной и контрольной группами на 2-й и 3-й КТ:

* — $p<0,05$; [#] — $p<0,01$; T-критерий Вилкоксона равен 0,00 во всех попарных измерениях.

Таблица 3.

Сравнение показателей оценочных шкал после инъекции БоНТ по 3-й КТ и исходные данные общей группы, Me [25-й; 75-й перцентили]

Table 3.

Comparation of rating scales results after injection of BONT in the 3rd CP and the initial data of the general group, Me [25th; 75th percentile]

Шкалы	Исходные данные общей группы (n=42)	Группы сравнения		Сравнение исследуемых групп	
		основная (n=22)	контрольная (n=20)	U-критерий Манна–Уитни	p (уровень значимости)
BBT, баллы	40,0 [37,0; 46,0]	49,5 [40,5; 54,0]	46,0 [39,0; 51,0]	162,0	<0,05
10MWT, м/с	0,40 [0,35; 0,48]	0,56 [0,53; 0,60]	0,49 [0,44; 0,56]	124,5	<0,01
RMI, баллы	11,0 [9,0; 12,0]	12,5 [11,0; 14,0]	12,0 [11,0; 13,0]	187,0	0,1
MAS, баллы	2,5 [2,0; 3,0]	1,0 [1,0; 1,5]	1,5 [1,0; 2,0]	161,0	0,1
TS, градусы	228,5 [228,0; 233,0]	255,0 [250,0; 260,0]	244,0 [238,5; 249,5]	88,0	<0,001
MRCS, баллы	3,5 [3,0; 4,0]	4,0 [3,0; 4,0]	4,0 [3,0; 4,0]	201,0	0,82
mRS, баллы	3,0 [2,0; 4,0]	3,0 [2,0; 3,0]	3,0 [2,0; 3,0]	204,0	0,69
ВАШ, баллы	1,0 [1,0; 1,0]	8,0 [7,0; 9,0]	5,0 [4,5; 6,0]	23,0	<0,001

новой группе с высокой значимостью ($p < 0,01$ и $p < 0,001$) демонстрировала практически двукратное превышение прироста показателей этих шкал в контрольной группе и относительно исходных данных: соответственно BBT — 8,5 vs 3,5 и 3,0 балла; MAS — 1,0 vs 0,5 и 0,5 балла; TS — 22,0° vs 14,5° и 7,0°. Основным показателем, демонстрирующим достижение реабилитационной цели пациента — увеличение скорости и уверенности в ходьбе, — является 10MWT, прирост которого также показал двукратное превышение по сравнению с контрольной группой и исходными данными (0,12 vs 0,06 и 0,07 м/с соответственно). Это отразилось и на показателях ВАШ, которые продемонстрировали удовлетворенность пациента лечением (7 vs 4 и 3 балла соответственно; $p < 0,001$).

Для демонстрации изменений абсолютных значений показателей оценочных шкал между исходными и финальными данными пациентов обеих групп проведен анализ эффективности введения БоНТ; его результаты отражены в табл. 3. В качестве исходных показателей представлены данные общей группы ($n=42$).

При анализе данных, представленных в табл. 3, особого внимания заслуживают показатели 10MWT (0,56 м/с) и TS хамстрингов (255°). Нормальными показателями здорового человека являются скорость комфортной ходьбы от 0,59 м/с и показатели TS для хамстрингов 260–270°.

Оценку динамики восстановительного процесса проводили с помощью расчета коэффициентов абсолютного опережения по шкалам и его среднего значения (см. табл. 4). Оценочные шкалы, не показавшие значимых различий по динамике, не учитывали.

Анализ представленных расчетов показал выраженность изменений в единицу времени при межгрупповом сравнении (см. табл. 4). При данной методике интегральная выраженность эффекта от применения ЭС по шести представленным шкалам составила 65,5%. При этом следует принять во внимание, что в данном случае было невозможно учесть потенцирование воздействия комплексной реабилитации и ЭС.

