

Виртуальная реальность в медицинской реабилитации

С.Г. Щербак^{1, 2}, Д.А. Вологжанин^{1, 2}, С.В. Макаренко^{1, 2}, А.С. Голота², Т.А. Камилова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

² Городская больница № 40 Курортного административного района, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Пациентам с двигательными и/или когнитивными расстройствами, перенёсшим инсульт, травму головного или спинного мозга, пациентам с хроническими болевыми синдромами, нейродегенеративными заболеваниями и неврологическими последствиями тяжёлой формы COVID-19 не всегда и недостаточно эффективно помогают фармакотерапия и традиционные методы реабилитации. Одним из инновационных терапевтических подходов для восстановления утраченных функций является вмешательство с использованием виртуальной реальности — комбинированной интерактивной технологии, которая создаёт виртуальный мир посредством компьютерного моделирования, обеспечивает мультисенсорную стимуляцию у пациентов, активирует восстановительные нейронные механизмы и оказывает анальгезирующий эффект. Использование виртуальной реальности в неврологии возросло за последние годы, продемонстрировав её эффективность в улучшении как двигательных, так и когнитивных результатов лечения широкого спектра неврологических и нейропсихологических дисфункций за счёт нейропластичности и нейрогенеза в повреждённых областях мозга. Реабилитация на основе виртуальной реальности применяется либо отдельно, либо в сочетании с другими формами терапии. Наиболее эффективно комбинированное лечение, включающее в себя лечебную физкультуру, физиотерапию, психологическое консультирование, стандартную когнитивную тренировку и упражнения с применением иммерсивной виртуальной реальности, создающей ощущение присутствия в трёхмерной цифровой среде, которая позволяет пользователю погружаться в виртуальную среду и натуралистически взаимодействовать с виртуальными объектами с помощью головных дисплеев и датчиков мониторинга тела. Согласно результатам систематических обзоров и метаанализов, у многих или большинства пациентов в зависимости от исходного состояния наблюдается повышение объёма произвольных движений, улучшение равновесия, когнитивных функций, настроения и качества жизни, снижение тревожности и интенсивности боли. Таким образом, применение терапии на основе виртуальной реальности является перспективным подходом в реабилитации пациентов с неврологической симптоматикой. Неврологическая реабилитация на основе виртуальной реальности позволяет индивидуально определить сложность и интенсивность упражнений, повысив комплаентность пациентов за счёт геймификации (игрофикации). Тем не менее необходимы дальнейшие исследования для стандартизации тестируемых методов виртуальной реальности, уточнения критериев включения/невключения пациентов, участвующих в клинических исследованиях, а также для оптимизации протоколов и изучения долгосрочных эффектов.

Ключевые слова: виртуальная реальность; реабилитация; неврологическое расстройство; когнитивное расстройство; инсульт; травма головного мозга; травма спинного мозга; хронический болевой синдром; двигательные функции; когнитивные функции.

Как цитировать:

Щербак С.Г., Вологжанин Д.А., Макаренко С.В., Голота А.С., Камилова Т.А. Виртуальная реальность в медицинской реабилитации // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2025. Т. 7, № 2. С. ??-??. DOI: 10.36425/rehab677338 EDN: QXFKLM

DOI: <https://doi.org/10.36425/rehab677338>

EDN: QXFKLM

Virtual Reality in Medical Rehabilitation

Sergey G. Scherbak^{1, 2}, Dmitry A. Vologzhanin^{1, 2}, Stanislav V. Makarenko^{1, 2}, Aleksandr S. Golota², Tatyana A. Kamilova²

¹ Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;

² Saint-Petersburg City Hospital № 40, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Patients with motor and/or cognitive disorders, a history of stroke or head/spinal cord injury, chronic pain, neurodegenerative diseases, or neurological complications of severe COVID-19 may not benefit from pharmacotherapy or traditional rehabilitation. Virtual reality is an innovative therapeutic approach that restores lost functions. This interactive technology uses computer modeling to create a virtual world. Virtual reality provides multisensory stimulation, activates restorative neural mechanisms, and produces an analgesic effect. In recent years, virtual reality has become more prevalent in neurology. It improves motor and cognitive outcomes in patients with various neurological and neuropsychological dysfunctions. These improvements are the result of neuroplasticity and neurogenesis in brain lesions. Virtual reality-based rehabilitation can be used alone or in combination with other treatment options. The most effective treatment combines exercise therapy, physical therapy, psychological counseling, standard cognitive training, and training with immersive virtual reality technology. This technology creates a sense of presence in a three-dimensional digital environment. With head-mounted displays and body monitoring sensors, users can interact naturally with virtual objects. Systematic reviews and meta-analyses have shown that depending on the initial condition, most patients demonstrate improvement in voluntary range of motion, balance, cognitive function, mood, quality of life, anxiety, and pain. Therefore, virtual reality-based therapy is a promising rehabilitation option for patients with neurological symptoms. Virtual reality-based neurological rehabilitation allows for the personalized selection of exercise complexity and intensity, thereby increasing patient compliance through gamification. However, further research is needed to standardize virtual reality-based modalities, clarify inclusion and exclusion criteria for clinical trials, optimize protocols, and evaluate long-term effects.

Keywords: virtual reality; rehabilitation; neurological disorder; cognitive disorder; stroke; brain injury; spinal cord injury; chronic pain syndrome; motor functions; cognitive functions.

To cite this article:

Scherbak SG, Vologzhanin DA, Makarenko SV, Golota AS, Kamilova TA. Virtual Reality in Medical Rehabilitation. *Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2025;7(2):??-??. DOI: 10.36425/rehab677338 EDN: QXFKLM

Submitted: 19.03.2025

Accepted: 26.05.2025

Published online: ???.?.2025

Список сокращений

ВР — виртуальная реальность

иВР/ниВР — иммерсивная/неиммерсивная
виртуальная реальность

РКИ — рандомизированное контролируемое
исследование

ПТСР — посттравматическое стрессовое расстройство

ТМС — транскраниальная магнитная стимуляция

ТСКК — терапия соматокогнитивной координации

ТСМ — травма спинного мозга

IVRMT (immersive virtual reality mirror therapy) —
метод реабилитации, сочетающий технологии
виртуальной реальности и зеркальную терапию

VRRS (Virtual Reality Rehabilitation System)
от Khymeia — электронная система для удалённой
реабилитации когнитивных и моторных функций

ВВЕДЕНИЕ

Виртуальная реальность (ВР) — искусственный мир, созданный средствами информационных технологий и способный воздействовать на человека через органы чувств. Виртуальная реальность — быстро развивающаяся перспективная цифровая технология лечения и/или реабилитации пациентов с различными заболеваниями, расстройствами и травмами, которая создаёт «продвинутую форму интерфейса пользователь-компьютер» с помощью компьютерного программного обеспечения [1, 2]. Технология ВР включает в себя моделирование и взаимодействие с виртуальными объектами в реальном времени с помощью множественных сенсорных модальностей [3]. Виртуальная реальность может быть неиммерсивной (ниВР), полностью иммерсивной (иВР) или полуиммерсивной в зависимости от степени погружения.

Прилагательное «иммерсивный» в отношении ВР является общепринятым. Корпорация Google на запрос «иммерсивная виртуальная реальность» выдаёт более 1 млн результатов (дата обращения: 8 мая 2025 года).

Неиммерсивная ВР позволяет пользователям одновременно взаимодействовать с виртуальным и физическим миром при просмотре видео на экране телевизора или дисплея компьютера. Низкая стоимость, лёгкая доступность и незначительный уровень побочных эффектов делают эту форму ВР-технологии популярной в реабилитации. Полуиммерсивная ВР позволяет пользователям взаимодействовать с виртуальной средой через очень большой экран, обеспечивая некоторую степень частичного погружения без ущерба для способности воспринимать реальный мир. Иммерсивная (погружающая) ВР — трёхмерная компьютерная симуляция, которая с помощью специализированного электронного оборудования позволяет пользователям погрузиться в виртуальную среду и обеспечивает реалистичное взаимодействие человека с визуальными эффектами и звуками реальной среды [4].

Google на запрос «войти в виртуальную среду» выдаёт более 9 млн результатов (дата обращения: 8 мая 2025 года).

Технология иВР создаёт виртуальный цифровой мир посредством компьютерного моделирования и обеспечивает сложную, реалистичную и немедленную обратную связь с использованием программного обеспечения и аппаратных устройств (наушников, шлемов, очков, перчаток, жилетов и т.д.), чтобы дать пользователю ощущение погружения [5].

Устройства ниВР используются для проецирования виртуальных сред на экран и позволяют взаимодействовать с объектами с помощью джойстика или клавиатуры. Для полного погружения пользователя в трёхмерный виртуальный мир технология иВР включает в себя использование программного обеспечения и головных дисплеев (head-mounted displays, HMD), обеспечивающих обзор виртуальной среды на 360°. Датчики отслеживания движения и устройства прямого ввода данных позволяют пользователю осматриваться и естественным образом взаимодействовать с виртуальной средой. Создаваемые в иВР виртуальные среды пациент воспринимает как реальные (погружение), ощущая себя частью этого мира и взаимодействуя со всеми элементами в нём с помощью ручных контроллеров или собственных рук (присутствие) [6].

Виртуальная реальность является эффективным инструментом, позволяющим вовлечь широкий круг пациентов, нуждающихся в проведении реабилитационных мероприятий, за счёт увлекательности самого процесса погружения в искусственный мир.

В последние годы технология ВР всё шире используется в неврологической, нейропсихологической, педиатрической, ортопедической и других областях реабилитации. Мультисенсорная терапия на основе ВР за счёт геймификации (использование игровых элементов в любом неигровом контексте) повышает мотивацию и вовлечённость пациента в процесс физической реабилитации, уменьшая субъективное восприятие физической нагрузки, монотонность и скуку традиционного реабилитационного процесса [7]. Кроме того, устройства ВР и видеоигры позволяют регулировать интенсивность и сложность упражнений

для каждого пациента, что позволяет максимально индивидуализировать и эмоционально окрасить обучение функциональным движениям в безопасной виртуальной среде, в том числе при использовании телекоммуникационных технологий при дистанционно контролируемой реабилитации [6].

Использование технологии ВР требует осторожности из-за риска таких потенциальных нежелательных эффектов, как кибернетическая болезнь [8], которая характеризуется симптомами укачивания, включая тошноту, головокружение, дезориентацию, головную боль, потливость и общий дискомфорт [3]. В этой связи безопасность определяется как отсутствие нежелательных явлений, связанных с ВР-терапией, а переносимость — как способность пациентов завершать назначенные сеансы без прерывания из-за дискомфорта или других проблем, связанных с ВР [9].

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В НЕВРОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Неврологические расстройства, такие как последствия инсульта и хронические болевые синдромы, оказывают глубокое влияние на независимость и качество жизни, особенно когда нарушаются функции рук. Хотя традиционная физиотерапия обеспечивает некоторое восстановление нейронов, сохраняется потребность в поиске новых эффективных технологий реабилитации. Технология ВР может служить инструментом для изучения, диагностики и лечения неврологических и нейropsychологических расстройств. Предполагается, что мультисенсорная обратная связь может повысить нейронную пластичность, лежащую в основе неврологического и нейropsychологического восстановления. Навыки, приобретённые во время ВР-терапии, могут переноситься в реальную жизнь [1]. Сочетание аппаратного и программного обеспечения позволяет пользователям взаимодействовать с виртуальными объектами и средами, как если бы они были материальными (реальными) объектами. В контексте реабилитации игровая природа ВР делает опыт пациента более приятным и способствует вовлечению в виртуальные терапевтические упражнения, специально разработанные для неврологического восстановления [3].

Двигательные расстройства у пациентов, переживших инсульт

Визуальная, слуховая и кинестетическая мультисенсорная природа иВР позволяет пациентам полностью погрузиться в трёхмерную виртуальную среду, в которой человек может испытать изменённую версию реальности — феномен, который используется в реабилитации пациентов, перенёсших инсульт [10]. Интерактивная иВР

предоставляет пациентам, перенёсшим инсульт, многоканальный сенсорный ввод через такие устройства, как контроллеры, перчатки и экзоскелеты способствует повышению нейронной функциональной пластичности, может значительно улучшить функцию верхних конечностей и функцию равновесия [2].

