Роботизированная механотерапия с электростимуляцией и VR

И. В. Погонченкова, Е. В. Костенко, Л. В. Петрова, Г. М. Лутохин, А. Г. Кашежев, М. А. Рассулова, Е. А. Турова, Ю. В. Утегенова

ГАУЗ «Московский научно-практический центр медицинской реабилитации, восстановительной и спортивной медицины имени С. И. Спасокукоцкого Департамента здравоохранения города Москвы»

Процесс внедрения роботизированных и электромеханических систем в программы медицинской реабилитации пациентов с нарушением функции нижних конечностей получил активное развитие в последние годы, что связано с возможностью автоматизировать, индивидуализировать и интенсифицировать эту трудоемкую отрасль медицины.

Возможности роботизированной механотерапии и экзоскелета

Роботизированная механотерапия (РМ) представляет собой внешние механизированные ортезы с сервоприводами, оснащенные аппаратно-программным управлением. Выделяют два основных типа экзоскелетов:

1. Экзоскелеты, связанные с беговой дорожкой и системой разгрузки веса, преимуществом которых является надежная фиксация больного без рисков падения и травм, а также регулируемая настройка трека ходьбы (угол наклона дорожки, скорость полотна).
2. Экзоскелеты свободного перемещения (ExoAtlet I), которые чаще всего не имеют системы разгрузки веса или свободно перемещаются вместе с больным, обладают мобильностью и могут использоваться в повседневной жизни.

Восстановление ходьбы с помощью РМ осуществляется путем интенсивной, повторяющейся и целеориентированной двигательной активности, которая формирует правильный паттерн движений. Упражнения требуют физических усилий, внимания и вовлеченности в процесс. Экзоскелеты последнего поколения (ExoAtleIt I) оснащены синхронизированной функциональной электростимуляцией (ФЭС) мышц спины и нижних конечностей, что потенцирует эффект механотерапии и реорганизует нарушенный стереотип движений.

Роботизированные устройства регистрируют ряд параметров: угол выноса бедра и голени, объем движений в голеностопном суставе, площадь опоры, скорость и вектор переноса центра тяжести при ходьбе, что позволяет индивидуализировать особенности

Проведено исследование эффективности экзоскелета с интегрированной функциональной электростимуляцией для восстановления ходьбы у пациентов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта.

Таблица 1 | Критерии отбора пациентов с постинсультными статолокомоторными нарушениями

Показатель	Критерии соответствия
Возраст	18–75 лет
Давность после ЦИ	ранний восстановительный период
Мышечная сила	0–3 балла по шкале комитета медицинских исследований (Medical Research Council Scale, MRCS)
Спастичность	2–3 балла по модифицированной шкале Эшворта (Modified Ashworth Scale, mAS)
Статическое и динамическое равновесие	>12 баллов по общей шкале Тинетти >7 баллов по подшкале равновесия шкалы Тинетти
Мобильность	4–8 баллов по индексу мобильности Ривермид >5 баллов по подшкале ходьбы шкалы Тинетти > 0,4 м/сек по тесту 10-метровой ходьбы (10 Meter Walk Test)
Тревога и депрессия	<11 баллов по разделам «Тревога» и «Депрессия» Госпитальной шкалы тревоги и депрессии (Hospital Anxiety and Depression Scale: HADS)
Когнитивные функции	>20 баллов по Монреальской шкале оценки когнитивных функций (The Montreal Cognitive Assessment, MoCA)
Состояние функционирования и ограничения жизнедеятельности	3–4 балла по шкале реабилитационной маршрутизации (ШРМ); 3–4 балла по шкале Рэнкина; >50 баллов по индексу Бартел

нарушений походки и адаптировать программу под потребности пациента.

Одной из модальностей в терапии нарушений ходьбы является проприоцептивная стимуляция. Рецепторный аппарат подошвы благодаря воздействию, имитирующему шаговые движения, инициирует процесс восстановления движений нижней конечности и сохраняет познотонические рефлексы при поражении проводящих путей в головном мозге, особенно в условиях недостаточной нисходящей стимуляции. Для уменьшения негативного влияния отсутствия гравитации и последующей атрофии гравитационно-зависимых мышц используется подошвенная стимуляция, показавшая свою эффективность в ряде исследований.

Для уменьшения негативного влияния отсутствия гравитации и последующей атрофии гравитационно-зависимых мышц используется подошвенная стимуляция, показавшая свою эффективность в ряде исследований.

