

Роботизированные системы в нейрореабилитации

Л.А. Черникова

Научный центр неврологии РАМН, Москва

Среди новейших технологий в реабилитации больных, перенесших инсульт, особое место занимает робот-терапия, которая в большей степени, чем другие технологии, воплощает основные принципы современной теории двигательного обучения. В обзоре анализируется современное состояние исследований по применению робот-терапии в реабилитации больных, перенесших инсульт. Обсуждаются преимущества использования этой новой технологии, связанные с широкими возможностями моделирования параметров тренировок, непрерывным компьютерным анализом, контролем произвольного участия пациента, возможностью проведения длительных тренировок с высокой повторяемостью движений, близких к физиологическому паттерну. Рассматриваются перспективы развития роботизированных систем в нейрореабилитации.

Ключевые слова: роботизированные системы, инсульт, реабилитация.

Актуальность и предпосылки к развитию роботизированных систем

Р еабилитация больных с постинсультными двигательными нарушениями является одной из актуальнейших проблем современной медицины, что обусловлено прежде всего высокой распространенностью сосудистых заболеваний головного мозга (более 400 тыс. инсультов в год в РФ) [2] и увеличением числа больных (от 30 до 66%), переживших инсульт, но имеющих тяжелые двигательные нарушения [1].

В многочисленных экспериментальных и клинических исследованиях показано, что в активации механизмов нейропластичности ЦНС важную роль играют различные методы усиления афферентного входа, которые и составляют основу восстановительной терапии больных с двигательными нарушениями. Эти данные послужили значительным толчком к развитию современной концепции двигательного обучения, основные положения которой заключаются в использовании целенаправленного подхода, ориентированного на обучение определенной двигательной задаче, а также в обеспечении интенсификации процесса обучения путем многократного повторения [4]. Последнее положение является решающим фактором в процессе обучения; об этом свидетельствует ряд экспериментальных работ [23, 27, 36], в которых показано, что изменения плотности синапсов в первичной двигательной коре отмечаются только после 400 целенаправленных повторных движений, в то время как после 60 подобных движений эти изменения не наступают.

Наиболее ярко современная концепция двигательного обучения воплотилась в таких новых реабилитационных технологиях, как принудительно-форсированная методика кинезотерапии (Constraint-induced therapy или СИ-терапия) для паретичной руки [39, 41] и обучение ходьбе на тредбане с системой для разгрузки веса тела [40], которые появились и начали активно разрабатываться в начале 1990-х гг.

Методика СИ-терапии заключается в стимуляции движений в паретичной руке путем фиксации здоровой руки по 5

часов в день в течение 2 недель. В многочисленных работах продемонстрирована эффективность применения этой методики у больных с легким и умеренным парезом руки в позднем восстановительном и резидуальном периодах после инсульта [8, 26, 42]. Имеются единичные исследования, оценивающие эффективность этой методики в остром и раннем восстановительном периодах инсульта [13, 33]. Улучшение двигательных функций руки на фоне СИ-терапии нашло подтверждение в исследованиях с применением транскраниальной магнитной стимуляции, функциональной МРТ и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, выявивших процессы реорганизации коркового представительства руки не только в здоровом, но и в пораженном полушарии у больных с легким или умеренным парезом при применении этой терапии даже спустя 10 лет после инсульта [7, 10, 25, 37].

Эффективность применения этой технологии у больных с легким и умеренным парезом при локализации очага в правом полушарии была продемонстрирована в исследовании, выполненном в Научном центре неврологии РАМН [3]. Однако применение этой методики для больных с глубоким парезом руки не представляется возможным, к тому же она требует постоянного присутствия инструктора по лечебной гимнастике, что значительно осложняет работу отделения.

Другая технология связана с тренировкой ходьбы на беговых дорожках с системой, облегчающей вес тела. Эта технология признана самой эффективной для восстановления ходьбы у больных, перенесших инсульт. Хотя рандомизированные контролируемые исследования не выявили преимуществ разных подходов в тренировке ходьбы у больных на ранних стадиях реабилитации, экспериментальные исследования по изучению кортикального и спинального контроля моторного обучения показали, что использование тредбанов с системой разгрузки веса тела значительно лучше восстанавливает навык ходьбы, чем обычная кинезотерапия, позволяя больному обучаться моторному паттерну путем многократного повторения заданных временно-пространственных и кинематических параметров ходьбы, включая нагрузку, скорость, ритм и длину шага [6, 16, 18, 38].