Обсуждение. Результаты пилотных исследований применения ЭС EgoAtlet у пациентов с травмами и заболеваниями

ЦНС выявили его эффективность по ряду показателей [6, 38]. В основном внимание исследователей обращено на изучение эффективности роботизированных систем в реабилитации пациентов с парализациями вследствие повреждений спинного мозга различной этиологии (аутоиммунной, травматической, сосудистой) [5–7, 13, 14, 20, 22].

В работе с асимметричным неврологическим дефицитом (гемипарез) всегда остаются вопросы в отношении адекватности усилий, создаваемых робот-ассистирующими системами. При этом результаты работ, посвященных восстановлению передвижения у пациентов, перенесших повреждение головного мозга, как правило, не имеют достаточно большого количества наблюдений и неоднозначны по выбору методов оценки [12, 16, 21, 23, 24]. Так, например, в работе Е.В. Письменной и соавт. [39] проводилась полноценная оценка биомеханики и после курса тренировки в ЭС EgoAtlet у пациентов с последствиями ОНМК. Было выявлено улучшение всех основных характеристик шага и увеличение скорости передвижения, при этом исследование было выполнено на пяти пациентах, оценка спастичности не проводилась и остался нераскрытым вопрос корректности применения клинических и реабилитационных шкал.

Дизайн работы А. Picelli и соавт. [40] построен на исследовании влияния ЭС на спастичность мышц голени, вызывающих эквиноварусную деформацию стопы. Исследование проводилось на фоне уже проведенного лечения спастичности БоНТ. Как в контрольной, так и в основной группе было показано, что занятия в ЭС никак не повлияли на уже достигнутые эффекты БоНТ, но улучшили показатели скорости ходьбы. D. Erbil и соавт. [41] использовали похожий дизайн работы, но акцент был сделан на оценку показателей баланса и мобильности. Сравнивались группы пациентов, перенесших ОНМК, после лечения спастичности БоНТ, а также получавших занятия ЛФК и занятия в ЭС. Были показаны улучшение баланса и ходьбы и уменьшение спастичности в обеих группах со значимым превалированием показателей баланса и мобильности в группе с использованием ЭС. Дизайн обоих упомянутых исследований исключает возможность оценки непосредственного влияния ЭС на спастичность. Мышцы, выбранные для анализа,

не являются показательными, поскольку основное очевидное воздействие ЭС оказывает на механику движения в коленном и тазобедренном суставах, что ярко показали в своей работе по изменению биомеханики ходьбы Е.В. Письменная и соавт. [39]. Построение нашей работы, напротив, дает возможность оценить изолированное влияние ЭС на показатели ходьбы и на спастичность, при этом в качестве исследуемой выбрана группа мышц задней поверхности бедра. Последующее использование БоНТ дало закрепление эффектов и развило тенденции, выявленные при тренировке в ЭС.

В целом результаты исследования подтвердили сформулированную рабочую гипотезу. Отмеченное нами уменьшение выраженности спастич-

Таблица 4. Сравнительная оценка динамики (между 1-й и 3-й КТ) восстановительного процесса в исследуемых группах

Table 4. Comparative assessment of the dynamics (between 1st and 3rd CPs) of the recovery process in the study groups

Оценочные шкалы	Средний абсолютный прирост		Коэффициент абсолютного опережения	Абсолютное опережение, %
	основная группа (n=22)	контрольная группа (n=20)		
BBT, баллы	3,091	2,500	1,236	23,6
10MWT, м/с	0,060	0,039	1,818	81,8
RMI, баллы	1,182	0,650	1,538	56,8
MAS, баллы	0,591	0,275	2,149	114,9
TS, градусы	6,773	4,100	1,652	65,2
ВАШ, баллы	3,682	2,400	2,534	153,4
Среднее	2,839	1,863	1,655	65,5

