

УДК 612.76

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.017](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.017)

К вопросу использования технологии дополненной реальности в реабилитации пациентов с нарушением функции равновесия

М.С. Галушка✉, В.Ю. Вишневецкий

Южный федеральный университет, Таганрог, Российская Федерация

Резюме. Анализ технических аспектов систем на основе дополненной реальности (AR-систем) для реабилитации пациентов с нарушением функции равновесия является важным вопросом в медицинской практике. Настоящее исследование представляет собой анализ работ, посвященных использованию AR-систем для реабилитации пациентов, имеющих проблемы с равновесием. В исследовании проанализирована 31 статья, опубликованная с 2018 года по 2023 год, об использовании различных AR-систем для реабилитации пациентов с проблемами баланса. Были рассмотрены технические характеристики AR-систем, такие как тип используемых устройств, функциональные возможности, доступность, удобство использования и эффективность в процессе реабилитации. Результаты анализа показали, что AR-системы могут быть эффективными в реабилитации пациентов с нарушением равновесия, особенно в случаях, когда традиционные методы лечения ограничены. Некоторые из систем могут использоваться дома, что позволяет сократить необходимость в больничных посещениях и уменьшить затраты на лечение. Однако многие из AR-систем все еще требуют доработок для повышения точности и удобства использования, а также улучшения доступности для широкого круга пациентов. Таким образом, AR-системы являются перспективным инструментом в реабилитации пациентов с нарушением функции равновесия, однако в целях повышения их эффективности следует рассмотреть вариант совместного использования AR-систем с другими устройствами для реабилитации, в частности, с силовыми платформами (стабилоплатформами).

Ключевые слова: дополненная реальность, реабилитация, равновесие, баланс.

Для цитирования: Галушка М.С., Вишневецкий В.Ю. К вопросу использования технологии дополненной реальности в реабилитации пациентов с нарушением функции равновесия. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1392> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.017

On the use of augmented reality technology in the rehabilitation of patients with balance disorders

M.S. Galushka✉, V.Yu. Vishnevetsky

Southern Federal University, Taganrog, the Russian Federation

Abstract. Analysis of the technical aspects of augmented reality systems (AR systems) for the rehabilitation of patients with impaired balance function is an important issue in medical practice. This study is an analysis of research on the use of AR systems for rehabilitating patients with balance problems. The study covered and analyzed 31 articles published between 2018 and 2023 that used various AR systems to rehabilitate patients with balance problems. The technical characteristics of AR systems were considered such as the type of devices used, functionality, accessibility, usability and effectiveness in the rehabilitation process. The results of the review showed that AR systems can be effective in the rehabilitation of patients with balance disorders, especially when traditional therapies are limited. Some of the systems can be used at home, which can reduce the need for hospital visits and reduce treatment costs. However, many of the AR systems still require improvements to enhance accuracy and usability as well as to improve accessibility for a wide range of patients. Therefore, AR

systems are a promising tool in the rehabilitation of patients with balance disorder; however, in order to increase their effectiveness, the option of using AR systems together with other rehabilitation devices, e.g. with force platforms, should be considered.

Keywords: augmented reality, rehabilitation, equilibrium, balance.

For citation: Galushka M.S., Vishnevetsky V.Yu. On the use of augmented reality technology in the rehabilitation of patients with balance disorders. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvivot.ru/ru/journal/pdf?id=1392> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.017 (In Russ.).

Введение

В настоящее время проблемы с балансом являются распространенной причиной падений и травм у людей всех возрастов [1]. Хотя физические упражнения и терапия могут помочь улучшить баланс, некоторые люди могут испытывать трудности из-за физических ограничений или боли.

В последние годы системы дополненной реальности (AR) стали широко использоваться в медицинской реабилитации, включая реабилитацию пациентов с нарушением равновесия [2]. AR-системы позволяют создавать виртуальные среды, в которых пациент может выполнять различные упражнения и движения, что способствует улучшению баланса, силы мышц и диапазона движения.

Однако до сих пор не было проведено систематическое обзорное исследование, посвященное техническим аспектам AR-систем для реабилитации пациентов с нарушением равновесия. Целью данного обзора является анализ технических характеристик AR-систем, использованных для реабилитации пациентов с нарушением равновесия, с целью определения их эффективности и возможных ограничений.

Материалы и методы

Данное исследование проводится в формате систематического обзора с использованием воспроизводимой методологии. В обзоре использовалась PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [3] для отбора и оценки качества включенных статей.

В данном обзоре анализируются исследования, опубликованные с 2018 по 2023 годы, включающие анализ систем дополненной реальности, применяемых в реабилитации пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата нижних конечностей.

Для отбора статей, соответствующих критериям включения, были использованы такие базы данных, как PubMed, ScienceDirect, Google Scholar и Mendeley. Ключевые слова, использованные для поиска, включали augmented reality, rehabilitation, gait, balance. Поиск был ограничен англоязычными статьями.

Отбирались статьи, соответствующие следующим критериям:

1. Описывали использование систем дополненной реальности в реабилитации пациентов с нарушением равновесия.

2. Публиковались в период с 2018 по 2023 годы.

3. Были доступны на английском языке.