Несмотря на очевидное преимущество этих технологий перед традиционными методами кинезотерапии, внедрение их в клиническую практику сопряжено с рядом проблем, одной из которых являются большие энергетические затраты со стороны кинезотерапевтов (при использовании мануального сопровождения тренировок на бегущих дорожках) и недостаток рабочего времени для обеспечения непрерывной (в течение 5 часов) тренировки при применении СИ-терапии. Кроме того, существуют и другие проблемы, сдерживающие широкое внедрение этих технологий в лечебную практику, такие как: отсутствие объективного контроля за амплитудой движений в суставах, трудность повторения нормального кинематического паттерна, отсутствие четких данных о дозе воздействий, их интенсивности и длительности.

Роботизированные устройства для тренировки движений рук

Указанные выше проблемы послужили толчком к стимуляции работ в области создания роботизированных устройств. Это направление в реабилитации начало особенно интенсивно развиваться с начала 1990-х гг. Первый робот под названием MIT-Manus для тренировки паретичной руки, обеспечивающий две степени свободы неограниченного перемещения в горизонтальной плоскости для плечевого и локтевого суставов, был предложен сотрудниками Массачусетского технологического института в середине 1990-х (рис. 1). Применение робота имитировало помощь кинезотерапевта при выполнении больным движения паретичной рукой. На экране дисплея отображалась траектория движения, которой должен был следовать больной. Для оценки эффективности применения этого робота в реабилитации больных, перенесших инсульт, было проведено исследование, в котором в общем участвовало 96 больных с давностью инсульта в среднем 2 недели [12]. В экспериментальной группе больные тренировались с помощью робота 5 раз в неделю по 1 часу в день в течение 5 недель. В среднем каждый больной за весь период тренировки получал 1500 повторений целенаправленных движений. В контрольной группе использование робота только имитировалось. В конце курса лечения в группе получавших тренировку с помощью робота наблюдалось достоверно более значительное увеличение силы в тренируемых проксимальных отделах руки. При этом значимых различий силы в дистальных отделах руки между группами не отмечалось.

В другом исследовании [14] изучалась эффективность этого робота для тренировки паретичной руки у 20 больных с давностью инсульта от 1 до 5 лет. Терапия с использованием робота проводилась три раза в неделю в течение 6 недель. Были предложены две методики тренировки: сенсомоторная (для больных с пlegией в руке) и так называемая прогрессивная терапия с сопротивлением – для



рис. 1: Первый робот для тренировки руки MIT-MANUS

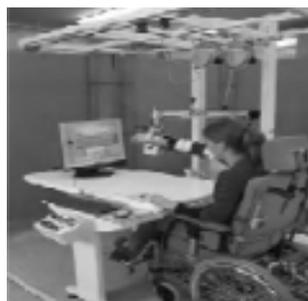


рис. 2: Первый бимануальный робот для тренировки рук MIME



рис. 3: Первый робот, в котором возможна тренировка дистальных отделов рук Bi-Manu-Track

больных, имеющих произвольную активность в паретичной руке. При использовании последней методики больные совершали движения с сопротивлением, сила которого определялась их способностями. Оказалось, что в группе, использующей прогрессивную терапию с сопротивлением, отмечалось увеличение силы не только в проксимальных, но и в дистальных отделах руки.

