

# ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В КОМПЛЕКСНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ (ОБЗОР)

DOI: 10.17691/stm2018.10.4.21

УДК 004.94:616–039.76

Поступила 18.01.2018 г.



**М.Г. Воловик**, д.б.н., ведущий научный сотрудник отделения функциональной диагностики  
Университетской клиники;

**В.В. Борзиков**, младший научный сотрудник отделения функциональной диагностики  
Университетской клиники;

**А.Н. Кузнецов**, младший научный сотрудник отделения функциональной диагностики  
Университетской клиники;

**Д.И. Базаров**, младший научный сотрудник консультативно-реабилитационного отделения  
Университетской клиники;

**А.Г. Полякова**, д.м.н., старший научный сотрудник консультативно-реабилитационного отделения  
Университетской клиники

Приволжский исследовательский медицинский университет, пл. Минина, 10/1, Н. Новгород, 603005

Обзор посвящен вопросам интеграции инновационных технологий виртуальной реальности в комплекс медицинской реабилитации пациентов с ограниченными возможностями. Анализ данных, представленных в современной отечественной и зарубежной литературе, доказывает эффективность применения таких технологий для восстановления нарушенных двигательных функций у пациентов разного возраста с патологией нервной и опорно-двигательной систем и свидетельствует об их корректирующем влиянии на нейрофизиологический моторный дефицит. Оценка достигнутых результатов с позиций доказательной медицины подтверждает целесообразность использования персонализированного подхода к выбору направленности и объема виртуальных технологий в комплексе реабилитационных мероприятий.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность; реабилитация; двигательные функции.

**Как цитировать:** Volovik M.G., Borzikov V.V., Kuznetsov A.N., Bazarov D.I., Polyakova A.G. Virtual reality technology in complex medical rehabilitation of patients with disabilities (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2018; 10(4): 173–182, <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.4.21>

## English

## Virtual Reality Technology in Complex Medical Rehabilitation of Patients with Disabilities (Review)

**M.G. Volovik**, DSc, Leading Researcher, Department of Functional Diagnostics, University Clinic;

**V.V. Borzikov**, Junior Researcher, Department of Functional Diagnostics, University Clinic;

**A.N. Kuznetsov**, Junior Researcher, Department of Functional Diagnostics, University Clinic;

**D.I. Bazarov**, Junior Researcher, Counseling and Rehabilitative Department, University Clinic;

**A.G. Polyakova**, MD, DSc, Senior Researcher, Counseling and Rehabilitation Department, University Clinic

Privolzhsky Research Medical University, 10/1 Minin and Pozharsky Square, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

**Для контактов:** Воловик Михаил Григорьевич, e-mail: [afanassy@mail.ru](mailto:afanassy@mail.ru)

The review is devoted to integration of innovative virtual reality technologies in the complex of medical rehabilitation of patients with disabilities. The analysis of data presented in modern domestic and foreign literature proves the effectiveness of using these technologies for recovery of impaired motor functions in patients of various ages with nervous and musculoskeletal system pathologies and gives evidence of their corrective effect on neurophysiological motor deficiency. Evaluation of the achieved results from the perspective of evidence-based medicine confirms the feasibility of using a personalized approach to targeting and controlling the dosage of virtual technologies in the complex of rehabilitation measures.

**Key words:** virtual reality; rehabilitation; motor functions.

## Введение

Проблема реабилитации людей с ограниченными возможностями актуальна во всем мире. По данным ООН, насчитывается примерно 450 млн. человек с нарушениями физического и психического развития. В структуре населения России отмечается 7,8% лиц с ограниченными возможностями двигательных и когнитивных функций на почве травм, заболеваний опорно-двигательного аппарата и нервной системы, большинство из которых составляют люди трудоспособного возраста [1]. Это наносит ущерб экономике страны, измеряемый десятками миллиардов рублей в год, и побуждает к поиску и разработке инновационных мультидисциплинарных технологий, внедрение которых в комплекс реабилитационных мероприятий способно повысить их эффективность [2].

В настоящее время активно разрабатываются технологии воздействия на мозг с помощью виртуальной реальности (VR), использование которых, по многим данным, способно повысить результативность восстановительного лечения как по времени, так и по качеству достигнутых эффектов [3–10].

## Понятие виртуальной реальности.

### Развитие VR-технологий

Виртуальная реальность (*англ.* virtual reality) — это компьютерная симуляция реальной среды, воспроизведение какой-либо ситуации через ощущения (зрительные, слуховые, обонятельные, осязательные и др.) с целью индуцировать ответные реакции [11]. Впервые понятие искусственной реальности ввел американский компьютерный художник Майрон Крюгер (Myron Krueger) в конце 1960-х гг. «Погружение» в VR достигается с помощью языка кодирования, известного как VRML (Virtual Reality Modeling Language). Технологии VR используют интерактивные симуляции с помощью шлемов или очков VR, проекторов и перчаток с сенсорами. При этом происходит мультисенсорная (визуальная, звуковая или тактильная) стимуляция в различных вариантах: пассивном (в виде просмотра видеороликов) или активном (когда пользователь манипулирует образом собственного тела — «аватаром» или конкретными объектами внутри виртуального сценария) с использованием обратной связи от компьютера, обсчитывающего результаты его

действий [12–16]. Применение мультисенсорной тренировки в виртуальной среде для физической реабилитации было предложено в 1982 г. австралийскими физиотерапевтами J.H. Carr и R.B. Shepherd [17].

В конце 1960-х гг. стало известно о возможности VR перестраивать и тренировать альфа-мозговую активность с целью усиления релаксации, что было использовано для оказания помощи больным с неконтролируемой эпилепсией [18]. В 1993 г. психиатр R. Lemson выдвинул идею применения VR в реабилитации пациентов с различными фобиями и тревожными расстройствами [19]. Примерно в то же время группа J. Williford описала уменьшение проявлений акрофобии при использовании VR [20, 21]. В дальнейшем подобный подход стал применяться в лечении зуда [22], болевых синдромов [23, 24], депрессии, бессонницы, посттравматического стрессового расстройства у военнослужащих [25, 26]. Высоко оценивается потенциал VR-технологий у детей с расстройствами аутистического спектра [27–30], а также у пациентов с болезнью Паркинсона [31], болезнью Альцгеймера [32], рассеянным склерозом [33] и др. В настоящее время чаще всего VR применяется в нейрореабилитации после инсультов [34–38]. Развлекательный эффект погружения в VR отвлекает внимание пациента от болезненных процедур, снижает тревожность, дискомфорт или неудовлетворенность лечением [39].