Для анализа данных был использован метод синтеза включенных статей. По результатам анализа были выделены основные технические характеристики систем дополненной реальности, применяемых в реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия.

В данном обзоре не проводился статистический анализ данных.

В данном обзоре не были затронуты вопросы этики и конфиденциальности, так как использовались только уже опубликованные материалы.

Одним из главных ограничений данного обзора является отсутствие возможности проводить мета-анализ результатов из-за значительной разнообразности технических решений систем дополненной реальности, использованных в исследованиях. Кроме того, наличие публикационного смещения в сторону положительных результатов также может повлиять на результаты данного обзора.

С использованием ключевых слов и ограничений поиска, описанных выше, были получены 134 статьи из разных источников. После удаления дубликатов и применения критериев включения осталось 31 статья, включенная в данное исследование.

После оценки качества включенных статей выделены основные технические характеристики систем дополненной реальности, применяемых в реабилитации пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата нижних конечностей. Эти технические характеристики описаны в разделе «Результаты».

Результаты

В данный обзор был включен 31 источник, где авторы описывают применение систем дополненной реальности в реабилитации пациентов с нарушением функции равновесия.

Технические характеристики систем дополненной реальности, использованные в исследованиях, включают:

1. Тип устройства для вывода информации: большинство систем дополненной реальности, использованных в исследованиях, были основаны на носимых устройствах, таких как очки дополненной реальности (HoloLens и GoogleGlass) [4-10], беговая дорожка с дополненной реальностью [11], смартфон [12] или проекционные системы [13].

2. Тип обратной связи: большинство систем дополненной реальности включают обратную связь, которая может быть визуальной [4-6, 14-16], звуковой [16] или тактильной [14].

3. Тип устройств получения внешней информации: большинство исследований проводилось с использованием внешних камер для захвата изображения [17], в частности, Microsoft Kinect, или инерциальных измерительных блоков [18-20], в одном исследовании использовались датчики для поверхностной электромиографии [21].

4. Тип задач: системы дополненной реальности были использованы для выполнения различных задач, включая тренировку баланса, укрепление мышц, увеличение диапазона движения и улучшение координации [22].

5. Интерактивность: системы дополненной реальности могут быть интерактивными, что позволяет пользователям взаимодействовать с виртуальным окружением [23].

Медицинские показания: большинство исследований производило реабилитацию нарушений баланса по причине детского церебрального паралича [9, 24], болезни Паркинсона [8, 25-28], инсульта [29, 26, 30], заболевания нижних конечностей [31, 32], вестибулярная гиподисфункция [33], наследственная спастическая параплегия [11], травмы головного или спинного мозга [34].

Результаты исследований показали, что применение систем дополненной реальности в реабилитации пациентов с нарушением функции равновесия может приводить к улучшению баланса и уменьшению боли. Кроме того, системы дополненной реальности могут быть эффективными в улучшении мотивации для выполнения

регулярных упражнений, увеличении диапазона движения и улучшении координации движений.

Большая часть исследований использовала очки дополненной реальности и проекционные системы. Очки дополненной реальности позволяют эффективно производить проекцию виртуальной информации на поле зрения человека, однако некоторые пациенты отмечают неудобство использования и даже в отдельных случаях головокружение. Проекционные системы не сковывают движений, однако могут иметь ограничение в качестве изображения и необходимость в организации большого пространства.

Тип обратной связи в большинстве случаев был визуальным, поскольку данный способ позволяет пациентам лучше представлять результаты своих действий во время тренировок.

Для получения внешней информации в большинстве исследований использовались внешние камеры, например, Microsoft Kinect и инерциальные измерительные блоки. Главным достоинством является возможность делать захват движений без использования нательных датчиков, однако из-за этого точность захвата несколько ниже, чем при использовании нательных датчиков, а также необходимо использовать помещения с хорошим освещением. Инерциальные же датчики предоставляют наиболее точную информацию о положении и ориентации в пространстве пациента, однако пациенты отмечают, что они менее удобны в использовании, кроме того, эти датчики нужно периодически калибровать.

Как показывают рассмотренные исследования, индивидуальный подход к пациенту, а также введение интерактивных элементов в реабилитацию при помощи технологии дополненной реальности повышает мотивацию и комплаентность пациента.

Однако необходимо отметить, что не все исследования имели высокий уровень доказательной базы и некоторые из них были ограничены небольшими выборками пациентов. Кроме того, существует потребность в дальнейших исследованиях для определения оптимальных параметров систем дополненной реальности для реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия.

Также было отмечено, что доступность и стоимость систем дополненной реальности являются ограничивающими факторами и могут быть высокими для многих медицинских учреждений и пациентов.

В целом, результаты данного обзора показывают, что системы дополненной реальности могут быть эффективными в реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия. Однако, необходимо проведение дальнейших исследований с более крупными выборками пациентов и определение оптимальных параметров систем дополненной реальности для достижения наилучших результатов в реабилитации.

Обсуждение

Результаты данного обзора свидетельствуют о том, что системы дополненной реальности могут быть эффективными в реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия. Они могут использоваться для улучшения баланса, силы мышц и диапазона движения, а также для улучшения функциональности нижних конечностей. В частности, системы дополненной реальности могут быть полезны для улучшения реабилитации пациентов с различными заболеваниями, такими как остеоартрит, спинальные повреждения, травмы и др.