Нами была изучена эффективность экзоскелета ExoAtlet I с интегрированной функциональной электростимуляцией (ФЭС) для восстановления функции ходьбы у пациентов в раннем восстановительном периоде ишемического инсульта (ИИ).

Исследование проводили на базе филиала 3 ГАУЗ МНПЦ МРВСМ имени С. И. Спасокукоцкого ДЗМ. Курс реабилитации проходили 127 пациентов с тяжелыми нарушениями функции ходьбы и равновесия, в раннем восстановительном периоде ИИ. Из них — 68 мужчин, 59 женщин, средний возраст 63,0 ± 4,7 лет. Правосторонний гемипарез имелся у 58 больных (45,6 %), левосторонний — у 69 пациентов (54,4 %). Давность перенесенного инсульта составляла от одного до шести месяцев (в среднем — 4,6 ± 1,3 месяца).

В исследование включали пациентов с тяжелым или умеренным парезом мышц-разгибателей стопы (балл по 6-балльной системе оценки двигательных нарушений Британского совета медицинских исследований не более 3), отсутствием грубой спастичности мышц ног (балл по шкале спастичности Эшворта не более 3), легкими и умеренными когнитивными нарушениями (балл по шкале MoCA 20 и более). Критерии отбора пациентов для исследования представлены в таблице 1.

Все обследованные пациенты имели постинсультный парез в мышцах ног, причем наибольшая слабость отмечалась в мышцах-разгибателях стопы. У 11 пациентов (8,6 %) движения в стопе отсутствовали полностью, у 55 пациентов (43,3 %) сила мышц составляла 1–2 балла, у 61 пациента (48,1 %) — сила мышц-разгибателей стопы оценивалась в 3 балла.

Пациенты были рандомизированы методом случайных чисел на 2 группы, сопоставимые по возрастно-половым и неврологическим характеристикам:

- основная группа (ОГ) — 68 больных, средний возраст 66,6±3,9 лет;
- контрольная группа (КГ) — 59 пациентов в возрасте 61,1±4,8 лет.

Всем пациентам было проведено 15 процедур базовой реабилитации, которая включала ЛФК, магнитотерапию, массаж паретичной конечности. Процедуры выполнялись через день в течение 5 недель.

Пациенты ОГ дополнительно получали роботизированную механотерапию с использованием экзоскелета ExoAtlet I с БОС и ФЭС.

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОЗВОЛЯЮТ АДАПТИРОВАТЬ ПРОГРАММУ ИНДИВИДУАЛЬНО ПОД ПОТРЕБНОСТИ КАЖДОГО ПАЦИЕНТА

Таблица 2 | Этапы занятий на тренажере роботизированной механотерапии с БОС и программируемой ФЭС

Этап	Назначение этапа	Содержание этапа
1 этап Подготовительный	Оценка антропометрических параметров пациента	Замер антропометрических данных пациента с последующей настройкой экзоскелета. Пациент помещается в экзоскелет, производится монтаж оборудования, после чего пациент обучается пересаживаться в/из экзоскелета и вставать в нем.
2 этап Основной	Обучение ходьбе	Тренинг ходьбы по беговой дороже, проводится в двухфазном режиме: 1) последовательная ходьба (с остановками в момент переноса центра тяжести с одной ноги на другую и паузами между шагами); 2) непрерывная ходьба, на 1–2-м занятии проводят тренировки в режиме последовательной ходьбы со средним количеством шагов 600–800. При хорошей переносимости физических нагрузок выбирается непрерывный режим ходьбы. Целевое количество шагов составляет 1800 за тренировку. С началом ходьбы подбираются параметры электростимуляции.

Особенности проведения роботизированной механотерапии с функциональной стимуляцией

Работа тренажера основана на принципе локомоторного ассистирования движениям пациента через регистрацию данных актиграфов, акселерометров, а также электромиографических потенциалов мышц. За счет внешних роботизированных ортезов пораженная конечность передвигается в пределах анатомо-физиологических параметров. Также присутствует режим полного контроля движения в случае выраженного пареза или плегии. Комплекс РМ с ФЭС включает: экзоскелет с миостимулятором, планшет для управления, набор электродов, систему разгрузки веса свободного перемещения или на беговой дорожке, опционально очки виртуальной реальности (ВР). Методика роботизированной механотерапии включает несколько этапов (табл. 2).

Работа тренажера основана на принципе локомоторного ассистирования движениям пациента через регистрацию данных актиграфов, акселерометров, а также электромиографических потенциалов мышц.