ности (продемонстрированное данными MAS и TS) на фоне использования ЭС ExoAtlet и БоНТ можно объяснить механическим растяжением мышечных контрактур и повышением порога возбудимости стретч-рефлекса. Традиционно одним из важных показателей неврологического дефицита является степень выраженности пареза по MRCS [32]. Отсутствие динамики этого показателя вполне объяснимо, поскольку восстановление силы мышц возможно только через самостоятельные тренировки и не может быть достигнуто аппаратными методиками. Оценка ходьбы (10MWT) и мобильности (RMI) фактически являются интегральными показателями, позволяющими продемонстрировать конечный результат и расширение возможностей жизнедеятельности для конкретного пациента. В основе положительной динамики 10MWT лежали как увеличение длины шага, достигнутое за счет уменьшения спастичности и контрактуры, так и улучшение баланса и связанных с ним эффектов. Аналогичная ситуация была с RMI. Менее выраженная (по сравнению с 10MWT) динамика вполне объяснима, поскольку в его расчет входят параметры, которые не могли быть натренированы с помощью занятий в ЭС (поднятие предметов с пола, прием ванны и т. п.) [28, 33]. Очевидно, что в данном случае 10MWT являлся наиболее показательным тестом с высокой экологичностью в плане оценки восстановления ходьбы и оценки влияния применения ЭС на восстановление реальной жизнедеятельности.

Отдельного внимания заслуживают результаты, демонстрирующие улучшение баланса и коррелирующие с увеличением скорости ходьбы. Согласно данным литературных источников, использование стационарных ЭС (типа Lokomat) не демонстрирует таких результатов [16–18, 39, 42, 43]. Эти достижения, видимо, связаны с возможностями мобильных ЭС, к которым относится ExoAtlet, а именно — с реальным движением в пространстве с полноценным переносом тяжести тела и работой мышц спины и тазового пояса. Используемый впервые режим «дифференциации по усилию» позволил скорректировать асимметричность неврологического дефицита, улучшить динамику восстановления скорости и уверенности ходьбы у пациентов с последствиями повреждений головного мозга. Выявленное нами в ходе исследования статистически значимое улучшение баланса и равновесия на фоне применения ЭС ExoAtlet и инъекций БоНТ, по сравнению с контрольной группой, вероятно, обусловлено компенсацией сразу нескольких звеньев патогенеза нарушения ходьбы:

- тренировка баланса в процессе реального движения;

- активизация интеро- и проприорецепторного аппарата суставов и сухожилий в процессе реального перемещения;
- положительный запрос к сегментарным системам на формирование сбалансированной ходьбы;
- психоэмоциональная тренировка для преодоления постурально-фобического расстройства;
- тренировка статического и статокINETического рефлексов.

Использованные методы и достигнутые результаты характеризуют повышение возможностей передвижения (скорости, устойчивости), но не могут показать изменения качества ходьбы. Для оценки качества ходьбы и ее соответствия физиологической биомеханике необходимо проведение исследований в условиях полноценной лаборатории ходьбы и видеоанализа движения (gate analysis).

Заключение. Таким образом, следует отметить перспективность использования в комплексной реабилитации пациентов с последствиями поражения головного мозга ЭС, позволяющего повысить эффективность восстановления скорости и уверенности ходьбы через механизмы восстановления баланса, снижение выраженности мышечных контрактур и разрушение патологического стереотипа ходьбы в условиях реализации модели реального движения. Комбинированное использование ЭС с инкобтулотоксином (Ксеомин®) показало взаимное потенцирование эффектов, а БоНТ в суммарной дозировке от 300 до 400 Ед, в свою очередь, продемонстрировал эффективность и безопасность при лечении спастичности мышц нижних конечностей. Разработанная схема комплексного применения экзорееабилитации и ботулинотерапии для восстановления ходьбы показала свою эффективность и целесообразна для использования у пациентов с последствиями повреждения головного мозга, сопровождающимися гемипарезом и нарушениями передвижения. Ее применение позволяет рассчитывать на увеличение скорости ходьбы с 0,4 до 0,56 м/с, приближая эти характеристики пациента к показателям нормальной скорости комфортной ходьбы. Использование ЭС не может сократить конкретный период реабилитации и срок госпитализации, но, обладая более высокой эффективностью и возможностями достижения положительного результата, позволяет рассчитывать на сокращение общих сроков реабилитации и числа госпитализаций.