В 2000 г. С.G. Burgar et al. [9] из Стэнфордского университета представили первую модель бимануального робота MIME (Mirror-Image Motion Enabler), в котором паретичная рука имитировала действие здоровой руки (рис. 2). Так же, как и в предыдущей модели, роботы использовались для тренировки проксимальных отделов руки (плеча, локтя и предплечья). Использование 6 степеней свободы движения позволяло предплечью изменять положение внутри большого объема позиций и с ориентацией в трехмерном пространстве. Были предложены четыре программы тренировки. В пассивной модели больной полностью расслаблялся, так что требуемое движение по направлению к цели полностью осуществлялось с помощью робота. В активно-помогающей модели больной волевым усилием (произвольно) инициирует необходимое движение по направлению к цели, а затем движение продолжается с помощью робота. В активно-противодействующей модели робот обеспечивает вязкое противодействие в направлении необходимого движения и некоторое облегчение в перпендикулярном направлении к движению, совершаемому больным, так что больной пытается достичь цели с максимально возможным усилием. В бимануальной модели пациент пытается совершить зеркально подобные движения двумя руками, при этом робот помогает паретичной руке, постоянно подстраивая положение и ориентацию паретичного предплечья к предплечью здоровой руки. В рандомизированных контролируемых исследованиях [28, 29] было показано преимущество использования этого робота для тренировки проксимальных отделов паретичной руки и более значительное улучшение при измерении функциональных возможностей, по данным FIM, у больных с постинсультными гемипарезами и давностью инсульта более 6 месяцев. Робот-тренировки в основной группе проводились по 1 часу в день на протяжении 2 месяцев. Кроме того, при сравнительном изучении применения

унилатеральной и билатеральной моделей робота MIME показана большая эффективность бимануальной модели для восстановления движений в проксимальных отделах руки.

Одно из последних робототехнических устройств Bi-Manu-Track (рис. 3) для тренировки паретичной руки было предложено S. Hesse et al. [18]. В отличие от остальных роботов с помощью этой модели возможна тренировка дистальных отделов рук – кистей. Амплитуда, скорость и сопротивление в обеих рукоятках робота можно устанавливать индивидуально в зависимости от степени пареза в руке. Рандомизированное контролируемое исследование, выполненное создателями этого робота в 2005 г. [19], показало значительное улучшение контроля движений и повышение силы в тренируемых мышцах паретичной руки и снижение спастичности.

К настоящему времени опубликованы три обзора, посвященных оценке применения роботизированных устройств для руки у больных, перенесших инсульт. В обзоре G.V. Prange et al. [35] проанализированы 8 исследований эффективности применения роботов для восстановления функции руки у больных в подострой и хронической стадиях инсульта. Показано, что применение роботов для тренировки проксимальных отделов руки приводит к улучшению двигательного контроля, увеличивая скорость, паттерн мышечной активации и мышечную координацию в более значительной степени, чем традиционная терапия. При этом не получено убедительных данных, что робот-терапия улучшает повседневную активность по оценке шкалы FIM.

В другом обзоре [24] проанализированы 10 рандомизированных контролируемых исследований (218 больных) по применению описанных выше роботов. Авторы приходят к заключению о том, что действительно подтверждается положительная роль использования робототехнических устройств с целью увеличения движений в проксимальном отделе руки. Вместе с тем, не получено убедительных данных, что включение роботов в реабилитацию больных, перенесших инсульт, в конечном счете улучшает их ежедневную жизненную активность. Однако авторы обзора подчеркивают, что оценка функциональных способностей с помощью индекса ADL (Activities of Daily Living), которая использовалась в анализируемых работах, не отражает степени восстановления паретичной руки.

Наконец, в одном из последних обзоров [31] проанализированы результаты 11 проведенных исследований (328 больных) и показано улучшение функции и силы мышц руки при использовании робот-терапии. Однако так же, как и в предыдущих исследованиях, не получено достоверных данных об улучшении повседневной активности пациентов.

Роботизированные устройства для тренировки ног

Движения нижних конечностей во время ходьбы довольно стереотипны, по крайней мере, в сагитальной плоскости, по сравнению с движениями в руке; таким образом, они наиболее легко могут быть воспроизведены роботом.

Один из первых роботов для тренировки функции ходьбы был предложен S. Hesse et al. [17] (рис. 4). Это устройство представляет собой специальный электромеханический



рис. 4: Электромеханический тренажер ходьбы Gait Trainer-1 (GT-1)

