

ОЦЕНКА СЕНСОМОТОРНОГО ДЕФИЦИТА У БОЛЬНЫХ С ТРАВМОЙ ПОЗВОНОЧНИКА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОНЕЙРОМИОГРАФИИ В ПРОЦЕССЕ РЕАБИЛИТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ЭКСОСКЕЛЕТА

Гвоздарева М.А.¹, Чешева Е.В.¹, Павлова Е.В.³, Дроздов Г.О.², Самохин А.Г.¹,
Карева Н.П.^{1,2}

¹ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России, Новосибирск, e-mail: knpnsk@mail.ru;

²ФГБОУ ВО НГМУ Минздрава России, Новосибирск;

³АНО «Клиника НИИТО», Новосибирск

Целью исследования было изучить динамику электронейрофизиологических показателей у пациентов в возрасте от 19 до 55 лет с травматической болезнью спинного мозга (55 человек – 39 мужчин и 16 женщин; длительность посттравматического периода $84,8 \pm 7,44$ месяца, уровень неврологического поражения не выше Th1, степень нарушения проводимости спинного мозга по шкале ASIA от А до С) под влиянием реабилитационных тренировок в экзоскелете. Программа реабилитации каждого участника состояла из 2 сессий по 20 дней, проводимых в стационарных условиях, и включала тренировки с использованием экзоскелета «ЭкзоАтлет» (не менее 15 тренировок по 30 мин в период каждой госпитализации), специализированную лечебную гимнастику и физиотерапевтические процедуры (электромиостимуляцию и по показаниям магнитотерапию или лазеротерапию). Оценку результатов проводили до начала 1-й сессии и через месяц после окончания 2-й сессии, оценивая результаты по шкалам ASIA, SCIM, Хаммерсмит и данные стимуляционной электронейромиографии. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование экзоскелета для реабилитации пациентов с преимущественно исходно тяжелыми нарушениями проводимости спинного мозга (ASIA тип А) не демонстрирует каких-либо изменений в улучшении проводимости по нервным волокнам после проведенного курса реабилитации, что подтверждается отсутствием значимых различий по результатам выполнения электронейромиографии (ЭНМГ). Однако при использовании специализированных клинических шкал SCIM и Хаммерсмит, разработанных для комплексной оценки состояния таких пациентов, отмечается значимое изменение исходных величин, что позволяет говорить о наличии определенных улучшений у пациентов после проведенной им реабилитации с использованием экзоскелета.

Ключевые слова: позвоночно-спинномозговая травма, парапарез, экзоскелет, реабилитация, электронейромиография, ЭНМГ

EVALUATION OF SENSOMOTOR DEFICIENCY IN PATIENTS WITH SPINAL TRAUMA USING ELECTRONEUROMYOGRAPHY DURING REHABILITATION WITH EXOSKELETON

Gvozдарeva M.A.¹, Chesheva E.V.¹, Pavlova E.V.³, Drozdov G.O.², Samokhin A.G.¹,
Kareva N.P.^{1,2}

¹Novosibirsk research institute of traumatology and orthopaedics n.a. Ya.L. Tsivyan, Novosibirsk, e-mail: knpnsk@mail.ru;

²Novosibirsk State Medical University, Novosibirsk;

³ANO «NIITO Clinic», Novosibirsk

Study aim was to evaluate electroneurophysiological parameters in patients aged 19-55 years with traumatic spinal cord injury which underwent rehabilitation with exoskeleton (55 subjects, 39 males and 16 females, mean posttrauma period duration $84,8 \pm 7,44$ months, injury localization lower than Th1 evaluated as ASIA A to C). Rehabilitation complex consists of two 20-day in-patient sessions, with 1 month pause between them, and included «ExoAthlet» exoskeleton trainings (not less than 15 trainings with 30 minutes duration), therapeutic exercises and physiotherapy treatment (electromyostimulation and, if prescribed by physician, magnetotherapy and laserotherapy). Results were evaluated at baseline and after a month after rehabilitation ends, using next scores: ASIA, SCIM, Hammersmith motor ability score; and electroneuromyography. Study results showed that using of exoskeleton for rehabilitation in patients with baseline severe spine cord impairments (such as ASIA type A) has no effect on spine cord neural conductivity at the study end, that supported by the absence of significant difference on electroneuromyography results, but specialized evaluation scores such as SCIM and Hammersmith motor ability score showed a significant improvement that marks a positive effect after a complex rehabilitation with exoskeleton in such patients.