Для изучения механизмов восстановительных эффектов ЭС, уточнения степени влияния предложенных методик у пациентов с различной этиологией повреждения головного мозга требуются дальнейшие исследования.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ткаченко ПВ, Даминов ВД, Карпов ОЭ. Использование экзоскелета в комплексной реабилитации пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой. *Вестник восстановительной медицины*. 2017;78(2):126–32. [Tkachenko PV, Daminov VD, Karpov OE. Application of exoskeleton exoatlet in complex rehabilitation of the spinal cord injury patients. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2017;78(2):126–32 (In Russ.)].
2. International classification of functioning, disability and health: ICF. Geneva: World Health Organization; 2001. 311 p.
3. Коваленко АП. Патопфизиология спастического пареза. Гипотеза «незавершенного движения». *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2019;111(12):54–61. [Kovalenko AP. Pathophysiology of spastic paresis. The hypothesis of «incomplete movement». *Vestnik Rossiyskoy voyenno-meditsinskoy akademii*. 2019;111(12):54–61 (In Russ.)].
4. Коваленко АП, Мисиков ВК. Ботулинический токсин в лечении спастичности нижней конечности при повреждениях головного мозга. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2018;118(9):28–34. [Kovalenko AP, Misikov VK. Botulinum toxin in treatment of lower limb spasticity in patients with brain damage. *Zhurnal nevrologii i psikhiiatrii im. S.S. Korsakova*. 2018;118(9):28–34 (In Russ.)].