Один из ключевых технических компонентов AR-системы – это устройство для вывода информации. В исследованиях было выявлено, что наиболее распространенными устройствами являются очки дополненной реальности, такие как HoloLens и Google

Glass, а также проекционные системы. Очки AR позволяют проецировать виртуальную информацию прямо на поле зрения пациента, что делает их эффективным инструментом в реабилитации. Они обеспечивают пациенту возможность наблюдать визуальные инструкции и реагировать на них в режиме реального времени. Проекционные системы, в свою очередь, не ограничивают движения пациента, что может быть полезным при выполнении определенных упражнений. Однако следует отметить, что очки AR могут быть более удобными в использовании, так как они обеспечивают более интимное взаимодействие с пациентом.

Другим важным техническим компонентом является тип обратной связи. В большинстве исследований использовалась визуальная обратная связь, которая может быть представлена визуальными инструкциями, графиками или анимациями. Визуальная обратная связь позволяет пациенту наглядно видеть результаты своих движений и корректировать их соответствующим образом. Она может быть особенно полезной при тренировке баланса и координации. Однако в некоторых случаях может быть полезной также звуковая или тактильная обратная связь, особенно при работе с пациентами с нарушениями зрения или слуха.

Третий технический компонент, который следует рассмотреть, устройства получения внешней информации. В исследованиях использовались различные устройства, такие как внешние камеры (например, Microsoft Kinect) и инерциальные измерительные блоки. Внешние камеры позволяют захватывать движения пациента без использования нателных датчиков. Они могут использоваться для отслеживания позиции тела и движений, что важно при тренировке баланса и координации. Инерциальные измерительные блоки предоставляют более точную информацию о положении и ориентации пациента в пространстве. Эти устройства позволяют точнее отслеживать движения и могут быть особенно полезны при работе с пациентами, у которых требуется высокая точность измерений.

Важно отметить, что выбор технических компонентов должен основываться на конкретных потребностях пациента и характеристиках заболевания. Например, у пациентов с травмами головного или спинного мозга или с ограниченными возможностями движения, более подходящим вариантом может быть использование очков AR, так как они обеспечивают прямую визуальную обратную связь и не требуют сложного взаимодействия с устройствами. В то же время, пациенты с более сложными случаями нарушения равновесия могут получить больше пользы от использования инерциальных измерительных блоков для более точного отслеживания и анализа движений.

Тем не менее, использование AR очков может сопровождаться головокружением, как одним из побочных эффектов использования. Данная реакция зависит от серьезности вестибулярных нарушений, интенсивности визуальных эффектов, синхронизации визуальной информации с движениями головы, а также индивидуальной чувствительности пациента к подобного рода стимуляции.

Однако важно отметить, что реакция на использование AR очков может быть индивидуальной и зависит от каждого конкретного случая. Некоторые пациенты могут не испытывать головокружения или других негативных эффектов, в то время как у других пациентов они могут проявляться более явно.

Для снижения риска возникновения головокружения при использовании AR очков в реабилитации пациентов с травмами головы, рекомендуется:

1. Постепенное введение и привыкание к технологии. Пациентам следует предоставить возможность постепенно приспосабливаться к AR очкам, начиная с коротких сеансов использования и увеличивая их продолжительность по мере того, как пациент привыкает к ним.

2. Настройка интенсивности визуальных эффектов. Возможно, необходимо регулировать интенсивность и яркость визуальных эффектов, чтобы снизить возможное негативное воздействие на вестибулярную систему пациента.

3. Индивидуальный подход. Важно учитывать индивидуальные особенности и реакции каждого пациента на AR технологии. Предварительная оценка пациента и консультация с медицинским специалистом могут помочь определить, насколько безопасно и эффективно будет использование AR очков в данном случае.

4. Следить за пациентом. Во время использования AR очков необходимо внимательно наблюдать за пациентом и отслеживать его реакцию. Если пациент испытывает существенное головокружение или дискомфорт, следует прекратить использование AR технологии.

В случае, когда индивидуальная реакция пациента не позволяет использовать очки дополненной реальности, необходимо использовать проекционные системы для вывода визуальной обратной связи. В контексте реабилитации двигательной функции и функции равновесия возможно использование следующих разновидностей проекционных систем:

1. Пол-проекционные системы: Эти системы проецируют визуальные элементы на пол или на специальную платформу, на которой пациент выполняет упражнения. Одним из преимуществ таких систем является свобода движений пациента, поскольку проекция на пол позволяет ему свободно перемещаться в пространстве. Кроме того, такие системы могут создавать эффект присутствия виртуальных объектов в реальном окружении, что улучшает ощущение вовлеченности. Недостатком пол-проекционных систем может быть ограничение в качестве изображения и требование к наличию достаточного пространства для их размещения.