Keywords: spinal cord injury, paraparesis, exoskeleton, rehabilitation, electroneuromyography, ENMG

Одной из наиболее сложных и до сегодняшнего дня не решенных задач, стоящих перед службами медицинской и социальной реабилитации, является реабилитация пациентов с осложненной травмой позвоночника, тяжелые и стойкие последствия которой приводят к получению I и II групп инвалидности в 70–80% случаев. Данную категорию пациентов составляют преимущественно лица трудоспособного возраста от 18 до 50–55 лет [1]. Своевременно организованная комплексная реабилитация помогает вернуться к труду и привычному образу жизни более чем 25% пациентов и существенно улучшает качество жизни больных, получивших группу инвалидности. Появление в конце XX в. роботизированных комплексов, позволяющих создать по заданным программам физиологический алгоритм движений туловища и конечностей обездвиженного вследствие травмы или заболевания пациента, обозначило качественно новые возможности реабилитации. Включение в программу реабилитации тренировок посредством экзоскелета обеспечивает возможность вертикализации и имитации самостоятельной ходьбы после длительного пребывания в инвалидной коляске, что приводит к активации и укреплению костно-мышечного аппарата, улучшению психоэмоционального состояния пациента, увеличению способности к самообслуживанию [2, 3].

Широкому использованию этого инновационного метода реабилитации препятствуют не только технические сложности, обусловленные особенностями конструкции роботизированных устройств (вес экзоскелета может достигать 20 кг, а для обеспечения внешнего программного управления требуется помощь одного или двух ассистентов), но и остающиеся до сих пор не решенными вопросы, касающиеся показаний и противопоказаний к тренировкам посредством экзоскелета, самой технологии тренировок и оценки их эффективности и влияния на функцию нервно-мышечного аппарата [4, 5].

Обзор исследований, выполненных в последние десять лет в России и за рубежом, показал, что для оценки эффективности тренировок и влияния ходьбы в экзоскелете на моторную активность пациента преимущественно использовались специализированные клинические шкалы и тесты. В последние годы для интегральной оценки реабилитационного потенциала и эффективности реабилитации больных с позвоночно-спинномозговой травмой (ПСМТ) рекомендовано применять данные электрофизиологической диагностики [6]. Основой для этих рекомендаций послужили исследования динамики электронейромиографии (ЭНМГ) у больных травматической болезнью спинного мозга в послеоперационный период и в процессе реабилитации с применением стандартных технологий [7, 8]. В то же время в доступной литературе встречаются лишь единичные

работы по оценке нейрофизиологических показателей в процессе тренировок посредством экзоскелета, остается неизученным вопрос о возможном влиянии ходьбы в роботизированном устройстве на проводниковую функцию периферического нерва.

Цель исследования: изучить динамику электрофизиологических показателей у пациентов с травматической болезнью спинного мозга под влиянием реабилитационных тренировок в экзоскелете.

Материал и методы исследования

Клиническое исследование эффективности программы реабилитации на основе тренировок в экзоскелете проводилось на базе ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России с 2017 по 2019 гг. Для осуществления реабилитационных тренировок использовался российский экзоскелет «ЭкзоАтлет» (производитель ООО «ЭкзоАтлет», Россия), представляющий собой аппаратно-программный комплекс (АПК). АПК «ЭкзоАтлет» состоит из механической конструкции, повторяющей контуры нижних конечностей и имеющей в своем составе двигатели для обеспечения движения, и процессора для регистрации телеметрических данных во время тренировки и формирования сигналов управления на основе анализа этих данных. Критерии включения в исследование: возраст пациентов от 19 до 55 лет, уровень неврологического поражения не выше Th1, степень нарушения проводимости спинного мозга по шкале ASIA от А до С, сохранение навыков самостоятельного перемещения в коляске и самообслуживания, навыков пользования обеими верхними конечностями и способность контролировать силу их мышечного усилия. В исследование были вовлечены 55 человек (39 мужчин и 16 женщин) с повреждением спинного мозга вследствие ПСМТ в грудном и поясничном отделах. В 25,5% случаев (14 человек) травма была на уровне Th1–Th7, в 40,0% случаев (22 человека) – на уровне Th8–Th12, у 27,4% пациентов (15 человек) – на уровне L1–L5. 7,1% пациентов (4 человека) имели травматическое повреждение одновременно нижних грудных и верхних поясничных позвонков. Давность травмы колебалась от 1 года до 15 лет, средняя продолжительность посттравматического периода составила $84,8 \pm 7,44$ месяца.