В сообщении R.B. Bailey [10] приведено описание клинического случая о нарушении функции правой руки у 75-летнего мужчины после ишемического инсульта. После лечения в больнице и реабилитационном центре пациент мог нормально ходить, но у него сохранялись афазия и контрактуры суставов правой руки с нарушением моторики (сохранилось только активное движение пальцев). Спустя 7 лет после инсульта он снова обратился за помощью. Эрготерапевт разработал комплексную программу упражнений в ВР для управления мышечным тонусом с помощью приложения на гарнитуре пациента, в котором пациент взглядом отслеживает движения летящего дракона, что способствует растяжению шейного отдела позвоночника и увеличению диапазона движений, а также компьютерные игры Balloon Blast, в которой надо лопать цветные шарики смахивающими движениями для увеличения диапазона движений плеча, и Color Match — для движений верхних конечностей, имитирующих боксёрские, чтобы включить в действия когнитивный компонент. После каждого сеанса пациент мог визуализировать результат и наблюдать изменения. В дополнение к ежедневной ВР-терапии пациент выполнял физические упражнения по 5 дней в неделю, включая упражнения на перенос веса тела на правую руку в положении на четвереньках и выполнение активных вспомогательных движений в правой верхней конечности. Этот план постоянно обновлялся на протяжении всей ВР-терапии, чтобы игры в цифровой среде оставались сложными и способствовали прогрессу. К концу лечения пациент выполнял упражнения с сопротивлением для правой руки и кисти с весом около 1 кг, продемонстрировав улучшения во всех измеряемых областях: увеличение скорости движения правой рукой в ответ на стимул, увеличение диапазона сгибания плеча на 10° и улучшение качества движения (ускорение-замедление во время движения) на 8,5%. Представленный в работе случай свидетельствует о том, что комбинация ВР и традиционной терапии может существенно увеличить силу и подвижность правой верхней конечности, улучшив, таким образом, качество повседневной жизни пациента даже спустя годы после инсульта [10].

Вмешательства на основе ВР осуществляются с помощью различных систем (оборудования и программного обеспечения). Как с клинической, так и с исследовательской точки зрения, важно рассмотреть использование и эффективность конкретной системы ВР. Так, L. Macchitella и соавт. [1] провели описательный обзор исследований, в которых использовалась система VR Khymeia — Virtual Reality Rehabilitation System (VRRS),

реализующая нейropsychологические и неврологические реабилитационные процедуры на основе иBP или ниBP. VRRS предоставляет как нейромоторные, так и когнитивные модули для различных реабилитационных задач. Тренировки с VRRS можно сочетать с физиотерапией и/или другим стандартным лечением для улучшения двигательных функций, в том числе в отделении интенсивной терапии. Мультимодальное лечение как сочетание различных стратегий реабилитации, включая традиционное лечение (физиотерапию и трудотерапию), роботизированное обучение и нейромоторные тренировки на основе VRRS, может обеспечить больше преимуществ, чем только традиционное лечение, в улучшении двигательных функций у пациентов с неврологическими нарушениями, включая инсульт и нейродегенеративные расстройства.

Использование VRRS уменьшает двигательную дисфункцию паретичной верхней конечности у пациентов, перенёсших инсульт, тогда как в моторике нижней паретичной конечности не было обнаружено никаких изменений [11]. Комбинированное с физиотерапией лечение VRRS продемонстрировало более значительное улучшение двигательных функций верхних или нижних конечностей, а также снижение интенсивности боли, улучшение качества жизни и показателей функциональной независимости у пациентов, перенёсших инсульт, по сравнению с традиционным лечением [12]. Пациенты выполняли виртуальные сенсомоторные задания, направленные на стимуляцию мышечной силы, диапазона движений суставов, устойчивости позы, реакций равновесия и движений таза. Каждый сеанс состоял из различных типов двигательных заданий, включая манипулирование объектами в виртуальном сценарии, статическую тренировку равновесия, мобилизацию лёжа на спине, вспомогательные и активные упражнения для контроля туловища и равновесия в положении сидя, упражнения на смещение веса и шагание в статическом и динамическом равновесии с использованием стабилметрической и проприоцептивной/динамической платформы [1].

Расстройство равновесия затрагивает до 70–80% пациентов, перенёсших инсульт. Процесс функционального восстановления после инсульта зависит от способности мозга адаптироваться и реорганизовываться на ранних стадиях заболевания. Реабилитация играет важную роль в содействии этой адаптивности. В клинических исследованиях доказано, что новые нейрофизиологические подходы, такие как BP-терапия и повторяющаяся транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС), улучшают функцию равновесия у пациентов, перенёсших инсульт, при применении по отдельности, но потенциальные синергетические эффекты объединения BP и ТМС на функцию равновесия и нейропластичность у пациентов с инсультом остаются неопределёнными. Известно, что ТМС вызывает деполяризацию аксонов, повышает возбудимость кортикоспинальной системы, стимулирует пластичность

нейронов, усиливает синаптическую трансмиссию и реактивность нервной системы [13]. Y. Liu и соавт. [14] провели многоцентровое рандомизированное контролируемое исследование (РКИ) для оценки комбинированного воздействия BP и ТМС на восстановление равновесия и нейропластичность у постинсультных пациентов. Участники были случайным образом распределены в 4 группы: BP, ТМС, BP+ТМС и стандартная тренировка равновесия. Все группы дополнительно получали по 2 часа стандартной реабилитации ежедневно. Оценку проводили через 2 и 4 недели с помощью шкалы Берг (основной показатель) и других тестов функционального состояния, а также биомаркеров нейропластичности (нейротрофический фактор мозга BDNF, фактор роста эндотелия сосудов VEGF и др.). Авторы установили, что сочетание BP и транскраниальной ТМС демонстрирует синергетический эффект в восстановлении постинсультных нарушений, усиливая мозговой метаболизм, стимулируя экспрессию BDNF (brain-derived neurotrophic factor) и VEGF (vascular endothelial growth factor), способствуя пролиферации и дифференцировке нервных клеток и улучшая перфузию мозга. Авторы подчёркивают необходимость дальнейших исследований для оценки долгосрочных эффектов такого подхода.

Более чем в 80% случаев инсульта у пациентов наблюдаются нарушения функции верхних конечностей, включая слабость или паралич, уменьшение диапазона движений, спастичность, проблемы с координацией, сенсорные изменения и нарушение мелкой моторики [15]. Двигательная реабилитация направлена на улучшение двигательного контроля, координации и функциональных способностей путём вовлечения поражённой конечности в целенаправленные действия, такие как захват и манипулирование объектами, свободно перемещающимися в виртуальной среде, разгибание запястья или пальцев [16]. Зеркальная терапия — широко применяемый метод реабилитации с использованием статичного зеркала, в котором отражается здоровая верхняя конечность таким образом, что поражённая рука визуально заменяется её зеркальным изображением для создания визуальной иллюзии нормального движения конечности. Изображение непоражённой конечности, представленное в режиме виртуального отражения, способствует формированию у мозга иллюзии нормального функционирования поражённой конечности. Считается, что эта визуальная иллюзия после повторения действий перестраивает нейронные связи в мозге, улучшая тем самым двигательную функцию верхних конечностей и уменьшая боль у пациентов, перенёсших инсульт. Однако приверженность к зеркальной терапии со временем снижается, так как пациенты устают от простых движений, которые обычно используются в зеркальной терапии [17].

Технология зеркальной иBP привлекла внимание как перспективная технологическая инновация для реабилитации верхних конечностей после инсульта. Зеркальная

BP-терапия — вариант традиционной зеркальной терапии, при которой пациенты видят виртуальное отражение своей поражённой конечности, движущейся синхронно с фактическим движением непоражённой руки [15, 18]. Вместе с иллюзией правильного функционирования поражённой конечности мозг получает положительную обратную связь, что помогает облегчить боль, уменьшить отёк и улучшить двигательную функцию и координацию, при этом зеркальная терапия стимулирует нейропластичность мозга для реорганизации нейронных путей и реинтеграции сенсорных и двигательных функций [3]. D.B. Mekbib и соавт. [19], изучая механизм стимулирования моторной и теменной коры с использованием зеркальной иBP, обнаружили, что упражнения по отражению конечностей в иBP активируют систему зеркальных нейронов в мозге и что изменение межполушарной функциональной связанности двигательных областей коры после тренировок по зеркальному отражению конечностей в иBP значимо коррелирует с функциональным улучшением. Исследователи пришли к выводу, что упражнения в зеркальной иBP улучшают кортикальную реорганизацию с последующим улучшением двигательных функций. W.K. Chang и соавт. [20] подтвердили, что терапия с использованием зеркальной иBP повышает нейропластичность в двигательной коре посредством нейронной реорганизации и адаптации после травмы, что проявляется восстановлением двигательных функций у пациентов, перенёсших инсульт.

G. Gebreheat и соавт. [17] опубликовали обзор применения зеркальной терапии с эффектом погружения в BP (immersive virtual reality mirror therapy, IVRMT) для реабилитации функции руки после инсульта, в котором они утверждают, что IVRMT является безопасным методом восстановления моторики верхних конечностей после инсульта. Во всех включённых в обзор исследованиях IVRMT реализована с использованием программного обеспечения (или приложений) и очков BP, которые позволяют скоординированно дублировать движения здоровой руки движениями поражённой руки: таким образом пациенты погружаются в зеркальную иллюзию двусторонней активности и активного использования поражённой конечности. IVRMT включает в себя упражнения, функциональную деятельность и игровые виртуальные задачи. Игровые тренировки как мотивирующие и вовлекающие участников доминировали во всех протоколах, однако клинические протоколы вмешательства различались во всех исследованиях, что препятствует проведению любых прямых сравнений.

Хотя авторы всех исследований, проанализированных G. Gebreheat и соавт. [17], пришли к выводу, что IVRMT является хорошо переносимым и безопасным вмешательством для пациентов с постинсультным парезом верхних конечностей, в некоторых сообщениях описаны симптомы киберболезни, вызванные встроенной в методику IVRMT

зеркальной терапии и способные влиять на терапевтическую эффективность занятий [15, 21]. В целом для пациентов, переживших инсульт, по сравнению с людьми того же возраста без инсульта, участие в виртуальных играх оказалось более трудоёмким, при этом степень сложности закономерно соответствовала тяжести функционального расстройства. Повседневное разочарование от осознания невозможности использовать поражённую конечность подавляет веру в успешность восстановления в ней движений. В этой связи стоит задача разработки новых эффективных технологий для улучшения результатов восстановления после инсульта. Тем не менее в большинстве проанализированных исследований подтверждается достигнутый прогресс в восстановлении функции верхних конечностей после зеркальной терапии с погружением в BP. Только в одном исследовании авторы пришли к выводу, что IVRMT эффективнее традиционной зеркальной терапии [21]. Для окончательных выводов относительно преимуществ этого типа терапии в реабилитации верхних конечностей необходимо провести методологически надёжные сравнительные исследования, чтобы разработать единый стандартизированный протокол IVRMT.

Наиболее популярным вариантом тренировок в BP с помощью головных дисплеев были ручные контроллеры для отслеживания положения рук в пространстве, однако удержание ручного контроллера может быть сложным или даже невозможным для людей с нарушениями моторики рук. Чтобы решить эту проблему, обычно используются ленты (ремни) для фиксации контроллера на руках участников или отслеживание положения рук (пальцев) с помощью инфракрасной камеры Leap Motion (Ultraleap, США). С.Р. Камт и соавт. [16] пользовались безмаркерным отслеживанием, включённым в систему Oculus Quest 2, которое устраняет необходимость держать или носить контроллеры и позволяет пациенту двигаться без ограничений.