В России VR-терапия в восстановительном лечении пациентов с двигательными нарушениями развивалась параллельно с методами механо- и роботизированной терапии [40–42]. Данный подход основан на фундаментальных механизмах физиологии движения, установленных классиками отечественной физиологии Н.А. Бернштейном и П.К. Анохиным. В ходе исследования технологий VR с позиций доказательной медицины их наиболее высокая эффективность выявлена при восстановлении функции ходьбы [9, 43] и манипулятивной функции верхней конечности [44–46]. Более успешное восстановление движений и повышение физической активности за счет применения VR у таких пациентов происходит благодаря тренировке в среде, максимально приближенной к реальной, а также повышению мотивации и активному участию пациентов в реабилитационных мероприятиях [47–49].

Традиционные методы физиотерапии (лечебная гимнастика и механотерапия) не всегда используют активное обучение больного двигательным навыкам,

а ВР с аналогичными параметрами движения благодаря уникальным возможностям воспроизводить практически любую среду и предоставлять обратную связь вовлекает пациента в процесс тренировки, в ходе которой он может осознать и исправлять свои ошибки при выполнении движений [50–53]. Благодаря трем ключевым элементам, необходимым для тренировки моторных функций (повторение стимуляции, сенсорная обратная связь, мотивация пациентов) ВР создает возможность более эффективно оттачивать двигательные навыки именно в том контексте, в котором они должны применяться в жизни [54, 55].

Использование ВР в нейрореабилитации показало, что восстановление двигательного дефицита обусловлено активизацией механизмов пластичности мозга, в том числе изменениями в первичной сенсомоторной коре и в дополнительной двигательной области [53, 56, 57]. Это знание позволяет расширять спектр нозологий, при которых с помощью ВР удается достигнуть значимых результатов.

### **ВР-технологии в нейрореабилитации для восстановления двигательных функций у больных, перенесших инсульт**

Одним из перспективных направлений интеграции ВР в реабилитационный комплекс является устранение последствий инсультов [58–60]. Наиболее часто ВР-терапия применяется в отдаленном периоде реабилитации постинсультных пациентов [61–63], хотя из литературных данных очевидны преимущества ранней ВР-реабилитации с использованием интерактивных игр, которые повышают мотивацию к терапии, и программ с применением тактильной обратной связи, способствующих восстановлению сенсорных функций и предотвращающих развитие потенциальных осложнений [64, 65].

Результаты включения ВР в комплекс восстановительного лечения при двигательных нарушениях у постинсультных больных не всегда однозначны с позиций доказательной медицины. Так, хотя у пациентов, прошедших реабилитацию с использованием системы ВР YouGrabber (YouRehab, Швейцария) — игровое программное обеспечение, симулирующее занятия в тренажерном зале, — результаты оказались чуть лучше, чем в контрольной группе с традиционной терапией, однако между группами не выявлено статистически значимых различий [66]. Сходный по сравнению с традиционными методами реабилитации функциональный вклад в компенсацию двигательного дефицита отмечен при использовании системы ВР Reh@City (NeuroRehabLab, Португалия) — это виртуальная симуляция города, где память, внимание и решение визуально-пространственных задач интегрированы для выполнения различных повседневных действий [52]. В исследовании [67] пациенты в раннем постинсультном периоде пользовались системой ВР Sixense (США) и реабилитационным игровым про-

граммным обеспечением с аватаром на экране, который был синхронизирован с движениями пациента. Авторы отмечали улучшение сенсомоторной функции, однако отличия между основной и контрольной группами пациентов оказались недостоверны.

В то же время в ряде исследований продемонстрировано прогрессивное улучшение качества и увеличение диапазона движений (например, при совместном использовании ВР и реабилитационного экзоскелета для плечевого, локтевого и лучезапястного суставов, с возможностью движений с семью степенями свободы, с поддержкой паретичной руки и регистрацией кинематики движений и силы схвата для контроля по обратной связи) [49]. Обнадешивающие результаты получены в работе Р. Кіпер с соавт. [68], где для восстановления дисфункции верхней конечности после инсульта использовали усиленную обратную связь в виртуальной среде. Игровые консоли ВР, управляемые жестами (Nintendo Wii; Nintendo, Япония; Xbox Kinect; Microsoft, США), продемонстрировали высокую эффективность в двигательной реабилитации [69], особенно для улучшения функций верхних конечностей [70].

В целом взаимодействие, совмещающее визуальную и тактильную (гаптическую) стимуляцию, оказалось наиболее эффективным. Так, С. Yin с соавт. [71] исследовали влияние тренировок езды на велосипеде с применением ВР на улучшение баланса у пациентов после инсульта. Используемая система ВР включала билатеральные pedalные силовые датчики и динамометрическую платформу, анализировала собранные данные для обеспечения пациента обратной связью в виде виртуального автомобиля, тем самым тренируя пораженную сторону. Авторы показали, что после цикла таких тренировок сила возросла на 22% и баланс улучшился на 29%. Сходный принцип реабилитации описан в работе А. Flowers с соавт. [72].

Обобщенные данные по современному состоянию применения технологий ВР для целенаправленной двигательной реабилитации функций верхней конечности после нарушений мозгового кровообращения приведены в ряде отечественных статей [73–75]. У пациентов с двигательными нарушениями центрального генеза в первую очередь нарушаются базовые моторные функции руки, такие как способность точно дотянуться до объекта, манипулировать им, а также координировать движения двух рук. Применение технологий ВР позволяет частично компенсировать подобные нарушения: трудности при дозировании мышечного усилия, например, при сгибании и разгибании пальцев [73], а также мышечную слабость, нарушения межсуставной координации и последовательность активации различных групп мышц [74].

Значительное число новейших исследований показало эффективность использования ВР-технологий в реабилитации больных с постинсультными моторными нарушениями в верхних конечностях, тогда как в доступных нам источниках не обнаружено работ по применению ВР в реби-

литации пациентов с последствиями часто встречающихся травм конечностей, осложненных развитием периферических нейропатий (комплексный регионарный болевой синдром и др.). Кроме того, как мы уже отметили, в ряде работ, где в комплексе восстановительной терапии пациентов с двигательными нарушениями использовали такие коммерческие ВР-системы, как Sixense [67] или YouGrabber [66], результаты не обнаружили значимых различий с группой пациентов, проходивших традиционную реабилитацию. Причиной этому может служить неточный подбор применяемых визуальных стимулов, предъявляемых через 3D-очки либо панорамный экран, поскольку в целях нейрореабилитации крайне важен весь спектр афферентных стимулов [25]. Это свидетельствует о сохранении актуальности дальнейших исследований в развитии данного направления и продолжения поиска более эффективных ВР-технологий, а также новых доказательных способов верификации и прогноза результатов их применения.