Программа реабилитации каждого участника состояла из 2 сессий по 20 дней, проводимых в стационарных условиях, и включала тренировки с использованием АПК «ЭкзоАтлет» (не менее 15 тренировок по 30 мин в период каждой госпитализации), специализированную лечебную гимнастику и физиотерапевтические процедуры (электромиостимуляцию и по показаниям магнитотерапию или лазеротерапию). Перерыв между сессиями составлял 1 месяц.

Оценка эффективности реабилитационных тренировок проводилась до начала 1-й сессии (Визит 1) и через месяц после окончания 2-й сессии (Визит 5). В качестве оценочных

инструментов использовались шкала ASIA для определения тяжести неврологического дефицита, шкала SCIM для измерения независимости пациента при повреждениях спинного мозга, шкала оценки моторных функций Хаммерсмит и данные стимуляционной ЭНМГ.

Нейрофизиологическое обследование осуществляли методом ЭНМГ с использованием аппарата отечественного производства «НейроМВП-4» («Нейрософт», Иваново, Россия). Регистрацию импульсов производили со следующих мышц: на стопах и голенях – малоберцовые и большеберцовые группы мышц (m.m. Extensor digitorum brevis dex et sin, m.m. Flexor hallucis brevis dex et sin), на бедрах – прямые порции четырехглавых мышц (m.m. Rectus femoris dex et sin). Проводилась точечная электрическая стимуляция прямоугольными импульсами длительностью 0,2 мс в зонах проекции соответствующих периферических нервов (n.n. Peroneus dex et sin, n.n. Tibialis dex et sin, n.n. Femoralis dex et sin). Прямой моторный ответ мышцы (М-ответ) регистрировался на стимуляцию дистальных и проксимальных отделов нервов, измерялось расстояние между точками стимуляции для вычисления скорости проведения по периферическому нерву на участке «голень – стопа». Регистрируемые моторные ответы оценивали по параметру: наличие или отсутствие моторных ответов на стимуляцию, при регистрации М-ответа проводилась оценка цифровых показателей амплитуды, формы, скорости проведения.

С целью оценки проводимости всей сегментарной дуги, афферентных и эфферентных путей проведения осуществлялась регистрация Н-рефлекса – моносинаптического рефлекторного ответа, регистрируемого с m.m. Gastrocnemius dex et sin на стимуляцию дистальных отделов n.n. Tibialis dex et sin. Оценке подлежали латентность регистрируемого Н-рефлекса, отражающая проводимость по всей рефлекторной дуге, а также амплитуда рефлекторного ответа.

Обработку полученных результатов исследования осуществляли с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics v25.0 путем вычисления описательных статистик, а также с выполнением внутригруппового сравнения величин дискретных параметров и проведением корреляционного анализа на наличие возможных взаимосвязей между дискретными и категориальными параметрами. Описательные статистики представлены в виде средней (M) и среднеквадратичного отклонения (SD). Статистическую значимость различий между сравниваемыми величинами дискретных параметров оценивали с использованием непараметрического знакового рангового критерия Уилкоксона. Корреляционный анализ проводили по методу Кендалла. Уровень альфа для принятия или отклонения нулевой гипотезы принимали равным 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ результатов неврологического обследования, проведенного до начала реабилитационных мероприятий, показал, что в группе наблюдения преобладали пациенты с полным нарушением проводимости спинного мозга (табл. 1).