Почти во всех исследованиях (12 из 13), посвящённых иBP-реабилитации верхних конечностей, включённых в обзор M. Ceradini и соавт. [3], отмечается улучшение по меньшей мере одного из количественных клинических показателей и/или облегчение боли у пациентов с различными типами неврологических расстройств. Среди отмеченных преимуществ продемонстрировано улучшение физических (сила и объём движений, улучшение координации), функциональных (повышение независимости в повседневной деятельности) и когнитивных (улучшение внимания, памяти и исполнительных функций) показателей. Пациенты с болевыми синдромами сообщали о значительном облегчении боли. Среди факторов, определяющих привлекательность иBP для восстановления функции верхних конечностей, наиболее часто упоминаются простота использования, повышенная вовлечённость пациентов. Полезным для пациентов может быть отвлечение от больничной

обстановки на время процедуры. Поскольку больничная рутина не всегда оказывает положительное влияние на эффективность лечения, иммерсивная и интерактивная природа ВР-терапии, приносящая положительные эмоции, мотивирует пациентов прилагать больше усилий во время реабилитационных упражнений. Кроме того, ВР подходит для телереабилитации, когда пациенты выполняют упражнения, не выходя из дома, при необходимости следуя голосовым инструкциям терапевта. Телереабилитация сокращает или устраняет необходимость физического присутствия пациентов в клинике, уменьшая неудобства и расходы. Это особенно важно для пациентов с серьёзным двигательным дефицитом. Объективные показатели результативности восстановления дают врачам полную картину состояния пациентов и позволяют персонализировать варианты вмешательства, что в конечном итоге повышает их эффективность. Это обеспечивает пациентоориентированный подход, ускоряющий функциональное восстановление.

Виртуальная реальность является эффективной дополнительной терапией для восстановления вербальной коммуникации у пациентов с афазией после ишемического инсульта. С помощью реабилитационного устройства BTS-Nirvana, которое использует полуиммерсивную ВР в лечении хронической постинсультной афазии, удалось достичь большего улучшения, чем в контрольной группе, проходившей традиционную речевую и когнитивную тренировку. Стойкое улучшение сохраняется и через полгода наблюдения [22]. Разработано специализированное мобильное приложение ВР для реабилитации речи у пациентов с афазией после инсульта [23].

Повреждение спинного мозга

Травма спинного мозга (ТСМ) может привести к сенсорной, двигательной, мочеполовой и кишечной дисфункции ниже уровня повреждения. Пациенты с ТСМ могут испытывать множество других нарушений, таких как спастичность, боль и эмоциональные расстройства, которые серьёзно влияют на способность выполнять повседневные действия и снижают качество жизни. Основным методом лечения пациентов с ТСМ является реабилитационная тренировка для восстановления двигательных функций.

L. Wang и соавт. [2] провели систематический обзор с метаанализом 16 исследований, в том числе 5 РКИ, чтобы изучить общий эффект от любых вмешательств на основе ВР на функциональные показатели, оценить влияние различной продолжительности вмешательства и сравнить изменения у пациентов с ТСМ в группах ВР и традиционной реабилитации. Индекс повседневной независимости пациента с повреждением спинного мозга (spinal cord independence measure, SCIM), разработанный для пациентов с ТСМ, оказался очень чувствительным к функциональным изменениям во время реабилитации,

что делает его важным инструментом оценки. Метаанализ публикаций результатов исследования пациентов по методике SCIM в баллах не показал значимой разницы до и после ВР-тренировок, а также между ВР и традиционными реабилитационными методами. В то же время метаанализ выявил более значительные улучшения двигательной функции рук в тесте «Коробка и кубики» (функциональный тест, используемый в реабилитационной медицине для оценки ловкости руки) по сравнению с традиционной реабилитацией. Поднятие и перемещение кубика в ящик требуют скоординированных движений всех анатомических отделов руки, и тренировка с ВР может оказаться более целенаправленной и эффективной в выполнении таких координационных задач, чем традиционная реабилитация, с точки зрения мелкой моторики и координации. Однако в целях оптимизации тренировок с ВР необходимо изучить, как различные типы ВР влияют на функцию руки у пациентов с ТСМ.

Индекс ходьбы пациента с повреждением спинного мозга (walking index for spinal cord injury, WISCI) является надёжным показателем такого фундаментального аспекта ТСМ, как способность ходить. В то время как общий анализ показывает значимое улучшение показателей WISCI после тренировки с ВР, анализ подгрупп не выявил влияния длительности одного вмешательства (<45 или ≥45 минут), т.е. повышение индекса WISCI, наблюдаемое в общем анализе, не связано с продолжительностью отдельных сеансов. Возможно, другие факторы, такие как совокупное время вмешательства или тип используемых задач ВР, играют более важную роль в улучшении способности ходить. Таким образом, хотя ВР продемонстрировала потенциальную пользу в улучшении функции ходьбы, существует необходимость оптимизации протоколов вмешательства ВР для пациентов с ТСМ. Исследование также показывает отсутствие улучшения показателей в тесте вставания со стула и ходьбы на время после тренировки ВР. Возможно, это связано с тем, что данный тест фокусируется на оценке общего динамического баланса, скорости ходьбы и способности поворачиваться — навыков более высокого уровня, чем просто хождение по прямой. Достижение значительных улучшений в этой области может потребовать более длительной или более интенсивной тренировки, которую текущая сессия ВР, по-видимому, не обеспечивает в достаточной степени.

Таким образом, всесторонний метаанализ показывает, что ВР-вмешательства не приводят к значительным улучшениям двигательной функции нижних конечностей у пациентов с ТСМ. Несмотря на очевидные преимущества, такие как мотивационное подкрепление и повышенная вовлечённость пациента, результаты свидетельствуют об ограниченном влиянии ВР на улучшение двигательной функции. Возможно, неутешительные результаты ВР-вмешательств связаны с используемым оборудованием. Примечательно, что все исследования

двигательной функции нижних конечностей использовали ниВР-платформы, которые в отличие от иВР-технологии не повышают концентрацию внимания пациента. Следовательно, иммерсивные методы ВР могут оказаться перспективными в улучшении двигательной функции нижних конечностей у пациентов с ТСМ. На эффективность реабилитации могут влиять и другие факторы, присущие тренировкам с упражнениями, такие как характер задач в каждой программе ВР, в связи с чем необходимо определение оптимальной структуры ВР, адаптированной к потребностям реабилитации конкретного параметра движения пациента с ТСМ [2].

Данный анализ продемонстрировал значительное улучшение функции равновесия у пациентов с ТСМ после вмешательств с ВР. Хотя большинство пациентов отдаёт приоритет способности ходить как конечной цели реабилитации после ТСМ, функция равновесия играет решающую роль в облегчении ходьбы. Тест на предел устойчивости (равновесие в условиях относительно фиксированного центра тяжести) и шкала баланса Берг (равновесие в условиях постоянно смещающегося центра тяжести) служат надёжным показателем функции равновесия у пациентов. В исследовании [2] наблюдалось улучшение обоих показателей, однако следует отметить, что функция баланса заметно улучшилась при движении только во фронтальной, но не сагиттальной плоскости.

Для пациентов с ТСМ крайне важно начинать тренировки сразу после стабилизации состояния пациента. Достижение улучшений в этой области требует длительной реабилитации с большей продолжительностью сеансов. В настоящее время программы ВР-реабилитации сосредоточены в основном на определённых функциях с меньшим вниманием к активностям повседневной жизни, которые являются основной целью реабилитации. Следовательно, необходимо разрабатывать программы, адаптированные к потребностям пациентов с ТСМ в повседневной жизни. Пациенты с ТСМ демонстрируют более низкий уровень принятия вмешательств с ВР по сравнению с традиционными методами реабилитации. ВР вызывает у некоторых пациентов побочные реакции, характерные для киберболезни. Будущие исследования должны уделять первоочередное внимание оценке частоты и характера побочных эффектов, испытываемых пациентами [2].

Черепно-мозговая травма

R. De Luca и соавт. [24] установили, что нейропсихологическая тренировка процесса внимания, реализованная с помощью VRRS, эффективнее, чем то же лечение, основанное на занятиях с бумагой и карандашом, у пациентов с черепно-мозговой травмой. В следующем исследовании эти же авторы [25] оценили эффективность когнитивной тренировки с VRRS в улучшении исполнительных функций пациентов с черепно-мозговой травмой. Пациенты

экспериментальной группы прошли VRRS-тренировку исполнительных функций, в то время как контрольной группе была предоставлена традиционная, когнитивная терапия, направленная на тренировку временной и пространственной/топографической ориентации, внимания, памяти и логических ассоциаций. Сравнение оценок до и после лечения показало улучшение всех изученных показателей в экспериментальной группе, в то время как в контрольной группе улучшились только некоторые показатели. Исследования R. De Luca и соавт. [24, 25] показывают, что пациенты с черепно-мозговой травмой могут получить пользу от когнитивной терапии с использованием ВР.

Многоцентровое РКИ с аналогичным дизайном также оценило эффективность когнитивной тренировки на основе неиммерсивной VRRS, реализованной путём телекоммуникации, в улучшении глобального когнитивного функционирования и исполнительных функций у пациентов с тяжёлой черепно-мозговой травмой [26]. Нейропсихологические эффекты двигательной терапии с помощью системы теле-VRRS по видеоконференцсвязи сравнивались с эффектами традиционной очной двигательной реабилитации на дому у пациентов с тяжёлой черепно-мозговой травмой, проводимой физиотерапевтом или логопедом. Глобальное функциональное и общее состояние здоровья улучшилось как в группе теленейро-VRRS, так и контрольной группе. В отношении спастичности аналогичного эффекта не отмечено, однако только в группе теленейро-VRRS статистически значимо улучшились двигательные (уровень функциональной независимости) и когнитивные (лобные функции/исполнительные способности) функции, а также показатели психологического благополучия и качества жизни, снизились симптомы тревожности и депрессии. Результаты свидетельствуют о том, что VRRS является подходящим альтернативным или дополнительным инструментом для улучшения двигательных функций и уменьшения поведенческих расстройств у пациентов с черепно-мозговой травмой.

Рассеянный склероз

Рассеянный склероз — хроническое аутоиммунное заболевание, которое поражает миелиновые оболочки головного и спинного мозга с нейропсихиатрической симптоматикой; наиболее распространёнными симптомами являются тревога, депрессия и когнитивные нарушения. Вероятность когнитивных нарушений (памяти, исполнительных функций, внимания и скорости обработки информации) у пациентов с рассеянным склерозом составляет 45–70%. Депрессия, вызванная рассеянным склерозом, вдвое повышает риск суицида, поэтому крайне важно вмешаться на ранней стадии заболевания и свести к минимуму многочисленные последствия. Учитывая когнитивные и эмоциональные аспекты рассеянного склероза, необходимо дальнейшее совершенствование методов терапии [4].

Систематический обзор с метаанализом J. Zhang и соавт. [4] является первым в области изучения эффективности реабилитации на основе ВР в отношении когнитивных функций и настроения у пациентов с клиническим диагнозом рассеянного склероза, независимо от пола и длительности заболевания. Монреальская когнитивная оценка (Montreal Cognitive Assessment, MoCA), тесты на пространственное запоминание (Spatial Recall Test, SPART), на немедленное вспоминание и отсроченное вспоминание показали улучшение по сравнению с контрольной группой с точки зрения глобальной когнитивной функции и зрительно-пространственных способностей. Не выявлено существенных различий в скорости обработки, внимании, рабочей памяти и депрессии. Индексы MoCA и SPART показали, что 8-недельное реабилитационное вмешательство на основе ВР оказалось эффективнее в улучшении глобальной когнитивной функции, немедленного и отсроченного вспоминания, зрительно-пространственных способностей у пациентов с рассеянным склерозом, чем ранее применявшиеся методики. Эффект был достигнут за счёт повышения мотивации и вовлечённости пациента в лечение.