2. Стеновые проекционные системы: Эти системы проецируют визуальные элементы на стены помещения, в котором пациент проводит реабилитационные сеансы. Преимуществом стеновых проекционных систем является возможность создания широкого поля зрения и обеспечение более реалистичной визуальной среды для пациента. Они также могут быть более доступными в плане стоимости и требований к пространству по сравнению с другими AR технологиями. Недостатком стеновых проекционных систем может быть ограничение в свободе движений пациента, так как он ограничен в перемещении только в пределах помещения.

3. Переносные проекционные системы: Эти системы представляют собой портативные устройства, которые могут быть размещены вблизи пациента или на его теле. Преимуществом переносных проекционных систем является их мобильность и гибкость, позволяющая использовать AR технологии в различных условиях и с разными пациентами. Они могут быть легкими и компактными, что облегчает их переноску и установку. Недостатком таких систем может быть ограниченная проекционная область и потенциальные проблемы с точностью отслеживания движений, особенно если устройство не установлено надежно.

Интеграция дополненной реальности с другими средствами реабилитации движения и равновесия также выглядит перспективным направлением исследований. Среди подобного типа устройств можно выделить следующие:

1. Экзоскелеты и поддерживающие устройства. Интеграция AR с экзоскелетами и другими поддерживающими устройствами позволяет создавать визуальные подсказки и указания для правильного использования этих устройств в процессе реабилитации. Пациенты могут получать обратную связь о своем положении, движении и нагрузке, что помогает им лучше контролировать свои действия и улучшать свои двигательные функции. Интеграция экзоскелетов и поддерживающих устройств с дополненной

реальностью позволит проводить более эффективную и безопасную реабилитацию даже при самых серьезных поражениях функции равновесия и двигательной функции.

2. Сенсорные и силовые платформы (стабилоплатформы). Интеграция AR с сенсорными и силовыми платформами позволяет создавать визуальные элементы, которые реагируют на контакт пациента с поверхностью. Это может быть полезно для тренировки баланса, координации и управления нижними конечностями. Пациенты могут получать визуальную обратную связь о своем равновесии, точности движений и контроле над своим телом. Кроме того, на данный момент стабилоплатформы являются одним из самых эффективных инструментов для оценки и реабилитации пациентов с нарушением двигательных функций.

Таким образом, выбор оптимальных технических компонентов для использования AR в реабилитации зависит от многих факторов, включая тип заболевания, индивидуальные особенности пациента и целевые показатели реабилитации. Очки AR, проекционные системы, внешние камеры и инерциальные измерительные блоки, экзоскелеты и стабилоплатформы представляют различные технические решения, которые могут быть применены с учетом специфики конкретного случая.

Тем не менее, внедрение дополненной реальности в практику реабилитации может сталкиваться с рядом проблем. Например, доступность и стоимость систем дополненной реальности могут быть высокими для многих медицинских учреждений и пациентов, что является ограничивающим фактором для широкого использования этих технологий в реабилитации. Однако, с развитием технологий и увеличением спроса на системы дополненной реальности, можно ожидать снижения стоимости и улучшения доступности этих систем в ближайшее время. Другой проблемой является отсутствие универсального решения для реабилитации каждого пациента, потому для каждого пациента будет более эффективной конкретная система реабилитации.

В целом, системы дополненной реальности могут представлять собой инновационный подход к реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия. Однако, для достижения наилучших результатов, необходимо проводить дальнейшие исследования для определения оптимальных параметров систем дополненной реальности и их применения в различных условиях реабилитации, в частности, рассмотреть возможность совместного использования систем дополненной реальности с силовыми платформами (стабилоплатформами) и экзоскелетами и поддерживающими устройствами для улучшения качества реабилитации.

Заключение

В данном обзоре были проанализированы технические аспекты систем дополненной реальности для реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия. Результаты показали, что системы дополненной реальности могут быть эффективными в улучшении баланса, силы мышц и диапазона движения, а также в улучшении функциональности нижних конечностей.

Однако необходимо учитывать, что эффективность систем дополненной реальности может зависеть от различных факторов, таких как возраст пациента, степень тяжести заболевания и индивидуальных особенностей. Для достижения наилучших результатов необходимо проводить индивидуальную настройку систем дополненной реальности в соответствии с потребностями и способностями пациентов.

Кроме того, доступность и стоимость систем дополненной реальности могут быть высокими, что является ограничивающим фактором для широкого использования этих технологий в реабилитации. Однако, с развитием технологий и увеличением спроса на

системы дополненной реальности, можно ожидать снижения стоимости и улучшения доступности этих систем в ближайшее время.

