

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 004.946

doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-10

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В СОЧЕТАНИИ С ИНТЕРФЕЙСОМ «МОЗГ–КОМПЬЮТЕР» В ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Д. А. Самофалов¹, Д. А. Дегтерев², Д. Н. Печенина³

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

^{2,3} Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Москва, Россия

¹ dmi.samofalov@gmail.com, ² d.degterev@mknc.ru, ³ darya.pechenina2017@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью данного обзора является определение перспектив использования технологий виртуальной реальности в сочетании с интерфейсом «мозг–компьютер» в двигательной реабилитации. Использование технологии виртуальной реальности (ВР) в медицине является актуальным направлением, открывающим новые перспективы в диагностике, лечении и реабилитации пациентов. ВР охватывает все больше областей медицины и вскоре сможет стать ее неотъемлемой частью, помогающей врачам совершенствовать уже имеющиеся методы диагностики и лечения различных заболеваний. *Материалы и методы.* Представлены существующие разработки, инновационные проекты и исследования в области ВР, применяющиеся в медицинском образовании и на практике. Особое внимание уделено использованию технологий ВР в нейрореабилитации. *Результаты и выводы.* Приведенные ниже исследования отражают не только востребованность данной технологии в медицине, но и показывают эффективность и превосходство ВР над традиционными подходами, ВР является стремительно развивающимся трендом в обучении медицинского персонала, благодаря уникальной возможности моделировать реальные ситуации, требующие быстрого и точного реагирования. ВР позволяет создавать персонализированные программы реабилитации, например, после острого нарушения мозгового кровообращения и различных травм, обеспечивая пациентам максимальное вовлечение в процесс восстановления.

Ключевые слова: виртуальная реальность, реабилитация, интерфейс «мозг–компьютер», двигательные функции, нейрореабилитация

Для цитирования: Самофалов Д. А., Дегтерев Д. А., Печенина Д. Н. Использование виртуальной реальности в сочетании с интерфейсом «мозг–компьютер» в двигательной реабилитации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 79–89. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-10

THE USE OF VIRTUAL REALITY IN COMBINATION WITH A BRAIN-COMPUTER INTERFACE IN MOTOR REHABILITATION

D.A. Samofalov¹, D.A. Degterev², D.N. Pechenina³

¹ National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

^{2,3} Moscow Clinical Scientific Center named after A.S. Loginov, Moscow, Russia

¹ dmi.samofalov@gmail.com, ² d.degterev@mknc.ru, ³ darya.pechenina2017@yandex.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this review is to determine the prospects for using virtual reality technologies in combination with the brain-computer interface in motor rehabilitation. The use of virtual reality technology (herein-after referred to as VR) in medicine is a relevant area that opens up new prospects in the diagnosis, treatment and

rehabilitation of patients. VR covers more and more areas of medicine and will be able to become its integral part, helping doctors improve the methods of diagnosis and treatment of various diseases that already exist. *Materials and methods.* This review presents existing developments, innovative projects and research in the field of VR used in medical education and practice. *Results and conclusions.* Particular attention is paid to the use of VR technologies in neurorehabilitation. The studies below reflect not only need for this technology in medicine, but also show the effectiveness and superiority of VR over traditional approaches, VR is a rapidly developing trend in the training of medical personnel, due to the unique ability to simulate real situations that require a quick and accurate response. VR allows for the creation of personalized rehabilitation programs, for example, after acute cerebrovascular accident and various injuries, providing patients with maximum involvement in the recovery process.

Keywords: virtual reality, rehabilitation, brain-computer interface, motor functions, neurorehabilitation

For citation: Samofalov D.A., Degterev D.A., Pechenina D.N. The use of virtual reality in combination with a brain-computer interface in motor rehabilitation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):79–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-10

Введение

Медицина как наука и практика всегда стремилась к инновациям и совершенствованию методов диагностики, лечения и реабилитации. В последние десятилетия виртуальная реальность (далее – ВР) прошла эволюцию от футуристической концепции к важнейшему инструменту в арсенале современной медицины. ВР, изначально созданная для сферы развлечений и игр, выросла до целого медицинского направления. В настоящее время принципы ВР используются в медицинском образовании, хирургии, психиатрии и реабилитации. С развитием технологий и увеличением их доступности возможности применения ВР в медицине растут.

В данном обзоре рассмотрены различные способы применения ВР в здравоохранении, включая обучение медицинских специалистов, создание диагностических систем, проведение реабилитации и повышение качества жизни пациентов.

Двигательная реабилитация играет определяющую роль в лечении пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) и различные травмы. Объединение ВР с интерфейсом «мозг–компьютер» (далее – ИМК) стало новым словом в двигательной реабилитации неврологических заболеваний.

Целью данного обзора является определение перспектив развития технологий ВР и ИМК в двигательной реабилитации.

Области применения виртуальной реальности в медицине

Технологии ВР активно используются в процессе обучения и оценки медицинских знаний, позволяя получить практический опыт еще до начала клинической практики. Это особенно необходимо в сфере здравоохранения, где цена совершения ошибки высока. Кроме того, при использовании данных технологий сокращается время обучения и улучшаются визуально-пространственные навыки [1, 2].