### ВР-технологии в реабилитации детей

Одним из перспективных направлений в коррекции координации и точности движений конечностей является использование ВР в качестве дополнительного способа реабилитации у детей с детским церебральным параличом (ДЦП) [4]. Многочисленные работы с использованием ВР-технологий у таких детей посвящены как технологическим, так и медицинским аспектам реабилитации [5, 6, 76]. Самой распространенной системой, применяемой в лечении ДЦП, является Virtual Rehab (США) — реабилитационная платформа, использующая коммерчески доступные сенсоры Microsoft Kinect (США) и Leap Motion (США) и технологию видеоигр для телереабилитации и предназначенная для восстановления двигательных функций конечностей. Так, на основе платформы с открытым исходным кодом Unity 3D разработана виртуальная среда, с которой ребенок с ДЦП может взаимодействовать в реальном масштабе времени при помощи датчика движений кисти и пальцев Leap Motion. При этом комбинированная запись ЭЭГ с помощью устройства MindWave (NeuroSky, США) позволяет отслеживать прогресс в клинике пациента в реальном масштабе времени с учетом различий в уровнях внимания и релаксации [77].

Виртуальная реальность в терапии с применением сенсоров Microsoft Kinect доказала свою эффективность в улучшении выполнения физических упражнений и повышении физической активности [5]. Выявлен мощный потенциал положительного влияния ВР-реабилитации на походку, баланс, мышечную силу и общие двигательные навыки детей с ДЦП [78]. Превращение лечения в игру повышает внимание ребенка к выполнению тех или иных упражнений при реабилитации по сравнению с обычным лечением [79, 80] и, что особенно важно, возможно использование

ВР-технологий на дому [8, 81, 82]. Авторы этих и ряда других исследований (например, [83]) оптимистично оценивают добавление ВР к традиционному лечению в качестве альтернативного игрового инструмента для когнитивной и двигательной реабилитации детей, в том числе при множественных нарушениях. В литературе мы не обнаружили методик дистанционных онлайн-сеансов с инструктором при использовании ВР-шлемов для детей с двигательными нарушениями в отличие от ситуации с разрабатываемыми подобными системами для взрослых пациентов [84].

В работе Н.Ю. Николенко и соавт. [85] представлен разработанный авторами комплекс реабилитации детей с прогрессирующими мышечными дистрофиями на основе внедрения современных технологий игровой ВР, эффективность которого была научно обоснована и доказана с учетом существующих принципов реабилитации детей с этой тяжелой патологией. Методика позволяет значимо улучшить состояние двигательных функций, качество жизни и повысить доступность реабилитации.

### ВР-технологии на этапах реабилитации больных с последствиями травм нервной системы и опорно-двигательного аппарата

Одной из наиболее сложных проблем реабилитации больных с двигательными нарушениями является восстановление утраченных функций после позвоночно-спинномозговой травмы. Появляющиеся результаты современных исследований [86–88] позволяют сделать вывод о целесообразности использования ВР для реабилитации этих пациентов. Оценка влияния визуальной обратной связи в тренировках с интерактивно управляемым аватаром на улучшение походки у пациентов с травмой спинного мозга [89] показала, что скорость движений при меньшем количестве попыток была значительно выше по сравнению с тестами, где демонстрировались только статичные сцены. I. Dimbwadyo-Terreg с соавт. [48] изучали эффективность ВР-системы Touga (Испания) при восстановлении верхней конечности у людей с тетраплегией, сформировавшейся после травмы спинного мозга. В ходе реабилитации использовались игры, базирующиеся на выполнении повседневных процедур (еда, расчесывание волос или умывание), с тремя уровнями сложности. Несмотря на отсутствие статистически значимых различий в результатах реабилитации этих пациентов с группой контроля, проходившей традиционный комплекс восстановительного лечения, они были более мотивированы и выражали желание и в дальнейшем продолжать использование системы Touga.

Положительную динамику при использовании ВР-технологий у пациентов после спинальной травмы отмечали и другие исследователи [90–93]. Так, при изучении эффекта ВР на улучшение способности к

вождению автомобиля у пациентов с позвоночно-спинномозговой травмой было показано, что реабилитация навыков вождения в условиях ВР даже при тяжелых последствиях спинальной травмы дает существенный прогресс [94].

Внедрение ВР-технологий в комплекс восстановительных мероприятий пациентов с утратой движений верхней конечности в результате травм головного мозга является очень важным фактором в процессе переобучения двигательным навыкам [95]. Традиционные подходы в подобных случаях не способны полностью решить задачу задействования процессов нейропластичности, в то время как реабилитационные методы с использованием ВР, обеспечивающие обратную связь, могут эти процессы улучшить [96–98].

Ключевым фактором для эффективной реабилитации с использованием ВР могут являться различные уровни сложности заданий, когда моделируется ситуация, мотивирующая превзойти собственный результат. Так, установлено, что при разработке движений с помощью игровой приставки Nintendo Wii (Япония) с периферическим устройством, отслеживающим положение тела и движения — Balance Board (Nintendo of Korea) — у пациентов после операции на коленном суставе эффект использования ВР-системы не зависел от серьезности травмы колена, а определялся именно последовательным усложнением задач [99].

Успешной интеграции ВР в систему реабилитации пациентов с синдромом замороженного плеча способствовало применение носимых сенсоров [100]. Восстановительное лечение, включавшее комплекс упражнений, горячие компрессы, интерференционную терапию, состояло из сессий с применением ВР дважды в неделю по 40 минут в течение 4 недель. В результате исследования авторами было выявлено значительное увеличение диапазона движений в плечевом суставе и силы мышц верхней конечности.

В последнее время появились единичные работы, в которых отмечается целесообразность использования ВР-технологии в реабилитации пациентов с последствиями спортивных травм (например, коленного сустава в послеоперационном периоде) [101].

## Заключение

Для пациентов с двигательными нарушениями технологии, основанные на использовании виртуальной среды, предоставляют оптимальные условия для восстановления двигательного дефицита, тактильная обратная связь способствует восстановлению сенсорных функций, а интерактивные игры повышают мотивацию к терапии. Однако это не должно исключать требований к тщательному изучению возможных осложнений использования ВР-технологий с целью обеспечения безопасности больных, особенно детей. В каждом конкретном случае необходим персонализированный подход с учетом индивидуальных адаптационно-компенсаторных возможностей организма, с

оценкой адекватности психических реакций и контролем физиологических функций при общении пациента с виртуальной средой.