Фото: НИИОЗММ ДЗМ

Фото: НИИОЗММ ДЗМ

Фото: НИИОЗММ ДЗМ

Фото: НИИОЗММ ДЗМ

Фото: НИИОЗММ ДЗМ

Этапы проведения роботизированной механотерапии с БОС и программируемой ФЭС (экзоскелет)

Таблица 3 | Параметры встроенной функциональной электростимуляции в экзоскелете

Параметр	Значения параметра
Количество каналов	10
Частота следования импульсов, Гц	10–300 (шаг 10)
Длительность импульса, мкс	100–300 (шаг 50)
Максимальная амплитуда тока в импульсе (на нагрузке 1000 Ом)	0–80 мА (шаг 2)
Форма импульса	Монофазная, бифазная
Детектирование разрыва канала	Наличие
Работа в режиме ходьбы вперед	Наличие

Курс процедур составляет 10–15 сеансов продолжительностью 30 минут, занятия проводятся ежедневно или 2–3 раза в неделю (в зависимости от выраженности пареза и состояния пациента).

От начала к концу курса увеличивают длину шага и снижают интервал между шагами до ходьбы без интервала. Параметры длины шага и скорость ходьбы настраиваются индивидуально. Время ходьбы составляет 30 минут и поделено на 3 интервала по 10 минут с обязательными перерывами по 5 минут, которые больной проводит в положении сидя.

Активный и индифферентный электроды накладывают накожно перпендикулярно ходу мышечных волокон. Электростимуляцию проводят однополярным низкочастотным импульсным током прямоугольной формы с амплитудой в диапазоне от 30 до 80 мА, длительностью от 100 до 150 мкс и частотой следования от 50 до 80 Гц. Стимуляция подбирается индивидуально для каждого пациента, обеспечивая наиболее оптимальное мышечное сокращение (табл. 3).

Исходно, до начала терапии (1-й визит, T1), через 3 недели терапии (2-й визит, T2) и 5 недель от начала курса МР (3-й, окончательный визит, T3) проводили оценку двигательных, координаторных нарушений, а также когнитивной, эмоциональной функций независимости в повседневной жизни (индекс Бартел).

Степень пареза нижней конечности определялась по пятибалльной шкале MRCs, спастичность — по модифицированной шкале Эшворта (mAS), функциональная независимость — с помощью индекса Бартел. Оценка когнитивных функций проводилась по Монреальской шкале (MoCA), уровня тревоги и депрессии — по госпитальной шкале тревоги и депрессии (HADS), нарушение ходьбы и равновесия — с использованием шкалы Тинетти.

От начала к концу курса увеличивают длину шага и снижают интервал между шагами до ходьбы без интервала. Параметры длины шага и скорость ходьбы настраиваются индивидуально.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКЗОСКЕЛЕТА ПОКАЗАЛО НЕ ТОЛЬКО УВЕЛИЧЕНИЕ МЫШЕЧНОЙ СИЛЫ У ПАЦИЕНТОВ, НО ТАКЖЕ УЛУЧШЕНИЕ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