тренажер ходьбы Gait Trainer-1 (GT-1), предназначенный прежде всего для облегчения работы кинезотерапевтов с больными во время тренировки ходьбы на тредбане. Ноги пациента фиксируются к двум пластинам, движения которых аналогичны фазам опоры и переноса физиологического шага. Длина шага и ритм подбираются индивидуально, специальные канаты присоединяются к ремню безопасности, контролирующему движения центра масс в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Функциональная электростимуляция мышц бедра во время фазы опоры помогает разгибанию колена в этой фазе. Проведенный анализ ходьбы показал, что кинематика суставов в сагитальной плоскости и паттерн мышечной активации различных мышц нижних конечностей у больных с постинсультными гемипарезами были аналогичны как на разработанном тренажере для ходьбы, так и на обычном тредбане. Однако на тренажере больные ходили более симметрично, с меньшей спастичностью, а вертикальное перемещение центра масс было более физиологично. В дальнейших работах [15] по изучению эффективности этого тренажера у 12 больных с грубыми постинсультными гемипарезами давностью более 6 месяцев, которые не могли самостоятельно ходить, было показано, что после 4 недель дополнительной тренировки по 20 мин в день отмечалось значительное улучшение способности к перемещению и повышение мышечной активности по сравнению с результатами предыдущей трёхнедельной стандартной терапии. В течение 20 мин на тренажере больные совершали от 800 до 1000 шагов, что позволило им значительно улучшить функцию ходьбы.

К настоящему времени выполнено несколько рандомизированных клинических исследований по изучению эффективности применения тренажера для ходьбы GT-1. Так, в

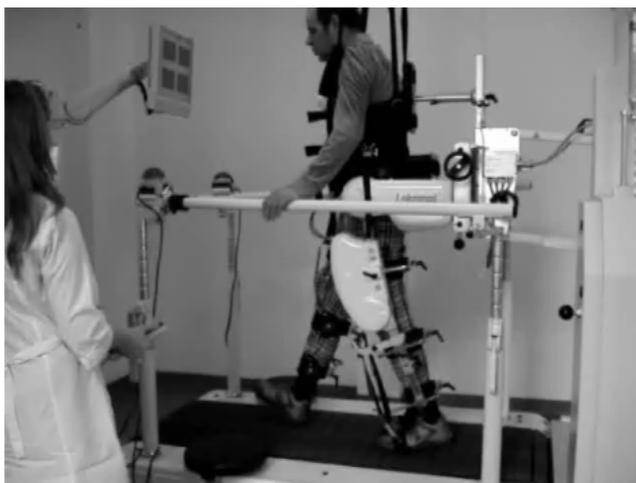


рис. 5: Роботизированная система Lokomat

работе М. Ng et al. [32], в которой участвовали 56 больных в подострой стадии инсульта, было показано, что применение механического тренажера для ходьбы, особенно в сочетании с нервной-мышечной стимуляцией, оказывается значительно более эффективным для восстановления способности ходьбы, чем традиционная терапия. При этом эффект сохраняется и через 6 месяцев наблюдения. В другом рандомизированном контролируемом исследовании [34], в котором были проанализированы результаты применения GT-1 в четырех немецких реабилитационных центрах, показано, что использование интенсивной тренировки ходьбы с помощью GT-1 в сочетании с классической физиотерапией значительно эффективнее, чем применение только традиционного лечения.

Почти одновременно с немецкими авторами в 2000 г. G. Colombo et al. [11] предложили систему для тренировки ходьбы у больных с травмой спинного мозга, названную Lokomat, состоящую из роботизированных ортезов ходьбы и системы поддержки массы тела, комбинированных с беговой дорожкой (рис. 5). Управляемые компьютером роботы-ортезы Lokomat точно синхронизированы со скоростью беговой дорожки. Они задают ногам пациента траекторию движения, которая формирует паттерн ходьбы, близкий к физиологическому, а удобная связь с компьютером позволяет терапевту без особых усилий управлять системой Lokomat и регулировать параметры тренировки согласно потребностям каждого пациента. Таким образом, больной получает возможность обучаться физиологическому паттерну ходьбы в течение длительного времени. Автоматизирование процесса позволяет уменьшить физическую нагрузку на кинезотерапевтов и проводить более длительные и эффективные занятия для пациентов. В настоящее время использование системы Lokomat рекомендовано не только больным с последствиями травм

головного и спинного мозга, но также больным с последствиями инсульта, при рассеянном склерозе, болезни Паркинсона, детском церебральном параличе.

