

Виртуальная реальность как метод восстановления двигательной функции руки

А.Е. Хижникова, А.С. Клочков, А.М. Котов-Смоленский, Н.А. Супонева, Л.А. Черникова

ФГБНУ «Научный центр неврологии» (Москва)

Последствия перенесенных нарушений мозгового кровообращения серьезно снижают качество жизни пациентов. Одной из наиболее приоритетных задач восстановления бытовой и социальной активности пациентов является восстановление базовых моторных навыков, таких как: способность достигнуть объект, манипулировать им, координировать движения двух рук. Для успешного восстановления движений необходимо проведение тренировок в среде, максимально приближенной к реальной, активное участие пациента, а также наличие интерактивной обратной связи, позволяющей пациенту контролировать правильность выполнения двигательной задачи и корректировать собственные усилия. С развитием компьютерных технологий появилась возможность усовершенствовать классические подходы в реабилитации пациентов, перенесших инсульт. Для соблюдения данных условий и успешного целенаправленного обучения конкретной двигательной задаче активно применяются технологии виртуальной реальности (VR). Технической основой VR послужили компьютерное моделирование и компьютерная имитация, а также трехмерная визуализация, позволяющая реалистично отображать движение на экране. Данные технологии позволяют воссоздать необходимое рабочее пространство для тренировки моторного навыка, обеспечить интерактивную обратную связь и высокую интенсивность реабилитации. В статье приведена информация о развитии подобных технологий в области двигательной реабилитации функций верхней конечности, сравнительный анализ применяемых и разрабатываемых в настоящий момент систем и перспективы развития VR в нейрореабилитации.

Ключевые слова: инсульт, реабилитация, виртуальная реальность, двигательная реабилитация, моторика руки, ричинг.

Введение

Среди всех неврологических заболеваний инсульт занимает ведущее место по инвалидизации взрослого населения во всем мире. Последствия перенесенных нарушений мозгового кровообращения серьезно снижают качество жизни пациентов. Согласно prognostическим данным ВОЗ, количество инсультов в Европе увеличится с 1 100 000 в год (2000 г.) до более чем 1 500 000 в год к 2025 г. [43]. По данным Регистра инсульта НИИ неврологии РАМН, к концу острого периода инсульта гемипарезы наблюдались у 81,2% выживших пациентов, в т.ч. гемиплегия (полное отсутствие движений в руке, ноге) – у 11,2%, грубый и выраженный гемипарез – у 11,1%, легкий и умеренный гемипарез – у 58,9% пациентов. Успешное восстановление моторной функции руки происходит лишь в 20% случаев [13, 41]. Кисть и верхняя конечность человека являются наиболее развитым и эффективным инструментом-органом, представляя собой сложную кинематическую цепь, состоящую из суставов плечевого пояса, локтевого и лучезапястного суставов, а также суставов кисти. У пациентов с постинсультными двигательными нарушениями в первую очередь нарушаются базовые моторные функции руки, такие как: способность достигнуть объект, манипулировать им, а также координировать движения двух рук. К основным причинам подобных нарушений можно отнести мышечную слабость, повышение мышечного тонуса и, как следствие, изменения межсуставной координации движений, последовательности активации различных групп мышц [15, 16, 21]. Также большие со спастическими парезами в кисти испытывают трудности при дозировании мышечного усилия, например, при сгибании пальцев, а также разгибании пальцев после того, как предмет был схвачен и удерживался в руке некоторое время [5, 40].

Согласно Л.Г. Ткачевой и Г.Р. Столяровой [3], а также J.H. Carr и R.V. Shepherd [19], основной задачей реабилитации больного является восстановление его двигательных функций, более сходные с теми, которые он имел до момента возникновения у него неврологических нарушений. Для успешного восстановления движений необходимо проведение тренировок в среде, максимально приближенной к реальной, активное участие пациента, а также наличие интерактивной обратной связи, позволяющей пациенту контролировать правильность выполнения двигательной задачи и корректировать собственные усилия. Зачастую степень выраженности двигательных нарушений и ограниченные возможности воссоздания мультифункциональной среды значительно ограничивают возможности двигательной реабилитации.

С развитием компьютерных технологий появилась возможность усовершенствовать классические подходы в реабилитации пациентов, перенесших инсульт. Широкое распространение получили такие виды реабилитационных направлений, как роботизированная и механотерапия [1, 4, 7, 9]. Параллельно с этими методами стала развиваться технология, получившая впоследствии название виртуальная реальность (VR) [6, 8]. Впервые термин «виртуальная реальность» был введен J. Lanier в 1989 г. [34]. Технической основой VR послужили компьютерное моделирование и компьютерная имитация, а также ускоренная трехмерная визуализация, позволяющая реалистично отображать движение на экране.

Несомненными достоинствами этой технологии являются возможность достижения большей интенсивности тренировок на фоне усиления обратной сенсорной связи и создание индивидуального виртуального пространства для

каждого больного в соответствии с его двигательными возможностями. Для реализации ВР используются различные компьютерные платформы, игровые консоли, 3D очки и шлемы. Все это позволяет применять ВР не только в стационарных условиях, но и проводить тренировки с применением ВР в домашних условиях. Являясь, прежде всего, обратной сенсорной связью, ВР представляет собой мощный инструмент для повышения мотивации больного как в качестве самостоятельной методики, так и будучи интегрированным в современные реабилитационные технологии.