Таблица 1

Степень нарушения проводимости спинного мозга по шкале ASIA у больных с ПСМТ до начала реабилитации (n=55)

Степень	Количество больных		Описание
	Абс.	%	
А	36	65,5	Полное: нет сохранных движений и чувствительности в сегментах S4–S5
В	7	12,7	Неполное: чувствительность (но нет движения) сохранена ниже неврологического уровня поражения (в том числе в сегментах S4–S5)
С	12	21,8	Неполное: двигательные функции ниже неврологического уровня поражения сохранены, мышечная сила большинства ключевых мышц ниже уровня поражения <3 баллов

При оценке сенсомоторного дефицита методом ЭНМГ было выявлено отсутствие биоэлектрической активности исследуемых мышц и Н-рефлекса в 9,1% случаев, что свидетельствовало о полном блоке проведения по моторным волокнам соответствующих периферических нервов. Симметричное отсутствие М-ответа с мышц коротких разгибателей регистрировалось в 57,7% случаев, с мышц коротких сгибателей – в 27,3% случаев. М-ответ с m.m. Rectus femoris dex et sin не был получен в 17,9% случаев (табл. 2). Отсутствие вызванного мышечного ответа с одноименных мышц обеих конечностей характерно для тяжелых нарушений функции проводимости иннервирующих эти мышцы нервов с неблагоприятным реабилитационным прогнозом [9].

Таблица 2

Показатели сенсомоторной активности по данным стимуляционной ЭНМГ у больных с ПСМТ до начала реабилитации

Параметры (Визит 1)	n (включенные в анализ наблюдения)	M± SD	95,0% Верхняя граница ДИ	95,0% Нижняя граница ДИ	Отсутствие ответа (амплитуда 0)	
					Количество пациентов	Доля пациентов в группе (%)
Амплитуда М-ответа m. Flexor hallucis brevis dex., мВ	55	1,46±1,71	1,93	0,99	19	34,5
Амплитуда М-ответа m. Flexor hallucis brevis sin., мВ	55	1,51±1,67	1,97	1,06	16	29,6

Параметры (Визит 1)	n (включенные в анализ наблюдения)	M± SD	95,0% Верхняя граница ДИ	95,0% Нижняя граница ДИ	Отсутствие ответа (амплитуда 0)	
					Количество пациентов	Доля пациентов в группе (%)
Амплитуда М-ответа m. Extensor digitorum brevis dex., мВ	52	0,82±1,72	1,30	0,34	30	57,7
Амплитуда М-ответа m. Extensor digitorum brevis sin., мВ	52	0,86±1,51	1,28	0,44	32	61,5
Амплитуда М-ответа m. Rectus femoris dex., мВ	28	0,65±0,65	0,90	0,39	6	21,4
Амплитуда М-ответа m. Rectus femoris sin., мВ	28	0,60±0,70	0,87	0,33	6	21,4
Амплитуда Н-рефлекса с m. Gastrocnemius dex.	45	1,56±2,00	2,16	0,96	6	13,3
Амплитуда Н-рефлекса с m. Gastrocnemius sin.	45	1,05±1,29	1,43	0,66	7	15,6

Примечание: ДИ – доверительный интервал

При получении М-ответа с m.m. extensor digitorum brevis dex. et sin. (42,3% и 38,5% наблюдений соответственно), m.m. flexor hallucis brevis dex. et sin. (71,4% и 65,5% наблюдений) выявлялись электронейрофизиологические признаки аксональной полинейропатии нижних конечностей в виде изменения формы моторных ответов, снижения цифровых значений амплитуды и отсутствие ее прироста на увеличение стимуляции. Наиболее сохранены показатели отмечены при исследовании функций проведения по моторным волокнам бедренных нервов. Регистрируемые моторные ответы имели соответствующие норме показатели формы, без латеральных различий. По-видимому, это связано с тем, что бедренные нервы не относятся к так называемым длинным нервам, каковыми являются малоберцовые и большеберцовые нервы.