Таким образом, системы дополненной реальности могут представлять собой инновационный и перспективный подход к реабилитации пациентов с нарушениями функции равновесия. Однако для оптимального использования этих технологий в реабилитации необходимо проводить дальнейшие исследования для определения наилучших параметров их применения в различных условиях реабилитации, а также возможность использования AR-систем совместно с силовыми платформами и экзоскелетами и поддерживающими устройствами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. World Health Organisation. Falls. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls> (дата обращения: 01.05.2023).
2. Kevser S.K., Cihangir K. Bibliometric analysis of research in pediatrics related to virtual and augmented reality: a systematic review. *Current Pediatric Reviews*. 2023 Feb 14. DOI: 10.2174/1573396319666230214103103.
3. Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*. 2009;339:b2535. DOI: 10.1136/bmj.b2535.
4. Baashar Y., Alkawsy G., Wan Ahmad W.N., Alomari M.A., Alhussian H., Tiong S.K. Towards wearable augmented reality in healthcare: a comparative survey and analysis of head-mounted displays. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023;20(5):3940. DOI: 10.3390/ijerph20053940.
5. Guinet A., Bams M., Payan-Terral S. et al. Effect of an augmented reality active video game for gait training in children with cerebral palsy following single-event multilevel surgery: protocol for a randomised controlled trial. *BMJ*. 2022;12:e061580. DOI: 10.1136/bmjopen-2022-061580.
6. Riem L., Van Dehy J., Onushko T., Beardsley S. Inducing compensatory changes in gait similar to external perturbations using an immersive head mounted display. *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Tuebingen/Reutlingen, Germany*. 2018. p. 128–135. DOI: 10.1109/VR.2018.8446432.
7. Evans E., Dass M., Muter W.M., Tuthill C., Tan A.Q., Trumbower R.D. A wearable mixed reality platform to augment overground walking: a feasibility study. *Front Hum Neurosci*. 2022;16:868074. DOI: 10.3389/fnhum.2022.868074.
8. Lee A., Hellmers N., Vo M., Wang .F, Popa P., Barkan S., Patel D., Campbell C., Henchcliffe C., Sarva H. Can Google glass™ technology improve freezing of gait in parkinsonism? A pilot study. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2023;18(3):327–332. DOI: 10.1080/17483107.2020.1849433.
9. Guinet A.L., Bouyer G., Otmane S., Desailly E. Validity of hololens augmented reality head mounted display for measuring gait parameters in healthy adults and children with cerebral palsy. *Sensors (Basel)*. 2021;21(8):2697. DOI: 10.3390/s21082697.
10. Chan Z.Y.S, MacPhail A.J.C., Au I.P.H., Zhang J.H., Lam B.M.F. et al. Walking with head-mounted virtual and augmented reality devices: Effects on position control and gait biomechanics. *PLOS ONE*. 2019;14(12):e0225972. DOI: 10.1371/journal.pone.0225972.
11. van de Venis L., van de Warrenburg B., Weerdesteyn V., Geurts A.C.H., Nonnekes J. Gait-adaptability training in people with hereditary spastic paraplegia: a randomized clinical trial. *Neurorehabil Neural Repair*. 2023;37(1):27–36. DOI: 10.1177/15459683221147839.

12. Jin Y., Monge J., Postolache O., Niu W. Augmented reality with application in physical rehabilitation. *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI), Lisbon, Portugal*. 2019. p. 1–6. DOI: 10.1109/ISSI47111.2019.9043665.
13. Beatriz P., Campos P., Azadegan A. Digitally augmenting the physical ground space with timed visual cues for crutch-assisted walking. *CHI EA '19: 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 1-6. DOI: 10.1145/3290607.3312891.
14. Hidayah R., Chamarchy S., Shah A., Fitzgerald-Maguire M., Agrawal S.K. Walking with augmented reality: a preliminary assessment of visual feedback with a cable-driven active leg exoskeleton (C-ALEX). *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4(4):3948–3954. DOI: 10.1109/LRA.2019.2929989.
15. Koop M.M., Rosenfeldt A.B., Johnston J.D., Streicher M.C., Qu J., Alberts J.L. The HoloLens augmented reality system provides valid measures of gait performance in healthy adults. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2020;50(6):584–592. DOI: 10.1109/THMS.2020.3016082.
16. Miller D.A.L., Ogata T., Sasabe G., Shan L., Tsumura N., Miyake Y. Spatiotemporal gait guidance using audiovisual cues of synchronized walking avatar in augmented reality. *IEEE Access*. 2022;10:90498–90506. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3200744.
17. Hurtado J., Saint-Priest Y., Caicedo E. Development of a gait recognition visualization system using augmented reality. *International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV), Hong Kong, China*. 2019. p. 196–199. DOI: 10.1109/ICVRV47840.2019.00046.
18. Lupo A, Cinnera AM, Pucello A, Iosa M, Coiro P, Personeni S, Gimigliano F, Iolascon G, Paolucci S, Morone G. Effects on balance skills and patient compliance of biofeedback training with inertial measurement units and exergaming in subacute stroke: a pilot randomized controlled trial. *Funct Neurol*. 2018;33(3):131–136. PMID: 30457965.
19. Lupo A., Martino Cinnera A., Pucello A., Iosa M., Coiro P., Personeni S., Gimigliano F., Iolascon G., Paolucci S., Morone G. Effects on balance skills and patient compliance of biofeedback training with inertial measurement units and exergaming in subacute stroke: a pilot randomized controlled trial. *Functional neurology*. 2018;33:131–136. PMID: 30457965.
20. Miller Koop M, Rosenfeldt A.B., Owen K., Penko A.L., Streicher M.C., Albright A., Alberts J.L. The Microsoft HoloLens 2 provides accurate measures of gait, turning, and functional mobility in healthy adults. *Sensors (Basel)*. 2022;22(5):2009. DOI: 10.3390/s22052009.
21. Günaydin T., Arslan R. B., LOWER-LIMB FOLLOW-UP: A surface electromyography based serious computer game and patient follow-up system for lower extremity muscle strengthening exercises in physiotherapy and rehabilitation. *IEEE 32nd International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS), Cordoba, Spain*. 2019. p. 507–512. DOI: 10.1109/CBMS.2019.00103.
22. Held J.P.O., Yu K., Pyles C., Veerbeek J.M., Bork F., Heining S.M., Navab N., Luft A.R. Augmented reality-based rehabilitation of gait impairments: case report. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2020;8(5):e17804. DOI: 10.2196/17804.
23. Vinolo Gil M.J., Gonzalez-Medina G., Lucena-Anton D., Perez-Cabezas V., Ruiz-Moliner M.D.C., Martín-Valero R. Augmented reality in physical therapy: systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games*. 2021;9(4):e30985. DOI: 10.2196/30985.
24. Guinet A.L., Nejjib K., Otmane S., Bouyer G., Desailly E. Exploring visual feedback modalities in augmented reality to control the walking speed of children with cerebral palsy. Experimental design protocol. *Gait & Posture*. 2020;81:120–121. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.07.094.