История появления виртуальной реальности

Первый прототип виртуальной реальности был разработан М. Heilig в 1962 г. и получил название «Сенсорам». Данная система погружала зрителя в виртуальную реальность при помощи короткометражных фильмов, сопровождавшихся обонятельными, осязательными и звуковыми эффектами.

В 1967 г. I. Sutherland и его студентом В. Spoul было сконструировано устройство, считающееся прототипом ВР, — шлем виртуальной реальности. Изображение на шлем генерировалось при помощи компьютера. Эта система была примитивной с точки зрения пользовательского интерфейса, а низкий уровень реалистичности препятствовал глубокому вовлечению пользователя в виртуальное пространство; тем не менее, устройство позволяло изменять изображение соответственно движениям головы, что обеспечивало зрительную обратную связь. Шлем был настолько тяжел, что для использования приходилось подвешивать его к потолку. Грозный вид устройства послужил основой для названия «Дамоклов меч».

В 1970-х гг. компьютерная графика полностью заменила видеосъемку, до того использовавшуюся в симуляторах. Первой такой системой стала Aspen Movie Map, созданная в Массачусетском технологическом институте в 1977 г. [37]. В ней использовалось примитивное виртуальное моделирование города Аспен, штат Колорадо (известного горнолыжного курорта). Эта программа симулировала прогулку по улице города в одном из трех режимов, основанных на реальных фотографиях, а также трехмерной модели города.

Первым широко признанным устройством для управления рукой в виртуальном пространстве стала перчатка Digital Data Entry Glove (рис. 1), разработанная Г. Граймсом в 1981 г. [26]. Она была предназначена для создания буквенно-цифровых символов в компьютерном пространстве и предложена в качестве альтернативы клавиатуре. Впоследствии перчатку использовал Д. Ланьер как метод манипулирования предметами в виртуальном пространстве, созданном при помощи виртуального шлема.

Позднее, в 1990-х гг., идею использования виртуальной реальности подхватили разработчики видеоигр. В 1991 г. компанией Sega разработаны гарнитуры Sega VR для аркадных игр, состоящие из изображения на LCD-экране, стереонаушников и инерционных датчиков, которые позволяли системе отслеживать и реагировать на движения головы пользователя. В 1995 г. компанией Nintendo была выпущена 32-битная игровая система Virtual Boy, которая использовала для вывода трехмерной графики несколько оттенков красного цвета. Однако все эти системы были дорогостоящими и неудобными в использовании, поэтому разработчикам пришлось отказаться от выпуска этих устройств.



рис. 1: Перчатка Digital Data Entry Glove.

(<http://www.cs.ru.ac.za/research/g0712273/images/project/2.1.grimesddeglove600x300.png>)

Следующим витком развития ВР стала виртуальная комната. Впервые концепция такой комнаты была предложена в 1992 г. в университете Чикаго и получила название «CAVE» (Cave Automatic Virtual Environment) [22]. Иллюзия погружения создавалась путем проецирования 3D компьютерной графики в кубе, состоящем из экранов, полностью окружающих объект.

Технологии ВР продолжают активно развиваться в настоящее время и широко используются в различных областях науки, техники, медицины, в обучении и повседневной жизни. В последние годы ВР активно используется в индустрии развлечений, а также в качестве способа для обучения профессиям, где эксплуатация реальных устройств и механизмов связана с повышенным риском либо связана с большими затратами (пилот самолёта, машинист поезда, диспетчер, водитель и т.п.).

Несмотря на долгий путь развития, идея использования виртуальной реальности как метода реабилитации пациентов возникла только в 90-х годах XX века. Впервые идея использовать терапию посредством ВР была предложена психиатром R. Lemson в 1993 г. для терапии пациентов с различными фобиями и тревожными расстройствами [35]. В 1997 г. в США был разработан симулятор для адаптации и лечения посттравматического стрессового расстройства у солдат, вернувшихся с войны. В дальнейшем подобная установка стала применяться в лечении других психических расстройств, таких как депрессии, бессонница, фобии [32].

Стоит упомянуть, что одним из основных направлений в медицине, применяющих ВР, является реабилитация. В последнее десятилетие ВР активно используется в качестве самостоятельной методики, так и интегрированной в другие реабилитационные системы технологий. Особый интерес вызывает применение ВР совместно с технологией мозг-компьютер интерфейса. В основе разработок лежит управление виртуальными объектами, используя в качестве контроллера воображение движения руки [2]. Подобная концепция открывает новые возможности не только для погружения в виртуальную среду, но также для реабилитации пациентов с грубым парезом или пlegией. Наиболее широкое распространение данная методика получила именно в реабилитации пациентов с двигательными нарушениями руки вследствие неврологического дефицита (рис. 2).

То, что движения руки в физической и виртуальной средах идентичны, было показано еще в 2004 г. А. Viau и А. Feldman [44]. В данном исследовании кинематика движений при достижении, захвате мяча, переносе и отпускании его изучалась как в реальной, так и в виртуальной среде.