Средние значения амплитуды М-ответа всех исследуемых мышц, а также Н-рефлекса в группе пациентов с ПСМТ до начала реабилитации были снижены более чем в 2 раза, что отражает как нарушения функции проводимости длинных двигательных проводников (М-ответ), так и патологические изменения в афферентной части дуги моносинаптического рефлекса спинного мозга (Н-рефлекс) (табл. 2).

При анализе показателей электронейрофизиологического исследования, проведенного после завершения 2 курсов реабилитации, включавших от 30 до 36 тренировок в экзоскелете, не выявлено достоверных изменений изучаемых параметров, за исключением зарегистрированных различий по амплитуде М-ответа для m. extensor digitorum brevis sin.

($p=0,017$), однако на симметричной ей мышце контралатеральной конечности значимых различий не отмечено. Результаты статистической обработки данных ЭНМГ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели сенсомоторной активности по данным стимуляционной ЭНМГ у больных с ПСМТ через 1 месяц после реабилитации

Параметры (Визит 5)	n (включенные в анализ наблюдения)	M± SD	95,0% Верхняя граница ДИ	95,0% Нижняя граница ДИ	Отсутствие ответа (амплитуда 0)	
					Количество пациентов	Доля пациентов в группе (%)
Амплитуда М-ответа m. Flexor hallucis brevis dex., мВ	53	1,66±1,94 (p=0,070)	2,19	1,13	20	37,7
Амплитуда М-ответа m. Flexor hallucis brevis sin., мВ	53	1,41±1,59 (p=0,408)	1,84	0,97	16	30,2
Амплитуда М-ответа m. Extensor digitorum brevis dex., мВ	53	0,70±1,50 (p=0,213)	1,12	0,29	32	60,4
Амплитуда М-ответа m. Extensor digitorum brevis sin., мВ	53	0,63±1,24 (p=0,017)	0,97	0,29	34	64,2
Амплитуда М-ответа m. Rectus femoris dex., мВ	38	0,69±0,65 (p=0,722)	0,91	0,48	7	18,4
Амплитуда М-ответа m. Rectus femoris sin., мВ	38	0,68±0,72 (p=0,583)	0,91	0,44	5	13,2
Амплитуда Н-рефлекса с m. Gastrocnemius dex.	44	1,44±2,05 (p=0,711)	2,06	0,81	5	11,4
Амплитуда Н-рефлекса с m. Gastrocnemius sin.	44	1,16±1,34 (p=0,615)	1,57	0,75	6	13,6

Примечание: p – статистическая значимость различий по отношению к результатам ЭНМГ до начала реабилитации; ДИ – доверительный интервал

Средние значения показателей проведения по моторным волокнам периферических нервов и корешковым структурам поясничного отдела позвоночника, зарегистрированные на Визите 5, не изменились по сравнению с аналогичными показателями до начала реабилитационного процесса, за исключением снижения амплитуды моторного ответа с коротких разгибателей стопы слева (табл. 2, 3). У 5 человек с полным блоком сегментарного проведения до начала реабилитации (9,1%) признаков биоэлектрической активности на Визите 5 не появилось. Доля пациентов с симметричным отсутствием М-ответа с m.m. Extensor digitorum brevis dex et sin, m.m. Flexor hallucis brevis dex et sin через месяц после завершения реабилитационного процесса увеличилась на 2–3%, но это изменение не было статистически значимым. Результаты обследования с использованием клинических шкал

были более оптимистичными: достоверно возрос суммарный средний балл по шкале независимости SCIM (с $66,1 \pm 10,95$ на Визите 1 до $68,7 \pm 9,44$ на Визите 5, $p=0,024$). Доля пациентов, у которых суммарный балл возрос на 1 балл и более, составила 45,5%, то есть почти у половины пациентов, получавших реабилитацию посредством экзоскелета, произошло изменение возможностей самообслуживания в сторону улучшения. При оценке моторных функций по шкале Хаммерсмит на Визите 5 также зарегистрировано статистически значимое увеличение среднего балла в сравнении с Визитом 1 ($p=0,008$), что свидетельствует об улучшении моторно-двигательных навыков в процессе реабилитации. Проведение корреляционного анализа между показателями шкал и данными ЭНМГ не выявило взаимосвязей между изучаемыми параметрами. Об отсутствии положительных изменений нейрофизиологических параметров у больных с существенным улучшением клинических показателей в результате реабилитации сообщают и другие авторы [10].