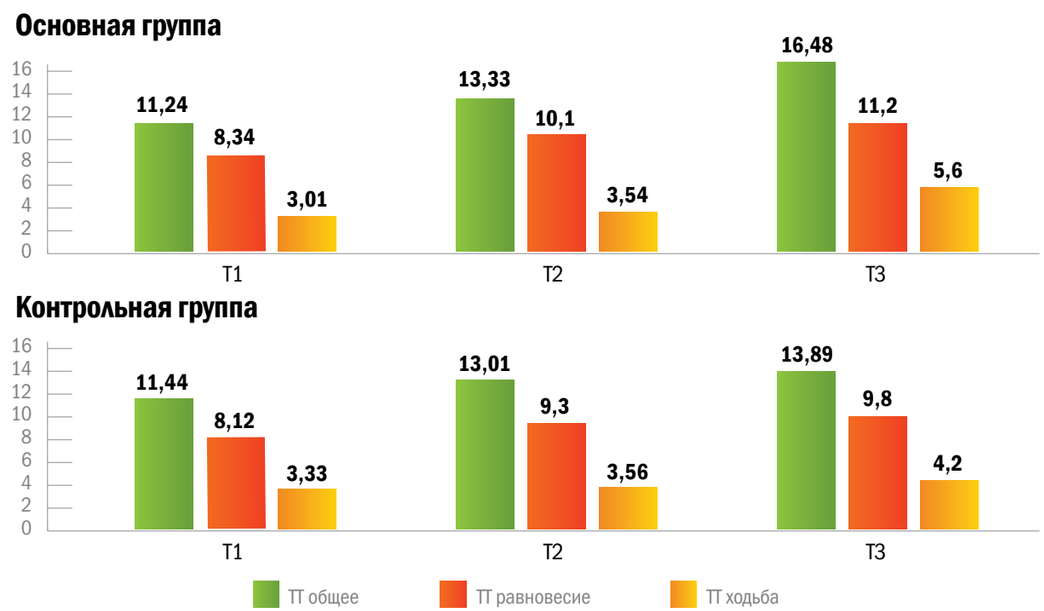

Рисунок 1 | **Динамика показателей шкалы Тинетти (баллы) при проведении роботизированной механотерапии**

Результаты исследования

При оценке динамики функциональной независимости было получено статистически достоверное улучшение индекса Бартел у пациентов обеих групп, со статистически значимой разницей межгрупповых различий по показателям: передвижение по ровной поверхности, вставание с постели, подъем по лестнице.

При проведении медицинской реабилитации пациентов ОГ было выявлено увеличение силы мышц с 2,78±0,23 до 3,57±0,21 балла по MRCs и снижение мышечного тонуса с 1,86±0,21 до 1,52±0,19 балла по mAS. У пациентов КГ положительная динамика снижения мышечного тонуса и повышения силы в мышцах голени не достигала значимых различий ($p>0,05$).

Средняя комфортная и максимальная скорость ходьбы, рассчитанная по тесту 10-метровой ходьбы, у всех участников исследования находилась в пределах средних значений, 0,4±0,14 м/сек у пациентов ОГ и 0,38 ±0,16 м/сек у пациентов КГ, что свидетельствовало о наличии выраженных ограничений свободного передвижения в условиях сообщества, без значимых межгрупповых различий. К моменту окончания исследования наблюдалось статистически значимое нарастание скорости ходьбы у пациентов ОГ (с 0,4 до 0,48 м/сек; $p<0,05$), в то время как у пациентов КГ улучшение показателей не достигало степени статистической значимости.

При повторном тестировании отмечался регресс познотонических расстройств по шкале Тинетти. У пациентов ОГ к концу исследования в 63,3 % случаев (43 пациента) выявлялись умеренные статолокомоторные нарушения. Изучение эффективности применения РМ с ФЭС на общую двигательную активность, статическое и динамическое равновесие показало статистически значимую положительную динамику ($p<0,05$) у пациентов ОГ по параметрам общей двигательной активности, подшкалам ходьбы и равновесия шкалы Тинетти на визите Т3. У пациентов КГ значимого нарастания среднего суммарного числа баллов по сравнению с исходными значениями шкалы Тинетти не зарегистрировано ($p<0,05$). Также отмечалось улучшение ходьбы по шкале Тинетти у пациентов ОГ (рис. 1).

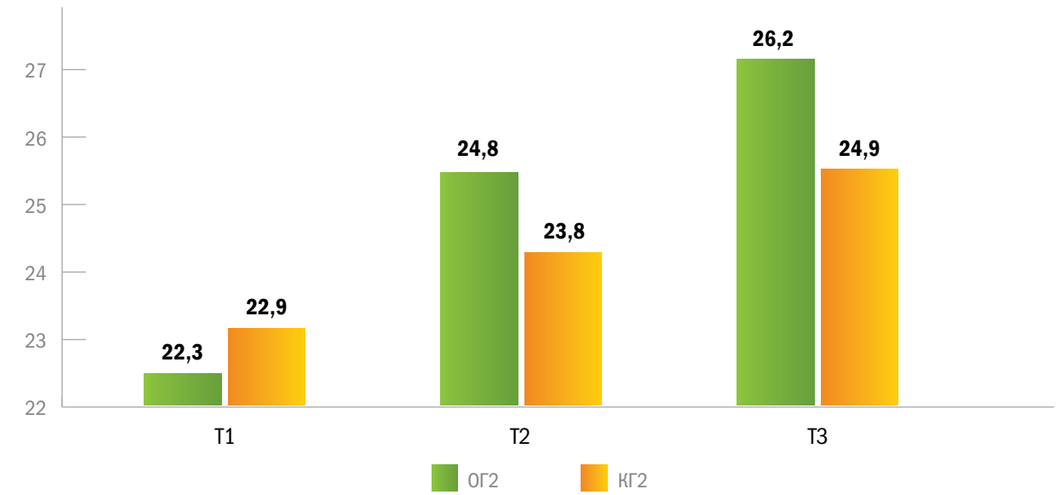

Рисунок 2 | **Динамика показателей когнитивного статуса по шкале MoCA при проведении роботизированной механотерапии, баллы**

При оценке динамики психоэмоционального статуса и когнитивных функций был получен статистически значимый прирост по шкале MoCA и уровню депрессии по HADS в ОГ (рис. 2–3).