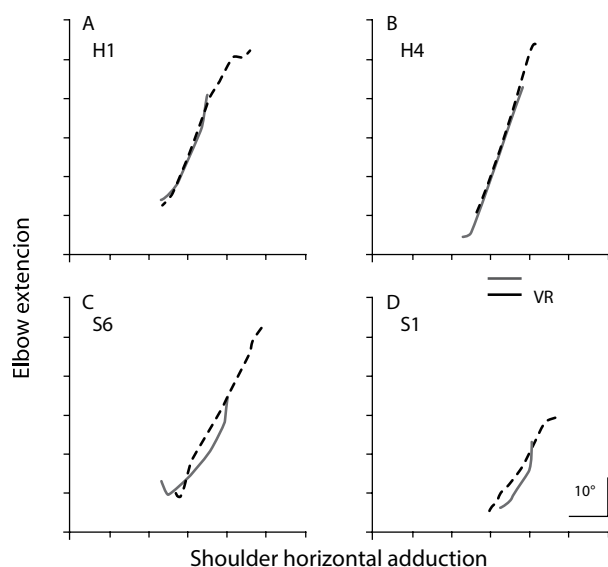


рис. 2: Траектория движения в виртуальной (пунктирная линия) и физической (черная линия) средах. (Viau A. et al. Reaching in reality and virtual reality. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2004)

Было показано, что, несмотря на некоторые различия в движениях, обусловленных, вероятнее всего, использованием двухмерной реальности и отсутствием тактильной обратной связи в виртуальной среде, стратегия движения в обеих средах идентична. Таким образом, для обучения пациента с двигательным дефицитом наиболее целесообразно применение трехмерной виртуальной среды, обеспечивающей глубину при достижении определенного объекта, а также наличие тактильной обратной связи, которая дает наиболее приближенный к реальным условиям захват в виртуальной среде. В своем исследовании G. Lewis и соавт. [36] показали, что проведение функциональных тренировок с использованием виртуальной среды способствует повышению мотивации пациентов и, как следствие, увеличению количества повторений движений.

Классификация виртуальной реальности

Существующие к настоящему времени системы ВР можно разделить на два крупных класса [30]:

Первый класс – настольная ВР:

- погружение в ВР – через «окно» (экран компьютера);
- взаимодействие с ВР – управление частью тела или объектом через контроллер (мышь, джойстик, гироскоп, перчатка);
- вид ВР – от первого или от третьего лица.

Второй класс – иммерсионная ВР:

- погружение в ВР – полное интерактивное погружение (шлем ВР);
- взаимодействие с ВР – с помощью перчатки или костюма, иногда с тактильной обратной связью;
- вид ВР – только от первого лица.

Выделение остальных видов и типов виртуальных миров может меняться в зависимости от области применения технологии ВР.

Для систем ВР, созданных на базе игровых платформ, наиболее актуальна классификация 2011 г. [25], согласно которой виртуальные системы для реабилитации подразделяются:

1. По фокусировке на движениях:
 - A. Системы с фокусировкой на движениях верхних конечностей.
 - B. Системы с фокусировкой на движениях нижних конечностей.
 - C. Системы с фокусировкой на движениях всего тела.
2. По наличию упражнений для тренировки когнитивных функций:
 - A. Системы с когнитивными тренировками.
 - B. Системы без когнитивных тренировок.
3. По отслеживанию качества (точности) выполняемого движения:
 - A. Системы, способные отслеживать качество (точность) движения.
 - B. Системы, не способные отслеживать качество (точность) движения.
4. По возможности тренировать опорную функцию позвоночника:
 - A. Системы с возможностью проведения тренировок сидя.
 - B. Системы с возможностью проведения тренировок стоя.

Использование виртуальной реальности при восстановлении функции руки

Несмотря на растущее количество систем виртуальной реальности, в настоящее время отсутствуют общие подходы к разработке функциональных упражнений для восстановления моторики руки. Из множества комплексных движений руки наиболее частыми являются достижение удаленно расположенного объекта и его захват. Данные движения не являются строго стереотипными и меняются в зависимости от окружающей обстановки. Тем не менее в подавляющем большинстве законченных на настоящий момент исследований в качестве тренировочной парадигмы применялись вариации движения, направленного на достижение удаленно расположенного объекта и/или его захват.

В качестве инструментального компонента для создания виртуального пространства применяются как специализированные комплексы, так и игровые консоли или их элементы. В качестве программного обеспечения могут использоваться как специально созданные программы функционального тренинга с элементами игровой среды, так и не ориентированные на реабилитацию игры, в которых требуется активное движение руки для управления игровым процессом.

Для точного распознавания и регистрации движений часто применяются контактные методы взаимодействия с виртуальным пространством, такие как сенсорные перчатки, костюмы, джойстики, экзоскелеты и пр.

В 2001 г. D. Jask и R. Voian одними из первых использовали систему виртуальной реальности для реабилитации функции руки. В исследовании была использована сенсорная перчатка (CyberGlove), подключенная к персональному компьютеру [29]. На фоне интенсивных реабилитационных мероприятий дополнительные занятия с использова-

нием ВР способствовали увеличению скорости и объема движений в большом пальце, а также силы сжатия в паретичной руке при шаровидном захвате.

Данный вид захвата наиболее часто применяется как в клинической и биомеханической оценке функций кисти, так и в качестве функционального упражнения в реабилитации. Шаровидный захват является наиболее распространенным в быту и повседневной активности и обеспечивается равномерным сгибанием всех пальцев кисти в межфаланговых и пястно-фаланговых суставах и расположением их вокруг шаровидного тела. В связи с этим парадигма шаровидного захвата наиболее часто применяется в качестве тренировочной модели в условиях ВР.