5. Даминов ВД, Горохова ИГ, Ткаченко ПВ. Антигравитационные технологии восстановления ходьбы в клинической нейрореабилитации. *Вестник восстановительной медицины*. 2015;(4):33-6. [Daminov VD, Gorokhova IG, Tkachenko PV. Antigravity technologies for walking recovery in clinical rehabilitation. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2015;(4):33-6 (In Russ.).]
6. Даминов ВД. Роботизированная локомоторная терапия в нейрореабилитации. *Вестник восстановительной медицины*. 2012;(1):57-62. [Daminov VD. Robotic locomotor therapy in neurorehabilitation. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2012;(1):57-62 (In Russ.).]
7. Конева ЕС, Лядов КВ, Шаповаленко ТВ, Серебряков АВ. Восстановление стереотипа ходьбы с использованием роботизированного устройства у пациентов после тотального эндопротезирования коленных суставов. *Травматология и ортопедия России*. 2013;2(68):31-8. [Koneva ES, Lyadov KV, Shapovalenko TV, Serebryakov AV. The restoration of walking stereotype with robotic device in patients after knee replacement. *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. 2013;2(68):31-8 (In Russ.).]
8. Коваленко АП, Мисиков ВК. Атлас ультразвуковой визуализации мышц для ботулинотерапии. Спастика. Диагностика и лечение. Методическое руководство. Санкт-Петербург: Либрайт; 2020. 264 с. [Kovalenko AP, Misikov VK. *Atlas ul'-trazvukovoy vizualizatsii myshits dlya botulinoterapii. Spastichnost'. Diagnostika i lecheniye. Metodicheskoye rukovodstvo* [Atlas of ultrasound imaging of muscles for botulinum therapy. Spasticity. Diagnostics and treatment. Methodical guidance]. St Petersburg: Librayt; 2020. 264 p. (In Russ.).]
9. Коваленко АП, Мисиков ВК, Искра ДА и др. Шкала Тардье в диагностике спастичности. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2019;119(9):83-90. [Kovalenko AP, Misikov VK, Iskra DA, et al. Tardue scales in the diagnostic of spasticity. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2019;119(9):83-90 (In Russ.).]
10. Коваленко АП, Синельников КА, Шамигулов ВД и др. Картирование моторных точек мышц конечностей для таргетного введения ботулинического токсина при лечении фокальной и сегментарной спастичности. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2020;12(6):61-70. doi: 10.14412/2074-2711-2020-6-61-70 [Kovalenko AP, Sinelnikov KA, Shamigulov VD, et al. Mapping the limb muscle motor points for targeted administration of botulinum toxin in the treatment of focal and segmental spasticity. *Neurologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika*. 2020;12(6):61-70. doi: 10.14412/2074-2711-2020-6-61-70 (In Russ.).]
11. Искра ДА, Коваленко АП, Кошкарёв МА, Дыскин ДЕ. Спастика: от патофизиологии к лечению. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2018;118(10):108-14. [Iskra DA, Kovalenko AP, Koshkarev MA, Dyskin DE. Spasticity: from pathophysiology to treatment. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2018;118(10):108-14 (In Russ.).]
12. Jung H, Ko C, Kim JS, et al. Alterations of relative muscle contribution induced by hemiplegia: Straight and turning gaits. *Int J Precis Eng Manufact*. 2015;16(10):2219-27. doi: 10.1007/s12541-015-0286-8
13. Ткаченко ПВ, Даминов ВД, Карпов ОЕ. Использование экзоскелета в комплексной реабилитации пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой. *Вестник восстановительной медицины*. 2017;78(2):126-32. [Tkachenko PV, Daminov VD, Karpov OE. Application of exoskeleton exoatlet in complex rehabilitation of the spinal cord injury patients. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2017;78(2):126-32 (In Russ.).]
14. Котов СВ, Лиждвой ВЮ, Секирин АБ и др. Эффективность применения экзоскелета ExoAtlet для восстановления функции ходьбы у больных рассеянным склерозом. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски*. 2017;117(10):41-7. [Kotov SV, Likhvoy VYU, Sekirin AB, et al. The efficacy of the exoskeleton ExoAtlet to restore walking in patients with multiple sclerosis. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova. Spetsvyputski*. 2017;117(10):41-7 (In Russ.).]