Результаты метаанализа 10 РКИ [4] показывают, что реабилитация на основе ВР (иВР, ниВР или полумерсивная ВР, применяемые отдельно либо в сочетании с другими формами терапии) может улучшить настроение и когнитивные способности пациентов с рассеянным склерозом, в частности глобальную когнитивную функцию, немедленное и отсроченное воспроизведение, зрительно-пространственные способности, а также снизить тревожность. Однако эффективность реабилитации на основе ВР в отношении улучшения скорости обработки, внимания, рабочей памяти и депрессии не подтверждается данными, полученными другими авторами (у пациентов с лёгкими когнитивными нарушениями тренировки в ВР оказали умеренное или сильное влияние на общие когнитивные, конструктивные и двигательные функции) [27]. Расхождения с результатами исследования [27] могут быть связаны со следующими причинами. Во-первых, у пациентов с рассеянным склерозом имеются другие симптомы, такие как боль и усталость. Во-вторых, рабочая память является более широким понятием, чем кратковременная память, и включает в себя способность хранить и обрабатывать информацию, что связано со скоростью обработки и вниманием. Высокоинтенсивное, повторяющееся и ориентированное на задачу обучение является отличительной чертой ВР в связи с тем, что ВР усиливает синаптическую пластичность, смягчает влияние атрофии серого вещества и других поражений мозга на скорость обработки информации и память. Реабилитация с помощью ВР стимулирует активацию системы зеркальных нейронов у пациентов с рассеянным склерозом, что приводит к кортикальным и субкортикальным изменениям,

а также к дополнительной стимуляции синаптической реорганизации и ремиелинизации в двигательных областях мозга, улучшает равновесие и когнитивные функции [12]. Виртуальная реальность может быть эффективной мотивирующей альтернативой традиционной реабилитации. В целом ВР положительно влияет на настроение и когнитивные способности пациентов с рассеянным склерозом, независимо от того, использовалась она отдельно или в сочетании с другими терапевтическими воздействиями. Ограничением метаанализа [4] является отсутствие в большинстве включённых РКИ данных последующего наблюдения, что затрудняет определение степени стойкости результатов лечения на основе ВР, поэтому интерпретировать их следует с осторожностью. Побочные эффекты и безопасность ВР также остаются неизвестными. Чтобы определить эффективность различных ВР и оптимальные параметры ВР-лечения рассеянного склероза, необходимы более обширные комплексные многоцентровые РКИ с более длительными периодами наблюдения.

По данным исследований групп М. Goffredo [28] и С. Pagliari [29], двигательная тренировка на основе VRRS, проводимая на дому у пациента посредством телекоммуникационных технологий, эффективнее традиционного лечения без использования каких-либо технологических устройств в улучшении статического и динамического равновесия и походки, тогда как никакой разницы между вмешательствами не продемонстрировано относительно односторонней ловкости рук (измеренной с помощью теста «Коробка и кубики») у пациентов с рассеянным склерозом [28].

Необходимо рассмотреть важный аспект, который может поставить под сомнение эффективность VRRS в лечении нейропсихологических дефицитов. В некоторых случаях получены противоречивые результаты воздействия на одну и ту же когнитивную функцию. Например, одно и то же исследование обнаруживает улучшение некоторых, но не всех показателей одной и той же нейропсихологической функции (тест с построением маршрута в исследовании R. De Luca и соавт. [25]). Таким образом, несмотря на признание эффективности VRRS в нейропсихологической реабилитации в целом, противоречивые результаты, касающиеся конкретных когнитивных функций и задач, в некоторых случаях ограничивают возможность делать однозначные выводы, в связи с чем рекомендации об использовании VRRS для лечения не могут быть экстраполированы на различные группы пациентов. Необходимы РКИ для изучения и подтверждения эффективности VRRS в реабилитации определённых неврологических и нейропсихологических функций при конкретных состояниях, чтобы на основе научных доказательств рекомендовать VRRS и теле-VRRS для повышения неврологического и нейропсихологического функционирования у конкретной группы пациентов [1].

Болезнь Паркинсона

BP-технология доказала свою эффективность в когнитивной и двигательной реабилитации пациентов с болезнью Паркинсона. Система обучения по когнитивному и поведенческому восстановлению и соответствующее когнитивное приложение BP могут тренировать память таких пациентов, исполнительные функции, внимание, логическое мышление и скорость мышления, тем самым укрепляя когнитивные функции с точки зрения исполнительных и визуально-пространственных способностей [5]. Виртуальная реальность в сочетании с традиционной физиотерапией может значительно уменьшить тремор покоя, ригидность, улучшить осанку, походку и медленные движения тела [30]. Неиммерсивные игры с упражнениями в BP помогают пациентам с болезнью Паркинсона, особенно пациентам пожилого возраста, улучшить походку и равновесие [31].

При тяжёлой болезни Паркинсона контроль симптомов на поздних стадиях проблематичен. У пациентов наблюдается брадикинезия, определяемая как снижение скорости или амплитуды движений в сочетании с тремором покоя, ригидностью или обоими этими симптомами. На поздних стадиях заболевания часто присутствует постуральная нестабильность. Такие симптомы влияют на двигательные способности пациентов и качество их жизни. Фармакологическая терапия дофаминергическими препаратами (леводопа и агонисты дофамина) часто связана с долгосрочными осложнениями, такими как дискинезии и двигательные флуктуации, а также может усугубить немоторные симптомы паркинсонизма, такие как галлюцинации, когнитивные нарушения и ортостатическая гипотензия. Некоторые двигательные функции, включая походку и равновесие, обычно не отвечают на леводопу.

Глубокая стимуляция мозга доказала свою эффективность в улучшении качества жизни и уменьшении тремора, но не влияет на аксиальные расстройства, такие как застывание походки, постуральная неустойчивость, изменения осанки туловища и дизартрофония [32]. Благодаря BP-технологии появилась возможность нового подхода к реабилитации. В этой развивающейся области реабилитации М. Нага и соавт. [9] разработали новый тип вмешательства, названный терапией соматокогнитивной координации (ТСКК) для координации движений путём сосредоточения внимания на произвольном движении суставов, отличных от тех, которые предназначены для мобилизации. В трёхмесячном исследовании авторы оценивали безопасность и переносимость ТСКК с использованием иВР, а также результаты тестов для походки, функции руки, индекс оценки болезни Паркинсона и показатель функциональной независимости. Целью этих тестов была не оценка терапевтической эффективности, а обеспечение отсутствия пагубных последствий

BP-ТСКК для физических функций пациентов с прогрессирующей тяжёлой болезнью Паркинсона. Этот аспект особенно важен, учитывая уязвимость исследуемой популяции. В среде иВР авторы сосредоточились на движениях суставов за пределами предполагаемого действия, которые они называли суставной связанностью. Эта уникальная настройка BP позволяет наблюдать спутанную соматокогнитивную сеть действий, подобную спутанным нитям марионетки, что лишает её способности двигать одной частью своего тела. иВР-ТСКК проводили в сеансах по 20 минут трижды в неделю в течение 3 месяцев с упором на снижение суставной связанности во время выполнения задач. Во время ТСКК пациенты в сидячем положении попеременно дотягивались левой и правой рукой до статичных или падающих целей в виртуальном пространстве. Терапевт персонализировал задания в соответствии со способностями каждого пациента, а успешное взаимодействие подтверждалось мультисенсорной обратной связью — текстом, звуком и вибрацией. Этот метод имитирует смещение веса тела во время ходьбы и отражает стратегический подход к одновременному решению проблем походки и функций верхних конечностей у пациентов с прогрессирующей болезнью Паркинсона. Все участвующие пациенты хорошо адаптировались к BP, и никто не выбыл из-за проблем с переносимостью, не наблюдалось никаких нежелательных явлений, вызванных BP, и никакого ухудшения в результатах тестов. Все пациенты были удовлетворены своим участием в клиническом исследовании с использованием BP [9]. Таким образом, BP-ТСКК представляется хорошо переносимым вмешательством при тяжёлой форме болезни Паркинсона.

Систематический обзор с метаанализом 51 РКИ (2095 пациентов) по изучению эффективности BP-терапии с полным аудиовизуальным погружением представили С.Е. Уан и соавт. [32]. Авторы продемонстрировали, что вмешательства на основе BP могут значительно улучшить качество жизни, походку и параметры равновесия у пациентов с болезнью Паркинсона. Такие пациенты в 2 раза чаще падают и получают переломы, чем лица без болезни Паркинсона, поэтому восстановление равновесия и постуральной устойчивости имеет для них жизненно важное значение. Динамическое равновесие достигается и поддерживается посредством сложной сети сенсорных входов, включающих вестибулярные, слуховые и зрительные модальности. Эти входы интегрированы и взаимодействуют с планированием движений. Предполагается, что реабилитация в BP как глобальное вмешательство стимулирует множество чувств одновременно, и, следовательно, интегральная система улучшает равновесие. Вмешательство с BP-компонентом показало лучшие результаты в выполнении теста со вставанием со стула и ходьбой с отсчётом времени (timed up and go test, TUG) по сравнению с контролем, превзойдя

роботизированные и проприоцептивные вмешательства (такие как периферическая стимуляция) и лечебную физкультуру, значительно улучшило показатели шкалы равновесия, а также качество жизни по сравнению с контрольным вмешательством. Контролем служило то же вмешательство без ВР-компонента. По оценке двигательных результатов по шкале UPDRS (Unified Parkinson's Disease Rating Scale) все вмешательства имели схожую эффективность [32].

Таким образом, технология ВР может предоставить пациентам с болезнью Паркинсона безопасную и эффективную среду для тренировок и реабилитации. Поскольку двигательные функции могут зависеть от когнитивных способностей человека, вмешательства с ВР-компонентом, которые интегрируют двигательные и когнитивные аспекты, имеют потенциал для улучшения двигательных результатов реабилитации. Авторы считают необходимым изучить мультимодальный реабилитационный подход с использованием комбинации традиционных методов лечения (например, фармакотерапии) и технологических вмешательств. Исследования долгосрочных эффектов технологических вмешательств и их взаимодействия с традиционными методами помогут индивидуализировать лечение для различных двигательных подтипов болезни Паркинсона [32].

Хронические болевые синдромы

Хроническая боль оказывает глубокое влияние на независимость и качество жизни, особенно когда затрагивается функция верхней конечности. От хронической боли страдают 20–30% людей в мире. Хроническая мышечно-скелетная боль влияет на физическое, психологическое и социальное функционирование. Эффективный контроль боли в настоящее время считается центральным принципом медицинской помощи. Несмотря на это, боль часто не лечится, отчасти из-за опасений по поводу назначения опиоидов, которые эффективны при острой боли, но несут риск передозировки и привыкания [33]. Лечебная физкультура является хорошо известным нефармакологическим методом лечения хронической боли, оказывающим положительное влияние на интенсивность боли, физическую функцию, сон и качество жизни. Её дополнительные преимущества за счёт высвобождения эндорфинов, серотонина, дофамина и других «вознаграждающих» эндогенных химических веществ продемонстрированы у людей с хронической болью и депрессией [34]. Когда речь идёт о реабилитации пациентов, страдающих от боли, лечебная физкультура представляет для них долгий, трудный и утомительный процесс, в связи с чем необходимы новые подходы для увеличения переносимости физических упражнений, а также для повышения мотивации и удовлетворённости, поддержания психосоциального благополучия пациентов, у которых отсутствует мотивация выполнять упражнения. В этом отношении ВР

может стать полезным инструментом для смягчения терапевтических проблем.

В систематическом обзоре с метаанализом 25 РКИ с участием пациентов с хронической мышечно-скелетной болью Н.Н. Ло и соавт. [34] изучали влияние тренировок с использованием ВР на интенсивность боли, функциональную инвалидность и кинезиофобию. Международная классификация болезней 11-го пересмотра определяет хроническую мышечно-скелетную боль как боль, которая длится более 3 месяцев постоянно или периодически, включая региональную боль (суставы, конечности, спина или шея), дегенеративное состояние суставов (например, остеоартрит) и мышечно-скелетную боль, подпадающую под классификацию «хронической первичной боли». Хронической вторичной болью называется боль, которая воспринимается как симптом, вторичный по отношению к основному заболеванию [35]. Психологический статус измеряли по кинезиофобии — эмоциональному и когнитивному фактору, который приводит к неадаптивному поведению [36]. В контрольных группах используют лечебную физкультуру или физиотерапию. Результаты исследования показывают, что ВР-технологии облегчают хронические мышечно-скелетные боли. При болях в пояснице ниВР более эффективна для уменьшения симптомов непосредственно после курсового лечения и при динамическом наблюдении в течение 6 месяцев по сравнению с обычными тренировками. При хронической боли в спине тренировка с использованием ниВР превосходит обычную тренировку по показателям уменьшения интенсивности боли, инвалидности и кинезиофобии в краткосрочной и среднесрочной перспективе. Размер эффекта для инвалидности был умеренным. В случае боли в шее иВР снизила интенсивность боли, в краткосрочной перспективе уменьшила инвалидность; значимых краткосрочных и среднесрочных эффектов на кинезиофобию не обнаружено. Для боли в колене доступна только ниВР. Статистически значимых различий между группами ниВР и контролем в отношении боли в колене и функции сустава не обнаружено во всех временных точках. Активная тренировка с использованием как ниВР, так и иВР уменьшает симптомы боли в спине и шее, но какая форма ВР эффективнее, осталось невыясненным. Положительной динамики использования ВР у пациентов с болевыми синдромами других локализаций, например, в плече, бедре, не обнаружено. Способность ВР, особенно игровых технологий с мотивационными и вознаграждающими элементами, уменьшать боль объясняется в основном активным отвлечением, которое уменьшает субъективное ощущение боли, тем не менее результаты показывают, что включение ВР в обычную активную тренировку помогает в лечении хронической мышечно-скелетной боли [34].