В 2009 г. S. Adamovich и соавт. использовали дополнительно подключенные к сенсорной перчатке приводы, обеспечивающие сопротивление активным движениям, тем самым создав ощущение реального объекта [10]. Было показано, что постоянно оказываемое пневматическое сопротивление позволяет поддерживать определенный уровень силы сжатия пальцев, согласованный с моделью упражнения, заданной в системе. Тем самым данная система позволяет тренировать как изолированные движения в пальцах, так и различные виды захватов при правильно заданных параметрах, что может эффективно использоваться в реабилитации дистальных отделов руки.

Оценивая возможность тренировки одновременно захвата и способности дотянуться до объекта, A. Merians и соавт. в 2011 г. предложили совместить технологии сенсорной перчатки и ассистирующей роботизированной технологии Haptic Master robot (Moog FCS Corporation), позволяющие одновременно тренировать как дистальные, так и проксимальные отделы руки [38]. В проведенном исследовании у пациентов, перенесших инсульт, для тренировки дистальных отделов использовался симулятор игры на фортепиано, а для проксимальных – достижение объекта (поймать птицу). Анализ полученных данных показал, что на фоне проводимых тренировок улучшается точность, скорость и координация движений, а также увеличивается объем активных движений в пястно-фаланговых и лучезапястном суставах. Результаты данного исследования послужили обоснованием применения сопряженной методики, позволяющей включать в работу все отделы руки для обеспечения целенаправленного комплексного движения.

В 2010 г. проводилось исследование эффективности тренировок достижения объекта и шаровидного захвата на бесконтактной системе ВР Rehabilitation Gaming System (RGS) у пациентов, перенесших инсульт [18]. Данная система оснащена видеокамерой, фиксирующей положение цветных маркеров, расположенных на кисти и предплечье. В виртуальной среде отражалось положение обеих рук и выполнялись определенные задания (дотянуться до летящего меча и захватить его). Тренировка проводилась как для здоровой, так и для паретичной руки с автоматической настройкой уровня сложности тренировки. Полученные данные выявили значительное увеличение показателей времени реакции и силы сжатия кисти, однако не наблюдалось статистически значимых улучшений в показателях скорости движения в паретичной руке. В продолжение исследования анализировались данные эффективности тренировок на системе RGS с тактильной обратной связью, а также совместно с бимануальным тренингом на системе с разгрузкой веса руки Arneo Spring [17]. Анализ получен-

ных данных показал, что во всех группах наблюдались статистически значимые улучшения показателей, оцениваемых клиническими шкалами Barthel Index, Motricity Index, CAHAI, а также раздела шкалы Fugl-Meyer Assessment Scale для руки и кисти. В то же время достоверных данных, свидетельствующих об уменьшении степени спастичности, получено не было. Было показано, что улучшения, достигнутые на занятиях на каждой из систем, сохранялись даже спустя 3 месяца после курса реабилитации. Самые высокие показатели улучшения двигательной функции руки были достигнуты в группе, получавшей ВР с тактильной обратной связью, что говорит о ее большой значимости в восстановлении движений.

В 2014 г. M. Agostini и соавт. предложили использовать в качестве тактильной обратной связи реальный объект. К примеру, если заданием в виртуальной реальности было взять мяч и опустить его в корзину, то в руки пациенту давался реальный мяч [31]. Помимо этого, инструктор создавал последовательность двигательных задач, которая отображалась на экране, и траекторию движения, которую пациенту необходимо было повторить, например, взять бутылку и перелить из нее воду в стакан в виртуальной среде. Траектория движения пациента отображалась на экране после каждого завершеного упражнения, и пациент мог корректировать ее в последующем. Анализ полученных данных показал, что использование подобной системы в дополнение к стандартной реабилитационной программе в большей степени способствует улучшению моторики в руке, чем использование только традиционной реабилитации.

Возможность обеспечить в виртуальной среде многокомпонентную обратную связь во время выполнения сложной функциональной задачи значительно расширяет возможности двигательной реабилитации, позволяя задействовать механизмы переобучения двигательного контроля.

Эволюция технологий сделала системы ВР более доступными, что привело к их активной интеграции в игровой индустрии. Компании Sony, Nintendo и Microsoft внедрили ряд игровых консолей с технологией ВР, для реализации которой применялись инфракрасные сенсоры, видеокамера или контроллеры со встроенными датчиками акселерометрами.

В начале 2000-х гг. подобные системы стали активно использовать для реабилитации неврологических пациентов. В 2010 г. впервые в России на базе ФГБНУ НЦН был изучен эффект двигательного обучения в условиях технологии виртуальной реальности [8]. С этой целью использовали аппаратуру Sony PlayStation II с видеовводом изображения через цветную цифровую видеокамеру и анимационную компьютерную программу EyeToy Play-3 для реабилитации 47 пациентов с постинсультным парезом руки в возрасте от 21 до 76 лет, со средней давностью заболевания около 8 месяцев. Тренировка проводилась по 20–30 мин 5 раз в неделю, курс состоял из 10 процедур. Эффект обучения оценивался клинически (по шкале Motor Assessment Scale, MAS) и биомеханически с помощью электромагнитной трекинг-системы Mini Birds ("Ascension Technology Corporation", США). Показано, что использование технологии ВР особенно эффективно у больных с локализацией очага в правом полушарии, оно способствует уменьшению степени пареза не только в проксимальных отделах руки, на тренировку которых в основном направлены игровые задания, но также и в кисти, что можно объяснить с по-

зиции нейропластичности мозга. Кроме того, повышается точность попадания в цель, уменьшается кривизна траектории движения и снижается время, затраченное на выполнение двигательного задания в целом.