15. Макарова МР, Лядов КВ, Турова ЕА, Кочетков АВ. Возможности современной механотерапии в коррекции двигательных нарушений неврологических больных. *Вестник восстановительной медицины*. 2014;(1):54-62. [Makarova MR, Lyadov KV, Turova EA, Kochetkov AV. Possibilities of modern mechanical therapy in the correction of motor disorders of neurological patients. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2014;(1):54-62 (In Russ.).]
16. Клочков АС, Черникова ЛА. Роботизированные системы в восстановлении навыков ходьбы у постинсультных пациентов. *Вестник восстановительной медицины*. 2014;(3):54-5. [Klochkov AS, Chernikova LA. Robotic systems in the restoration of walking skills in post-stroke patients. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2014;(3):54-5 (In Russ.).]
17. Guidali M, Duschau-Wicke A, Broggi S, et al. A robotic system to train activities of daily living in a virtual environment. *Med Biol Eng Comput*. 2011 Oct;49(10):1213-23. doi: 10.1007/s11517-011-0809-0. Epub 2011 Jul 28.
18. Воробьев АА, Андриященко ФА, Засыпкина ОА и др. Терминология и классификация экзоскелетов. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2015;3(55):71-7.
- [Vorob'yev AA, Andryushchenko FA, Zasyapkina OA, et al. Terminology and classification of exoskeleton. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. 2015;3(55):71-7 (In Russ.).]
19. Wölbrecht ET, Chan V, Le V, et al. Real-time computer modeling of weakness following stroke optimizes robotic assistance for movement therapy. In: 2007 3rd International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. IEEE; 2007. P. 152-8.
20. Бушков ФА, Клещуннов СС, Косяева СВ и др. Клиническое исследование применения экзоскелета «ExoAtlet» у спинальных пациентов. *Вестник восстановительной медицины*. 2017;78(2):90-100. [Bushkov FA, Kleshchunov SS, Kosyayeva SV, et al. Clinical trial applications of the locomotion exoskeleton «ExoAtlet» in spinal patients. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2017;78(2):90-100 (In Russ.).]
21. Abdollahi F, Case Lazzaro ED, Listenberger M, et al. Error augmentation enhancing arm recovery in individuals with chronic stroke: a randomized crossover design. *Neurorehabil Neural Repair*. 2014 Feb;28(2):120-8. doi: 10.1177/1545968313498649. Epub 2013 Aug 8.
22. Cruciger O, Schildhauer TA, Meindl RC, et al. Impact of locomotion training with a neurologic controlled hybrid assistive limb (HAL) exoskeleton on neuropathic pain and health related quality of life (HRQoL) in chronic SCI: a case study. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2016 Aug;11(6):529-34. doi: 10.3109/17483107.2014.981875. Epub 2014 Nov 10.
23. Kasai R, Takeda S. The effect of a hybrid assistive limb® on sit-to-stand and standing patterns of stroke patients. *J Phys Ther Sci*. 2016 Jun;28(6):1786-90. doi: 10.1589/jpts.2016.1786. Epub 2016 Jun 28.
24. Mehrholz J, Elsner B, Werner C, et al. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2013 Jul 25;2013(7):CD006185. doi: 10.1002/14651858.CD006185.pub3.
25. Casadio M, Sanguineti V. Learning, retention, and slacking: a model of the dynamics of recovery in robot therapy. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 012 May;20(3):286-96. doi: 10.1109/TNSRE.2012.2190827. Epub 2012 Apr 16.
26. Коваленко АП, Камаева ОВ, Мисиков ВК и др. Шкалы и тесты для оценки эффективности лечебно-реабилитационных мероприятий у пациентов со спастичностью нижней конечности. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2018;118(5):120-8. doi: 10.17116/jneuro201811851120 [Kovalenko AP, Kamayeva OV, Misikov VK, et al. Scales and tests in the rehabilitation and treatment of patients with spasticity of the lower limbs. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2018;118(5):120-8. doi: 10.17116/jneuro201811851120 (In Russ.).]