Заключение

Использование экзоскелета для реабилитации пациентов с исходно тяжелыми нарушениями проводимости спинного мозга (ASIA тип А в 65,5% случаев) вследствие ПСМТ не влияет на проведение по моторным волокнам периферических нервов и корешковым структурам поясничного отдела позвоночника, что подтверждается отсутствием существенных различий амплитуды М-ответа и Н-рефлекса при проведении стимуляционной ЭНМГ до начала и после завершения программы реабилитации. Однако при использовании специализированных клинических шкал SCIM и Хаммерсмит, разработанных для комплексной оценки состояния таких пациентов, отмечается значимое изменение исходных величин, что позволяет говорить о наличии определенных улучшений у пациентов после 2 сессий реабилитационных тренировок в экзоскелете продолжительностью 20 дней с интервалом в 1 месяц между сессиями. Таким образом, при характеристике исходов реабилитации такой категории пациентов приоритет следует отдавать анализу специализированных клинических шкал, разработанных для комплексной оценки состояния больных с сенсомоторным дефицитом.

Список литературы

1. Морозов И.Н., Млявых С.Г. Эпидемиология позвоночно-спинномозговой травмы: обзор // Медицинский альманах. 2011. № 4 (17). С. 157-159.
2. Baunsgaard C.B., Vig Nissen U., Brust AK., Frotzler A., Ribeill C., Kalke Y-B. Gait training after spinal cord injury: safety, feasibility and gait function following 8 weeks of training with the exoskeletons from Ekso Bionics. Spinal Cord. 2018. vol. 56. P. 106–116.

3. Sczesny-Kaiser M., Höffken O., Aach M., Cruciger O., Grasmücke D., Meindl R., Schildhauer T.A., Schwenkreis P., Tegenthoff M. HAL exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients. *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*. 2015. vol. 12. P. 68.
4. Карева Н.П., Шелякина О.В., Павлова Е.В. Перспективы антропоморфной робототехники в восстановлении пациентов после травмы спинного мозга (обзор литературы) // *Современные проблемы науки и образования*. 2018. № 6.; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=28430> (дата обращения: 12.11.2019).
5. Miller L.E., Zimmermann A.K., Herbert W.G. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Med Devices Auckl NZ*. 2016. vol. 9. P.455–466.
6. Иванова Г.Е., Воловец С.А., Морозов И.Н., Бойко А.Н., Гринь А.А., Хасанова Д.Р., Бодрова Р.А., Комаров А.Н., Кезина Л.П., Салюков Р.В., Силина Е.В. Рекомендации по ведению больных в рамках амбулаторно-поликлинической и стационарной медицинской помощи больным с последствиями травм спинного мозга в восстановительном и позднем периодах: руководство для врачей. М.: Союз реабилитологов России, 2015. 75 с.
7. Бодрова Р.А., Аухадеев Э.И., Якупов Р.А. Возможности определения реабилитационного потенциала и эффективности реабилитации у пациентов с травмой спинного мозга // *Вопросы курортологии физиотерапии и лечебной физкультуры*. 2016. Т. 93. № 2-2. С. 39-40.
8. Шеин А.П., Криворучко Г.А., Чухарева Н.А. ЭМГ-характеристики выраженности сенсомоторного дефицита в системе нижних конечностей у больных с различной локализацией повреждения в грудном и поясничном отделах позвоночника // *Гений Ортопедии*. 2010. № 1. С. 29-38.
9. Николаев С.Г. Практикум по клинической электронейромиографии: Издание второе, перераб. и доп.: Иваново: Иван. гос. мед. академия, 2003. Глава 7. С. 27-44, 62-68.
10. Ковражкина Е.А. Клиническая и нейрофизиологическая динамика у пациента со спинальной травмой: описание случая. *Consilium Medicum*. 2017. V. 19 (9). P. 77–79. DOI: 10.26442/2075-1753_19.9.77-79.