К настоящему времени закончены три рандомизированных контролируемых исследования [20, 21, 30], в которых изучалась эффективность применения роботизированной системы Lokomat у больных с постинсультными гемипарезами. В работе А. Mayr et al. [30] изучались эффекты использования системы Lokomat у 16 больных с постинсультными гемипарезами давностью не более 1 года с различной локализацией очага поражения и разной этиологией. Основная группа (8 больных) получала тренировки на системе Lokomat в течение 3 недель, затем в течение 3 недель — обычную традиционную терапию, а затем вновь в течение 3 недель — терапию с помощью системы Lokomat. В контрольной группе (8 больных) последовательность применения традиционной терапии и системы Lokomat была иной. В течение первых 3 недель больные получали традиционную реабилитацию, затем в течение 3 недель — тренировку с помощью системы Lokomat и в заключение — опять 3 недели традиционной реабилитации. Эффекты проведенного лечения оценивались с помощью балльных шкал и по таким показателям системы Lokomat, как увеличение скорости ходьбы, степень разгрузки массы тела и степень уменьшения усилия управления. Сравнительное исследование выявило преимущество автоматизированной тренировки на системе Lokomat по отношению к традиционной реабилитации в плане клинических показателей оценки ходьбы. Авторы считают, что тренировка на системе Lokomat особенно полезна на ранних стадиях восстановления, когда имеют место проблемы с балансом, мышечной силой, нестабильностью мышечного тонуса. Однако авторы замечают, что тренировка на системе Lokomat ни в коем случае не заменяет традиционную кинезотерапию, а прежде всего облегчает обучение ходьбе больных с выраженными и грубыми парезами.

В другом исследовании [21] оценивалась эффективность терапии с помощью системы Lokomat у 30 больных с постинсультными гемипарезами с давностью инсульта от 28 до 200 дней. Помимо общепринятых клинических шкал, использовались оценка ходьбы с помощью системы Pagedmed Neubeuern (Germany), анализировался биоэлектрический импеданс мягких тканей тела, оценивался мышечный тонус по шкале Ашфорта и повседневная активность с помощью индекса Бартеля. Проведенное исследование показало, что у больных, получавших тренировки на системе Lokomat, увеличивалась длительность явного одиночной опоры на паретичную ногу, увеличивалась мышечная масса и уменьшалось процентное содержание жира в исследуемых тканях. Статистически значимых отличий по другим измерениям не было отмечено.

В то же время, в исследовании J. Hidler et al. [20], в отличие от двух предыдущих работ, не получено явного преимущества системы Lokomat для тренировки ходьбы у 63 больных с тяжелыми инсультами в раннем восстановительном периоде по сравнению с традиционной кинезотерапией. Вместе с тем, в работе, выполненной в Научном центре неврологии РАМН, показано достоверное преимущество реабилитационного комплекса, включающего тренировки на системе Lokomat, у 10 больных со среднетяжелым и тяжелым (от 11 до 22 баллов по шкале NIHSS6 средняя тяжесть 15,8+3,8) ишемическим инсультом полушарной локализации в остром и раннем восстановительном периоде по сравнению с традиционным реабилитационным лечением [5].



рис. 6: Lokomat – ортезы для взрослых и детей

Помимо системы Lokomat для взрослых пациентов фирмой Носота разработана первая в мире система Pediatric Lokomat, которая может использоваться для интенсивной тренировки ходьбы у детей с 4-х лет при различных неврологических заболеваниях, сопровождающихся нарушением походки. Важно отметить, что система Lokomat для взрослых после некоторой модернизации может также использоваться с детскими ортезами нижних конечностей (рис. 6).

Положительные и отрицательные стороны применения роботизированных систем в реабилитации больных с постинсультными двигательными нарушениями

Таким образом, несмотря на то, что анализируемые работы значительно различались между собой по длительности курса, количеству и типу тренировок, характеристикам больных, в большинстве исследований была подтверждена положительная роль использования робот-терапии для улучшения функции проксимального отдела руки (при использовании роботов для рук) и улучшения двигательного контроля – увеличения скорости ходьбы, улучшения паттерна мышечной активации и координации движений (при использовании роботов для тренировки ходьбы). Преимуществом робот-терапии являются широкие возможности моделирования параметров тренировок, непрерывный компьютерный анализ, контроль произвольного участия пациента, возможность проведения длительных тренировок с высокой повторяемостью движений близких к физиологическому паттерну. Немаловажным положительным результатом является значительное облегчение работы кинезотерапевтов с тяжелыми больными. Важным аргументом в пользу применения робот-терапии является воз-