В настоящее время уже существуют варианты программного обеспечения, позволяющего включать мониторинговую регистрацию различных физиологических параметров в мобильные ВР-решения — носимые устройства, подключаемые к смартфону. J.E. Muñoz с соавт. [102] разработали мобильный комплекс виртуальной реальности со встроенной биологической обратной связью, которая основана на использовании сигналов от пациента: сердечного ритма, ЭЭГ и электромиографии, получаемых при помощи носимых сенсоров и передающихся на смартфон посредством Bluetooth. Эти сигналы используются для управления в реальном масштабе времени виртуальной средой, созданной на базе Unity 3D, при этом сбор, передачу и запись физиологических сигналов облегчает разработанная авторами игра EmoCat Rescue с фреймворком PhysioVR в основе. Смартфон в данном случае используется как экран для безэкранных очков виртуальной реальности и как персональный сервер для передачи данных [102, 103]. Такие подходы, делаая виртуальную реальность мобильной и экономически доступной технологией, представляют собой ближайшие тенденции развития ВР-реабилитации и являются основой для более широкого внедрения ее в медицинскую практику.

**Финансирование исследования.** Исследование не финансировалось какими-либо источниками.

**Конфликт интересов.** Авторы подтверждают отсутствие финансовых и других конфликтных интересов, способных оказать влияние на их работу.

## Литература/References

1. Брянцева Н.В., Сулим О.Н. Социально-правовые вопросы лиц с ограниченными возможностями здоровья. *Успехи в химии и химической технологии* 2012; 9(138): 55–58. Bryantseva N.V., Sulim O.N. Social and legal issues for people with disabilities. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* 2012; 9(138): 55–58.
2. Разумов А.Н., Мельникова Е.А. Современные подходы к индивидуальному прогнозированию восстановления больных с инсультом в процессе реабилитации: обзор литературы и результаты собственного исследования. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры* 2015; 92(6): 11–16. Razumov A.N., Melnikova E.A. The modern approaches to the prognostication of rehabilitation of the patients after stroke on an individual basis: a review of the literature and the results of original investigations. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury* 2015; 92(6): 11–16, <https://doi.org/10.17116/kurort2015611-16>.
3. Saposnik G., Levin M.; Outcome Research Canada (SORCan) Working Group. Virtual reality in stroke rehabilitation a meta-analysis and implications for clinicians. *Stroke* 2011; 42(5): 1380–1386, <https://doi.org/10.1161/strokeaha.110.605451>.

4. Легкая Е.Ф., Ходасевич Л.С., Полякова А.В. Информационные технологии в комплексной реабилитации пациентов с детским церебральным параличом (обзор). Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры 2016; 93(2): 53–58. Legkaya E.F., Khodasevich L.S., Polyakova A.V. The informational technologies for the comprehensive rehabilitation of the patients presenting with juvenile cerebral palsy (a review). *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury* 2016; 93(2): 53–58, <https://doi.org/10.17116/kurort2016253-58>.
5. Bonnechère B., Jansen B., Omelina L., Degelaen M., Wermenbol V., Rooze M., Van Sint Jan S. Can serious games be incorporated with conventional treatment of children with cerebral palsy? A review. *Res Dev Disabil* 2014; 35(8): 1899–1913, <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.04.016>.
6. Chen Y.P., Lee S.Y., Howard A.M. Effect of virtual reality on upper extremity function in children with cerebral palsy: a meta-analysis. *Pediatr Phys Ther* 2014; 26(3): 289–300, <https://doi.org/10.1097/pep.0000000000000046>.
7. Dascal J., Reid M., IsHak W.W., Spiegel B., Recacho J., Rosen B., Danovitch I. Virtual reality and medical inpatients: a systematic review of randomized, controlled trials. *Innov Clin Neurosci* 2017; 14(1–2): 14–21.
8. Miller K.J., Adair B.S., Pearce A.J., Said C.M., Ozanne E., Morris M.M. Effectiveness and feasibility of virtual reality and gaming system use at home by older adults for enabling physical activity to improve health-related domains: a systematic review. *Age Ageing* 2014; 43(2): 188–195, <https://doi.org/10.1093/ageing/af194>.
9. Сидякина И.В., Добрушина О.Р., Лядов К.В., Шаповаленко Т.В., Ромашин О.В. Доказательная медицина в нейрореабилитации: инновационные технологии (обзор). Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры 2015; 92(3): 53–56. Sidiakina I.V., Dobrushina O.R., Liadov K.V., Shapovalenko T.V., Romashin O.V. The role of evidence-based medicine in the neurorehabilitation: the innovative technologies (a review). *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury* 2015; 92(3): 53–56, <https://doi.org/10.17116/kurort2015353-56>.
10. Wang Q., Markopoulos P., Yu B., Chen W., Timmermans A. Interactive wearable systems for upper body rehabilitation: a systematic review. *J Neuroeng Rehabil* 2017; 14(1): 20, <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0229-y>.
11. Riener R., Harders M. *Virtual reality in medicine*. London: Springer; 2012, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4011-5>.
12. Abadía M.F., Quintana M.S., Calvo P.Á.M. Application of topographical capture techniques for modelling virtual reality: from the static object to the human figure. In: *Virtual technologies for business and industrial applications: innovative and synergistic approaches*. IGI Global; 2011; p. 181–200, <https://doi.org/10.4018/9781615206315.ch011>.
13. Moya S., Grau S., Tost D., Campeny R., Ruiz M. Animation of 3D avatars for rehabilitation of the upper limbs. In: *Third International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications*. IEEE; 2011; p. 168–171, <https://doi.org/10.1109/vs-games.2011.32>.
14. Zimmerli L., Jacky M., Lünenburger L., Riener R., Bolliger M. Increasing patient engagement during virtual reality-based motor rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 2013; 94(9): 1737–1746, <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.01.029>.
15. 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, <https://doi.org/10.1310/tsr2102-152>.
16. Iamsakul K., Pavlovic A.V., Calderon J.I., Sanderson L.M. Project heaven: preoperative training in virtual reality. *Surg Neurol Int* 2017; 8: 59, [https://doi.org/10.4103/sni.sni\\_371\\_16](https://doi.org/10.4103/sni.sni_371_16).
17. Carr J.H., Shepherd R.B. *Motor relearning programme for stroke*. Rockville: Aspen Publishers; 1983.
18. Kamiya J. The first communications about operant conditioning of the EEG. *J Neurother* 2011; 15(1): 65–73, <https://doi.org/10.1080/10874208.2011.545764>.
19. Lemson R. Virtual therapy of anxiety disorders. *CyberEdge Journal* 1994; 4(2): 1–28.
20. Williford J., Hodges L., North M., North S. Relative effectiveness of virtual environment desensitization and imaginal desensitization in the treatment of acrophobia. In: *Proceedings graphic interface*. Toronto, ON: Canadian Human-Computer Communications Society; 1993; p. 162.
21. Rothbaum B.O., Hodges L.F., Kooper R., Opdyke D., Williford J.S., North M. Effectiveness of computer-generated (virtual reality) graded exposure in the treatment of acrophobia. *Am J Psychiatry* 1995; 152(4): 626–628, <https://doi.org/10.1176/ajp.152.4.626>.
22. Leibovici V., Magora F., Cohen S., Ingber A. Effects of virtual reality immersion and audiovisual distraction techniques for patients with pruritus. *Pain Res Manage* 2009; 14(4): 283–286, <https://doi.org/10.1155/2009/178751>.
23. Keefe F.J., Huling D.A., Coggins M.J., Keefe D.F., Rosenthal M.Z., Herr N.R. Virtual reality for persistent pain: a new direction for behavioral pain management. *Pain* 2012; 153(11): 2163–2166, <https://doi.org/10.1016/j.pain.2012.05.030>.
24. Jones T., Moore T., Choo J. The impact of virtual reality on chronic pain. *PLoS One* 2016; 11(12): e0167523, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167523>.
25. Тезга В.Ю., Дьяконов И.Ф., Овчинников Б.В., Шпилея Л.С., Палехова О.В. Современные перспективные технологии медико-психологической реабилитации военнослужащих. *Medline.ru* 2015; 16: 659–668. Tegza V.Y., Dyakonov I.F., Ovchinnikov B.V., Shpilena L.S., Palekhova O.V. Modern and advanced technology medical and psychological rehabilitation of military personnel. *Medline.ru* 2015; 16: 659–668. URL: <http://www.medline.ru/public/art/tom16/art60.html>.
26. 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, <https://doi.org/10.3109/09638288.2012.670036>.
27. Georgescu A.L., Kuzmanovic B., Roth D., Bente G., Vogeley K. The use of virtual characters to assess and train nonverbal communication in high-functioning autism. *Front Hum Neurosci* 2014; 8: 807, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00807>.
28. Parsons S. Authenticity in virtual reality for assessment and intervention in autism: a conceptual review. *Educational Research Review* 2016; 19: 138–157, <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.08.001>.
29. Forbes P.A.G., Pan X., Hamilton A.F. de C. Reduced mimicry to virtual reality avatars in autism spectrum disorder. *J Autism Dev Disord* 2016; 46(12): 3788–3797, <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2930-2>.
30. Duffield T.C., Parsons T.D., Landry A., Karam S.,