Внедрение экономически доступных систем виртуальной реальности в рутинную реабилитационную практику побудило многих исследователей задаться вопросом сравнения эффективности как методик погружения в ВР, так и программного обеспечения, специализированных систем ВР и игровых консолей с элементами ВР.

В 2010 г. G. Saposnik и соавт. было проведено сравнительное исследование эффективности функциональных упражнений и игр в виртуальном пространстве, созданном на базе игровой консоли Nintendo Wii для тренировки движений в руке у пациентов, перенесших инсульт [42]. В основной группе в дополнение к стандартной реабилитационной программе применялась тренировка на игровой платформе Nintendo Wii, при помощи которой тренировались сгибание и разгибание плеча (игра боулинг), ротация плеча, супинация и пронация кисти (теннис). В группе сравнения дополнительным методом послужила развлекательная программа в виде настольных игр. По сравнению с пациентами в развлекательной группе у участников, получивших Nintendo Wii, отмечалось значительное улучшение времени реакции – в среднем на 7 сек (Wolf Motor Function Test).

При изучении механизма действия ВР на восстановление двигательной функции в руке применяется метод функциональной МРТ (фМРТ). Если посмотреть на результаты фМРТ пациента до занятия на системе ВР и после, то очевидна разница в локализации зон активации коры. В проведенном в 2013 г. исследовании [12] было показано, что после тренировок на системе виртуальной реальности, созданной при помощи сенсора Kinect, отмечается активация противоположной сенсомоторной коры у пациентов с гемипарезом в отличие от здоровых испытуемых. Парадигма, используемая при фМРТ, представляла собой сжатие пальцев. В результате был сделан вывод, что у пациента, перенесшего инсульт, происходит реорганизация коры головного мозга, за счет чего и происходит восстановление движений в пораженной конечности.

В 2014 г. группа австралийских исследователей [39] провела анализ эффективности использования коммерческих видеоигр для реабилитации функции верхних конечностей у больных, перенесших инсульт. Авторами были проанализированы 13 исследований, 3 из которых были рандомизированными. В качестве игровых систем использовались: Nintendo Wii (10), EyeToy PlayStation (2), CyWee Z (1). Лучшие показатели восстановления функции верхних конечностей (объем движения, мелкой моторики, силы сжатия и ловкость в кисти) показали в группах с применением ВР на базе Nintendo Wii, в основе управления которой лежит использование джойстика со встроенным акселерометром. В результате работы авторы пришли к выводу, что данный метод улучшает функцию верхней конечности у пациентов, перенесших инсульт, однако имеет определенные ограничения в применении, связанные с методом управления виртуальной средой.

В 2010 г. компанией Leap Motion inc. было представлено устройство для захвата движений пальцев «Leap Motion», работающее на основе инфракрасного сенсора и позволяющее взаимодействовать с компьютерной программой или

виртуальной средой. В 2015 г. M. Iosa и соавт. [28] опубликовали данные пилотного исследования эффективности применения данного устройства для восстановления мелкой моторики руки у постинсультных пациентов. Согласно представленным материалам, у пациентов отмечалось значительное увеличение силы сжатия кисти, а также уровня двигательных навыков после курса игровой терапии с сенсором «Leap Motion».

В настоящее время на основе игровых технологий создания ВР разрабатываются и активно внедряются в практику реабилитационные комплексы, предназначенные для двигательной реабилитации в условиях виртуальной среды. В основе таких систем используется инфракрасный сенсор Microsoft Kinect, захватывающий движения тела пациента и транслирующий их в виртуальную среду. Данные системы, как правило, являются настольными и в качестве способа погружения в ВР используют широкоформатные экраны или телевизоры с большой диагональю. Во время тренировки пациент может управлять трехмерным аватаром или же видеть виртуальный мир от первого лица. В качестве программ тренировок используются игры, в которых управление аватаром или объектом обеспечивается за счет движений руки или рук, шагов на месте или приставных шагов, а также наклонов и поворотов корпуса. В частности, система NeuroAtHome позволяет пациенту с помощью сенсора Kinect управлять трехмерным аватаром, выполняющим упражнения для тренировки движений типа достижения рукой удаленно расположенного объекта, шагов вперед, назад, в стороны, наклонов корпуса и головы вперед/назад и в стороны [20, 24] (рис. 3).

Виртуальный мир может представлять собой комнату, имитирующую зал для лечебной гимнастики, улицу, горнолыжный склон, а также различные игровые сценарии. Другой подобной системой является комплекс VirtualRehab (Virtualware). Он также использует сенсор Microsoft Kinect, а в качестве тренировочной парадигмы используются функциональные упражнения для рук (в т.ч. бимануальные) и для ног (рис. 4).

В качестве виртуального мира используется гимнастический зал, в котором проецируется полупрозрачный аватар, создавая иллюзию присутствия от первого лица. Также есть возможность тренировки изолированных движений под контролем виртуальной обратной связи.