Сравнение клинической эффективности иВР и ниВР является сложной задачей, так как при хронической боли

в пояснице большинство исследователей использовали иВР, в то время как в исследованиях хронической боли в шее — иВР. Это связано с тем, что при боли в шее для анализа кинематики шейного отдела позвоночника, в отличие от болевого синдрома в спине, использовался головной дисплей. В большинстве исследований боли в спине были использованы готовые развлекательные игры ВР или виртуальные смоделированные среды. Новое иммерсивное терапевтическое программное обеспечение, направленное на создание присутствия, обучения и формирования привычек для лечения хронической боли в пояснице, расширяет возможности иВР в уменьшении боли у пациентов с хронической мышечно-скелетной болью [37]. Выводы Н.Н. Ло и соавт. [34] о влиянии ВР-терапии на снижение интенсивности хронической мышечно-скелетной боли подтверждаются в систематических обзорах других авторов [38–40]. Дальнейшие исследования с более длительным периодом наблюдением позволяют определить роль ВР с различными уровнями погружения в лечении болевых синдромов.

Виртуальная реальность, как и физические упражнения, позволяет уменьшить боль, избегая при этом рисков традиционной фармакотерапии. Когнитивная модуляция боли с помощью ВР возникла как нефармакологический метод снижения восприятия боли, ослабления когнитивных, эмоциональных и связанных с вниманием аспектов боли. Физические упражнения являются ещё одним нефармакологическим вмешательством с анальгетическим эффектом, центральным медиатором которого является симпатическая нервная система. Кратковременное симпатическое возбуждение является адаптивным ответом на боль и упражнения и оказывает положительное влияние, тогда как стойкая симпатическая активация усиливает болевое ощущение и хронизирует болевой синдром. Повышенная симпатическая активность распространена при хронической боли и может играть роль в поддержании гипералгезии при некоторых синдромах хронической боли. Сочетание упражнений и ВР представляет собой мультимодальный метод повышения переносимости боли, особенно при хронических болевых состояниях, когда нарушена нормальная физиология боли [41].

S.T. Rodriguez и соавт. [33] изучили аддитивный анальгетический эффект упражнений и ВР с целью оценить влияние упражнений в виртуальной среде на симпатическую активацию, восприятие и переносимость боли. Здоровые взрослые добровольцы были подвергнуты стандартизированному холодовому прессорному тесту (помещение руки или предплечья в холодную воду — стимул, который вызывает медленно нарастающую боль слабой или умеренной интенсивности и прекращается добровольным отдергиванием конечности). Холодовой прессорный тест является устоявшимся методом создания контролируемых и повторяемых болевых стимулов в экспериментальной обстановке. Сравнивались две модальности ВР

в отношении скорости наступления болевой реакции на холодовое воздействие: в первой пациенты движением головы сопровождали летающий объект взглядом, во второй использовалась езда на велосипеде. После ориентации в игровом процессе участники погружали руку в ледяную ванну (3–5°C) до момента наступления отчетливого болевого ощущения. Активность симпатической нервной системы косвенно оценивали по электропроводности кожи: в условиях обеих модальностей она увеличивалась с течением времени ($p < 0,0001$). Во всех временных точках у участников, выполнявших упражнения с ВР, отмечали более высокую симпатическую активность ($p < 0,0001$) и более высокие средние значения проводимости кожи ($p < 0,0001$). Вторичным результатом было влияние упражнений с поддержкой ВР на самооценку восприятия боли по шкале от 0 до 10 каждые 30 секунд во время холодового теста и сразу после того, как участник вынимал руку из ледяной ванны. Оценка боли «0» соответствовала полному отсутствию боли, а «10» — самой мучительной боли, какую можно себе представить. Между использованием обеих модальностей не было разницы в переносимости боли. Первоначально болевые ощущения усиливались при выполнении упражнений с ВР-поддержкой по сравнению с одной только ВР, но эта связь изменилась на противоположную в течение 4 минут: это означает, что упражнения могут повышать болевую чувствительность, но постоянная физическая активность в конечном итоге снижает восприятие боли. Снижение восприятия боли при выполнении упражнений с использованием ВР по сравнению с использованием только ВР указывает на то, что упражнения с использованием ВР могут быть полезным инструментом для контроля боли, хотя точный механизм этого эффекта неясен [33]. Симпатическая активность регистрировалась выше в условиях упражнений с ВР по сравнению с условиями только ВР на всех этапах исследования: эти результаты показывают, что боль вызывает стойкое увеличение симпатической активности, независимо от условий исследования, а упражнения вызывают относительное увеличение симпатической активности по сравнению с болью, ослабленной с помощью только ВР. Различий между условиями эксперимента в отношении переносимости боли не наблюдалось, что указывает на то, что снижение восприятия боли при упражнениях с ВР не всегда приводит к улучшению переносимости боли. Учитывая, что ВР и упражнения независимо друг от друга улучшают переносимость боли [42, 43], это неожиданное отсутствие эффекта может отражать эффект потолка для синергетической анальгезии с ВР и упражнениями [33].

Результаты эксперимента S.T. Rodriguez и соавт. [33] показывают, что добавление упражнений к ВР снижает болевую чувствительность после начального периода усиления боли. Упражнения с поддержкой ВР увеличили симпатическую активность и снизили восприятие боли

по сравнению с одной только ВР, что подтверждает их воздействие в качестве анальгезирующего вмешательства. Профиль риска, универсальность и доступность упражнений с поддержкой ВР особенно привлекательны по сравнению с фармакологическими анальгетиками. Этот нефармакологический мультимодальный подход к лечению боли может использоваться как в клинических, так и домашних условиях. Упражнения с поддержкой ВР для лечения хронической боли особенно привлекательны, поскольку пациенты могут получить пользу и от анальгезии, и от физической активности [41]. Помимо уменьшения боли, упражнения с поддержкой ВР предлагают пациентам такие преимущества, как улучшение результатов функциональной реабилитации, качества жизни и психологического благополучия.

Когнитивные расстройства

Когнитивные расстройства, также известные как нейрокогнитивные расстройства, могут прямо или косвенно, постоянно или временно влиять на функционирование когнитивно-нейронной и перцептивной систем, что приводит к различным поведенческим отклонениям и снижает качество жизни пациента. Лечение может помочь людям с когнитивными расстройствами сохранить свои умственные способности и навыки, смягчить последствия заболевания и выполнять свою работу более эффективно. Из-за распространённости когнитивных расстройств и проблем, связанных с медикаментозным лечением, возрос интерес к использованию нефармакологических методов, таких как технологии погружения в виртуальный мир. Представленная в публикациях [44, 45] образовательная программа на основе ВР интегрирует технологию ВР в обучение, внося положительный эмоциональный компонент. Используя компьютерные симуляции, ВР поощряет активное участие в процессе обучения. Игры на основе ВР также подразумевают использование технологии ВР для создания интерактивного игрового опыта, отдавая приоритет повествованию, игровому процессу и удовольствию. Имеющиеся данные показывают, что технология ВР может быть полезна для контроля и лечения когнитивных расстройств [44, 45]. Эта персонализированная динамичная терапия позволяет проводить целевые вмешательства на основе индивидуальных потребностей. Умеренное когнитивное нарушение, также называемое стадией преддеменции, является одним из наиболее распространённых когнитивных расстройств у пожилых людей. Когнитивные упражнения на основе ВР в сочетании с лечебной физкультурой способствуют укреплению здоровья мозга, когнитивных функций и физического здоровья у пожилых людей с преддеменцией [46]. Когнитивно-моторная реабилитация на основе ВР приводит к более значительному улучшению в областях визуально-пространственного восприятия, зрительно-моторной организации, ориентации, мыслительной деятельности

и внимания, чем вмешательства традиционной когнитивной реабилитации [5].

Систематический обзор К. Moulaei и соавт. [47] с метаанализом исследований влияния образовательных программ и игр на основе ВР на когнитивные функции установил, что ВР статистически значимо уменьшала когнитивные нарушения у пациентов с когнитивными расстройствами. Игры с включением ВР оказали большее влияние на уменьшение когнитивных нарушений по сравнению с другими видами когнитивных тренировок. Включённые в анализ исследования продемонстрировали, что игры и образовательные программы на основе ВР могут улучшить ориентацию, визуально-пространственное восприятие, зрительно-моторную организацию, мыслительную деятельность и функции внимания/концентрации у людей с когнитивными расстройствами. Погружая пациентов в виртуальные учебные сценарии, ВР делает процесс обучения более увлекательным и способствует приверженности лечению, даёт пациентам с лёгкими когнитивными нарушениями чувство безопасности и удовлетворения, снижает усталость, тревожность и стресс по сравнению с альтернативными методами обучения (такими как методы с ручкой и бумагой). Вовлечение пациентов с когнитивными нарушениями в иммерсивные и интерактивные виртуальные среды стимулирует у них когнитивные процессы, позволяет легче и безопаснее воспринимать сенсорные стимулы, улучшает понимание и усвоение функциональных навыков в процессе обучения благодаря способности ВР поддерживать различные функции коры, стимулируя и активируя метаболизм мозга, увеличивая мозговой кровоток и высвобождение нейротрансмиттеров [47].

Исследование Z. Liu и соавт. [48] продемонстрировало значительные улучшения результатов когнитивных тестов MoCA, TMT-A (Trail-Making Test-A, прокладывание маршрута), DSST (Digit Symbol Substitution Test, замена цифровых символов), DST (Digital Span Test, способность запоминать последовательность чисел), VFT (Verbal Fluency Test, беглость речи) и модифицированного индекса Бартел (Modified Barthel Index, степень зависимости в повседневной жизни) после использования игрово-головолом на основе ВР пациентами, перенёсшими инсульт. Игры в ВР предлагают пользователям захватывающий опыт с помощью интерактивных экранов, сенсорных контроллеров, датчиков движения, голосовых уведомлений, физической вибрации, панорамного обзора и увлекательных элементов игрового процесса, таких как сбор очков и защита от врагов. Эти аспекты способствуют привлекательности, чувству соревнования и азарту, которые пользователи получают от игр ВР [49]. Именно по этой причине игры оказались особенно эффективным подходом, превзойдя традиционные программы когнитивной тренировки в улучшении когнитивных способностей пациентов. Ощущение присутствия

в таких местах, как велосипедные или лыжные трассы, футбольные поля, или участие в приключенческих играх особенно привлекательно для пользователей с когнитивными расстройствами [47].

В исследовании К. Moulaei и соавт. [45] установлена важность конкретных элементов дизайна, таких как иммерсивный характер ВР, для оптимизации их воздействия на пациентов и достижения положительных результатов. В отличие от обычных когнитивных упражнений, которые могут казаться монотонными, игры в ВР предлагают динамичную среду, которая естественным образом удерживает внимание участника. Эта повышенная вовлечённость очень важна, так как постоянная концентрация и интерес потенциально способствуют повышению нейронной пластичности в когнитивных областях, стимулируя более широкий спектр когнитивных функций. Удовольствие и чувство прогресса, испытываемые во время игры, индуцируют выброс нейротрансмиттеров, таких как дофамин, связанных с системами мотивации и вознаграждения в мозге. Эта нейрохимическая реакция создаёт положительную обратную связь, побуждая вкладывать больше времени и усилий в игровую деятельность. Увеличение времени, проведённого за играми, может привести к более длительному вовлечению, способствуя в конечном итоге более надёжным когнитивным улучшениям.