Otero T., Mastel S., Hall T.A. Virtual environments as an assessment modality with pediatric ASD populations: a brief report. *Child Neuropsychol* 2017; 24(8): 1129–1136, <https://doi.org/10.1080/09297049.2017.1375473>.

31. Dockx K., Bekkers E.M.J., Van den Bergh V., Ginis P., Rochester L., Hausdorff J.M., Mirelman A., Nieuwboer A. Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *Cochrane Database Syst Rev* 2016; 12: CD010760, <https://doi.org/10.1002/14651858.cd010760.pub2>.

32. García-Betances R.I., Arredondo Waldmeyer M.T., Fico G., Cabrera-Umpiérrez M.F. A succinct overview of virtual reality technology use in Alzheimer's disease. *Front Aging Neurosci* 2015; 7: 80, <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00080>.

33. Massetti T., Trevizan I.L., Arab C., Favero F.M., Ribeiro-Papa D.C., de Mello Monteiro C.B. Virtual reality in multiple sclerosis — a systematic review. *Mult Scler Relat Disord* 2016; 8: 107–112, <https://doi.org/10.1016/j.msard.2016.05.014>.

34. Wüest S., van de Langenberg R., de Bruin E.D. Design considerations for a theory-driven exergame-based rehabilitation program to improve walking of persons with stroke. *Eur Rev Aging Phys Act* 2014; 11(2): 119–129, <https://doi.org/10.1007/s11556-013-0136-6>.

35. Lledó L.D., Díez J.A., Bertomeu-Motos A., Ezquerro S., Badesa F.J., Sabater-Navarro J.M., García-Aracil N. A comparative analysis of 2D and 3D tasks for virtual reality therapies based on robotic-assisted neurorehabilitation for post-stroke patients. *Front Aging Neurosci* 2016; 8: 205, <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00205>.

36. Schmid L., Glässel A., Schuster-Amft C. Therapists' perspective on virtual reality training in patients after stroke: a qualitative study reporting focus group results from three hospitals. *Stroke Res Treat* 2016; 2016: 6210508, <https://doi.org/10.1155/2016/6210508>.

37. Saposnik G. Virtual reality in stroke rehabilitation. In: Ovbiagele B. (editor). *Ischemic stroke therapeutics*. Springer, Cham; 2016; p. 225–233, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17750-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17750-2_22).

38. Brunner I., Skouen J.S., Hofstad H., Aßmus J., Becker F., Sanders A.-M., Pallesen H., Kristensen L.Q., Michielsen M., Thijs L., Verheyden G. Virtual reality training for upper extremity in subacute stroke (VIRTUES). *Neurology* 2017; 89(24): 2413–2421, <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000004744>.

39. Rooij M., Lobel A., Owen H., Smit N., Granic I. DEEP: a biofeedback virtual reality game for children at risk for anxiety. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems — CHI EA '16*. ACM Press; 2016, p. 1989–1997, <https://doi.org/10.1145/2851581.2892452>.