можность для больных в некоторых случаях (это касается роботов для руки) проводить тренировки независимо от участия кинезотерапевтов и даже в домашних условиях. Это обстоятельство чрезвычайно важно, поскольку многие кинезотерапевты отмечают нехватку времени как основное препятствие для проведения интенсивной целенаправленной длительной тренировки у больных с постинсультными парезами – именно того режима, который рекомендуется в современной реабилитации больных, перенесших инсульт.

В то же время не получено данных об улучшении повседневной активности, а в некоторых исследованиях не показано преимуществ робот-терапии по сравнению с традиционной терапией. Поэтому все без исключения авторы рекомендуют продолжить исследования по изучению эффективности робот-терапии с помощью современных инструментальных систем анализа движений, чтобы отличить истинное восстановление от компенсаторных стратегий и иметь возможность дать реальную оценку эффективности этой технологии. Кроме того, до сих пор остаются малоизученными показания к применению робот-терапии в зависимости от стадии и тяжести заболевания, не разработаны методики применения роботов в зависимости от клинической картины двигательных нарушений и давности процесса. И, наконец, высокая стоимость робот-терапии является одним из главных сдерживающих обстоятельств внедрения этой технологии, в связи с чем ставится вопрос о разработке более дешевых и доступных роботов.

Заключение

Настоящий момент можно рассматривать как критическую фазу развития робот-терапии для реабилитации постинсультных больных. Среди новых технологий робот-терапия представляет наибольший интерес, потому что она в большей степени, чем другие технологии, воплощает основные принципы современной теории двигательного обучения. При этом не надо забывать, что робот-терапия – всего лишь одна из технологий, применяемая в реабилитации, и её использование, так же, как и использование любой другой технологии, должно быть хорошо аргументировано и снабжено соответствующим методическим материалом. Необходимо реально определить возможности этой технологии в зависимости от периода инсульта и его тяжести; не следует рассматривать робот-технологии как «чудо» рубежа веков, которое может полностью восстановить нарушенные функции при грубом поражении центральной нервной системы. Применять робот-терапию, как и другие технологии у больных с инсультом, следует, исходя из классических представлений о возможности восстановления нарушенных функций от размера и локализации очага поражения, начальной тяжести дефекта, состояния мышечного тонуса и чувствительности, состояния когнитивных функций и эмоционально-волевой сферы, латерализации очага поражения, возраста больного, адекватности реабилитации. Наконец, необходимы дальнейшие исследования с применением новейших методов нейровизуализации, чтобы ответить на один из самых интригующих вопросов: является ли робот-терапия технологией, которая обеспечивает только интенсивную пассивную тренировку, или же применение робот-терапии приводит к обучению больных новому двигательному навыку.