Результаты исследования К. Moulaei и соавт. [47] подчёркивают потенциал ВР как ценного инструмента в стратегиях когнитивной реабилитации и преимущества включения игровых вмешательств для достижения оптимальных когнитивных результатов. Идентификация типа вмешательства как значимого модератора указывает на необходимость тонкого подхода к оценке и внедрению вмешательств на основе ВР и даёт теоретическую основу персонализированных стратегий когнитивной реабилитации.

ДРУГИЕ ОБЛАСТИ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Посттравматическое стрессовое расстройство

Посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР) — распространённое инвалидирующее психиатрическое расстройство, которое характеризуется навязчивыми мыслями и воспоминаниями, избеганием стимулов, связанных с травмой, перевозбуждением, нарушением настроения и когнитивных способностей. Основной дефицит при ПТСР концептуализирован как патологическое обусловливание страха с невозможностью вспомнить его угасание. Исследования ПТСР выявили отклонения в нейронных цепях, включая гиперактивность в миндалевидном теле и дорсальной передней поясной коре — областях, которые способствуют реакциям страха, а также гипоактивность

в вентромедиальной префронтальной коре — области, которая подавляет реакции страха. Считается, что при ПТСР нарушен нисходящий контроль миндалевидного тела со стороны вентромедиальной префронтальной коры и других областей головного мозга, которые у здоровых людей поддерживают безопасное обучение и память. Усиление ингибиторной модуляции миндалевидного тела со стороны вентромедиальной префронтальной коры может улучшить симптомы ПТСР [50].

Известные варианты лечения ПТСР включают когнитивно-поведенческую терапию, учитывающую характер травмы, и фармакотерапию селективными ингибиторами обратного захвата серотонина или норадреналина, имеют ограниченную эффективность и проблемы, связанные с доступностью и побочными эффектами [51]. Из-за отсутствия ответа на стандартную терапию и побочных эффектов преимущественно эмоциональной природы (сильного негативного аффекта, усиления размышлений о негативных автобиографических воспоминаниях, неправильного толкования нейтральных или неоднозначных событий как негативных) до 50% пациентов прекращают лечение [50].

Аномалии в угасании страха и воспоминаний о нём являются основным компонентом ПТСР. Доказано, что неинвазивная ТМС мозга постоянным током может уменьшить симптомы ПТСР. Слабые электрические токи, применяемые к коже головы, способствуют нейронной активности и угасанию страха. У ветеранов с ПТСР применяемая во время синаптической консолидации (перевод воспоминаний из кратковременной памяти в долговременную форму) после обучения угасанию страха транскраниальная магнитная стимуляция может усилить консолидацию угасания [52].

Одним из новых инструментов манипулирования контекстным представлением в исследованиях и лечении психического здоровья является ВР. Комбинированная терапия ТМС вентромедиальной префронтальной коры, разработанная для доставки слабых электрических токов и деполяризации нейронов в контексте ВР, эффективно уменьшает симптомы ПТСР [50].

Рандомизированное контролируемое исследование применения транскраниальной магнитной стимуляции в комбинации с виртуальной реальностью (ТМС+ВР) у участников — ветеранов армии США с посттравматическим стрессовым расстройством (ПТСР), связанным с боевыми действиями, показало, что активная стимуляция (6 сеансов по 25 минут в день ТМС при силе тока 2 мА в сочетании с ВР в течение 2 недель) привела к снижению психофизиологического возбуждения, улучшению самооценки состояния пациентами и ускорению психофизиологического привыкания к ВР-терапии ($p < 0,001$). Платцебо-группа (ложная магнитная стимуляция с силой тока 10 мкА в течение 15 мс каждые 550 мс + ВР) не продемонстрировала аналогичных эффектов [53]. Последующие

сеансы стимуляции через 3 месяца показали клинически значимое улучшение социального и профессионального функционирования и самооценки снижения ПТСР. Психиатрический рецидив ПТСР определяется как любая попытка суицида или суицидальные мысли, стационарное лечение или обращение в психиатрическую скорую помощь. Используемая система ВР обеспечивает визуальное, слуховое, тактильное и обонятельное погружение в виртуальные боевые условия. Участникам исследования была представлена серия виртуальных событий, которая начиналась с езды в автомобиле с защитой от мин и засад, с нарастающей интенсивностью воздействия: перестрелка вдаль, взрыв баллистической ракеты, пролёт военного вертолёта, засада на дороге 1, засада на дороге 2, самодельное взрывное устройство (СВУ) справа на расстоянии 40 м, засада на дороге, СВУ справа на расстоянии 40 м, СВУ слева на расстоянии 30 м, засада на мосту, СВУ впереди с переворотом ведущего автомобиля. Участники повторяли один и тот же 8-минутный сценарий ВР 3 раза с интервалом 30 секунд, чтобы проверить переносимость этого опыта, и могли остановиться в любой момент [50]. В течение года после лечения не было ни одного случая смерти от суицида или других причин. Участники исследования, рандомизированные в группу плацебо, были более склонны к рецидиву (Odd Ratio 3): 23,5% пациентов рецидивировали в группе активной стимуляции (ТМС+ВР) и 76,5% — в группе сравнения (ложная стимуляция ТМС+ВР). В активной группе 69% пациентов не показали никаких изменений в приёме лекарств, 27% уменьшили приём лекарств, а 1 (3,8%) — увеличил. В группе плацебо у 50% не было изменений, 14% дозу лекарств уменьшили, а 36% увеличили. Оценка качества жизни клиницистами показала неспецифическое улучшение с течением времени. Социальное и профессиональное функционирование значительно улучшилось через 3 месяца в группе активной ТМС по сравнению с группой ложной ТМС. Это означает, что активная ТМС усиливает привыкание между сеансами и внутри них у пациентов обеих групп. Побочные эффекты были лёгкими и не различались между группами по частоте. Таким образом, статистически значимые положительные результаты получены по нескольким направлениям: в группе активной стимуляции наблюдался более низкий уровень рецидивов и сокращение фармакотерапии психиатрическими препаратами. Ограничением этой работы является отсутствие отдельного контроля ВР и определение рецидива, основанное на индикаторах более тяжёлого психиатрического заболевания, поэтому менее значительные изменения могли быть упущены, тем не менее полученные результаты демонстрируют реальные доказательства того, что ТМС+ВР-терапия может обеспечить кратко- и долгосрочные преимущества для пациентов с ПТСР. Данное РКИ показало, что 6 сеансов активной ТМС+ВР в течение 2–3 недель превосходят фиктивную ТМС+ВР в уменьшении тяжести симптомов

ПТСР, связанного с военными действиями. Эффекты были клинически значимыми и увеличивались с течением времени. Пациенты в группе активной ТМС испытали усиленное психофизиологическое привыкание к сигналам ВР из зоны боевых действий по сравнению с группой ложной ТМС, что соответствует лучшей реконсолидации. Симптомы ПТСР продолжали уменьшаться в течение месяца после лечения активной ТМС+ВР [50, 53].

В публикации [54] подтверждается эффективность и безопасность использования ТМС у военных ветеранов с симптомами депрессии и ПТСР на основе данных многоцентровых широкомасштабных клинических исследований.

Большинство психофизиологических изменений происходит в начале терапии, поэтому продление курса ТМС+ВР вряд ли принесёт пользу лицам, у которых не произошли физиологические изменения. Следует отметить, что ВР-вмешательство не было индивидуализированным, оно было разработано для включения широко распространённых травматических переживаний, чтобы стандартизировать метод. Это РКИ демонстрирует потенциал комбинированной стимуляции мозга и контекстного контроля, который подчёркивает инновационные возможности данных технологий [50].

Хроническая обструктивная болезнь лёгких

Терапию на основе ВР предложено включить в программы традиционной лёгочной реабилитации для лечения хронической обструктивной болезни лёгких в качестве дополнительного инструмента.

В систематическом обзоре с метаанализом E. Obrero-Gaitán и соавт. [6] синтезировали все имеющиеся на сегодняшний день доказательства влияния ВР в сочетании с лёгочной реабилитацией и в качестве самостоятельной терапии на улучшение показателей функции внешнего дыхания и функциональной мобильности у пациентов с хронической обструктивной болезнью лёгких. Большинство включённых в метаанализ исследований (80%) использовали ниВР, поэтому результаты метаанализа актуальны именно для этого типа вмешательства, который включает игровой компонент, уменьшающий субъективное восприятие усилий и повышающий мотивацию. Анализ подгрупп обнаружил удивительно большой эффект сочетания ниВР с лёгочной реабилитацией в улучшении функциональной мобильности (тест на 6-минутную ходьбу) и функции лёгких (оцениваемой по объёму форсированного выдоха) у пациентов с хронической обструктивной болезнью лёгких любой степени тяжести.

Классические программы лёгочной реабилитации состоят из тренировочных упражнений, которые часто воспринимаются как монотонные или демотивирующие. Вмешательство на основе ВР может решить эту проблему, предлагая терапию, которая является активной, увлекательной и адаптированной к индивидуальным потребностям, включая интенсивность и продолжительность

упражнений. ВР считается безопасной терапией, удобной для использования в качестве домашнего тренинга (посредством телекоммуникаций) у пациентов с хроническими респираторными заболеваниями, включая хроническую обструктивную болезнь лёгких. ВР-системы, используемые в реабилитации, просты в транспортировке и могут быть установлены дома. Забавные и приятные впечатления, предоставляемые видеоиграми, или экзергеймами (exergame-терапия — игровая терапия для улучшения функциональной подвижности), используемыми в ВР, повышают мотивацию и приверженность пациента терапии. Высокий уровень приверженности к комбинированной терапии может объяснить более выраженное улучшение результатов по сравнению с лёгочной реабилитацией [6]. Преимущества включения ВР-компонента в лёгочной реабилитации подтверждают аналогичные выводы систематического обзора и метаанализа РКИ, выполненного ранее [55].

С помощью лёгочной реабилитации на основе ВР можно добиться улучшения функции лёгких, когнитивных функций, повышения переносимости физических нагрузок и эффективности лекарств, уменьшить симптомы одышки у пожилых пациентов с хронической обструктивной болезнью лёгких и лёгкой когнитивной дисфункцией [5].

Онкология

Онкологический диагноз является тяжёлым, психотравмирующим событием, вызывающим тревожность, депрессию, плохое качество сна и снижение физической активности, и справиться с болезнью очень сложно. Уровень психического стресса сразу после постановки диагноза обычно очень высок [56]. Разнообразие симптомов означает необходимость охватить гораздо более широкую симптоматику, чем сама злокачественная опухоль. Важным фактором является физическая активность до заболевания и во время реабилитации. Преимущества упражнений для повышения качества жизни, снижения уровня тревожности и депрессии у пациентов с раком описаны в систематическом обзоре М. Sun и соавт. [57]. Учёные сходятся во мнении, что имеют значение количество и интенсивность физической активности.

Технологическая революция способствовала внедрению ВР в лечение онкологических пациентов, а также в процессы преабилитации и реабилитации. Технологии иВР способны влиять на сознание пациента, что в сочетании с психотерапией улучшает психофизическое состояние во время лечения, позволяет получать положительные терапевтические эффекты с нулевым или низким риском побочных эффектов лечения по сравнению с другими терапевтическими методами. О. Czech и соавт. [58] провели РКИ с целью оценить эффективность ВР в улучшении психического состояния и качества сна, а также повышении физической активности у пациентов

с диагнозом рака молочной железы. Экспериментальное вмешательство состояло из 8 сеансов ВР, запрограммированных на успокоение и улучшение настроения. Сеансы продолжительностью 15 минут переносили пациентов в виртуальный сад с терапевтическим аудиокomentarием. Состояние виртуального сада улучшалось от сеанса к сеансу, начиная с бесцветного сада, что приводило к восстановлению цветов, энергии и красоты на последнем сеансе. Кроме того, все сеансы включали двигательные задания (создание виртуальной мандалы, разной для каждого сеанса; уход за садом; дыхательные упражнения). ВР-устройство состояло из специальных очков и контроллера (манипулятора), подключённого к компьютеру. Полное погружение обеспечивает интенсивные визуальные, слуховые и кинестетические стимулы, помогает пациентам использовать свои психологические ресурсы и мотивирует их более активно участвовать в процессе реабилитации. В виртуальном саду используются символы и метафоры, среди которых самым важным является Сад Возрождения, который символизирует выздоровление пациента. Благодаря вовлечению пациента в возделывание сада виртуальная земля начинает гудеть жизнью. Сила метафорической коммуникации заключается в обходе сопротивления пациента. Психотерапия по методу М. Эриксона позволяет пациенту проходить процессы самовосстановления, которые продлевают терапевтический эффект. Эффекты оценивали с помощью шкалы психической адаптации к раку (mini-Mental Adjustment to Cancer scale, mini-MAC), международного опросника физической активности (International Physical Activity Questionnaire, IPAQ), Питтсбургского индекса качества сна (Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI) и модифицированной госпитальной шкалы тревоги и депрессии (modified Hospital Anxiety and Depression Scale, HADS-M) в четырёх временных точках: до вмешательства (T0), через 2 недели после вмешательства (T1), через 6 (T2) и 10 (T3) недель после измерения T0. Анализ выявил в экспериментальной группе значимые различия между временными точками T0-T2 и T0-T3 в отношении стиля совладания с болезнью (конструктивный против деструктивного), ходьбы, физической активности, качества и продолжительности сна, депрессии, тревожности и уровня агрессии. Результаты исследования показывают улучшение психофизического состояния онкологических больных в период преабилитации и терапии, снижение уровня стресса, повышение эффективности терапии и участия пациента в процессе выздоровления.

Кардиология

Кардиологические процедуры часто вызывают боль и тревожность у пациентов, что отрицательно сказывается на выздоровлении. Систематический обзор с метаанализом РКИ показал, что ВР статистически значительно снижает тревожность, но не интенсивность боли

по сравнению со стандартным лечением. Пациенты, включённые в исследование, существенно различались по типам, продолжительности и частоте использования технологий ВР, но, несмотря на гетерогенность данных, ВР эффективно снижала уровень тревожности у пациентов, перенёвших кардиологические процедуры [59]. Медицинские услуги по кардиопульмональной реабилитации успешно осуществляются с использованием технологии ВР как вспомогательного инструмента в программах кардиореабилитации. ВР-реабилитация способствует повышению приверженности лечению и удовлетворённости медицинской помощью у пациентов с ишемической болезнью сердца II стадии по сравнению с группой традиционного лечения. Игровая ВР-терапия улучшает показатели частоты сердечных сокращений, частоты дыхания и воспринимаемой нагрузки во время и после выполнения упражнений у пациентов, проходящих кардиореабилитацию [5].

Реабилитация на основе ВР может обеспечить персонализацию вмешательства, повысить толерантность к физическим нагрузкам и снизить тревожность и симптомы депрессии, что было продемонстрировано у госпитализированных больных в период пандемии COVID-19. После стационарного лечения когнитивная реабилитация в сочетании с ВР может с успехом проводиться в рамках дистанционно-контролируемой реабилитации [60].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение различных программ реабилитации на основе ВР сопровождается улучшением неврологического статуса пациентов: увеличиваются сила и объём движений, улучшается координация, облегчается боль. Большинство исследований демонстрируют, что нейромоторная реабилитация на основе ВР (отдельно или в комбинации с традиционными методами реабилитации) может быть более эффективной, чем традиционное лечение, и что иммерсивная ВР является перспективным реабилитационным инструментом, особенно для лиц, перенёвших инсульт, и лиц со сложным региональным болевым синдромом. Продemonстрирована эффективность очного когнитивного тренинга на основе ВР в улучшении нейропсихологических функций. Что касается эффективности вмешательства ВР, реализованного путём телекоммуникации, исследования показывают, что оно сопоставимо по эффекту с традиционными методами восстановительного лечения.

Реабилитация требует персонализированных планов лечения, разработанных с учётом состояния и прогресса пациента. Приложения для ВР-реабилитации должны быть гибкими и адаптируемыми под разнообразные потребности и возможности пациентов. Для обеспечения максимальной эффективности должны быть доступны регулировка уровней сложности и ориентация

на определённые двигательные навыки. Интеграция технологий виртуальной реальности (ВР) в традиционные методы реабилитации представляет собой сложный междисциплинарный процесс, требующий тесного взаимодействия между специалистами в области медицинской реабилитации и инженерами-разработчиками. Это необходимо для обеспечения «бесшовного» внедрения ВР в существующие клинические подходы, а также для разработки стандартизированных протоколов и методических рекомендаций по применению технологии в реабилитационной практике. В большинстве случаев исследовательские команды создают индивидуальную иммерсивную виртуальную среду, которую можно адаптировать к предполагаемому варианту использования с точки зрения требований реабилитологов и потребностей пациентов. Расширение сферы применения ВР требует оценки пригодности и долгосрочных эффектов для различных возрастных групп, уровней инвалидности и клинических сценариев.

Избегание потенциальных побочных эффектов должно быть приоритетом в протоколах ВР-реабилитации для предотвращения негативных последствий для пациентов. Для более широкого внедрения иммерсивной ВР в качестве инструмента реабилитации исследователям необходима возможность оценки, сравнения и устранения потенциальных неблагоприятных эффектов реабилитации на основе погружения в ВР, что требует разработки протоколов ВР, адаптированных к конкретным патологиям, и учёт количественных показателей киберболезни. Важно сопоставлять количественные показатели с клиническими результатами для мониторинга результатов и анализа динамики возможностей пациентов в ходе ВР-реабилитации.

Применение ВР в восстановительном лечении представляет собой достаточно безопасную перспективную технологию, позволяющую персонализировать и «дозировать» реабилитационные мероприятия в соответствии с потребностями и возможностями пациентов, а применяемая геймификация повышает приверженность пациентов лечению, тем не менее авторы исследований отмечают необходимость проведения рандомизированных контролируемых исследований для стандартизации используемых ВР-технологий, оптимизации протоколов и анализа долгосрочных эффектов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.Г. Щербак, А.С. Голота — написание текста статьи; Д.А. Вологжанин, С.В. Макаренко — написание и редактирование текста статьи; Т.А. Камилова — поисково-аналитическая работа, написание, обсуждение и редактирование текста статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При проведении исследования и создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступность данных. Все материалы, использованные в этой работе, доступны из источников, указанных в ссылках.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. S.G. Shcherbak, A.S. Golota: manuscript writing; D.A. Vologzhanin, S.V. Makarenko: revision and manuscript writing;

T.A. Kamilova: search and analytical work, writing and editing of the manuscript. All authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources. No funding.

Disclosure of interests. The authors declare that during the last three years they have not had any relationships, activities or interests (commercial or non-commercial) related to third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In conducting the research and creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. All materials used in this work are available from the sources indicated in the references.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Macchitella L, Spaccavento S, Arigliani M, et al. A narrative review of the use of a cutting-edge virtual reality rehabilitation technology in neurological and neuropsychological rehabilitation. *NeuroRehabil.* 2023;53(4):439–457. doi: 10.3233/NRE-230066
- Wang L, Zhang H, Ai H, Liu Y. Effects of virtual reality rehabilitation after spinal cord injury: A systematic review and meta-analysis. *J Neuroeng Rehabil.* 2024;21(1):191. doi: 10.1186/s12984-024-01492-w
- Ceradini M, Losanno E, Micera S, et al. Immersive VR for upper-extremity rehabilitation in patients with neurological disorders: A scoping review. *J Neuroeng Rehabil.* 2024;21(1):75. doi: 10.1186/s12984-024-01367-0
- Zhang J, Wu M, Li J, et al. Effects of virtual reality-based rehabilitation on cognitive function and mood in multiple sclerosis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Mult Scler Relat Disord.* 2024;87:105643. doi: 10.1016/j.msard.2024.105643
- Wang C, Kong J, Qi H. Areas of research focus and trends in the research on the application of VR in rehabilitation medicine. *Healthcare (Basel).* 2023;11(14):2056. doi: 10.3390/healthcare11142056
- Obrero-Gaitán E, Chau-Cubero CY, Lomas-Vega R, et al. Effectiveness of virtual reality-based therapy in pulmonary rehabilitation of chronic obstructive pulmonary disease: A systematic review with meta-analysis. *Heart Lung.* 2024;65:1–10. doi: 10.1016/j.hrtlng.2024.01.011
- Takei K, Morita S, Watanabe Y. Acceptability of physical therapy combined with nintendo ring fit adventure exergame for geriatric hospitalized patients. *Games Health J.* 2024;13(1):33–39. doi: 10.1089/g4h.2023.0009
- Drazich BF, McPherson R, Gorman EF, et al. In too deep? A systematic literature review of fully-immersive virtual reality and cybersickness among older adults. *J Am Geriatr Soc.* 2023;71(12):3906–3915. doi: 10.1111/jgs.18553
- Hara M, Murakawa Y, Wagatsuma T, et al. Feasibility of somato-cognitive coordination therapy using virtual reality for patients with advanced severe Parkinson's disease. *J Parkinsons Dis.* 2024;14(4):895–898. doi: 10.3233/JPD-240011
- Bailey RB. Highlighting hybridization: A case report of virtual reality-augmented interventions to improve chronic post-stroke recovery. *Medicine (Baltimore).* 2022;101(25):e29357. doi: 10.1097/MD.00000000000029357
- Contrada M, Arcuri F, Tonin P, et al. Stroke telerehabilitation in Calabria: A health technology assessment. *Front Neurol.* 2022;12:777608. doi: 10.3389/fneur.2021.777608
- Luque-Moreno C, Kiper P, Solís-Marcos I, et al. Virtual reality and physiotherapy in post-stroke functional re-education of the lower extremity: A controlled clinical trial on a new approach. *J Pers Med.* 2021;11(11):1210. doi: 10.3390/jpm11111210
- Duan H, Jing Y, Li Y, et al. Rehabilitation treatment of multiple sclerosis. *Front Immunol.* 2023;14:1168821. doi: 10.3389/fimmu.2023.1168821
- Liu Y, Lin R, Tian X, et al. Effects of VR task-oriented training combined with rTMS on balance function and brain plasticity in stroke patients: a randomized controlled trial study protocol. *Trials.* 2024;25(1):702. doi: 10.1186/s13063-024-08519-6
- Heinrich C, Morkisch N, Langlotz T, et al. Feasibility and psychophysical effects of immersive virtual reality-based mirror therapy. *J Neuroeng Rehabil.* 2022;19(1):107. doi: 10.1186/s12984-022-01086-4
- Kamm CP, Blättler R, Kueng R, Vanbellingen T. Feasibility and usability of a new home-based immersive virtual reality headset-based dexterity training in multiple sclerosis. *Mult Scler Relat Disord.* 2023;71:104525. doi: 10.1016/j.msard.2023.104525
- Gebreheat G, Antonopoulos N, Porter-Armstrong A. Application of immersive virtual reality mirror therapy for upper limb rehabilitation after stroke: A scoping review. *Neurol Sci.* 2024;45(9):4173–4184. doi: 10.1007/s10072-024-07543-3
- Demeco A, Zola L, Frizziero A, et al. Immersive virtual reality in post-stroke rehabilitation: A systematic review. *Sensors (Basel).* 2023;23(3):1712. doi: 10.3390/s23031712
- Mekbib DB, Zhao Z, Wang J, et al. Proactive motor functional recovery following immersive virtual reality-based limb mirroring therapy in patients with subacute stroke. *Neurotherapeutics.* 2020;17(4):1919–1930. doi: 10.1007/s13311-020-00882-x
- Chang WK, Lim H, Park SH, et al. Effect of immersive virtual mirror visual feedback on Mu suppression and coherence in motor and parietal cortex in stroke. *Sci Rep.* 2023;13(1):12514. doi: 10.1038/s41598-023-38749-8
- Da Silva Jaques E, Figueiredo AI, Schiavo A, et al. Conventional mirror therapy versus immersive virtual reality mirror therapy: The perceived usability after stroke. *Stroke Res Treat.* 2023;2023:5080699. doi: 10.1155/2023/5080699
- De Luca R, Leonardi S, Maresca G, et al. Virtual reality as a new tool for the rehabilitation of post-stroke patients with chronic aphasia: An exploratory study. *Aphasiology.* 2023;37(2):249–259. doi: 10.1080/02687038.2021.1998882
- Bu X, Ng PH, Tong Y, et al. A mobile-based virtual reality speech rehabilitation app for patients with aphasia after stroke: Development and pilot usability study. *JMIR Serious Games.* 2022;10(2):e30196. doi: 10.2196/30196
- De Luca R, Bonanno M, Rifici C, et al. Does non-immersive virtual reality improve attention processes in severe traumatic brain injury? Encouraging data from a pilot study. *Brain Sci.* 2022;12(9):1211. doi: 10.3390/brainsci12091211
- De Luca R, Bonanno M, Marra A, et al. Can virtual reality cognitive rehabilitation improve executive functioning and coping strategies in traumatic brain injury? *Brain Sci.* 2023;13(4):578. doi: 10.3390/brainsci13040578

26. Calabrò RS, Bonanno M, Torregrossa W, et al. Benefits of telerehabilitation for patients with severe acquired brain injury: Promising results from a multicenter randomized controlled trial using nonimmersive virtual reality. *J Med Internet Res*. 2023;25:e45458. doi: 10.2196/45458
27. Papaioannou T, Voinescu A, Petrini K, Stanton Fraser D. Efficacy and moderators of virtual reality for cognitive training in people with dementia and mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *J Alzheimers Dis*. 2022;88(4):1341–1370. doi: 10.3233/JAD-210672
28. Goffredo M, Pagliari C, Turolla A, et al.; RIN_TR_Group. Non-immersive virtual reality telerehabilitation system improves postural balance in people with chronic neurological diseases. *J Clin Med*. 2023;12(9):3178. doi: 10.3390/jcm12093178
29. Pagliari C, Di Tella S, Jonsdottir J, et al. Effects of home-based virtual reality telerehabilitation system in people with multiple sclerosis: A randomized controlled trial. *J Telemed Telecare*. 2024;30(2):344–355. doi: 10.1177/1357633X211054839
30. Kashif M, Ahmad A, Bandpei MA, et al. A randomized controlled trial of motor imagery combined with virtual reality techniques in patients with Parkinson's disease. *J Pers Med*. 2022;12(3):450. doi: 10.3390/jpm12030450
31. Sarasso E, Gardoni A, Tettamanti A, et al. Virtual reality balance training to improve balance and mobility in Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *J Neurol*. 2022;269(4):1873–1888. doi: 10.1007/s00415-021-10857-3
32. Yau CE, Ho EC, Ong NY, et al. Innovative technology-based interventions in Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis. *Ann Clin Transl Neurol*. 2024;11(10):2548–2562. doi: 10.1002/acn3.52160
33. Rodriguez ST, Makarewicz N, Wang EY, et al. Virtual reality facilitated exercise increases sympathetic activity and reduces pain perception: A randomized crossover study. *Am J Phys Med Rehabil*. 2024;104(1):51–57. doi: 10.1097/PHM.0000000000002550
34. Lo HH, Zhu M, Zou Z, et al. Immersive and nonimmersive virtual reality-assisted active training in chronic musculoskeletal pain: Systematic review and meta-analysis. *Med Internet Res*. 2024;26:e48787. doi: 10.2196/48787
35. Nicholas M, Vlaeyen JW, Rief W, et al.; IASP Taskforce for the Classification of Chronic Pain. The IASP classification of chronic pain for ICD-11: Chronic primary pain. *Pain*. 2019;160(1):28–37. doi: 10.1097/j.pain.0000000000001390
36. Van Bogaert W, Coppieters I, Kregel J, et al. Influence of baseline kinesophobia levels on treatment outcome in people with chronic spinal pain. *Phys Ther*. 2021;101(6):pzab076. doi: 10.1093/ptj/pzab076.6145902
37. Maddox T, Sparks CY, Oldstone L, et al. Perspective: the promise of virtual reality as an immersive therapeutic. *J Med Ext Real*. 2024;1(1):13–20. doi: 10.1089/jmxr.2023.0003
38. Guo Q, Zhang L, Gui C, et al. Virtual reality intervention for patients with neck pain: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Med Internet Res*. 2023;25:e38256. doi: 10.2196/38256
39. Kantha P, Lin J, Hsu W. The effects of interactive virtual reality in patients with chronic musculoskeletal disorders: A systematic review and meta-analysis. *Games Health J*. 2023;12(1):1–12. doi: 10.1089/g4h.2022.0088
40. Brea-Gómez B, Laguna-González A, Pérez-Gisbert L, et al. Virtual reality based rehabilitation in adults with chronic neck pain: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Virtual Real*. 2024;28(2):1–31. doi: 10.1007/s10055-024-00979-0
41. Simons LE, Hess CW, Choate ES, et al. Virtual reality-augmented physiotherapy for chronic pain in youth: Protocol for a randomized controlled trial enhanced with a single-case experimental design. *JMIR Res Protoc*. 2022;11:e40705. doi: 10.2196/40705
42. Neiman NR, Falkson SR, Rodriguez ST, et al. Quantifying virtual reality pain modulation in healthy volunteers: A randomized, crossover study. *J Clin Anesth*. 2022;80:110876. doi: 10.1016/j.jclinane.2022.110876
43. Senarath ID, Chen KK, Weerasekara I, de Zoete RM. Exercise-induced hypoalgesic effects of different types of physical exercise in individuals with neck pain: A systematic review and meta-analysis. *Pain Pract*. 2023;23(1):110–122. doi: 10.1111/papr.13150
44. Shahmoradi L, Rezayi S. Cognitive rehabilitation in people with autism spectrum disorder: A systematic review of emerging virtual reality-based approaches. *J Neuroeng Rehabil*. 2022;19(1):91. doi: 10.1186/s12984-022-01069-5
45. Moulai K, Bahaadinbeigy K, Haghdost A, et al. An analysis of clinical outcomes and essential parameters for designing effective games for upper limb rehabilitation: A scoping review. *Health Sci Rep*. 2023;6(5):e1255. doi: 10.1002/hsr2.1255
46. Yang JG, Thapa N, Park HJ, et al. Virtual reality and exercise training enhance brain, cognitive, and physical health in older adults with mild cognitive impairment. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(20):13300. doi: 10.3390/ijerph192013300
47. Moulai K, Sheikhtaheri A, Haghdost A, et al. Efficacy of virtual reality-based training programs and games on the improvement of cognitive disorders in patients: A systematic review and meta-analysis. *BMC Psychiatry*. 2024;24(1):116. doi: 10.1186/s12888-024-05563-z
48. Liu Z, He Z, Yuan J, et al. Application of immersive virtual-reality-based puzzle games in elderly patients with post-stroke cognitive impairment: A pilot study. *Brain Sci*. 2022;13(1):79. doi: 10.3390/brainsci13010079
49. Serafin S, Adjorlu A, Percy-Smith LM. A review of virtual reality for individuals with hearing impairments. *Multimodal Technol Interact*. 2023;7(4):36. doi: 10.3390/mti7040036
50. Van 't Wout-Frank M, Arulpragasam AR, Faucher C, et al. Virtual reality and transcranial direct current stimulation for posttraumatic stress disorder: A randomized clinical trial. *JAMA Psychiatry*. 2024;81(5):437–446. doi: 10.1001/jamapsychiatry.2023.5661
51. Schnurr PP, Hamblen JL, Wolf J, et al. The management of posttraumatic stress disorder and acute stress disorder: Synopsis of the 2023 U.S. Department of veterans affairs and U.S. Department of defense clinical practice guideline. *Ann Intern Med*. 2024;177(3):363–374. doi: 10.7326/M23-2757
52. Van 't Wout M, Longo SM, Reddy MK, et al. Transcranial direct current stimulation may modulate extinction memory in posttraumatic stress disorder. *Brain Behav*. 2017;7(5):e00681. doi: 10.1002/brb3.681
53. Philip NS, Brettler K, Greenberg BD, et al. One year clinical outcomes after transcranial direct current stimulation and virtual reality for posttraumatic stress disorder. *Brain Stimul*. 2024;17(4):896–898. doi: 10.1016/j.brs.2024.07.016
54. Madore MR, Kozel FA, Williams LM, et al. Prefrontal transcranial magnetic stimulation for depression in US military veterans: A naturalistic cohort study in the veterans health administration. *J Affect Disord*. 2022;297:671–678. doi: 10.1016/j.jad.2021.10.025
55. Patsaki I, Avgeri V, Rigoulia T, et al. Benefits from incorporating virtual reality in pulmonary rehabilitation of COPD patients: A systematic review and meta-analysis. *Adv Respir Med*. 2023;91(4):324–336. doi: 10.3390/arm91040026
56. Czech O, Matkowski R, Skórniak J, Malicka I. Psychological and physical well-being in women diagnosed with breast cancer: A comprehensive study of anxiety, depression, sleep quality, physical activity, and sociodemographic factors. *Med Sci Monit*. 2024;30:e943490. doi: 10.12659/MSM.943490
57. Sun M, Liu C, Lu Y, et al. Effects of physical activity on quality of life, anxiety and depression in breast cancer survivors: A systematic review and meta-analysis. *Asian Nurs Res (Korean Soc Nurs Sci)*. 2023;17(5):276–285. doi: 10.1016/j.anr.2023.11.001
58. Czech O, Kowaluk A, Ściepuro T, et al. Effects of immersive virtual therapy as a method supporting the psychological and physical well-being of women with a breast cancer diagnosis: A randomized rial. *Curr Oncol*. 2024;31(10):6419–6432. doi: 10.3390/curroncol31100477
59. Micheluzzi V, Burrai F, Casula M, et al. Effectiveness of virtual reality on pain and anxiety in patients undergoing cardiac procedures: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Curr Probl Cardiol*. 2024;49(5):102532. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2024.102532
60. Rutkowski S, Bogacz K, Czech O, et al. Effectiveness of an inpatient virtual reality-based pulmonary rehabilitation program among COVID-19 patients on symptoms of anxiety, depression and quality of life: Preliminary results from a randomized controlled trial. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(24):16980. doi: 10.3390/ijerph192416980

ОБ АВТОРАХ

*** Голота Александр Сергеевич**, канд. мед. наук, доцент;
адрес: Россия, 197706, Санкт-Петербург, г. Сестрорецк,
ул. Борисова, д. 9, лит. Б;
ORCID: 0000-0002-5632-3963;
eLibrary SPIN: 7234-7870;
e-mail: golotaa@yahoo.com

Щербак Сергей Григорьевич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-5036-1259;
eLibrary SPIN: 1537-9822;
e-mail: b40@zdrav.spb.ru

Вологжанин Дмитрий Александрович, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-1176-794X;
eLibrary SPIN: 7922-7302;
e-mail: volog@bk.ru

Макаренко Станислав Вячеславович;
ORCID: 0000-0002-1595-6668;
eLibrary SPIN: 8114-3984;
e-mail: st.makarenko@gmail.com

Камилова Татьяна Аскарровна, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0001-6360-132X;
eLibrary SPIN: 2922-4404;
e-mail: kamilovaspb@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr S. Golota**, MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor;
address: 9B Borisova st, Sestroretsk, Saint Petersburg,
Russia, 197706;
ORCID: 0000-0002-5632-3963;
eLibrary SPIN: 7234-7870;
e-mail: golotaa@yahoo.com

Sergey G. Scherbak, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-5036-1259;
eLibrary SPIN: 1537-9822;
e-mail: b40@zdrav.spb.ru

Dmitry A. Vologzhanin, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-1176-794X;
eLibrary SPIN: 7922-7302;
e-mail: volog@bk.ru

Stanislav V. Makarenko;
ORCID: 0000-0002-1595-6668;
eLibrary SPIN: 8114-3984;
e-mail: st.makarenko@gmail.com

Tatyana A. Kamilova, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0001-6360-132X;
eLibrary SPIN: 2922-4404;
e-mail: kamilovaspb@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author