25. Abbruzzese G., Pelosin E. Rehabilitation of Parkinson's disease. *Advanced Technologies for the Rehabilitation of Gait and Balance Disorders*. DOI: 10.1007/978-3-319-72736-3_10.
26. Enam N., Veerubhotla A., Ehrenberg N., Kirshblum S., Nolan K.J., Pilkar R. Augmented-reality guided treadmill training as a modality to improve functional mobility post-stroke: A proof-of-concept case series. *Top Stroke Rehabil.* 2021;28(8):624–630. DOI: 10.1080/10749357.2020.1864987.
27. Alberts J.L., Kaya R.D., Scelina K., Scelina L., Zimmerman E.M., Walter B.L., Rosenfeldt A.B. Digitizing a therapeutic: development of an augmented reality dual-task training platform for parkinson's disease. *Sensors.* 2022;22(22):8756, DOI: 10.3390/s22228756.
28. Gulcan K., Guclu-Gunduz A., Yasar E., Ar U., Sucullu Karadag Y., Saygili F. The effects of augmented and virtual reality gait training on balance and gait in patients with Parkinson's disease. *Acta Neurol Belg.* 2022 Nov 28:1–9. DOI: 10.1007/s13760-022-02147-0.
29. Timmermans C., Roerdink M., Meskers C.G.M. et al. Walking-adaptability therapy after stroke: results of a randomized controlled trial. *Trials.* 2022;1:923. DOI: 10.1186/s13063-021-05742-3
30. Phan H.L., Le T.H., Lim J.M., Hwang C.H., Koo K.-i. Effectiveness of augmented reality in stroke rehabilitation: a meta-analysis. *Appl. Sci.* 2022;12:1848. DOI: 10.3390/app12041848.
31. Ulrich B., Pereira L.C., Jolles B.M., Favre J. Walking with shorter stride length could improve knee kinetics of patients with medial knee osteoarthritis. *J Biomech.* 2023;147:111449. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2023.111449.
32. Chang H., Song Y., Cen X. Effectiveness of augmented reality for lower limb rehabilitation: a systematic review. *Appl Bionics Biomech.* 2022;2022:4047845. DOI: 10.1155/2022/4047845.
33. Hall C.D., Herdman S.J., Whitney S.L., Anson E.R., Carender W.J., Hoppes C.W., Cass S.P., Christy J.B., Cohen H.S., Fife T.D., Furman J.M., Shepard N.T., Clendaniel R.A., Dishman J.D., Goebel J.A., Meldrum D., Ryan C., Wallace R.L., Woodward N.J. Vestibular rehabilitation for peripheral vestibular hypofunction: an updated clinical practice guideline from the academy of neurologic physical therapy of the American Physical Therapy Association. *J Neurol Phys Ther.* 2022;46(2):118–177. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000382.
34. Boerger T.F., Hynstrom A.S., Furlan J.C., Kalsi-Ryan S., Curt A., Kwon B.K., Kurpad S.N., Fehlings M.G., Harrop J.S., Aarabi B., Rahimi-Movaghar V., Guest J.D., Wilson J.R., Davies B.M., Kotter M.R.N., Koljonen P.A. Developing peri-operative rehabilitation in degenerative cervical myelopathy. AO Spine RECODE-DCM Research Priority Number 6: An Unexplored Opportunity? *Global Spine J.* 2022;12(1_suppl):97S–108S. DOI: 10.1177/21925682211050925.

REFERENCES

1. World Health Organisation. Falls. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls> (accessed on 01.05.2023).
2. Kevser S.K., Cihangir K. Bibliometric analysis of research in pediatrics related to virtual and augmented reality: a systematic review. *Current Pediatric Reviews.* 2023 Feb 14. DOI: 10.2174/1573396319666230214103103.

3. Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*. 2009;339:b2535. DOI: 10.1136/bmj.b2535.
4. Baashar Y., Alkawsy G., Wan Ahmad W.N., Alomari M.A., Alhussian H., Tiong S.K. Towards wearable augmented reality in healthcare: a comparative survey and analysis of head-mounted displays. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023;20(5):3940. DOI: 10.3390/ijerph20053940.
5. Guinet A., Bams M., Payan-Terral S. et al. Effect of an augmented reality active video game for gait training in children with cerebral palsy following single-event multilevel surgery: protocol for a randomised controlled trial. *BMJ*. 2022;12:e061580. DOI: 10.1136/bmjopen-2022-061580.
6. Riem L., Van Dehy J., Onushko T., Beardsley S. Inducing compensatory changes in gait similar to external perturbations using an immersive head mounted display. *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Tuebingen/Reutlingen, Germany*. 2018. p. 128–135. DOI: 10.1109/VR.2018.8446432.
7. Evans E., Dass M., Muter W.M., Tuthill C., Tan A.Q., Trumbower R.D. A wearable mixed reality platform to augment overground walking: a feasibility study. *Front Hum Neurosci*. 2022;16:868074. DOI: 10.3389/fnhum.2022.868074.
8. Lee A., Hellmers N., Vo M., Wang .F, Popa P., Barkan S., Patel D., Campbell C., Henchcliffe C., Sarva H. Can Google glass™ technology improve freezing of gait in parkinsonism? A pilot study. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2023;18(3):327–332. DOI: 10.1080/17483107.2020.1849433.
9. Guinet A.L., Bouyer G., Otmane S., Desailly E. Validity of hololens augmented reality head mounted display for measuring gait parameters in healthy adults and children with cerebral palsy. *Sensors (Basel)*. 2021;21(8):2697. DOI: 10.3390/s21082697.
10. Chan Z.Y.S, MacPhail A.J.C., Au I.P.H., Zhang J.H., Lam B.M.F. et al. Walking with head-mounted virtual and augmented reality devices: Effects on position control and gait biomechanics. *PLOS ONE*. 2019;14(12):e0225972. DOI: 10.1371/journal.pone.0225972.
11. van de Venis L., van de Warrenburg B., Weerdesteyn V., Geurts A.C.H., Nonnekens J. Gait-adaptability training in people with hereditary spastic paraplegia: a randomized clinical trial. *Neurorehabil Neural Repair*. 2023;37(1):27–36. DOI: 10.1177/15459683221147839.
12. Jin Y., Monge J., Postolache O., Niu W. Augmented reality with application in physical rehabilitation. *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI), Lisbon, Portugal*. 2019. p. 1–6. DOI: 10.1109/ISSI47111.2019.9043665.
13. Beatriz P., Campos P., Azadegan A. Digitally augmenting the physical ground space with timed visual cues for crutch-assisted walking. *CHI EA '19: 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 1-6. DOI: 10.1145/3290607.3312891.
14. Hidayah R., Chamarthy S., Shah A., Fitzgerald-Maguire M., Agrawal S.K. Walking with augmented reality: a preliminary assessment of visual feedback with a cable-driven active leg exoskeleton (C-ALEX). *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4(4):3948–3954. DOI: 10.1109/LRA.2019.2929989.
15. Koop M.M., Rosenfeldt A.B., Johnston J.D., Streicher M.C., Qu J., Alberts J.L. The HoloLens augmented reality system provides valid measures of gait performance in healthy adults. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2020;50(6):584–592. DOI: 10.1109/THMS.2020.3016082.
16. Miller D.A.L., Ogata T., Sasabe G., Shan L., Tsumura N., Miyake Y. Spatiotemporal gait guidance using audiovisual cues of synchronized walking avatar in augmented reality. *IEEE Access*. 2022;10:90498–90506. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3200744.
17. Hurtado J., Saint-Priest Y., Caicedo E. Development of a gait recognition visualization system using augmented reality. *International Conference on Virtual Reality and*