40. Черникова Л.А., Пирадов М.А., Супонева Н.А., Червяков А.В., Клочков А.С., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Пойдашева А.Г., Авдюнина И.А. Высокотехнологичные методы нейрореабилитации при заболеваниях нервной системы. В кн.: *Неврология XXI века: диагностические, лечебные и исследовательские технологии*. Под ред. М.А. Пирадова, С.Н. Иллариошкина, М.М. Танашиан. М: АТМО; 2015; с. 274–331. Chernikova L.A., Piradov M.A., Suponeva N.A., Chervyakov A.V., Klochkov A.S., Mokienko O.A., Lyukmanov R.Kh., Poydasheva A.G., Avdyunina I.A. Vysokotekhnologichnye metody neyroreabilitatsii pri zabolevaniyakh nervnoy sistemy. V kn.: *Nevrologiya XXI veka: diagnosticheskie,*

*lechebnye i issledovatel'skie tekhnologii* [High-tech methods of neurorehabilitation for diseases of the nervous system. In: *Neurology of the XXI century: diagnostic, therapeutic and research technologies*]. Pod red. Piradova M.A., Illarioshkina S.N., Tanashyan M.M. [Piradov M.A., Illarioshkin S.N., Tanashyan M.M. (editors)]. Moscow: АТМО; 2015; p. 274–331.

41. Chernikova L.A., Suponeva N.A., Klochkov A.S., Khizhnikova A.E., Lyukmanov R.H., Gnedovskaya E.V., Yankevich D.S., Piradov M.A. Robotic and mechanotherapeutic technology to restore the functions of the upper limbs: prospects for development (review). *Sovremennye tekhnologii v medicine* 2016; 8(4): 222–230, <https://doi.org/10.17691/stm2016.8.4.27>.

42. Gordleeva S.Yu., Lukoyanov M.V., Mineev S.A., Khoruzhko M.A., Mironov V.I., Kaplan A.Ya., Kazantsev V.B. Exoskeleton control system based on motor-imaginary brain-computer interface. *Sovremennye tekhnologii v medicine* 2017; 9(3): 31–38, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.3.04>.

43. Moreira M.C., de Amorim Lima A.M., Ferraz K.M., Benedetti Rodrigues M.A. Use of virtual reality in gait recovery among post stroke patients — a systematic literature review. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2013; 8(5): 357–362, <https://doi.org/10.3109/17483107.2012.749428>.

44. Laver K., George S., Thomas S., Deutsch J.E., Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Stroke* 2012; 43(2), <https://doi.org/10.1161/strokeaha.111.642439>.

45. Turolla A., Dam M., Ventura L., Tonin P., Agostini M., Zucconi C., Kiper P., Cagnin A., Piron L. Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: a prospective controlled trial. *J Neuroeng Rehabil* 2013; 10: 85, <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-85>.

46. Piggott L., Wagner S., Ziat M. Haptic neurorehabilitation and virtual reality for upper limb paralysis: a review. *Crit Rev Biomed Eng* 2016; 44(1–02): 1–32, <https://doi.org/10.1615/critrevbiomedeng.2016016046>.

47. Regenbrecht H., Hoermann S., McGregoret G., Dixon B., Franz E., Ott C., Hale L., Schubert T., Hoermann J. Visual manipulations for motor rehabilitation. *Computers & Graphics* 2012; 36(7): 819–834, <https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.04.012>.

48. Dimbwadyo-Terrer I., Gil-Agudo A., Segura-Fragoso A., de los Reyes-Guzmán A., Trincado-Alonso F., Piazza S., Polonio-López B. Effectiveness of the virtual reality system Toyra on upper limb function in people with tetraplegia: a pilot randomized clinical trial. *Biomed Res Int* 2016; 2016: 6397828, <https://doi.org/10.1155/2016/6397828>.

49. Grimm F., Naros G., Gharabaghi A. Closed-loop task difficulty adaptation during virtual reality reach-to-grasp training assisted with an exoskeleton for stroke. *Front Neurosci* 2016; 10: 518, <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00518>.

50. Bohil C.J., Alicea B., Biocca F.A. Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci* 2011; 12(12): 752–762, <https://doi.org/10.1038/nrn3122>.

51. Luu T.P., He Y., Brown S., Nakagome S., Contreras-Vidal J.L. A closed-loop brain computer interface to a virtual reality avatar: gait adaptation to visual kinematic perturbations. In: *International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. IEEE; 2015, p. 30–37, <https://doi.org/10.1109/icvr.2015.7358598>.

52. Faria A.L., Andrade A., Soares L., Badia S.B. Benefits of virtual reality based cognitive rehabilitation through simulated activities of daily living: a randomized controlled trial with stroke

patients. *J Neuroeng Rehabil* 2016; 13(1): 96–107, <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0204-z>.

53. Teo W.P., Muthalib M., Yamin S., Hendy A.M., Bramstedt K., Kotsopoulos E., Perrey S., Ayaz H. Does a combination of virtual reality, neuromodulation and neuroimaging provide a comprehensive platform for neurorehabilitation? — A narrative review of the literature. *Front Hum Neurosci* 2016; 10: 284, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00284>.

54. Pereira M.E., Rueda M.F., Diego A.I.M., de la Cuerda R.C., de Mauro A., Miangolarra Page J.C. Use of virtual reality systems as proprioception method in cerebral palsy: clinical practice guideline. *Neurologia* 2014; 29(9): 550–559, <https://doi.org/10.1016/j.nrleng.2011.12.011>.

55. Yeh S.C., Huang M.C., Wang P.C., Fang T.Y., Su M.C., Tsai P.Y., Rizzo A. Machine learning-based assessment tool for imbalance and vestibular dysfunction with virtual reality rehabilitation system. *Comput Methods Programs Biomed* 2014; 16(3): 311–318, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.04.014>.

56. You S.H., Jang S.H., Kim Y.H., Kwon Y.H., Barrow I., Hallett M. Cortical reorganization induced by virtual reality therapy in a child with hemiparetic cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 2005; 47: 628–635, <https://doi.org/10.1017/s0012162205001234>.

57. Basso Moro S., Bisconti S., Muthalib M., Spezialetti M., Cutini S., Ferrari M., Placidi G., Quaresima V. A semi-immersive virtual reality incremental swing balance task activates prefrontal cortex: a functional near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage* 2014; 85: 451–460, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.031>.

58. Bower K.J., Louie J., Landesrocha Y., Seedy P., Gorelik A., Bernhardt J. Clinical feasibility of interactive motion-controlled games for stroke rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil* 2015; 12(1): 63, <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0057-x>.

59. Levac D.E., Glegg S.M.N., Sveistrup H., Colquhoun H., Miller P., Finestone H., De Paul V., Harris J.E., Velikonja D. Promoting therapists' use of motor learning strategies within virtual reality-based stroke rehabilitation. *PLoS One* 2016; 11(12): e0168311, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168311>.