Регистрация движений посредством инфракрасных сенсоров уже зарекомендовала себя не только как контроллер ВР,



рис. 3. Виртуальное пространство системы NeuroAtHome.
(<http://www.neuroathome.net>)

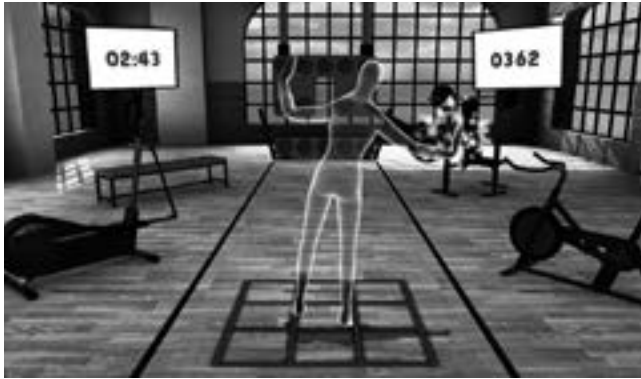


рис. 4: Виртуальный гимнастический зал системы VirtualRehab. (<http://ww1.prweb.com/prfiles/2014/09/24/12196044/VRehabGame01.png>)

но также как один из методов инструментальной оценки [11, 14]. В существующих реабилитационных комплексах ВР присутствует встроенная система статистических отчетов, предоставляющая как пациенту, так и врачу объективную информацию о прогрессе тренировок и двигательного восстановления. Многие авторы сходятся во мнении, что занятия с использованием виртуальной среды и интерактивные видеоигры способствуют улучшению двигательной функции руки и степени повседневной бытовой активности как при использовании совместно с традиционными методами реабилитации, так и в качестве альтернативы традиционному подходу.

Заключение

Повышение экономической доступности специализированных систем ВР, а также стремительное развитие технологий безмаркерного захвата движений и игровой индустрии, привели к значительному расширению спектра реабилитационных систем, использующих виртуальную среду. К неоспоримым преимуществам подобных технологий можно отнести возможность интенсификации реабилитационного процесса в условиях реабилитационного

стационара, а также пролонгации курса восстановления на дому [22, 26]. Помимо этого, технология создания виртуальной среды открывает уникальную возможность моделировать различные условия для тренировки бытовых навыков, проведения функциональных и комплексных тренировок, что особенно важно для реабилитации функции верхней конечности. Сложности реформирования двигательного навыка руки связаны с обилием равнозначных стереотипных движений, направленных на выполнения большого количества повседневных нужд. Для успешной тренировки подобных навыков традиционными методами требуется большое количество вспомогательных материалов и гимнастического оборудования. Помимо расширения рабочего пространства двигательной реабилитации, ВР позволяет пациентам во время тренировки отслеживать правильность и точность выполнения движений. Такой подход позволяет активировать процессы нейропластичности и реорганизации двигательного паттерна посредством биомеханической и зрительной обратной связи, проецируемой в виртуальное пространство. Именно это необходимое условие предъявляет максимальные требования как к программному обеспечению для реабилитации, так и к самому процессу двигательного восстановления движений в условиях ВР. Основываясь на метаанализе завершённых на настоящий момент исследований, можно выделить несколько ключевых условий эффективной реабилитации с применением ВР [35]. Так, например, было показано, что использование ВР, как в сочетании с традиционной терапией, так и в качестве альтернативной методики, приводит к более значительному восстановлению. Однако для достижения терапевтического эффекта необходимо не менее 15 часов тренировок. Исследования не выявили достоверного эффекта тренировок в ВР на увеличение силы сжатия кисти (уменьшение пареза), тем не менее, было показано увеличение степени бытовой активности в целом, что говорит о воздействии ВР на формирование комплексных повседневных двигательных навыков. Данное утверждение подтверждается также и тем, что наибольшей эффективностью и достоверностью обладают специализированные системы, созданные для восстановления функциональных движений, а не адаптированные под реабилитационные нужды игровые консоли.

Список литературы

1. Ключков А.С., Черникова Л.А. Роботизированные и механотерапевтические устройства для восстановления функции руки после инсульта. Русск. мед. журн. 2014; 22 (22): 1589–1592.
2. Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А. и др. Интерфейс мозг–компьютер: первый опыт клинического применения в России. Физиология человека. 2016; 42 (1): 31.
3. Столярова Г.Р., Ткачева Л.Г. Реабилитация больных с постинсультными двигательными расстройствами. М.: Медицина, 1978: 57.
4. Сулина З.А., Иллариошкин С.Н., Пирадов М.А. Неврология и нейронауки – прогноз развития. Анн. клинич. и эксперим. неврол. 2007; 1 (1): 5–9.
5. Умарова Р.М., Черникова Л.А., Танащян М.М. и др. Нервно-мышечная электростимуляция в острейший период ишемического инсульта. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2005; 4: 6–8.
6. Устинова К.И., Черникова Л.А. Виртуальная реальность в нейро-реабилитации Анн. клинич. и эксперим. неврол. 2008; 2 (4): 34–39.
7. Черникова Л.А. Роботизированные системы в нейрореабилитации. Анн. клинич. и эксперим. неврол. 2009; 3 (3): 30–36.
8. Черникова Л.А., Иоффе М.Е., Прокопенко Р.А. и др. Применение технологии виртуальной реальности при восстановлении движений в паретичной руке у больных, перенесших инсульт. Физиотерапия Бальнеология Реабилитация. 2011; (3) 3–7.
9. Черникова Л.А., Пирадов М.А., Супонева Н.А. и др. Высокотехнологичные методы нейрореабилитации при заболеваниях нервной системы В кн.: Неврология XXI века: диагностические, лечебные и исследовательские технологии Руководство для врачей. Под ред. М.А. Пирадова, С.Н. Иллариошкина, М.М. Танащян. М., 2015: 274–331.
10. Adamovich S.V., Fluet G.G., Mathai A. et al. Design of a complex virtual reality simulation to train finger motion for persons with hemiparesis: a proof of concept study. J Neuroeng Rehabil. 2009; 17 (6): 28. PMID: 19615045 DOI: 10.1186/1743-0003-6-28
11. Adams R.J., Lichter M.D., Krepkovich E.T. et al. Assessing upper extremity motor function in practice of virtual activities of daily living. Trans Neural Syst Rehabil Eng. 2015; 23 (2): 287–296. PMID: 25265612 DOI: 10.1109/TNSRE.2014.2360149
12. Bao X., Mao Y., Lin Q. et al. Mechanism of Kinect-based virtual