- Visualization (ICVRV)*, Hong Kong, China. 2019. p. 196–199. DOI: 10.1109/ICVRV47840.2019.00046.
18. Lupo A, Cinnera AM, Pucello A, Iosa M, Coiro P, Personeni S, Gimigliano F, Iolascon G, Paolucci S, Morone G. Effects on balance skills and patient compliance of biofeedback training with inertial measurement units and exergaming in subacute stroke: a pilot randomized controlled trial. *Funct Neurol*. 2018;33(3):131–136. PMID: 30457965.
 19. Lupo A., Martino Cinnera A., Pucello A., Iosa M., Coiro P., Personeni S., Gimigliano F., Iolascon G., Paolucci S., Morone G. Effects on balance skills and patient compliance of biofeedback training with inertial measurement units and exergaming in subacute stroke: a pilot randomized controlled trial. *Functional neurology*. 2018;33:131–136. PMID: 30457965.
 20. Miller Koop M, Rosenfeldt A.B., Owen K., Penko A.L., Streicher M.C., Albright A., Alberts J.L. The Microsoft HoloLens 2 provides accurate measures of gait, turning, and functional mobility in healthy adults. *Sensors (Basel)*. 2022;22(5):2009. DOI: 10.3390/s22052009.
 21. Günaydin T., Arslan R. B., LOWER-LIMB FOLLOW-UP: A surface electromyography based serious computer game and patient follow-up system for lower extremity muscle strengthening exercises in physiotherapy and rehabilitation. *IEEE 32nd International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS), Cordoba, Spain*. 2019. p. 507–512. DOI: 10.1109/CBMS.2019.00103.
 22. Held J.P.O., Yu K., Pyles C., Veerbeek J.M., Bork F., Heining S.M., Navab N., Luft A.R. Augmented reality-based rehabilitation of gait impairments: case report. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2020;8(5):e17804. DOI: 10.2196/17804.
 23. Vinolo Gil M.J., Gonzalez-Medina G., Lucena-Anton D., Perez-Cabezas V., Ruiz-Moliner M.D.C., Martín-Valero R. Augmented reality in physical therapy: systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games*. 2021;9(4):e30985. DOI: 10.2196/30985.
 24. Guinet A.L., Nejjib K., Otmane S., Bouyer G., Desailly E. Exploring visual feedback modalities in augmented reality to control the walking speed of children with cerebral palsy. Experimental design protocol. *Gait & Posture*. 2020;81:120–121. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.07.094.
 25. Abbruzzese G., Pelosin E. Rehabilitation of Parkinson’s disease. *Advanced Technologies for the Rehabilitation of Gait and Balance Disorders*. DOI: 10.1007/978-3-319-72736-3_10.
 26. Enam N., Veerubhotla A., Ehrenberg N., Kirshblum S., Nolan K.J., Pilkar R. Augmented-reality guided treadmill training as a modality to improve functional mobility post-stroke: A proof-of-concept case series. *Top Stroke Rehabil*. 2021;28(8):624–630. DOI: 10.1080/10749357.2020.1864987.
 27. Alberts J.L., Kaya R.D., Scelina K., Scelina L., Zimmerman E.M., Walter B.L., Rosenfeldt A.B. Digitizing a therapeutic: development of an augmented reality dual-task training platform for parkinson’s disease. *Sensors*. 2022;22(22):8756, DOI: 10.3390/s22228756.
 28. Gulcan K., Guclu-Gunduz A., Yasar E., Ar U., Sucullu Karadag Y., Saygili F. The effects of augmented and virtual reality gait training on balance and gait in patients with Parkinson's disease. *Acta Neurol Belg*. 2022 Nov 28:1–9. DOI: 10.1007/s13760-022-02147-0.
 29. Timmermans C., Roerdink M., Meskers C.G.M. et al. Walking-adaptability therapy after stroke: results of a randomized controlled trial. *Trials*. 2022;1:923. DOI: 10.1186/s13063-021-05742-3

30. Phan H.L., Le T.H., Lim J.M., Hwang C.H., Koo K.-i. Effectiveness of augmented reality in stroke rehabilitation: a meta-analysis. *Appl. Sci.* 2022;12:1848. DOI: 10.3390/app12041848.
31. Ulrich B., Pereira L.C., Jolles B.M., Favre J. Walking with shorter stride length could improve knee kinetics of patients with medial knee osteoarthritis. *J Biomech.* 2023;147:111449. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2023.111449.
32. Chang H., Song Y., Cen X. Effectiveness of augmented reality for lower limb rehabilitation: a systematic review. *Appl Bionics Biomech.* 2022;2022:4047845. DOI: 10.1155/2022/4047845.
33. Hall C.D., Herdman S.J., Whitney S.L., Anson E.R., Carender W.J., Hoppes C.W., Cass S.P., Christy J.B., Cohen H.S., Fife T.D., Furman J.M., Shepard N.T., Clendaniel R.A., Dishman J.D., Goebel J.A., Meldrum D., Ryan C., Wallace R.L., Woodward N.J. Vestibular rehabilitation for peripheral vestibular hypofunction: an updated clinical practice guideline from the academy of neurologic physical therapy of the American Physical Therapy Association. *J Neurol Phys Ther.* 2022;46(2):118–177. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000382.
34. Boerger T.F., Hynstrom A.S., Furlan J.C., Kalsi-Ryan S., Curt A., Kwon B.K., Kurpad S.N., Fehlings M.G., Harrop J.S., Aarabi B., Rahimi-Movaghar V., Guest J.D., Wilson J.R., Davies B.M., Kotter M.R.N., Koljonen P.A. Developing peri-operative rehabilitation in degenerative cervical myelopathy. AO Spine RECODE-DCM Research Priority Number 6: An Unexplored Opportunity? *Global Spine J.* 2022;12(1_suppl):97S–108S. DOI: 10.1177/21925682211050925.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Галушка Михаил Сергеевич, аспирант, Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог, Российская Федерация.

e-mail: mgalushka@sfedu.ru

Mikhail Sergeevich Galushka, Postgraduate Student, Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Taganrog, the Russian Federation.

Вишневецкий Вячеслав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Таганрог, Российская Федерация.

e-mail: yuvishnevetsky@sfedu.ru

ORCID: [0000-0002-3953-0207](https://orcid.org/0000-0002-3953-0207)

Vyacheslav Yurievich Vishnevetsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Taganrog, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 18.07.2023; одобрена после рецензирования 03.08.2023; принята к публикации 13.09.2023.

The article was submitted 18.07.2023; approved after reviewing 03.08.2023; accepted for publication 13.09.2023.