60. Chen L., Lo W.L.A., Mao Y.R., Ding M.H., Lin Q.L., Li H., Zhao J.L., Xu Z.Q., Bian R.H., Huang D.F. Effect of virtual reality on postural and balance control in patients with stroke: a systematic literature review. *Biomed Res Int* 2016; 2016: 7309272, <https://doi.org/10.1155/2016/7309272>.

61. Cameirão M.S., Badia S.B., Duarte E., Frisoli A., Verschure P.F. 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, <https://doi.org/10.1161/strokeaha.112.653196>.

62. Yeh S.C., Lee S.H., Chan R.C., Chen S., Rizzo A. A virtual reality system integrated with robot-assisted haptics to simulate pinch-grip task: motor ingredients for the assessment in chronic stroke. *Neurorehabilitation* 2014; 35(3): 435–449.

63. Lloréns R., Gil-Gómez J.A., Alcañiz M., Colomer C., Noé E. Improvement in balance using a virtual reality-based stepping exercise: a randomized controlled trial involving individuals with chronic stroke. *Clin Rehabil* 2015; 29(3): 261–268, <https://doi.org/10.1177/0269215514543333>.

64. Bao X., Mao Y., Lin Q., Qiu Y., Chen S., Li L., Cates R.S., Zhou S., Huang D. 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.

65. Iosa M., Morone G., Fusco A., Castagnoli M., Fusco F.R., Pratesi L., Paolucci S. 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, <https://doi.org/10.1179/1074935714z.0000000036>.

66. Stockley R.C., O'Connor D.A., Smith P., Moss S., Allsop L., Edge W. A mixed methods small pilot study to describe the effects of upper limb training using a virtual reality gaming system in people with chronic stroke. *Rehabil Res Pract* 2017; 2017: 9569178, <https://doi.org/10.1155/2017/9569178>.

67. Yin C.W., Sien N.Y., Ying L.A., Chung S.F., Tan May Leng D. Virtual reality for upper extremity rehabilitation in early stroke: a pilot randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 2014; 28(11): 1107–1114, <https://doi.org/10.1177/0269215514532851>.

68. Kiper P., Agostini M., Luque-Moreno C., Tonin P., Turolla A. 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, <https://doi.org/10.1155/2014/752128>.

69. Lohse K.R., Hilderman C.G., Cheung K.L., Tatla S., Van Der Loos H.F. Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. *PLoS One* 2014; 9(3): e93318, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093318>.

70. Thomson K., Pollock A., Bugge C., Brady M. Commercial gaming devices for stroke upper limb rehabilitation: a systematic review. *Int J Stroke* 2014; 9(4): 479–488, <https://doi.org/10.1111/ijss.12263>.

71. Yin C., Hsueh Y.H., Yeh C.Y., Lo H.C., Lan Y.T. A virtual reality-cycling training system for lower limb balance improvement. *Biomed Res Int* 2016; 2016: 9276508, <https://doi.org/10.1155/2016/9276508>.

72. Flowers A., Herve J.-Y. *BioPresence: a virtual reality biofeedback system*. 2018.

73. Черникова Л.А., Иоффе М.Е., Курганская М.Е., Мокиенко О.А., Кацуба Н.А., Устинова К.И., Прокопенко Р.А., Фролов А.А. Применение технологии виртуальной реальности при восстановлении движений в паретичной руке у больных, перенесших инсульт. *Физиотерапия, бальнеология, реабилитация* 2011; 3: 3–7. Chernikova L.A., Ioffe M.E., Kurganskaya M.E., Mokienko O.A., Katsuba N.A., Ustinova K.I., Prokopenko R.A., Frolov A.A. The use of the virtual reality technology for the restoration of movements of the paretic hand after stroke. *Fizioterapiya, bal'neologiya, reabilitatsiya* 2011; 3: 3–7.

74. Khizhnikova A.E., Klochkov A.S., Kotov-Smolenskiy A.M., Suponeva N.A., Chernikova L.A. Virtual reality as an upper limb rehabilitation approach. *Human Physiology* 2017; 43(8): 855–862, <https://doi.org/10.1134/s0362119717080035>.

75. Захаров А.В., Пятин В.Ф., Колсанов А.В., Повереннова И.Е., Сергеева М.С., Хивинцева Е.В., Коровина Е.С., Куцупалова Г.Ю. Использование виртуальной реальности в качестве средства ускорения двигательной реабилитации

пациентов после перенесенного острого нарушения мозгового кровообращения. Наука и инновации в медицине 2016; 3: 62–66. Zakharov A.V., Pyatin V.F., Kolsanov A.V., Poverennova I.E., Segreeva M.S., Khivintseva E.V., Korovina E.S., Kucepalova G.U. Using virtual reality as a method of accelerated rehabilitation among the patients after stroke. *Nauka i innovatsii v meditsine* 2016; 3: 62–66.

76. Galvin J., Levac D. Facilitating clinical decision-making about the use of virtual reality within pediatric motor rehabilitation: describing and classifying virtual reality systems. *Dev Neurorehabil* 2011; 14(2): 112–122, <https://doi.org/10.3109/17518423.2010.535805>.

77. de Oliveira J.M., Fernandes R.C., Pinto C.S., Pinheiro P.R., Ribeiro S., de Albuquerque V.H. Novel virtual environment for alternative treatment of children with cerebral palsy. *Comput Intell Neurosci* 2016; 2016: 8984379, <https://doi.org/10.1155/2016/8984379>.

78. Cho C., Hwang W., Hwang S., Chung Y. Treadmill training with virtual reality improves gait, balance, and muscle strength in children with cerebral palsy. *Tohoku J Exp Med* 2016; 238(3): 213–218, <https://doi.org/10.1620/tjem.238.213>.

79. Howcroft J., Klejman S., Fehlings D., Wright V., Zabjek K., Andrysek J., Biddiss E. Active video game play in children with cerebral palsy: potential for physical activity promotion and rehabilitation therapies. *Arch Phys Med Rehabil* 2012; 93(8): 1448–1456, <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.02.033>.

80. Ni L., Fehlings D., Biddiss E. Clinician and child assessment of virtual reality therapy games for motor rehabilitation of cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil* 2014; 95(10): e105, <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.07.323>.

81. Gagliardo P., Ferreiro T., Izquierdo R., Mas G., Penades V., Chirivella J. NeuroAtHome: a software platform of clinically designed videogames specifically designed for the motor rehabilitation of stroke patients. Abstracts 2014. *Brain Injury* 2014; 28(5–6): 517–878, <https://doi.org/10.3109/02699052.2014.892379>.

82. Chen Y.P., Garcia-Vergara S., Howard A.M. Effect of a home-based virtual reality intervention for children with cerebral palsy using super pop VR evaluation metrics: a feasibility study. *Rehabil Res Pract* 2015; 2015: 812348, <https://doi.org/10.1155/2015/812348>.

83. Green D., Wilson P.H. Use of virtual reality in rehabilitation of movement in children with hemiplegia — a multiple case study evaluation. *Disabil Rehabil* 2012; 34(7): 593–604, <https://doi.org/10.3109/09638288.2011.613520>.

84. Ongvisatepaiboon K., Chan J.H., Vanijja V. Smartphone-based tele-rehabilitation system for frozen shoulder using a machine learning approach. In: *2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*. IEEE; 2016, <https://doi.org/10.1109/ssci.2015.120>.

85. Николенко Н., Гончарова О.В., Артемьева С.Б., Ачкасов Е.Е., Литвинова Е.Б. Игровая система виртуальной реальности в реабилитации детей с прогрессирующими мышечными дистрофиями. Спортивная медицина: наука и практика 2014; 4: 90–97. Nikolenko N., Goncharova O.V., Artemyeva S.B., Achkasov E.E., Litvinova E.B. Use of virtual reality game systems in rehabilitation of children with progressive muscular dystrophies. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika* 2014; 4: 90–97.

86. Rahman Y.A., Hoque M.M., Zinnah K.I., Bokhary I.M. Helping-hand: a data glove technology for rehabilitation of monoplegia patients. In: *9th International Forum on Strategic*

*Technology (IFOST)*. IEEE; 2014; p. 199–204, <https://doi.org/10.1109/ifost.2014.6991104>.

87. Roosink M., Mercier C. Virtual feedback for motor and pain rehabilitation after spinal cord injury. *Spinal Cord* 2014; 52(12): 860–866, <https://doi.org/10.1038/sc.2014.160>.

88. Pozeg P., Palluel E., Ronchi R., Solca M., Al-Khoudairy A.W., Jordan X., Kassouha A., Blanck O. Virtual reality improves embodiment and neuropathic pain caused by spinal cord injury. *Neurology* 2017; 89(18): 1894–1903, <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000004585>.

89. Roosink M., Robitaille N., Jackson P.L., Bouyer L.J., Mercier C. Interactive virtual feedback improves gait motor imagery after spinal cord injury: an exploratory study. *Restor Neurol Neurosci* 2016; 34(2): 227–235, <https://doi.org/10.3233/rnn-150563>.

90. Villiger M., Bohli D., Kiper D., Pyk P., Spillmann J., Meilich B., Curt A., Hepp-Reymond M.C., Hotz-Boendermaker S., Eng K. Virtual reality-augmented neurorehabilitation improves motor function and reduces neuropathic pain in patients with incomplete spinal cord injury. *Neurorehabil Neural Repair* 2013; 27(8): 675–683, <https://doi.org/10.1177/1545968313490999>.

91. Mao Y., Chen P., Li L., Huang D. Virtual reality training improves balance function. *Neural Regen Res* 2014; 9(17): 1628–1634, <https://doi.org/10.4103/1673-5374.141795>.

92. Nas K., Yazmalar L., Şah V., Aydin A., Öneş K. Rehabilitation of spinal cord injury. *World J Orthop* 2015; 6(1): 8–16, <https://doi.org/10.5312/wjo.v6.i1.8>.

93. Rammo R., Schwab J.M. Comment: is virtual reality a useful adjunct to rehabilitation after spinal cord injury? *Neurology* 2017; 89(18): 1902, <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000004607>.

94. Sung W.H., Chiu T.Y., Tsai W.W., Cheng H., Chen J.J. The effect of virtual reality-enhanced driving protocol in patients following spinal cord injury. *J Chin Med Assoc* 2012; 75(11): 600–605, <https://doi.org/10.1016/j.jcma.2012.08.004>.

95. Wright W.G., McDevitt J., Appiah-Kubi K.O. A portable virtual reality balance device to assess mild traumatic brain injury symptoms: a pilot validation study. In: *International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. IEEE; 2015, <https://doi.org/10.1109/icvr.2015.7358591>.

96. Levin M.F., Weiss P.L., Keshner E.A. Emergence of virtual reality as a tool for upper limb rehabilitation: incorporation of motor control and motor learning principles. *Phys Ther* 2015; 95(3): 415–425, <https://doi.org/10.2522/ptj.20130579>.

97. Levin M., Magdalon E.C., Michaelsen S.M., Quevedo A. Quality of grasping and the role of haptics in a 3D immersive virtual reality environment in individuals with stroke. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2015; 23(6): 1047–1055, <https://doi.org/10.1109/tnsre.2014.2387412>.

98. Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyeva S.A., Velikova S.D. Brain-computer interface and neurofeedback technologies: current state, problems and clinical prospects (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2017; 9(1): 175–184, <https://doi.org/10.17691/stm2017.9.1.22>.

99. Lee M., Suh D., Son J., Kim J., Eun S.D., Yoon B.C. Patient perspectives on virtual reality-based rehabilitation after knee surgery: importance of level of difficulty. *J Rehabil Res Dev* 2016; 53(2): 239–252, <https://doi.org/10.1682/jrrd.2014.07.0164>.

100. Lee S.H., Yeh S.C., Chan R.C., Chen S., Yang G., Zheng L.R. Motor ingredients derived from a wearable

sensor-based virtual reality system for frozen shoulder rehabilitation. *Biomed Res Int* 2016; 2016: 7075464, <https://doi.org/10.1155/2016/7075464>.

**101.** Gokeler A., Bisschop M., Myer G.D., Benjaminse A., Dijkstra P.U., van Keeken H.G., van Raay J.J., Burgerhof J.G., Otten E. Immersive virtual reality improves movement patterns in patients after ACL reconstruction: implications for enhanced criteria based return-to-sport rehabilitation. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2016; 24(7): 2280–2286, <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3374-x>.

**102.** Muñoz J.E., Paulino T., Vasanth H., Baras K.

PhysioVR: a novel mobile virtual reality framework for physiological computing. In: *IEEE 18th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*. IEEE; 2016, <https://doi.org/10.1109/healthcom.2016.7749512>.

**103.** Muñoz J.E., Gouveia E.R., Cameirão M., Bermudez I., Badia S. The biocybernetic loop engine: an integrated tool for creating physiologically adaptive videogames. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Physiological Computing Systems*. Madrid, Spain; 2017; p. 45–54, <https://doi.org/10.5220/0006429800450054>.