27. Blum L, Korner-Bitensky N. Usefulness of the Berg Balance Scale in stroke rehabilitation: a systematic review. *Phys Ther*. 2008 May;88(5):559-66. doi: 10.2522/ptj.20070205. Epub 2008 Feb 21.
28. Collen FM, Wade DT, Robb GF, Bradshaw CM. The Rivermead mobility index: a further development of the Rivermead motor assessment. *Int Disabil Stud*. Apr-Jun 1991; 13(2):50-4. doi: 10.3109/03790799109166684
29. Crichton N. Visual analogue scale (VAS). *J Clin Nurs*. 2001;10(5):706-6.
30. Quinn TJ, Dawson J, Walters M, Lees KR. Reliability of the modified Rankin Scale: a systematic review. *Stroke*. 2009 Oct;40(10):3393-5. doi: 10.1161/STROKEAHA.109.557256. Epub 2009 Aug 13.
31. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys Ther*. 1987 Feb;67(2):206-7. doi: 10.1093/ptj/67.2.206
32. Van der Ploeg RJO, Oosterhuis H, Reuvekamp J. Measuring muscle strength. *J Neurol*. 1984;231(4):200-3. doi: 10.1007/BF00313939
33. Watson MJ. Refining the ten-metre walking test for use with neurologically impaired people. *Physiotherapy*. 2002;88(7):386-97. doi: 10.1016/S0031-9406(05)61264-3
34. Бернштейн НА. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. Москва: Наука; 1990. [Bernnsain NA. *Ocherki po fiziologii dvizheniy i fiziologii aktivnosti* [Essays on the physiology of movements and physiology of activity]. Moscow: Nauka; 1990 (In Russ.).]
35. Гранит Р. Основы регуляции движений. Пер. с англ. Под ред. Гурфинкеля В.С. Москва: Мир; 1973. [Granite R. *Osnovy regulyatsii dvizheniy* [The Basics of the regulation of movements]. Ed. Gurfinkel VS. Moscow: Mir; 1973 (In Russ.).]
36. Суханов ВБ. Общая система симметричной локомоции наземных позвоночных и особенности передвижения низших тетрапод. Ленинград: Наука; 1968. [Suchanov VB. *Obshchaya sistema simmetrichnoy lokomotsii nazemnykh pozvonochnykh i osobennosti peredvizheniya nizshikh tetrapod* [General system of symmetric locomotion of terrestrial vertebrates and peculiarities of movement of lower tetrapods]. Leningrad: Nauka; 1968 (In Russ.).]
37. Янсон ХА. Биомеханика нижней конечности человека. Рига: Зинатне; 1975. [Yanson KhA. *Biomekhanika nizhney konechnosti cheloveka* [Biomechanics of the human lower limb]. Riga: Zinatne; 1975 (In Russ.).]
38. Котов СВ, Исакова ЕВ, Лиждвой ВЮ и др. Методические рекомендации по нейрореабилитации больных рассеянным склерозом, имеющих нарушения ходьбы, с использованием экзоскелета ExoAtlet. Москва; 2018. 26 с. [Kotov SV, Isakova EV, Lizhdvoy VYu, et al. *Metodicheskiye rekomendatsii po neyrorereabilitatsii bol'nykh rasseyannym sklerozom, imeyushchikh narusheniya khod'by, s ispol'zovaniyem ekzoskeleta ExoAtlet* [Methodological recommendations for neurorehabilitation of patients with multiple sclerosis, with walking disorders, using ExoAtlet exoskeleton]. Moscow; 2018. 26 p. (In Russ.).]
39. Письменная ЕВ, Петрушанская КА, Котов СВ и др. Клинико-биомеханическое обоснование применения экзоскелета «Экзоатлет» при ходьбе больных с последствиями ишемического инсульта. *Российский журнал биомеханики*. 2019;23(2):204-30. [Pismennaya EV, Petrushanskaya KA, Kotov SV, et al. Clinical and biomechanical foundation of application of the exoskeleton exoatlet at walking of patients with poststroke disturbances. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* = *Russian Journal of Biomechanics*. 2019;23(2):204-30 (In Russ.).]
40. Picelli A, Bacciga M, Melotti C, et al. Combined effects of robot-assisted gait training and botulinum toxin type A on spastic equinus foot in patients with chronic stroke: a pilot, single blind, randomized controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2016 Dec;52(6):759-66. Epub 2016 Apr 21.
41. Erbil D, Tugba G, Murat TH, et al. Effects of robot-assisted gait training in chronic stroke patients treated by botulinum toxin-a: A pivotal study. *Physiother Res Int*. 2018 Jul;23(3):e1718. doi: 10.1002/pri.1718. Epub 2018 May 28.
42. Meng W, Liu Q, Zhou Z, et al. Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation. *Mechatronics*. 2015;31:132-45. doi: 10.1016/j.mechatronics.2015.04.005
43. Zhang X, Yue Z, Wang J. Robotics in lower-limb rehabilitation after stroke. *Behav Neurol*. 2017;2017:3731802. doi: 10.1155/2017/3731802. Epub 2017 Jun 8.

Поступила/отрецензирована/принята к печати

Received/Reviewed/Accepted

11.02.2021/15.03.2021/17.03.2021

Заявление о конфликте интересов/Conflict of Interest Statement

Статья спонсируется компанией Merz. Спонсор участвовал в разработке проекта исследования и поддержке исследовательской программы, а также принятии решения о представлении статьи для публикации. Конфликт интересов не повлиял на результаты исследования. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

This article has been supported by Merz. The sponsor has participated in the development of the investigation project and supported the investigation program, as well as in the decision to submit the article for publication. The conflict of interest has not affected the results of the investigation. The authors are solely responsible for submitting the final version of the manuscript for publication. All the authors have participated in developing the concept of the article and in writing the manuscript. The final version of the manuscript has been approved by all the authors.

Коваленко А.П. <https://orcid.org/0000-0001-5762-5632>

Родионов А.С. <https://orcid.org/0000-0002-7455-8600>

Кремлёв Д.И. <https://orcid.org/0000-0001-7919-3383>

Аверкиев Д.В. <https://orcid.org/0000-0002-4377-0115>

Лобзин В.Ю. <https://orcid.org/0000-0003-3109-8795>

Гусева А.В. <https://orcid.org/0000-0003-4923-9154>