Список литературы

1. *Кадыков А.С., Черникова Л.А., Шахпаронова Н.В.* Реабилитация неврологических больных. М.: МЕДпресс-информ, 2008.
2. *Суслина З.А., Варакин Ю.Я., Верецагин Н.В.* Сосудистые заболевания головного мозга. Эпидемиология. Патогенетические механизмы. Профилактика. М.: МЕДпресс-информ., 2009.
3. *Тарасова Л.Г., Черникова Л.А., Чубуков А.С.* Применение метода форсированной тренировки паретичных конечностей как новый подход в реабилитации больных с постинсультными гемипарезами. Физиотерапия, реабилитация и бальнеология 2008; 1: 33–35.
4. *Черникова Л.А.* Пластичность мозга и современные реабилитационные технологии. Анналы клин. и эксперим. неврологии 2007; 2: 40–47.
5. *Черникова Л.А., Демидова А.Е., Домашенко М.А. и др.* Эффект применения роботизированных устройств («Эриго» и «Локомат») в ранние сроки после ишемического инсульта. Вестн. восстан. мед. 2008; 6: 6–10.
6. *Barbeau H., Visintin M.* Optimal outcomes obtained with body-weight support combined with treadmill training in stroke subjects. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003; 84: 1458–1465.
7. *Boake C., Noser E.A., Ro T. et al.* Constraint-induced movement therapy during early stroke rehabilitation. Neurorehabil. Neural. Repair 2007; 21: 14–24.
8. *Brogårdh C., Sjölund B.H.* Constraint-induced movement therapy in patients with stroke: a pilot study on effects of small group training and of extended mitt use. Clin. Rehabil. 2006; 20: 218–227.
9. *Burgar C.G., Lum P.S., Shor P.C. et al.* Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Stanford experience. J. Rehabil. Res. Dev. 2000; 37: 663–673.
10. *Chouinard P.A., Leonard G., Paus T.* Changes in effective connectivity of the primary motor cortex in stroke patients after rehabilitative therapy. Exp. Neurol. 2006; 201: 375–387.
11. *Colombo G., Hostettler P.* Der Lokomat – eine angetriebene Geh-Orthese. Med. Orth. Tech. 2000; 120: 178–181.
12. *Doeringer J.A., Hogan N.* Performance of above elbow body-powered prostheses in visually guided unconstrained motion tasks. IEEE Trans. Biomed. Eng. 1995; 42: 621–631.
13. *Dromerick A.W., Edwards D.F., Hahn M.* Does the application of constraint-induced movement therapy during acute rehabilitation reduce arm impairment after ischemic stroke? Stroke 2000; 31: 2984–2988.
14. *Fasoli S.E., Krebs H.I., Stein J. et al.* Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic stroke. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003; 84: 477–482.
15. *Hesse S.* Locomotor therapy in neurorehabilitation. NeuroRehabilitation 2001; 16: 133–139.
16. *Hesse S., Bertelt C., Schaffrin A. et al.* Restoration of gait in nonambulatory hemiparetic patients by treadmill training with partial body-weight support. Arch. Phys. Med. Rehabil. 1994; 75: 1087–1093.
17. *Hesse S., Sarkodie-Gyan T., Uhlenbrock D.* Development of an advanced mechanized gait trainer, controlling movement of the centre of mass, for restoring gait in non-ambulant subjects. Biomed. Tech. (Berl). 1999; 44: 194–201.
18. *Hesse S., Schulte-Tiggens G., Konrad M. et al.* Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003; 84: 915–920.
19. *Hesse S., Werner C., Pohl M. et al.* Computerized arm training improves the motor control of the severely affected arm after stroke: a single-blinded randomized trial in two centers. Stroke 2005; 36: 1960–1966.
20. *Hidler J.* Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the lokomat in subacute stroke. Neurorehabil. Neural Repair 2009; 23: 5–13.
21. *Husemann B., Müller F., Krewer C. et al.* Effects of locomotion training with assistance of a robot-driven gait orthosis in hemiparetic patients after stroke: a randomized controlled pilot study. Stroke 2007; 38: 349–354.
22. *Hussein S., Schmidt H., Volkmar M. et al.* Muscle coordination in healthy subjects during floor walking and stair climbing in robot assisted gait training. In: Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2008: 1961–1964.
23. *Kleim J.A., Barbay S., Cooper N.R. et al.* Motor learning-dependent synaptogenesis is localized to functionally reorganized motor cortex. Neurobiol. Learn. Mem. 2002; 77: 63–77.
24. *Kwakkel G., Kollen B.J., Krebs H.I.* Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. Neurorehabil. Neural Repair 2008; 22: 111–121.
25. *Liepert J.* Motor cortex excitability in stroke before and after constraint-induced movement therapy. Cogn. Behav. Neurol. 2006; 19: 41–47.
26. *Liepert J., Graef S., Uhde I. et al.* Training-induced changes of motor cortex representations in stroke patients. Acta Neurol. Scand. 2000; 101: 321–326.
27. *Luke L.M., Allred R.P., Jones T.A.* Unilateral ischemic sensorimotor cortical damage induces contralesional synaptogenesis and enhances skilled reaching with the ipsilateral forelimb in adult male rats. Synapse 2004; 54: 187–199.
28. *Lum P.S., Burgar C.G., Shor P.C. et al.* Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2002; 83: 952–959.
29. *Lum P.S., Burgar C.G., Van der Loos M. et al.* MIME robotic device for upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: A follow-up study. J. Rehabil. Res. Dev. 2006; 43: 631–642.
30. *Mayr A., Kofler M., Quirbach E. et al.* Prospective, blinded, randomized crossover study of gait rehabilitation in stroke patients using the Lokomat gait orthosis. Neurorehabil. Neural Repair 2007; 21: 307–314.
31. *Mehrholz J., Platz T., Kugler J. et al.* Electromechanical and robot-assisted arm training for improving arm function and activities of daily living after stroke. Cochrane Database Syst. Rev. 2008; 8: CD006876.
32. *Ng M.F., Tong R.K., Li L.S.* A pilot study of randomized clinical controlled trial of gait training in subacute stroke patients with partial body-weight support electromechanical gait trainer and functional electrical stimulation. Six-month follow-up. Stroke 2008; 39: 154–160.
33. *Platz T.* Impairment-oriented training (IOT)-scientific concept and evidence-based treatment strategies. Restor. Neurol. Neurosci. 2004; 22: 301–315.
34. *Pohl M., Werner C., Holzgraefe M. et al.* Repetitive locomotor training and physiotherapy improve walking and basic activities of daily living after stroke: a single-blind, randomized multicentre trial (DEutsche GAntrainerStudie, DEGAS). Clin. Rehabil. 2007; 21: 17–27.
35. *Prange G.B., Jannink M.J., Groothuis-Oudshoorn C.G. et al.* Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke. J. Rehabil. Res. Dev. 2006; 43: 171–184.
36. *Remple M.S., Bruneau R.M., VandenBerg P.M. et al.* Sensitivity of cortical movement representations to motor experience: evidence that skill learning but not strength training induces cortical reorganization. Behav. Brain Res. 2001; 123: 133–141.
37. *Ro T., Noser E., Boake C. et al.* Functional reorganization and recovery after constraint-induced movement therapy in subacute stroke: case reports. Neurocase 2006; 12: 50–60.
38. *Suputtitad A., Yoontan P., Rarerng-Ying T.* Effect of partial body weight support treadmill training in chronic stroke patients. J. Med. Assoc. Thai 2004; 87 (Suppl 2): S107–S111.
39. *Taub E., Miller N.E., Novack T.A. et al.* Technique to improve chronic motor deficit after stroke. Arch. Phys. Med. Rehab. 1993; 74: 347–354.