Исходно умеренные когнитивные нарушения и деменция легкой степени выявлены у 74 (66,1 %) больных. Средний балл по шкале MoCA в ОГ составил 22,3±1,15; в КГ — 22,9±1,17. В обеих группах отмечались нарушения способности быстрой ориентации в меняющейся обстановке, концентрации внимания при выполнении тестов. Выявлялись снижение памяти, особенно на текущие события, замедленность мышления, быстрая истощаемость. При этом отмечалась достоверная положительная динамика показателей нейродинамических и регуляторных функций в ОГ. Позитивные изменения памяти отмечались к 5-й неделе исследования (рис. 2).

Анализ динамики эмоционального состояния по шкале HADS показал снижение суммарного числа баллов по подшкале депрессии у 58 (82,3 %) пациентов ОГ к 5-й неделе терапии до средних показателей 7,8. Это ниже диагностического показателя субклинической депрессии (8 баллов). Положительная динамика наблюдалась у пациентов ОГ по подшкале тревоги. Средний показатель выраженности тревоги у пациентов ОГ до начала реабилитации составлял 10,2 ± 2,9 балла, у пациентов КГ — 10,0 ± 2,4 балла. К моменту окончания исследования (Т3) средний балл тревоги по шкале HADS снизился до 7,4 у пациентов ОГ, что ниже диагностического показателя субклинической (8 баллов). Изменения показателей КГ не достигали степени статистической значимости (рис. 3).

Исходно пациенты ОГ и КГ не различались по сумме баллов шкалы Бартел.

К МОМЕНТУ ОКОНЧАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ **НАБЛЮДАЛОСЬ СТАТИСТИЧЕСКИ ЗНАЧИМОЕ НАРАСТАНИЕ СКОРОСТИ ХОДЬБЫ У ПАЦИЕНТОВ,** ИСПОЛЬЗОВАВШИХ ЭКЗОСКЕЛЕТ

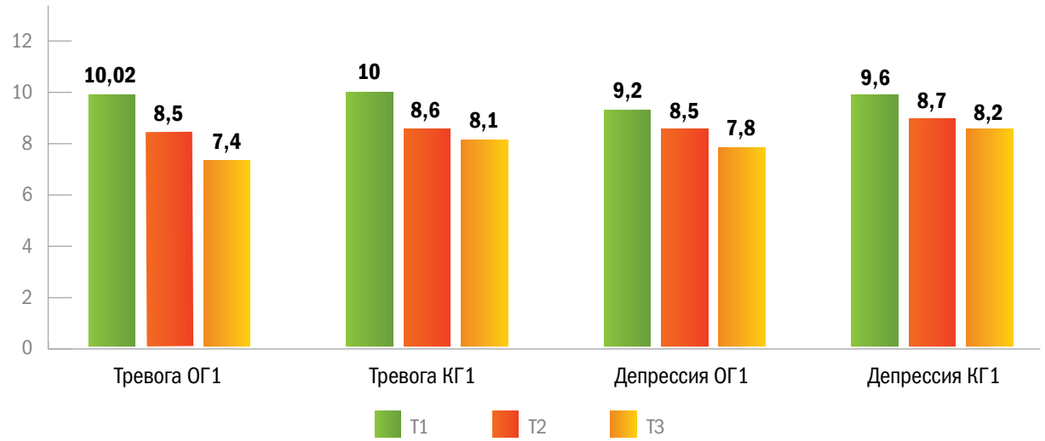

Рисунок 3 | **Динамика показателей эмоционального статуса по шкале HADS при проведении роботизированной механотерапии, баллы**