Результаты многочисленных исследований показали, что система обучения анатомии человека с визуализацией ВР позволяет студентам лучше понимать трехмерные структуры, повышает их уровень вовлеченности в процесс обучения и эффективнее традиционных способов обучения [3–5]. С помощью ВР обучающиеся могут неоднократно практиковать навыки выполнения технических манипуляций, способы реагирования в экстренных ситуациях, а также отрабатывать навыки общения с пациентами [6].

По данным исследования Heinrich et al. (2021), при использовании ВР улучшились объективные показатели производительности обучения без увеличения времени выполнения задач, сократилась частота совершения медицинских ошибок [7]. Еще одним примером использования ВР является разработанная в США в 2020 г. на базе Западного университета медицинских наук «виртуальная операционная», которая позволяет студентам получать базовые знания и навыки в области операционной хирургии в менее стрессовой среде без риска для здоровья пациентов [8]. В 2019 г. Van Duren et al. разработали цифровой симулятор рентгеноскопической визуализации с использованием ортогональных камер для отслеживания цветных маркеров, прикрепленных к проводнику, что создает виртуальное наложение на рентгеноскопические изображения моделей тазобедренного сустава. Результаты данного исследования показали высокую эффективность применения цифрового симулятора при обучении студентов [9]. В Испании используется 3D-симулятор дополненной реальности с тактильной обратной связью в качестве

учебного инструмента для размещения торакальных транспедикулярных винтов. Проведенные исследования выявили улучшение точности работы в среднем на 15 %, что указывает на преимущества использования ВР для обучения ординаторов и хирургов [10].

В настоящее время ВР успешно применяется в планировании и проведении хирургических операций. Исследования демонстрируют высокий потенциал объединения КТ, МРТ и рентгенологических снимков с реальными изображениями пациентов для проведения более точных хирургических манипуляций [11]. Данные технологии увеличивают скорость, повышают точность действий и снижают вероятность совершения хирургом интраоперационных ошибок [12–14]. Кроме того, они позволяют визуализировать индивидуальную анатомию пациента в режиме реального времени и получать дополнительную информацию о пациенте, что улучшает предоперационное планирование и облегчает процесс проведения хирургических операций [15].

С 2017 г. на базе Стэнфордского университета функционирует лаборатория неврологического моделирования. Программное обеспечение создает трехмерную модель мозга, созданную с помощью изображений МРТ, компьютерной томографии и ангиограмм, что позволяет визуализировать точное местоположение опухоли или аневризмы [16]. В Израиле разработана специализированная система для хирургов на базе технологии виртуальной реальности Surgical Theater, позволяющая нейрохирургам с большой точностью планировать конкретные операции. Данная платформа также успешно используется в 15 ведущих больницах США [17]. С помощью хирургических роботов da Vinci, использующих ВР, в России к 2021 г. было проведено более 20 000 операций. В настоящее время системы da Vinci присутствуют в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Уфе, Тюмени и нескольких других городах Российской Федерации [18, 19].

Технологии ВР также используются в лечении психических расстройств как самостоятельно, так и в совокупности с традиционными методами. Одним из примеров реализации данной технологии является проект компании «Virtually Better» (США), комплекс терапии психических расстройств состоит из настраиваемой среды виртуальной реальности, тактильной платформы, которые создают спектр стимулов, ассоциированных с моделируемой ситуацией [20]. Программное обеспечение адаптировано для работы с различными состояниями пациента, фобиями, а также с особенностями детского психологического развития.

Для терапии посттравматического стрессового расстройства используется платформа "Amelia Virtual Care platform" (Испания), включающая в себя систему датчиков, шлем виртуальной реальности, а также программное обеспечение, реализующее различные сценарии для терапии широкого спектра психических расстройств [21].

В одном из последних исследований Zhang et al. (2020) в Китае был выявлен положительный эффект влияния терапии с использованием технологий виртуальной реальности при лечении тревожных расстройств в рамках фобии заболеть COVID-19 [22].

В настоящее время в Российской Федерации и в мире ВР активно используется в сфере медицинской реабилитации. С каждым годом появляется все больше программных комплексов и технологических продуктов, позволяющих повысить эффективность реабилитации пациентов, перенесших ОНМК, и увеличить подвижности конечностей после различных травм. Одним из примеров использования подобных технологий является продукт российской компании «Исток-Аудио» (Московская область) – программный комплекс «Девирта-Делфи», предназначенный для лечения и реабилитации пациентов с двигательными и когнитивными нарушениями после травм, операций и ОНМК [23].

Также существуют аппаратные комплексы, использующие ВР для реабилитации лиц с нарушением локомоторных функций конечностей. Одним из них является тренажер для постинсультной реабилитации «ReviVR», производимый ООО «Прототип» (г. Самара) [24].

Одним из наиболее перспективных проектов в данной отрасли является программно-аппаратный комплекс «VR GO» (г. Томск) для реабилитации после ОНМК, в основе которого лежит принцип ассоциации реального и виртуального движения между человеком и его цифровым аватаром, позволяющий ускорить процесс реабилитации и дающий возможность осуществлять ее в домашних условиях [25].

Эффективность использования ВР при нейрореабилитации активно оценивается российскими и зарубежными учеными. Так, результаты исследования М. В. Долганова и соавт. (2019) по эффективности применения ВР при постинсультном парезе показывали, что включение короткого курса тренировок с применением данных технологий улучшает функцию верхней

конечности у пациентов в острый период ОНМК. Также у пациентов отмечалось улучшение стато-локомоторной функции уже на шестой день занятий [26].

Использование ВР благоприятно сказывается и на восстановлении двигательных функций у пациентов в остром периоде ОНМК. Участники исследования М. В. Долганова и соавт. (2019) по окончании реабилитационных мероприятий продемонстрировали достоверно значимое улучшение функции верхней конечности и активности в повседневной жизни [26].

Использование виртуальной реальности и интерфейса «мозг–компьютер», как метод восстановления двигательной функции верхних конечностей

Использование ВР в нейрореабилитации открывает новые горизонты для медицинской практики, преодолевая ограничения традиционных методов. Согласно работе А. Е. Хижниковой и соавт. (2016), существующие системы ВР, применяемые в двигательной реабилитации, можно разделить на два больших класса: настольные и иммерсионные [27]. Первый класс предполагает погружение в реальность через экран компьютера с использованием джойстика, мыши или специальной перчатки для управления, второй – использование шлема виртуальной реальности с полным погружением с возможностью управления посредством перчатки или костюма, в том числе с биологической обратной связью, например использование ИМК.

По данным мета-обзора Chen J. et al. (2022) 42 публикаций, описывающих эффективность использования ВР в локомоторной реабилитации верхних конечностей после перенесенных инсультов (совокупная выборка составила 1893 респондента), наблюдались значительные различия в ловкости рук, спастичности по шкале Эшворта, двигательной способности рук и кистей по сравнению с группой контроля [28].

Мета-анализ Rutkowski S. et al. (2020), включающий в себя 17 исследований, показал, что результаты реабилитации по шкале Фугль – Мейера были значительно выше у пациентов, проходивших ВР-реабилитацию в дополнение к классической терапии, по сравнению с контрольной группой [29].

В рамках анализа эффективности реабилитации нижних конечностей после инсульта с использованием технологий ВР проведен мета-анализ 12 исследований Kos A. et al. (2023) [30–33]. Выявлено, что кроме положительного воздействия на двигательную активность, у пациентов наблюдалось повышение мотивации к прохождению курсов реабилитации и снижение уровней депрессии в среднесрочном периоде.

Ю. Ю. Некрасова и соавторы (2021, 2022) также проводили клинические исследования с применением ВР в реабилитации после ОНМК и повреждений головного мозга [34, 35]. Во всех экспериментах были выявлены следующие положительные эффекты применения ВР-технологий: активное вовлечение пациентов в процесс выполнения упражнений, улучшение когнитивных функций и снижение уровня депрессии [36] (рис. 1).



Рис. 1. Стимуляция с помощью VR в отделении реабилитации и интенсивной терапии

Широкое внедрение в последние годы получил ИМК. Данная технология основана на электроэнцефалографии: специальный аппарат регистрирует электрическую активность

мозга и переводит ее в команды для управления устройствами. ИМК могут использоваться в обучении, улучшая когнитивные способности, память и скорость реакции [37, 38] (рис. 2).



Рис. 2. Выполнение реабилитационных упражнений с помощью экзоскелета «Экзокисть-3», управляемого через ИМК

Также особую роль ИМК играет в расширении коммуникативных возможностей людей с ограниченными возможностями здоровья, в том числе с такими расстройствами, как боковой амиотрофический склероз [39–41]. Кроме того, одним из возможных способов использования ИМК является управление протезами, инвалидными колясками и мобильными устройствами связи [36, 42, 46]. В контексте двигательной реабилитации ИМК может использоваться для управления виртуальными объектами. ИМК представляет собой технологию, позволяющую преобразовывать данные об активности головного мозга в управляющее воздействие на объект управления [34, 43–45]. Данным авторским коллективом проводилось сравнительное исследование применения ИМК в двигательной реабилитации пациентов на раннем восстановительном периоде в двух вариантах: совместно с роботизированной терапией (экзоскелет) и без нее. Как отмечают авторы: «Лечение продолжалось 4 недели, и по его окончании эффективность терапии была сопоставима в обеих группах, однако через 12 недель от начала лечения в группе ИМК+MIT Manus у большего количества больных (63,6 %) отмечалось дальнейшее улучшение двигательных функций в руке по сравнению с контрольной группой, в которой дальнейшее улучшение наблюдалось только у 35,7 %».

Обсуждение

К очевидным преимуществам использования ВР в сочетании с ИМК в двигательной реабилитации относятся:

1. Индивидуальная настройка.

ИМК позволяет персонализировать реабилитационные программы в зависимости от потребностей каждого пациента. Анализ активности мозга может помочь определить области, которые требуют особого внимания.

2. Мотивация и заинтересованность.

ВР создает интересные и визуально привлекательные пространства для реабилитации, что помогает пациентам оставаться мотивированными и увлеченными процессом.

3. Анализ и мониторинг.

Данные, собранные с помощью ВР и ИМК, могут быть использованы для непрерывного мониторинга и оценки прогресса пациента в реабилитации. Это позволяет адаптировать программы лечения в реальном времени.

Внедрение технологий ВР и ИМК в реабилитацию предоставляет многообещающие перспективы, однако сопряжено с рядом ограничений:

1. Высокие затраты на оборудование и разработку.

Приобретение специализированных гарнитур ВР и ИМК, а также разработка индивидуальных программ и симуляций может быть дорогостоящим процессом. Многие медицинские

учреждения и пациенты могут столкнуться с финансовыми ограничениями, что затрудняет доступность этих технологий.

2. Необходимость специализированной подготовки.

Внедрение ВР и ИМК требует обучения медицинского персонала и пациентов в использовании этой технологии. Это может быть вызовом, особенно для старшего поколения врачей и пациентов или тех, кто не имеет опыта работы с современными мобильными устройствами.

3. Недостаток научных исследований и стандартизации.

В настоящее время существует недостаток обширных научных исследований, подтверждающих эффективность ВР и ИМК в реабилитации. Недостаток стандартов и регулирования также может ограничить широкое внедрение данных технологий.

4. Необходимость интеграции с традиционными методами реабилитации.

Для успешного внедрения ВР и ИМК в реабилитацию необходимо интегрировать их с традиционными методами лечения и реабилитации. Это может потребовать изменений в протоколах лечения.

5. Индивидуальные ограничения и особенности пациентов.

Некоторые пациенты могут иметь физические или когнитивные ограничения, которые делают использование ВР и ИМК невозможным или затруднительным. Для таких случаев необходимы альтернативные методы реабилитации.

Заключение

Сочетание ВР и ИМК представляет мощный инструмент для двигательной реабилитации. Использование данных технологий в реабилитации повышает уровень персонализации, мотивацию пациентов, а также обеспечивает более точный мониторинг состояния пациента. В связи с вышеперечисленными сложностями внедрения данных технологий необходимо продолжить клинические исследования на базе отделений реабилитации медицинских учреждений, включая национальные медицинские исследовательские центры. Для внедрения подобных технологий в медицинскую практику потребуются создание междисциплинарных рабочих групп с привлечением как врачей-реабилитологов, неврологов, физиотерапевтов, так и специалистов в области биофизики, анализа данных и искусственного интеллекта. Существующим продуктам в данной области потребуются не только получение различных патентов, но и прохождение всех этапов сертификации для получения регистрационного удостоверения на медицинское изделие.

В перспективе 5–10 лет ожидается дальнейшее развитие и интеграция технологий ВР и ИМК в медицинскую практику, что позволит повысить эффективность восстановления двигательных функций у пациентов, перенесших инсульт, травмы позвоночника или другие заболевания, ассоциированные с частичной утратой локомоторных функций.

Список литературы

1. Bernardo A. Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training // World Neurosurgery. 2017. Vol. 106. P. 1015–1029.
2. Dang B. K., Palicte J. S., Valdez A., O'Leary-Kelley C. Assessing Simulation, Virtual Reality, and Television Modalities in Clinical Training // Clinical Simulation in Nursing. 2018. Vol. 19. P. 30–37.
3. Moro C., Stromberga Z., Raikos A., Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy // Anatomical Sciences Education. 2017. Vol. 10, № 6. P. 549–559.
4. Chytas D., Johnson E. O., Piagkou M. [et al.]. The role of augmented reality in Anatomical education: An overview // Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger. 2020. Vol. 229. P. 151463.
5. Kurniawan M. H., Suhajito D., Witjaksono G. Human Anatomy Learning Systems Using Augmented Reality on Mobile Application // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 135. P. 80–88.
6. Duarte M. L., Santos L. R., Guimarras Junior J. B., Peccin M. S. Learning anatomy by virtual reality and augmented reality. A scope review // Morphologie: Bulletin De l'Association Des Anatomistes. 2020. Vol. 104, № 347. P. 254–266.
7. Kempton S. J., Salyapongse A. N., Israel J. S., Mandel B. A. Surgical Education Module Improves Operative Proficiency in Endoscopic Carpal Tunnel Release: A Blinded Randomized Controlled Trial of Trainees // Journal of Surgical Education. 2018. Vol. 75, № 2. P. 442–449.
8. Heinrich F., Huettl F., Schmidt G. [et al.]. HoloPointer: a virtual augmented reality pointer for laparoscopic surgery training // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2021. T. 16. № 1. P. 161–168.
9. Labovitz J., Hubbard C. The Use of Virtual Reality in Podiatric Medical Education // Clinics in Podiatric Medicine and Surgery. 2020. Vol. 37, № 2. P. 409–420.

10. Duren van B. H., Sugand K., Wescott R. [et al.]. Augmented reality fluoroscopy simulation of the guide-wire insertion in DHS surgery: A proof of concept study // *Medical Engineering & Physics*. 2018. Vol. 55. P. 52–59.
11. Alaraj A., Lemole M. G., Finkle J. H. [et al.]. Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications // *Surgical Neurology International*. 2011. Vol. 2. P. 52.
12. Rahul K., Raj V. P. D., Srinivasan K. [et al.]. A Study on Virtual and Augmented Reality in Real-Time Surgery // *IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW) 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW)*. 2019. P. 1–2.
13. Ghaednia H., Fourman M. S., Lans A. [et al.]. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials // *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*. 2021. Vol. 21, № 10. P. 1617–1625.
14. Intra-operative augmented reality in distal locking | Semantic Scholar. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intra-operative-augmented-reality-in-distal-locking-Londei-Esposito/968985e4c3976494598c091dffa283e1fa845a3d> (дата обращения: 14.12.2023).
15. Tsukada S., Ogawa H., Nishino M. [et al.]. Augmented reality-based navigation system applied to tibial bone resection in total knee arthroplasty // *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2019. Vol. 6. P. 44.
16. Goh G. S., Lohre R., Parvizi J., Goel D. P. Virtual and augmented reality for surgical training and simulation in knee arthroplasty // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2021. Vol. 141, № 12. P. 2303–2312.
17. Virtual Human Interaction Lab. URL: <https://vhil.stanford.edu/> (дата обращения: 15.12.2023).
18. Virtual Reality for Surgery | Precison XR. URL: <https://surgicaltheater.com/> (дата обращения: 14.12.2023).
19. Робот да Винчи: хирурги, клиники, отзывы, преимущества, лечение. URL: <https://robot-davinci.ru/> (дата обращения: 14.12.2023).
20. Мурашко А. А. Возможности применения виртуальной реальности в психиатрии // *Социальная и клиническая психиатрия*. 2021. Т. 31, № 2. С. 101–105.
21. Virtually Better | Emory University | Atlanta GA. URL: <https://ott.emory.edu/about/success/virtuallybetter.html> (дата обращения: 14.12.2023).
22. VR Software for Mental Health Professionals' Therapy. URL: <https://ameliavirtualcare.com/> (дата обращения: 14.12.2023).
23. Zhang W., Paudel D., Shi R. [et al.]. Virtual Reality Exposure Therapy (VRET) for Anxiety Due to Fear of COVID-19 Infection: A Case Series // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2020. Vol. 16. P. 2669–2675.
24. Программа виртуальной нейрореабилитации для восстановления функций верхних и нижних конечностей «Девирта – Делфи» – купить по выгодной цене в Москве в ГК «Исток-Аудио». URL: https://www.istok-audio.com/catalog/product/virtualnaya_reabilitatsiya_devirta (дата обращения: 14.12.2023).
25. Тренажер для пассивной реабилитации ReviVR. URL: <https://revi.life/products/revivr/> (дата обращения: 15.12.2023).
26. VR GO – О нас. URL: <https://vr.go.team/about> (дата обращения: 14.12.2023).
27. Долганов М. В., Карпова М. И. Эффективность применения технологий виртуальной реальности при постинсультном парезе верхней конечности // *Пермский медицинский журнал*. 2018. Т. 35, № 1. С. 60–67. doi: 10.17816/pmj35160-67
28. Хижникова А. Е., Ключков А. С., Котовсмоленский А. М. [и др.]. Виртуальная реальность как метод восстановления двигательной функции руки // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2016. № 3. С. 5–11.
29. Chen J., Or C. K., Chen T. Effectiveness of Using Virtual Reality-Supported Exercise Therapy for Upper Extremity Motor Rehabilitation in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials // *Journal of Medical Internet Research*. 2022. Vol. 24, № 6, P. e24111.
30. Mane R., Wu Z., Wang D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review // *Stroke and Vascular Neurology*. 2022. Vol. 7, № 6. P. 541–549.
31. Повереннова И. Е., Захаров А. В., Хивинцева Е. В. [и др.]. Предварительные результаты исследования эффективности использования методики виртуальной реальности для восстановления двигательной функции нижних конечностей у пациентов в остром периоде инсульта // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2019. № 15. С. 172–176.
32. Aramaki A. L., Sampaio R. F., Cavalcanti A. Dutra FCMSE. Use of client-centered virtual reality in rehabilitation after stroke: a feasibility study // *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*. 2019. Vol. 77, № 9. P. 622–631. doi: 10.1590/0004-282X20190103
33. Zhang B., Li D., Liu Y. [et al.]. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Advanced Nursing*. 2021. Vol. 77, № 8. P. 3255–3273. doi: 10.1111/jan.14800
34. Rutkowski S., Kiper P., Cacciante L. [et al.]. Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020. Vol. 52, № 11. P. jrm00121.

35. Некрасова Ю. Ю., Воронцова В. С., Канарский М. М. [и др.]. Применение технологии виртуальной реальности в комплексной медицинской реабилитации. Медико-биологические, клинические и социальные вопросы здоровья и патологии человека : VII Всерос. науч. конф. студентов и молодых ученых с международным участием (г. Иваново, 6 апреля 2021 г.). Иваново : Ивановская государственная медицинская академия, 2021. С. 60–62.
36. Гунделах Ф. В., Станкевич Л. А., Сонькин К. М. Применение интерфейсов «мозг-компьютер» в ассистивных технологиях // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19, № 2. С. 277–301. doi: 10.15622/sp.2020.19.2.2
37. Петриков С. С., Гречко А. В., Щелкунова И. Г. [и др.]. Новые перспективы двигательной реабилитации пациентов после очагового поражения головного мозга // Вопросы нейрохирургии имени Н. Н. Бурденко. 2019. № 83. С. 90–99. doi: 10.17116/neiro20198306190
38. Крючков Ю. А., Щуковский Н. В., Шоломов И. И. Применение интерфейса «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР» в реабилитации пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта // Ульяновский медико-биологический журнал. 2019. № 33. С. 8–16.
39. Погонченкова И. В., Костенко Е. В., Петрова Л. В. Интерфейс мозг-компьютер с экзоскелетом кисти: новые возможности реабилитации // Московская медицина. 2022. № 4. С. 20–25.
40. Ларина Н. В., Корсунская Л. Л., Власенко С. В. Комплекс «Экзокисть-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с использованием неинвазивного интерфейса «мозг-компьютер» // Нервно-мышечные болезни. 2019. № 9. С. 44–50.
41. Карякин Н. Н., Шейко Г. Е., Воловик М. Г., Белова А. Н. Технологии виртуальной реальности в комплексной медицинской реабилитации пациентов с детским церебральным параличом // Бюллетень сибирской медицины. 2020. № 19 (2). С. 142–152. doi: 10.20538/1682-0363-2020-2-142–152
42. Massetti T, da Silva T. D., Crocetta T. B. [et al.]. The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation: A Systematic Review // Journal of Central Nervous System Disease. 2018. Vol. 10. doi: 10.1177/1179573518813541
43. Сорокина В. С., Некрасова Ю. Ю., Штерн М. В. [и др.]. Применение технологии виртуальной реальности для психологической реабилитации пациентов после повреждений головного мозга // Виртуальные технологии в медицине. 2022. № 1. С. 26–30.
44. Люкманов Р. Х., Черникова Л. А., Мокиенко О. А. Интерфейс мозг-компьютер: первый опыт клинического применения в России // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 1. С. 31–39. doi: 10.7868/S0131164616010136
45. Flesher S. N., Downey J. E., Weiss J. M. [et al.]. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control // Science. 2021. Vol. 372, № 6544. P. 831–836.
46. Канарский М. М., Некрасова Ю. Ю., Борисов И. В. [и др.]. VR-технологии в нейрореабилитации // Вестник Всероссийского общества специалистов по медико-социальной экспертизе, реабилитации и реабилитационной индустрии. 2021. № 1. С. 59–70. doi: 10.17238/issn1999-2351.2021.1.59-70

References

1. Bernardo A. Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training. *World Neurosurgery*. 2017;106:1015–1029.
2. Dang B.K., Palicte J.S., Valdez A., O’Leary-Kelley C. Assessing Simulation, Virtual Reality, and Television Modalities in Clinical Training. *Clinical Simulation in Nursing*. 2018;19:30–37.
3. Moro C., Stromberga Z., Raikos A., Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anatomical Sciences Education*. 2017;10(6):549–559.
4. Chytas D., Johnson E. O., Piagkou M. et al. The role of augmented reality in Anatomical education: An overview. *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger*. 2020;229:151463.
5. Kurniawan M.H., Suharjito D., Witjaksono G. Human Anatomy Learning Systems Using Augmented Reality on Mobile Application. *Procedia Computer Science*. 2018;135:80–88.
6. Duarte M.L., Santos L.R., Guimarges Junior J.B., Peccin M.S. Learning anatomy by virtual reality and augmented reality. A scope review. *Morphologie: Bulletin De l’Association Des Anatomistes*. 2020; 104(347): 254–266.
7. Kempton S.J., Salyapongse A.N., Israel J.S., Mandel B.A. Surgical Education Module Improves Operative Proficiency in Endoscopic Carpal Tunnel Release: A Blinded Randomized Controlled Trial of Trainees. *Journal of Surgical Education*. 2018;75(2):442–449.
8. Heinrich F., Huettl F., Schmidt G. et al. HoloPointer: a virtual augmented reality pointer for laparoscopic surgery training. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021;16(1):161–168.
9. Labovitz J., Hubbard C. The Use of Virtual Reality in Podiatric Medical Education. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*. 2020;37(2):409–420.
10. Duren van B.H., Sugand K., Wescott R. et al. Augmented reality fluoroscopy simulation of the guide-wire insertion in DHS surgery: A proof of concept study. *Medical Engineering & Physics*. 2018;55:52–59.

11. Alaraj A., Lemole M.G., Finkle J.H. et al. Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications. *Surgical Neurology International*. 2011;2:52.
12. Rahul K., Raj V.P.D., Srinivasan K. et al. A Study on Virtual and Augmented Reality in Real-Time Surgery. *IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW) 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW)*. 2019:1–2.
13. Ghaednia H., Fourman M.S., Lans A. et al. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*. 2021;21(10):1617–1625.
14. *Intra-operative augmented reality in distal locking / Semantic Scholar*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intra-operative-augmented-reality-in-distal-locking-Londei-Esposito/968985e4c3976494598c091dffa283e1fa845a3d> (accessed 14.12.2023).
15. Tsukada S., Ogawa H., Nishino M. et al. Augmented reality-based navigation system applied to tibial bone resection in total knee arthroplasty. *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2019;6:44.
16. Goh G.S., Lohre R., Parvizi J., Goel D.P. Virtual and augmented reality for surgical training and simulation in knee arthroplasty. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2021;141(12):2303–2312.
17. *Virtual Human Interaction Lab*. Available at: <https://vhil.stanford.edu/> (accessed 15.12.2023).
18. *Virtual Reality for Surgery | Precision XR*. Available at: <https://surgicaltheater.com/> (accessed 14.12.2023).
19. *Robot da Vinci: khirurgi, kliniki, otzvyv, preimushchestva, lechenie = The Da Vinci robot: surgeons, clinics, reviews, benefits, treatment*. (In Russ.). Available at: <https://robot-davinci.ru/> (accessed 14.12.2023).
20. Murashko A.A. Possibilities of using virtual reality in psychiatry. *Sotsial'naya i klinicheskaya psikiatriya = Social and clinical psychiatry*. 2021;31(2):101–105. (In Russ.)
21. *Virtually Better | Emory University | Atlanta GA*. Available at: <https://ott.emory.edu/about/success/virtuallybetter.html> (accessed 14.12.2023).
22. *VR Software for Mental Health Professionals' Therapy*. Available at: <https://ameliavirtualcare.com/> (accessed 14.12.2023).
23. Zhang W., Paudel D., Shi R. et al. Virtual Reality Exposure Therapy (VRET) for Anxiety Due to Fear of COVID-19 Infection: A Case Series. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2020;16:2669–2675.
24. *Programma virtual'noy neyrorabilitatsii dlya vosstanovleniya funktsiy verkhnikh i nizhnikh konechnostey «Devirta – Delfi» – kupit' po vygodnoy tsene v Moskve v GK «Istok-Audio» = Virtual neurorehabilitation program for restoring the functions of the upper and lower extremities "Devirta – Delphi" – buy at a bargain price in Moscow at Istok-Audio Group*. (In Russ.). Available at: https://www.istok-audio.com/catalog/product/virtualnaya_reabilitatsiya_devirta (accessed 14.12.2023).
25. *Trenazher dlya passivnoy rehabilitatsii ReviVR = ReviVR Passive Rehabilitation Simulator*. (In Russ.). Available at: <https://revi.life/products/revivr/> (accessed 15.12.2023).
26. *VR GO – O nas*. (In Russ.). Available at: <https://vrgo.team/about> (accessed 14.12.2023).
27. Dolganov M.V., Karpova M.I. The effectiveness of using virtual reality technologies in post-stroke paresis of the upper limb. *Permskiy meditsinskiy zhurnal = Perm Medical Journal*. 2018;35(1):60–67. (In Russ.). doi: 10.17816/pmj35160-67
28. Khizhnikova A.E., Klochkov A.S., Kotovsmolenskiy A.M. et al. Virtual reality as a method of restoring the motor function of the hand. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology*. 2016;(3):5–11. (In Russ.)
29. Chen J., Or C.K., Chen T. Effectiveness of Using Virtual Reality-Supported Exercise Therapy for Upper Extremity Motor Rehabilitation in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Medical Internet Research*. 2022;24(6):e24111.
30. Mane R., Wu Z., Wang D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review. *Stroke and Vascular Neurology*. 2022;7(6):541–549.
31. Poverennova I.E., Zakharov A.V., Khivintseva E.V. et al. Preliminary results of a study on the effectiveness of using virtual reality techniques to restore the motor function of the lower extremities in patients with acute stroke. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal = Saratov Scientific and Medical Journal*. 2019;(15):172–176. (In Russ.)
32. Aramaki A.L., Sampaio R.F., Cavalcanti A. Dutra FCMSE. Use of client-centered virtual reality in rehabilitation after stroke: a feasibility study. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*. 2019;77(9):622–631. doi: 10.1590/0004-282X20190103
33. Zhang B., Li D., Liu Y. et al. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Advanced Nursing*. 2021;77(8):3255–3273. doi: 10.1111/jan.14800
34. Rutkowski S., Kiper P., Cacciante L. et al. Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020; 52(11):jrm00121.
35. Nekrasova Yu.Yu., Vorontsova V.S., Kanarskiy M.M. et al. Application of virtual reality technology in complex medical rehabilitation. *Mediko-biologicheskie, klinicheskie i sotsial'nye voprosy zdorov'ya i patologii cheloveka: VII Vseros. nauch. konf. studentov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym*

- uchastiem (g. Ivanovo, 6 aprelya 2021 g.) = Biomedical, clinical and social issues of human health and pathology : VII All-Russian Scientific Conference of Students and Young Scientists with international participation (Ivanovo, April 6, 2021). Ivanovo: Ivanovskaya gosudarstvennaya meditsinskaya akademiya, 2021:60–62. (In Russ.)*
36. Gundelakh F.V., Stankevich L.A., Son'kin K.M. The use of "brain-computer" interfaces in assistive technologies. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAN*. 2020;19(2):277–301. (In Russ.). doi: 10.15622/sp.2020.19.2.2
 37. Petrikov S.S., Grechko A.V., Shchelkunova I.G. et al. New prospects for motor rehabilitation of patients after focal brain damage. *Voprosy neyrokhirurgii imeni N.N. Burdenko = Issues of neurosurgery named after N.N. Burdenko*. 2019;(83):90–99. (In Russ.). doi: 10.17116/neiro20198306190
 38. Kryuchkov Yu.A., Shchukovskiy N.V., Sholomov I.I. The use of the BRAIN-COMPUTER interface in the rehabilitation of patients with motor disorders after a stroke. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal = Ulyanovsk Medical and Biological Journal*. 2019;(33):8–16. (In Russ.)
 39. Pogonchenkova I.V., Kostenko E.V., Petrova L.V. Brain-computer interface with hand exoskeleton: new rehabilitation opportunities. *Moskovskaya meditsina = Moscow medicine*. 2022;(4):20–25. (In Russ.)
 40. Larina N.V., Korsunskaya L.L., Vlasenko S.V. The Exokist-2 complex in the rehabilitation of the upper limb in cerebral palsy using a non-invasive brain-computer interface. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular diseases*. 2019;(9):44–50. (In Russ.)
 41. Karyakin N.N., Sheyko G.E., Volovik M.G., Belova A.N. Virtual reality technologies in complex medical rehabilitation of patients with cerebral palsy. *Byulleten' sibirskoy meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2020;19(2):142–152. (In Russ.). doi: 10.20538/1682-0363-2020-2-142–152
 42. Massetti T, da Silva T.D., Crocetta T.B. et al. The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation: A Systematic Review. *Journal of Central Nervous System Disease*. 2018;10. doi: 10.1177/1179573518813541
 43. Sorokina V.S., Nekrasova Yu.Yu., Shtern M.V. et al. Application of virtual reality technology for psychological rehabilitation of patients after brain damage. *Virtual'nye tekhnologii v meditsine = Virtual technologies in medicine*. 2022;(1):26–30. (In Russ.)
 44. Lyukmanov R.Kh., Chernikova L.A., Mokienko O.A. Brain-computer interface: the first experience of clinical application in Russia. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 2016;42(1):31–39. doi: 10.7868/S0131164616010136
 45. Flesher S.N., Downey J.E., Weiss J.M. et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control. *Science*. 2021;372(6544):831–836.
 46. Kanarskiy M.M., Nekrasova Yu.Yu., Borisov I.V. et al. VR technologies in neurorehabilitation. *Vestnik Vserossiyskogo obshchestva spetsialistov po mediko-sotsial'noy ekspertize, reabilitatsii i reabilitatsionnoy industrii = Bulletin of the All-Russian Society of Specialists in Medical and Social Expertise, rehabilitation and Rehabilitation Industry*. 2021;(1):59–70. (In Russ.). doi: 10.17238/issn1999-2351.2021.1.59-70

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Александрович Самофалов

аспирант,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1)
E-mail: dmi.samofalov@gmail.com

Dmitriy A. Samofalov

Postgraduate student,
National Research Technological University "MISiS"
(b. 1, 4 Leninskiy avenue, Moscow, Russia)

Даниил Александрович Дегтерев

кандидат медицинских наук, врач-невролог,
заведующий отделением неврологии,
Московский клинический научный
центр имени А. С. Логина
(Россия, г. Москва, ул. Новогиреевская, 1 корп. 5)
E-mail: d.degterev@mknc.ru

Daniil A. Degterev

Candidate of medical sciences, neurologist,
head of the neurology department,
Moscow Clinical Scientific Center
named after A.S. Loginov
(p. 5, 1 Novogireevskaya street, Moscow, Russia)

Дарья Николаевна Печенина

ординатор,
Московский клинический научный
центр имени А. С. Логина
(Россия, г. Москва, ул. Новогиреевская, 1 корп. 5)
E-mail: darya.pechenina2017@yandex.ru

Daria N. Pechenina

Resident,
Moscow Clinical Scientific Center
named after A.S. Loginov
(p. 5, 1 Novogireevskaya street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 04.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 06.11.2024

Принята к публикации/Accepted 02.12.2024