reality training for motor functional recovery of upper limbs after subacute stroke. *Neural Regen Res.* 2013; 8 (31): 2904–2913. PMID: 25206611 DOI: 10.3969/j.issn.1673-5374.2013.31.003

13. *Beebe J.A., Lang C.E.* Active range of motion predicts upper extremity function 3 months after stroke. *Stroke.* 2009; 40 (5): 1772–1779. PMID: 19265051 DOI: 10.1161/STROKEAHA.108.536763

14. *Bonnechère B., Jansen B., Salvia P. et al.* Validity and reliability of the Kinect within functional assessment activities: comparison with standard stereophotogrammetry. *Gait Posture.* 2014; 39 (1): 593–598. PMID: 24269523 DOI: 10.1016/j.gaitpost.2013.09.018

15. *Bourbonnais D., Vanden Noven S., Carey K.M., Rymer W.Z.* Abnormal spatial patterns of elbow muscle activation in hemiparetic human subjects. *Brain.* 1989; 112 (1): 85–102. PMID: 2917281

16. *Bourbonnais D., Vanden Noven S., Pelletier R.* Incoordination in patients with hemiparesis. *Can J Public Health.* 1992; 83 (2): 58–63. PMID: 1468052

17. *Cameirão M.S., Badia S.B., Duarte E et al.* The combined impact of virtual reality neurorehabilitation and its interfaces on upper extremity functional recovery in patients with chronic stroke. *Stroke.* 2012; 43 (10): 2720–2728. PMID: 22871683 DOI: 10.1161/STROKEAHA.112.653196

18. *Cameirão M.S., Badia S.B., Oller E.D. et al.* Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System: methodology, design, psychometrics, usability and validation. *J Neuroeng Rehabil.* 2010; 22; 7: 48. PMID: 20860808 DOI: 10.1186/1743-0003-7-48

19. *Carr J.H., Shepherd R.B.* Motor Relearning Programme for Stroke. Rockville: Aspen Publishers, 1983; 172.

20. *Chirivella P., del Barco M. et al.* NeuroAtHome: A software platform of clinical videogames specifically designed for the cognitive rehabilitation of stroke patients. *Brain Injury.* 2014; 28 (5–6): 517–878.

21. *Cirstea M.C., Levin M.F.* Compensatory strategies for reaching in stroke. *Brain.* 2000; 123 (5): 940–953. PMID: 10775539

22. *Cruz-Neira C., Sandin D., DeFanti T. et al.* The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment. *Communications of the ACM.* 1992; 35 (6): 64–72. Doi:10.1145/129888.129892

23. *Dhurjaty S.* The economics of telerehabilitation. *Telemed J E Health.* 2004; 10 (2): 196–199. PMID: 15319049 DOI: 10.1089/tmj.2004.10.196

24. *Gagliardo P., Ferreiro G., Izquierdo A. et al.* NeuroAtHome: A software platform of clinical videogames specifically designed for the motor rehabilitation of stroke patients. *Brain Injury.* 2014; 28 (5–6): 517–878.

25. *Galvin J., Levac D.* Facilitating clinical decision-making about the use of virtual reality within pediatric motor rehabilitation: describing and classifying virtual reality systems. *Developmental neurorehabilitation.* 2011; 14 (2): 112–122.

26. *Grimes G.* Digital data entry glove interface device US Patent 4,414,537, 1983.

27. *Hailey D., Roine R., Ohinmaa A. et al.* Evidence of benefit from telerehabilitation in routine care: a systematic review. *J Telemed Telecare.* 2011; 17 (6): 281–287. PMID: 21844172 DOI: 10.1258/jtt.2011.101208

28. *Josa M., Morone G., Fusco A. et al.* Leap motion controlled videogame-based therapy for rehabilitation of elderly patients with subacute stroke: a feasibility pilot study. *Top Stroke Rehabil.* 2015; 22 (4): 306–316. PMID: 26258456 DOI: 10.1179/1074935714Z.0000000036

29. *Jack D., Boian R., Merians A.S. et al.* Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation. *Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2001; 9 (3): 308–318. PMID: 11561668 DOI: 10.1109/7333.948460

30. *Jonassen D.* Handbook of Research on Educational Communications and Technology. 2nd ed., Lawrence Erlbaum Associates Inc., Publishers. 2004: 461–498.