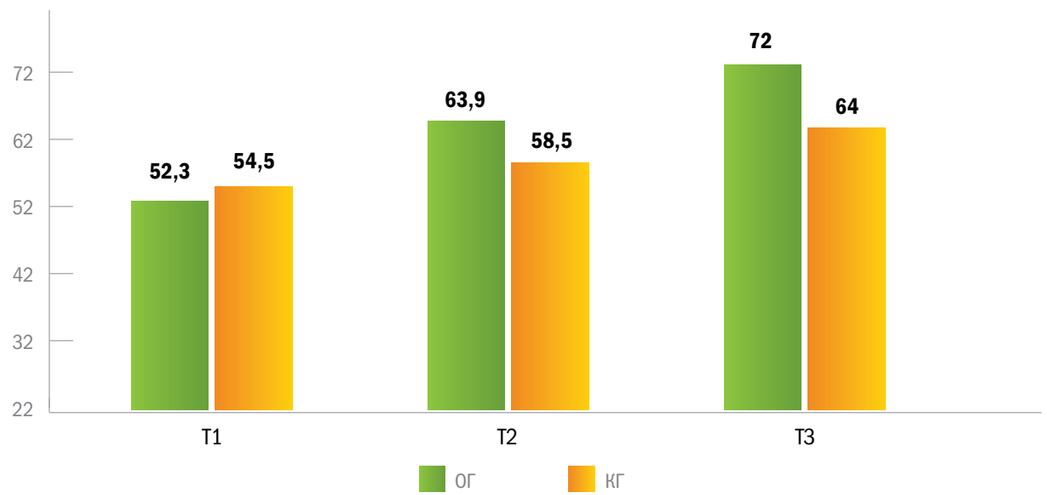

Рисунок 4 | **Динамика показателей активности повседневной деятельности (индекс Бартел) при проведении роботизированной механотерапии, баллы**

При оценке динамики функциональной независимости было получено статистически достоверное улучшение индекса Бартел у пациентов обеих групп, со статистически значимой разницей межгрупповых различий по показателям: передвижение по ровной поверхности, вставание с постели, подъем по лестнице. Через 5 недель после начала реабилитационных мероприятий средний балл для пациентов ОГ составил 72–4,6; для КГ — 64–6,8 (рис. 4).

В исследовании продемонстрирована эффективность применения РМ с ФЭС в восстановлении силы, объема и скорости движений в пораженной конечности. Кроме того, занятия с использованием экзоскелета ExoAtlet I достоверно улучшают когнитивные функции и приводят к снижению уровня депрессии у больных в раннем восстановительном периоде ИИ. На основании исследования разработана модель пациента для проведения РМ с ФЭС для коррекции нарушенной функции ходьбы и равновесия (табл. 4).

Применение роботизированной механотерапии с ФЭС открывает перспективы для эффективного восстановления и улучшения качества жизни пациентов после инсульта, дает возможность вернуться к активной и полноценной жизни людям с тяжелой патологией.

Таблица 4 | **Модель пациента для применения роботизированной механотерапии с функциональной электростимуляцией для восстановления функции ходьбы у пациентов с ишемическим инсультом**

Составляющая модели	Описание составляющей	Метод оценки
Возраст (лет)	15–75 лет	
Клиническая характеристика	1. Пациенты с умеренной и выраженной дисфункцией НК в раннем, позднем восстановительном периодах после перенесенного ИИ. 2. Пациенты с умеренной и выраженной дисфункцией НК в периоде остаточных явлений ИИ.	Данные медицинской документации
Характеристика функции нижней конечности	1. Выраженность пареза мышц НК 1–3 балла. 2. Спастичность 3 балла и менее. 3. Когнитивная функция 20 и более баллов. 4. Аффективные нарушения менее 11 баллов	MRCS MAS MoCA HADS
Домены МКФ, связанные с нарушением функции НК	**Домены активности:** d430.3 – поднятие ноги, перенос объекта на спине d435.3 – перемещение объектов ногами d410.3 – изменение позы тела d415.3 – поддержание положения тела d420.3 – перемещение тела d450.3 – ходьба	Неврологический осмотр MRCS, MAS, FMA-LE, Тинетти тест, 10 MWT, тест ходьбы Хаузера, Тест 6-минутной ходьбы
	Домены функции: b130.2 – функции управления b755.3 – функции непроизвольных движений b730.3 – функции мышечной силы b735.2-3 – функции мышечного тонуса b760.3 – функции контроля произвольных движений b798.3 – нейромышечные, скелетные и связанные с движением функции	Неврологический осмотр MRCS, MAS, FMA-LE, тест ходьбы Хаузера, Тест «10 самостоятельных шагов» Тинетти тест, 10 MWT Тест 6-минутной ходьбы
Функциональная независимость больного	3–4 балла по ШРМ 3–4 балла по шкале Рэнкина 6 баллов и более по Индексу Ривермид	ШРМ Шкала Рэнкина Индекс Ривермид
Этап МР	2 и 3 этап медицинской реабилитации	ШРМ