40. *Visintin M., Barbeau H., Korner-Bitensky N. et al.* A new approach to retrain gait in stroke patients through body weight support and treadmill stimulation. *Stroke* 1998; 29: 1122–1128.

41. *Wolf S.L., Lecraw D.E., Barton L.A. et al.* Forced use of hemiplegic upper extremities to reverse the effect of learned nonuse among

chronic stroke and head-injured patients. *Exp. Neurol.* 1989; 104: 125–132.

42. *Wolf S.L., Winstein C.J., Miller J.P. et al.* Effect of constraint-induced movement therapy on upper extremity function 3 to 9 months after stroke: the EXCITE randomized clinical trial. *JAMA* 2006; 296: 2095–2104.

The robotic systems in neurorehabilitation

L.A. Chernikova

Research Center of Neurology, Russian Academy of Medical Sciences, Moscow

Key words: the robotic systems, stroke, rehabilitation.

Among the newest technologies in rehabilitation of post-stroke patients a special place belongs to the robot-therapy, which, compared with other technologies, to a greater degree embodies main principles of the modern theory of motor learning. In the review, the up-to-date condition of research on application of the robot-therapy in rehabilitation of post-stroke patients is analyzed. Discussed are advantages of the use of this new technolo-

gy related to wide opportunities of modeling of training parameters, continuous computer analysis and control of patient's voluntary participation, as well as to opportunity of carrying out long trainings with high repeatability of movements close to a physiological pattern. The prospects of development of the robotic systems in neurorehabilitation are considered.

Контактный адрес: Черникова Людмила Александровна – д.м.н., профессор, зав. отделением нейрореабилитации и физиотерапии НЦН РАМН. Москва 125367, Волоколамское шоссе, д. 80. Тел.: (495) 490 25 02; e-mail: luda_cher44@mail.ru