31. *Kiper P., Agostini M., Luque-Moreno C. et al.* Reinforced feedback in virtual environment for rehabilitation of upper extremity dysfunction after stroke: preliminary data from a randomized controlled trial. *Biomed Res Int.* 2014; 2014: 752128. PMID: 24745024 DOI: 10.1155/2014/752128

32. *Krijn M., Emmelkamp P.M., Olafsson R.P. et al.* Virtual reality exposure therapy of anxiety disorders: a review. *Clin Psychol Rev.* 2004; 24 (3): 259–281. PMID: 15245832 DOI: 10.1016/j.cpr.2004.04.001

33. *Lamson R.* VR in Psychotherapy Virtual Therapy of Anxiety Disorders. *CyberEdge Journal.* 1994; (4): 1–28.

34. *Lanier J., Minsky M., Fisher S. et al.* Virtual Environments And Interactivity: Windows To The Future. *ACM Siggraph Panel Proceedings.* 1989.

35. *Laver K., George S., Thomas S. et al.* Virtual reality for stroke rehabilitation: an abridged version of a Cochrane review. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2015; 51 (4): 497–506. PMID: 26158918

36. *Lewis G.N., Rosie J.A.* Virtual reality games for movement rehabilitation in neurological conditions: how do we meet the needs and expectations of the users? *Disabil Rehabil.* 2012; 34 (22): 1880–1886. PMID: 22480353 DOI: 10.3109/09638288.2012.670036

37. *Lippman A.* Movie maps: An application of the optical videodisc to computer graphics 1980. In *SIGGRAPH Conf. Proc.*, 32–43.

38. *Merians A.S., Fluet G.G., Qiu Q. et al.* Robotically facilitated virtual rehabilitation of arm transport integrated with finger movement in persons with hemiparesis. *J Neuroeng Rehabil.* 2011; 16 (8): 27. PMID: 21575185 DOI: 10.1186/1743-0003-8-27

39. *Pietrzak E., Cotea C., Pullman S.* Using commercial video games for upper limb stroke rehabilitation: is this the way of the future? *Top Stroke Rehabil.* 2014; 21 (2): 152–162. PMID: 24710975 DOI: 10.1310/tsr2102-152

40. *Sapoznik G., Teasell R., Mamdani M. et al.* Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: a pilot randomized clinical trial and proof of principle. *Stroke.* 2010; 41 (7): 1477–1484. PMID: 20508185 DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.584979

41. *Simpson L.A., Eng J.J.* Functional recovery following stroke: capturing changes in upper-extremity function. *Neurorehabil Neural Repair.* 2013; 27 (3): 240–250. PMID: 23077144 DOI: 10.1177/1545968312461719

42. *Trombly C.A., Thayer-Nason L., Bliss G. et al.* The effectiveness of therapy in improving finger extension in stroke patients. *Am J Occup Ther.* 1986; 40 (9): 612–617. PMID: 3766683 doi:10.5014/ajot.40.9.612

43. *Truelsen T., Piechowski-Jozwiak B., Bonita R. et al.* Stroke incidence and prevalence in Europe: a review of available data. *Eur J Neurol.* 2006; 13: 581–198. PMID: 16796582 DOI: 10.1111/j.1468-1331.2006.01138.x

44. *Viau A., Feldman A.G., McFadyen B.J. et al.* Reaching in reality and virtual reality: a comparison of movement kinematics in healthy subjects and in adults with hemiparesis. *J Neuroeng Rehabil.* 2004; 14; 1 (1): 11. PMID: 15679937 DOI: 10.1186/1743-0003-1-11

Virtual reality as an upper limb rehabilitation approach

A.E. Khizhnikova, A.S. Klochkov, A.M. Kotov-Smolenskiy, N.A. Suponeva, L.A. Chernikova

Research Center of Neurology, Moscow, Russia

Keywords: cerebrovascular accident, rehabilitation, virtual reality, motor rehabilitation, hand motor skills, reaching.

The consequences of cerebrovascular diseases significantly reduce the quality of life of patients. Recovery of basic motor skills, such as the ability to reach the object, manipulate it, and coordinate the movements of two hands is one of the top-priority tasks in restoring patient's living and social activity. Training in the environment as close to the real one as possible, active involvement of the patient, as well as interactive feedback, which allows patients to control the correct execution of motor tasks and adjust their own efforts are required for successful motor recovery. The development of computer technology enabled the improvement of conventional approaches to rehabilitation of stroke patients. Virtual reality (VR) is extensively used to meet

these conditions and achieve successful targeted training for a specific motor task. The technical basis of VR includes computer modeling and computer simulation, as well as three-dimensional visualization, which provides realistic visualization of movements on the screen. These technologies enable reconstruction of the appropriate working space for motor skill training, and provide interactive feedback and high intensity of rehabilitation. This article provides information about the development of these technologies in the field of motor rehabilitation of upper extremity function, comparative analysis of systems that are currently used or being developed, and prospects of VR development in neurorehabilitation.

Контактный адрес: Клочков Антон Сергеевич – канд. мед. наук, старш. науч. сотр. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН. 125367 Москва, Волоколамское ш., д. 80. Тел.: +7 (495) 490-25-02; e-mail: Anton.S.Klochkov@gmail.com;

Хижникова А.Е. – асп. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН;

Котов-Смоленский А.М. – инструктор-методист отделения ЛФК нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН;

Супонева Н.А. – рук. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН;

Черникова Л.А. – главн. науч. сотр. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН.