

НАГОРНАЯ А.Ю.,

Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия; e-mail: krygina.ay@ssmu.ru

КАМЕНСКИХ Е.М.,

к.м.н., Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия;
e-mail: kamenskih.em@ssmu.ru

СОКОЛОВА Т.С.,

к.м.н., Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия;
e-mail: rizhakova.ts@ssmu.ru

ФЕДОРОВА О.С.,

д.м.н., профессор, Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия;
e-mail: fedorova.os@ssmu.ru

ТЕХНОЛОГИИ РЕАБИЛИТАЦИИ В МЕТАВСЕЛЕННОЙ: УСТОЙЧИВЫЙ ТРЕНД ИЛИ КОНТЕКСТНЫЕ РЕШЕНИЯ? (СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

DOI: 10.25881/18110193_2025_3_6

Аннотация. Концепция метавселенной является новой, активно развивающейся идеей, имеющей потенциал в различных сферах медицины. Сочетание мультисенсорной стимуляции и социального взаимодействия открывает широкие возможности для применения технологий метавселенной в реабилитации. Целью данного обзора является анализ сфер применения и перспектив развития метавселенной в реабилитации. Методы: Авторами был выполнен поиск в PubMed, ScienceDirect с использованием ключевых слов «metaverse», «метавселенная», среди которых в ручном режиме велся поиск исследований, связанных с различными аспектами реабилитации. Из найденных 1393 публикаций для дальнейшего анализа было отобрано 37. Результаты: Технологии метавселенной используются в медицинской реабилитации, помогая восстановить физические и когнитивные функции. Создание цифровых двойников-аватаров и использование машинного обучения для обработки данных о пациенте может сделать реабилитацию более персонализированной и эффективной. Обсуждение: Концепция метавселенной создает уникальную среду, в основе которой лежит синергия высоких технологий и социального взаимодействия. Новые возможности, которые открывает применение метавселенной в медицине, могут коренным образом изменить реабилитацию, сделав ее более эффективной и доступной.

Ключевые слова: метавселенная, медицина, реабилитация, виртуальная реальность, дополненная реальность.

Для цитирования: Нагорная А.Ю., Каменских Е.М., Соколова Т.С., Федорова О.С. Технологии реабилитации в метавселенной: устойчивый тренд или контекстные решения? (систематический обзор). Врач и информационные технологии. 2025; 3: 6-21. DOI: 10.25881/18110193_2025_3_6.

NAGORNAIA A.I.,

Siberian State Medical University, Tomsk, Russia, e-mail: krygina.ay@ssmu.ru

KAMENSKIKH E.M.,

Ph.D., Siberian State Medical University, Tomsk, Russia;
e-mail: kamenskih.em@ssmu.ru

SOKOLOVA T.S.,

Ph.D., Siberian State Medical University, Tomsk, Russia;
e-mail: rizhakova.ts@ssmu.ru

FEDOROVA O.S.,

DSc, professor, Siberian State Medical University, Tomsk, Russia;
e-mail: fedorova.os@ssmu.ru

REHABILITATION IN THE METAVERSE: A STEADY TREND OR CONTEXTUAL SOLUTIONS? (SYSTEMATIC REVIEW)

DOI: 10.25881/18110193_2025_3_6

Abstract. *The concept of the metaverse is a new, actively developing idea with potential in various fields of medicine. The combination of multisensory stimulation and mutual interaction opens up a wide range of possibilities for the application of metaverse therapy technologies in the context of a pandemic. The aim of this review is to analyze the scope of application and development of the metaverse perspective in the context of a crisis. Methods: The authors searched PubMed, ScienceDirect using the keyword "metaverse", among which a manual search was conducted for studies related to various aspects of rehabilitation. Of the 1393 publications found, 37 were selected for further analysis. Results: Metaverse technologies are used in medical rehabilitation, helping to restore physical and cognitive functions. Creating digital twins-avatars and using machine learning to process patient data can make rehabilitation more personalized and effective. Discussion: The concept of the metaverse creates a unique environment based on the synergy of high technology and social interaction. The new opportunities offered by the use of the metaverse in medicine can radically change rehabilitation, making it more effective and accessible.*

Keywords: *metaverse, medicine, rehabilitation, virtual reality, augmented reality.*

For citation: *Nagornaia A.I., Kamenskikh E.M., Sokolova T.S., Fedorova O.S. Rehabilitation in the metaverse: a steady trend or contextual solutions? (Systematic review). Medical doctor and information technology. 2025; 3: 6-21. DOI: 10.25881/18110193_2025_3_6.*

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшие сферы человеческой жизни все больше перемещаются в виртуальное пространство — работа, обучение, сфера услуг, в том числе медицинских. В 2020 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) приняла глобальную стратегию цифровой трансформации здравоохранения, в которой рассматриваются возможности и перспективы внедрения высоких технологий в различные области медицины, в том числе реабилитацию [1].

По данным Google Trends, «metaverse» является одним из самых популярных терминов, связанных с высокими технологиями [2]. Концепция, выросшая из научно-фантастического романа Нила Стивенсона «Лавина» 1992 г., получила повышенное внимание в последние годы. Исследовательский интерес к метавселенной настолько высок, что группа врачей и экспертов в области информационных технологий в рамках экспертного консенсуса предложила объявить 2022 г. годом метавселенных в медицине, подчеркивая важность и активное развитие данного концепта [3]. В России тему метавселенной в медицине подняли Лагутин М.Д. и соавторы (2023), выпустив первую русскоязычную обзорную статью о перспективах применения метавселенных в медицине [4].

В настоящий момент не существует консенсуса по поводу определения метавселенной. После рассмотрения существующих позиций в научном сообществе авторами данной статьи использовалось следующее определение: метавселенная — это виртуальное пространство с онлайн-доступом, существующее параллельно и смешанно с реальным миром. Метавселенная использует различные цифровые технологии (дополненная реальность (augmented reality, AR), виртуальная реальность (virtual reality, VR), искусственный интеллект (ИИ) и другие) для достижения многомерной и глубокой интеграции межличностных взаимодействий и создает новую иммерсивную виртуальную среду.

Понятие метавселенной тесно связано с VR, так как метавселенная — виртуальный мир, где люди могут через цифровых двойников взаимодействовать как с объектами реального и виртуального мира, так и друг с другом. Одной из областей медицины, в которой VR используется наиболее активно — реабилитация. Давая

возможность конструировать различные задачи и сценарии, в том числе трудные для воплощения в реальной жизни, VR является эффективным инструментом для адаптации и улучшения качества жизни лиц с ограниченными возможностями здоровья [5].

Для того чтобы выявить, какие термины в научных публикациях семантически связаны с метавселенной, с помощью программы VOSviewer (версия 1.6.19, 2023 год) был проведен библиографический анализ результатов поиска в PubMed по ключевому слову “metaverse” (рисунок 1).

Анализ ключевых слов выявил, что метавселенная связана с использованием таких технологий как VR, AR, ИИ, цифровые близнецы, машинное обучение и другие для создания уникальной виртуальной среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При подготовке обзора авторы руководствовались рекомендациями для систематических обзоров и мета-анализов — PRISMA [6]. Поиск публикаций был осуществлён в PubMed, ScienceDirect в мае 2025 года, запрос — «metaverse», «метавселенная». Ввиду ограниченного количества публикаций по теме метавселенной, авторами в ручном режиме велся поиск исследований, связанных с различными аспектами реабилитации. Результаты поиска были экспортированы в библиографический редактор Zotero [7].

КРИТЕРИИ ОТБОРА

Для включения в обзор публикации должны были содержать в себе информацию о различных технологиях метавселенной в реабилитации. Исключались публикации формата, отличного от научной статьи или обзора (письма, примечания, редакционные статьи) и публикации без доступного полного текста. Таким образом, из найденных 1393 публикации для дальнейшего анализа было отобрано 37 (рисунок 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Большая часть публикаций была опубликована в 2022 (n = 9), 2023 (n = 13), 2024 (n = 7) и 2025 (N = 6) году, по одному исследованию — в 2016 году, в 2011 году. Среди стран по количеству

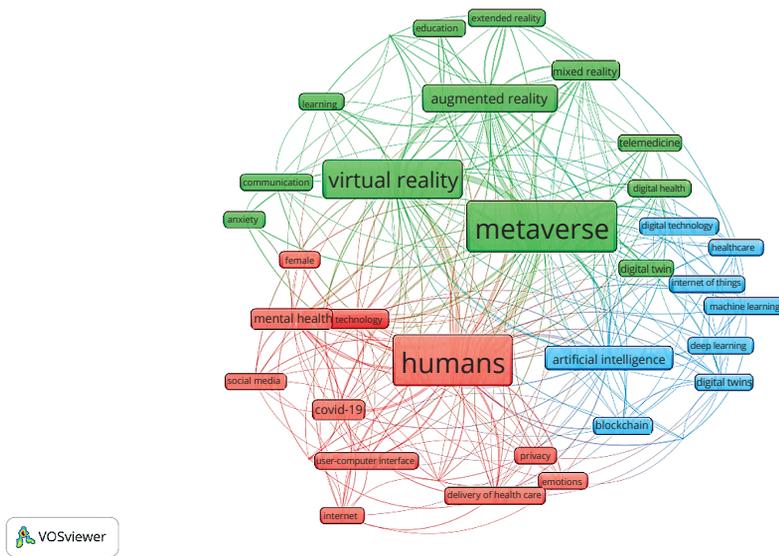


Рисунок 1 — Термины, наиболее часто встречающиеся в названиях и аннотациях публикаций о метавселенной в медицине. Включены термины, встречающиеся как минимум в 5 публикациях. Размер коррелирует с частотой встречаемости, а связи и цвет — то, какие слова часто встречаются одновременно.

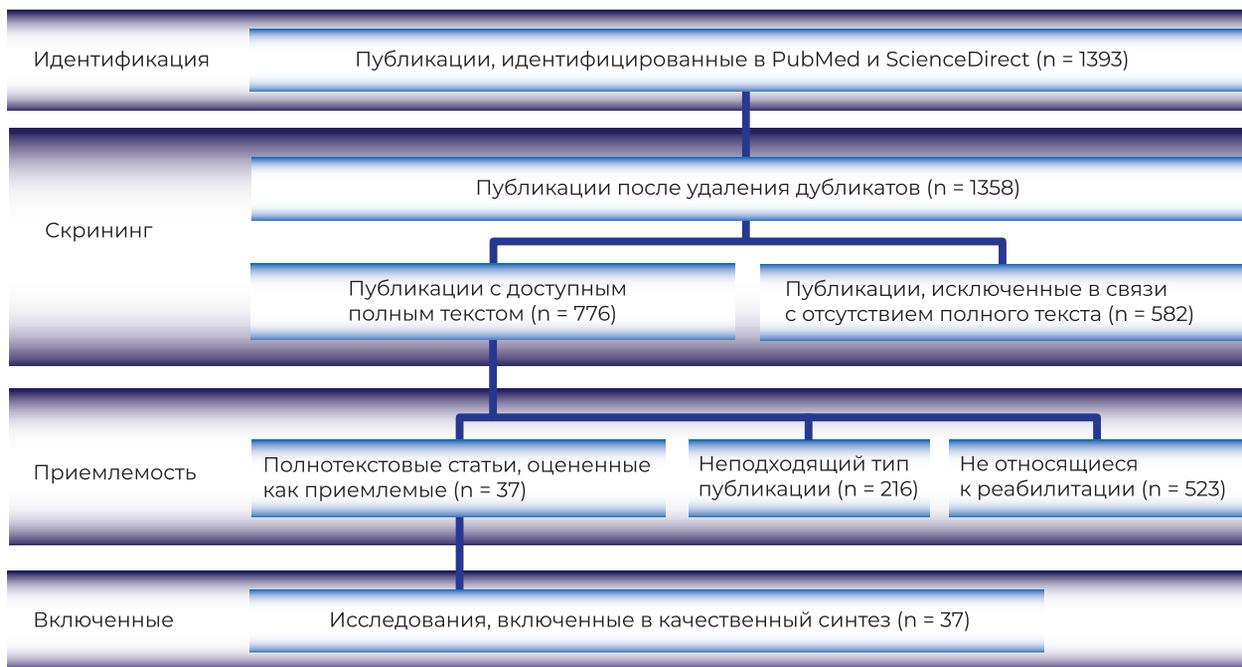


Рисунок 2 — Поэтапная схема отбора исследований в систематический обзор по рекомендации PRISMA.

публикаций превалирует Корея ($n = 8$), Италия ($n = 7$) и Китай ($n = 7$). Три работы принадлежит авторам из Индии, по две — Австралии, Японии, по одной работе написано в Иране, Норвегии, США, Тайвани, Франции, Испании, России, одна работа — многоцентровое исследование при участии США, Израиля и Австралии.

Наиболее распространенным типом публикации оказалась обзорная статья ($n = 19$) [2, 5, 8–24], которые включали в себя 3 систематических обзора [23, 25, 26] и 1 метаанализ [9]. Также было найдено 18 оригинальных исследований [27–44], среди которых 4 рандомизированных контролируемых исследования (РКИ) [27, 29, 31, 40], тринадцать проспективных исследований, направленных на разработку и проведение исследования эффективности и безопасности новой технологии [30, 32–37, 39, 41–43], и одно ретроспективное исследование [28].

ТЕХНОЛОГИИ МЕТАВСЕЛЕННОЙ В КОГНИТИВНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Согласно отчету ВОЗ, в мире насчитывается более 55 миллионов пациентов с деменцией, однако из-за старения населения ожидается, что это число увеличится до 78 миллионов в 2030 году и 139 миллионов в 2050 году [45]. На настоящий момент терапии, приводящей к полному излечению деменции, не существует, но раннее начало когнитивных тренировок, которые в том числе могут быть реализованы в метaprостранстве, могут значимо замедлять развитие дефицита [46].

Социальные взаимодействия в метавселенной являются преимуществом по сравнению с классической реабилитацией, характеризующейся общением врача и пациента «один на один». Присутствие подобных краткосрочных контактов не может в полной мере повлиять на социальную изолированность, которая часто сопутствует деменции и является фактором риска ее более тяжелого течения [47]. Важность социального аспекта подтверждает проведенное в Норвегии проспективное исследование реабилитации в VR пациентов старше 60 лет ($n = 14$). Участники были поделены на 2 равные группы: первая группа проходила тренировки в кооперации друг с другом, а участники второй — выполняли те же задания индивидуально. Программа тренировок формировалась на основе

4 предварительных встреч с физиотерапевтом, а режим VR сеансов включал два занятия в неделю в течение 4 недель. Результаты, согласно опроснику мотивации (доверительный интервал (ДИ): [0,35, 1,17], $t(12) = 4,01$, $p = 0,002$) и измерения уровня физической нагрузки, косвенно определенному по количеству смещений VR-датчиков для рук (ДИ: [110,38, 208,29], $t(12) = 7,09$, $p < 0,001$), были выше у участников групповой терапии [34].

Основываясь на принципах закона Рибо, одним из направлений терапии деменции является терапия воспоминаниями (reminiscence therapy), которая включает в себя обсуждение давно прошедших событий и опыта с использованием знакомых предметов из прошлого (фотографий, личных вещей), что оказывает положительный эффект на психическое состояние пациентов [48]. В метавселенной данный вид терапии позволяет обеспечить программы, которые воссоздают трехмерные локации из прошлого пациентов с помощью их личных фотографий или видео [18].

В обзорной статье Parisi и соавт. (2022) отобрали и проанализировали 10 РКИ, в которых пациенты, перенесшие инсульт, проходили когнитивную реабилитацию с помощью мультисенсорных технологий — VR или интерфейсы человек-компьютер, использующие технологию захвата движения. Анализ показал, что в большей части исследований в группах вмешательства наблюдались более высокие в сравнении с группами контроля темпы увеличения когнитивных показателей, оцененных с помощью краткой шкалы оценки психического статуса (Mini-Mental State Examination, MMSE) и Монреальской когнитивной шкалы (Montreal cognitive assessment, MoCA) [25].

Liang H. и соавт. (2023) проанализировали потребности пожилых людей для создания структуры виртуального социального центра, в котором участник выбирал цифрового аватара и взаимодействовал с другими аватарами: общался, прогуливался, играл в командные игры. В исследовании приняло участие 60 человек, которых разделили на контрольную группу ($n = 30$) и группу вмешательства ($n = 30$). В результате в группе вмешательства сильнее уменьшился уровень депрессии и тревоги, согласно госпитальной шкале тревоги и депрессии (Hamilton Depression Rating Scale, HAM-D), ($21,07 \pm 4,32$ в

контрольной группе и $15,48 \pm 0,37$ в группе вмешательства, $p < 0,01$) и опросника выраженности психопатологической симптоматики (Symptom Checklist-90, SCL-90) ($101,25 \pm 8,76$ в контрольной группе против $99,57 \pm 7,92$, $p < 0,01$ в группе вмешательства) [32].

Еще одним преимуществом проведения когнитивных тренировок в VR является то, что за счет сохранения больших объемов данных о результатах выполнения заданий пациентом, можно получить не только простые двоичные результаты решения задачи (верно/неверно), но и множество подробных параметров, которые могут содержать гораздо более полную информацию о когнитивных функциях человека. Например, в обзорной статье описывается исследование Kunz и соавт. (2015), выявившее изменение навигационного паттерна (тенденции перемещаться ближе к границам виртуальной арены) во время выполнения задания на проверку пространственной навигационной памяти в группе пациентов с генетическим риском болезни Альцгеймера [8]. В 24-недельном проспективном исследовании Montalban и соавт. (2022) паттерны движения отслеживались у пациентов 18–55 лет с рассеянным склерозом ($n = 76$) и контрольной группой здоровых людей ($n = 25$). Было разработано приложение, сочетающее пассивный мониторинг двигательных паттернов пациента «умными» часами и активное тестирование с помощью приложения для смартфонов. По результатам было показано, что двигательные паттерны статистически значимо коррелировали с оценкой по электронному тесту на модальности символов и цифр (Electronic Symbol Digital Modalities Test, e-SDMT) и MPT для когнитивных функций ($r = 0,82$, $p < 0,001$). Улучшения были отмечены в тестах, оценивающих функционирование верхних конечностей, таких как тест на захват, тест на рисование фигуры (Pinching Test, Draw a Shape Test) ($|r| = 0,40–0,64$, все $p < 0,001$), а также тестов на статический баланс, разворот, тест на ходьбу и пассивный мониторинг (Static Balance Test (SBT), U-Turn Test (UTT), Walk Test, Passive Monitoring) (r = от $-0,25$ до $-0,52$, все $p < 0,05$). Накопленные данные позволили создать «цифрового двойника» каждого пациента, что может быть использовано для разработки индивидуальных реабилитационных программ [30].

ТЕХНОЛОГИИ МЕТАВСЕЛЕННОЙ В РЕАБИЛИТАЦИИ ПРИ ПСИХИЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВАХ

Технологии VR находят свое применение в рамках реабилитации расстройств психики. С их помощью создается контролируемая среда, в которой возможно воспроизведение различных социальных сценариев, что дает широкие возможности для улучшения функционирования пациентов в обществе. В систематическом обзоре Lan и соавт. (2023) были проанализированы 23 исследования, в которых использовались технологии AR и VR для лечения лиц с психическими расстройствами. Было выявлено, что методы виртуальной реальности могут уменьшать симптомы и улучшать физическое здоровье, качество жизни и психосоциальное функционирование, выступая в качестве дополнения к психотерапевтическим и медикаментозным методам лечения [26].

В Южной Корее было проведено проспективное исследование, в которое вошли пациенты с шизофренией от 20 до 55 лет с как минимум средним образованием, способные дать информированное согласие. В течение 8 недель участники ($n = 9$) несколько раз в неделю проходили трудовую реабилитацию в VR-приложении, где они примеряли на себя роль продавцов в магазине, взаимодействуя при этом с виртуальными покупателями. При сравнении состояния группы пациентов до и после тренировок было выявлено улучшение клинического состояния по Манчестерской шкале (Manchester Scale) ($z = -2,24$, $p = 0,025$), по шкале личной и социальной эффективности (Personal and Social Performance Scale, PSP) ($z = -2$, $p = 0,046$). Оценка психоэмоциональной сферы была проведена с помощью шкалы оценки депрессии Гамильтона (Hamilton Depression Rating Scale, HAM-D), шкалы оценки депрессии Цунга (Zung Depression Rating Scale, ZDRS), опросника тревожности Бека (Beck Anxiety Inventory, BAI), значимых изменений выявлено не было. Оценка когнитивных функций с помощью Висконсинского теста сортировки карточек (Wisconsin Card Sorting Test, WCST), теста Струпа на исполнительную функцию (Stroop Test for executive function), теста комплексной фигуры Рея-Остерриета (Rey-Osterrieth Complex Figure Test, RCFT) на зрительную память, и корейской версии теста слухового вербального

обучения (Korean Version of the Auditory Verbal Learning Test K-AVLT) также не выявили значимых улучшений [37].

В проспективном исследовании Park и соавт. (2011) было проведено прямое сравнение тренировки социальных навыков у людей с шизофренией ($n = 91$) с помощью ролевых игр в VR (VR social skills training, SST-VR) и традиционных ролевых игр (traditional social skills training, SST-TR). Обе группы проводили 10 игровых сессий два раза в неделю. Вокальные, невербальные и разговорные навыки оценивались с помощью шкалы социального поведения Трауэра (Trower's Social Behavior Scales, SBS), эмоциональное состояние с помощью трех опросников — шкала уверенности в себе Ратуса (Rathus Assertiveness Schedule, RAS), шкала изменения отношений (Relationship Change Scale, RCS) и опросник решения социальных проблем (Social Problem Solving Inventory-Revised, SPSI-R). Было выявлено улучшение коммуникативных навыков в обеих группах. В группе VR-вмешательства отмечалась большая мотивация к выполнению заданий ($81,5$ в группе SST-VR, $75,5$ в SST-TR, $p = 0,009$) и улучшение разговорных навыков ($F_{1,62} = 17,261$, $p < 0,001$). Однако невербальные и вокальные навыки улучшились значительно в группе традиционного вмешательства [36]. Выявлен положительный эффект командных взаимодействий в виртуальной реальности у пациентов с шизофренией. В пилотном проспективном исследовании, проведенном в госпитале Святой Анны, Франция (Centre hospitalier Sainte-Anne, France), группа пациентов ($n = 6$) с шизофренией должна была ориентироваться в виртуальном городе с помощью карты, а также совместно планировать и выполнять различные действия. После 12 недель тренировок у участников улучшилась социальная адаптация, счет по краткой психиатрической оценочной шкале (The Brief Psychiatric Rating Scale, BPRS) составил $55,6 \pm 16,7$ баллов у группы контроля, $44,7 \pm 8,2$ у группы вмешательства, $p < 0,001$), и повысились навыки самообслуживания (баллы шкалы глобального функционирования (Global Assessment of Functioning Scale, GAF) $41,9 \pm 9,1$ баллов в группе контроля, $49,4 \pm 10,2$ в группе вмешательства, $p < 0,01$) [35].

Большой потенциал технологии метавселенной имеется в терапии расстройств аутистического

спектра (РАС). Исследование, проведенное Myles B.S. и соавт. (2001), показало, что люди с РАС могут избегать социальных взаимодействий отчасти из-за тревоги, вызванной прошлыми неудачными попытками коммуникации [49]. Использование технологии VR помогает снизить эту тревогу, поскольку позволяет им не беспокоиться о том, что они совершат серьезную ошибку и дает возможность переиграть неудачную попытку. В Корее было проведено РКИ, в котором сравнивалась группа детей с РАС, прошедшая программу освоения социальных навыков в метавселенной ($n = 12$), и контрольная группа без вмешательства ($n = 12$). Для попадания в метавселенную не использовалась VR-аппаратура — обучение проходило на базе одной из самых популярных платформ метавселенной Roblox. Оценка с применением шкалы социальной реакции (Social Responsiveness Scale, 2nd Edition, SRS-2) до и после вмешательства показала, что подобная терапия оказывает положительный эффект и сглаживает основные проявления РАС. Групповое медианное сравнение в баллах SRS-2 между группой вмешательства и контрольной группой составило $11,5$ ($p < 0,05$, ДИ: [8,5–14,0]). При анализе разделов опросника было выявлено, что наибольший эффект был достигнут в отношении социального интеллекта ($p < 0,5$ ДИ: [2,0, 1,0–4,0]), социального общения ($p < 0,05$ ДИ: [2,0, 1,0–4,0]) и аутистической манерности ($p < 0,05$, ДИ: [4,0, 1,0–5,0]) [29].

ТЕХНОЛОГИИ МЕТАВСЕЛЕННОЙ В РЕАБИЛИТАЦИИ ПРИ БОЛЕВОМ СИНДРОМЕ

Согласно определению международной ассоциации по изучению боли, боль — это неприятное сенсорное и эмоциональное переживание, связанное с истинным или потенциальным повреждением ткани [50]. За счет мультимодального воздействия реабилитация в метавселенной особенно актуальна в тех случаях, когда боль хронизируется, утрачивая свою сигнальную функцию или вовсе не связана с истинным повреждением.

В 2019 году было отмечено, что в России ежегодно выполняется около 15 тысяч высоких ампутаций нижних конечностей [51]. Частым осложнением являются ощущения фантомной конечности и боли в ней. На сегодняшний день

применяется три класса методов лечения фантомной боли: фармакологические вмешательства, инвазивные методы лечения и неинвазивные нефармакологические стратегии, например, зеркальная терапия [52].

VR и AR дает возможность для проведения зеркальной терапии, позволяя пациенту видеть и управлять виртуальной конечностью, заменяющей отсутствующую. В настоящее время существует большое количество механизмов, применяющихся для реализации данной технологии: электромагнитные трекеры движения, миоэлектрические браслеты, тактильные электростимуляторы, перчатки с захватом движения, электрокожная стимуляция [9]. Геймплей реабилитационных приложений как правило представляет собой обычные компьютерные игры (например, автогонки) с той разницей, что оригинальный контроллер заменен датчиками на ампутированной конечности. Для оценки силы боли до и после вмешательства в исследованиях чаще всего используется визуальная аналоговая (ВАШ) или числовая рейтинговая шкала. Метаанализ клинических исследований, описывающих реабилитацию пациентов с фантомной болью, перенесших ампутацию верхних или нижних конечностей, с помощью VR и AR ($n = 13$), показал, что подобные вмешательства снижают уровень фантомной боли примерно на два балла по ВАШ (разница средних значений $-2,30$, ДИ: $[-3,38, -1,22]$, $p < 0,001$) [9].

В многоцентровом ретроспективном исследовании было изучено влияние реабилитации в метавселенной у пациентов с хронической болью в спине ($n = 82$) в виртуальной клинике XRHealth [53]. Программа реабилитации разрабатывалась индивидуально на основе врачебных рекомендаций. Для доступа в метавселенную пациенты использовали VR-гарнитуру и ручные контроллеры. В результате статистической обработки данных пациентов была выявлена тенденция к улучшению физического и психического самочувствия. Оценка проводилась с помощью таких шкал, как шкала функциональности нижних конечностей (Lower Extremity Functional Scale, LEFS), влияние и интенсивность боли по информационной системе оценки результатов, сообщаемых пациентами, Национального института здравоохранения (National Institute of Health, Patient-Reported Outcomes

Measurement Information System, NIH PROMIS — Pain Interference, Pain Intensity). Индекс ограничения жизнедеятельности из-за боли в нижней части спины в выборке уменьшился на 17,8% ($p < 0,001$), индекс ограничения жизнедеятельности из-за боли в шее на 23,2% ($p = 0,02$) [28]. В пилотном РКИ Stamm и соавт. (2022) люди старше 65 лет, страдающие хронической болью в спине, были поделены на две группы: группа, проходящая реабилитацию с помощью групповой терапии в VR ($n = 11$), и контрольная группа, в которой применялась традиционная терапия групповых упражнений ($n = 11$). При анализе Ганноверского опросника функциональных способностей, связанных с болью в спине (Hannover Functional Ability Questionnaire for measuring back pain-related disability, Ffb- H-R) было выявлено значимое улучшение с умеренного нарушения до нормального функционирования (с 73,11 до 81,82%, $p = 0,026\%$) [31].

В систематическом обзоре, проведенном Marjan и соавт. (2025) ($n = 839$, средний возраст 62 года), изучалось применение XR, в том числе и метавселенной, для реабилитации пациентов после операции на открытом сердце. Было выявлено, что подобные методы реабилитации сокращают сроки госпитализации и улучшают функцию легких. Также наблюдались преимущества в контроле боли и поддержании психического здоровья, снижении тревожности и депрессии [23].

ТЕХНОЛОГИИ МЕТАВСЕЛЕННОЙ В РЕАБИЛИТАЦИИ ПРИ ПАТОЛОГИИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Использование виртуальной среды позволяет создавать адаптивные и интерактивные программы восстановления, повышая мотивацию пациентов и обеспечивая более точное выполнение реабилитационных упражнений. В условиях метавселенной создается среда, в которой возможно дистанционное участие и контроль за прогрессом, что особенно актуально для пациентов с ограниченной мобильностью [22].

В обзоре использования технологий иммерсивной VR в реабилитации от 2024 года показано, что тренировки в VR способствуют повышению мотивации, приверженности к терапии, расширению диапазона движений и снижению кинезиофобии при реабилитации

опорно-двигательного аппарата, особенно после оперативных вмешательств [20].

В обзорной статье Morone и соавт. (2025) подчеркивается, что метавселенная может стать платформой для реабилитации тех, кто нуждается не только в восстановлении после травм, но и их профилактики, в том числе у спортсменов. Виртуальные игровые сценарии могут помочь ускорить возвращение к спортивной деятельности, а также участвовать в пропаганде здорового образа жизни. Для пожилых людей и людей с тяжелыми хроническими заболеваниями метавселенная расширяет возможности для психологической терапии и повышения удовлетворенности лечением в домашних условиях.

В настоящий момент ведутся разработки устройств, нацеленных специально на реабилитацию пациентов с отсутствующими конечностями в метавселенной, так как помимо борьбы с фантомными болями очевидна потребность в восполнении утраченной функциональной активности. Например, Vera Anaya D. и соавт. (2023) разработали датчик, содержащий трибоэлектрические элементы. Проведенное экспериментальное исследование показало, что датчики могут с высокой точностью преобразовать сокращение мышц предплечья в движение полноценной виртуальной конечности, что упрощит управление своим аватаром в метавселенной [33].

Схожая технология создана командой ученых в Китае: была разработана автономная сенсорная система для визуализации в реальном времени движений нижних конечностей с помощью носимых трибоэлектрических датчиков и ИИ. Приложение визуализирует цифрового двойника через 5G, что обеспечивает точную обратную связь, автономность и удобство, расширяя возможности виртуальных тренировок и мониторинга в метавселенной [41].

Wang. и соавт (2024) разработали функционирующую на тех же принципах перчатку, сочетающую трибоэлектрические сенсоры и пневматический привод для обеспечения двухсторонней тактильной и кинестетической обратной связи. Модуль пальца позволяет воспроизводить тактильные ощущения и кинестетическую обратную связь и обеспечивает многомерную тактильную стимуляцию, что также дает возможность использовать ее для интерактивных

приложений виртуальной реальности, включая реабилитацию и обучение, повышая уровень взаимодействия и реалистичности ощущений [43].

Помимо носимых на теле датчиков, исследователями активно разрабатываются гибкие трибоэлектрические датчики, встраиваемые в «умную» одежду, способные точно считывать положение тела, которые также позволяют воссоздать динамические полноразмерные аватары для VR [42]. Исследователи из Австралийского университета Гриффита (Griffith University) в целях разработки персонализированных реабилитационных программ усовершенствовали технологию цифровых двойников за счет восьмизападной системы нейромышечно-скелетного моделирования, включающей 3D-сканирование всего тела, электромиографию и калибровку с помощью обратной связи, полученной с использованием AR [17]. В результате, выполняя спортивные задания, человек может наблюдать за синхронной анимацией его цифрового двойника и видеть, как движения выполняются его костно-мышечной системой, по необходимости корректируя неправильные паттерны движения [54].

В России подобные подходы к реабилитации также исследуются рядом ученых. Так, в статье Антипова и соавт. (2024) приведены данные о применении мультимодальной биологической обратной связи (БОС), которая активирует нейропластичность мозга и способствует восстановлению функций через сенсорные стимулы и обратную связь. Авторами был разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК) для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями верхних конечностей. В рамках работы использовалась концепция «воображаемых движений», которая включает мысленное имитирование движений, активирующее соответствующие области мозга. Эксперимент проводился на здоровых добровольцах с регистрацией электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и электромиограммы (ЭМГ). Результаты показали высокую точность распознавания (более 70% при воображении движений и более 80% при выполнении), что подтверждает эффективность выбранных алгоритмов. Разработанный ПАК включает регистрацию ЭЭГ, предварительную обработку, классификацию и обратную

связь, реализуемую через визуальные стимулы, вибрацию и транскраниальную магнитную стимуляцию (ТМС). Вибростимуляция активирует сенсомоторные области, а ТМС — модулирует активность моторной коры, способствуя нейропластичности и восстановлению движений. В настоящий момент планируются клинические испытания для оценки эффективности и устойчивости системы [44].

В настоящий момент очевидна тенденция использования цифровых двойников для персонализации реабилитации. Так, исследуется возможность использовать данные ЭЭГ, записанной при выполнении различных кинетических задач. Накопление данных о паттернах ЭЭГ, характерных для определенных движений позволяет прогнозировать двигательные намерения, что в будущем может повысить точность управления виртуальным аватаром [55].

Подобные цифровые аватары подходят для удаленного контроля состояния пациентов, в том числе после травм и операций. Так, Swarnil и соавт. проанализировали ряд технологий метавселенной, применяемых в ортопедии, и доказали, что использование систем для мониторинга движений, которые передают данные в реальном времени, позволяет врачам отслеживать прогресс, корректировать лечение и своевременно реагировать на осложнения, повышая эффективность реабилитации и ухода [24].

Помимо накопления данных, цифровые двойники способны также стимулировать работу так называемых зеркальных нейронов в восстановлении двигательных функций. В обзоре Calabrò и соавт. показано, что наблюдение за действиями цифрового двойника способствует двигательному обучению даже при отсутствии у пациента активных движений [19].

Подобное явление изучали Pascucci и соавт. (2024). Ученые создали приложение для виртуальной лепки скульптур. В эксперименте 30 молодых участников (средний возраст $25,3 \pm 3,7$ года) создавали виртуальные скульптуры, используя реальные руки. Обработка результатов показала, что виртуальная лепка улучшила плавность и симметрию движений рук: при первом повторении средний нормализованный рывок (The mean normalized jerk) составил 1551 ± 743 при первом повторении, 1993 ± 943 во втором ($p < 0,001$) [39].

Помимо индивидуальной реабилитации, метавселенная дает возможность для групповых тренировок, что может стимулировать физическую активность среди пациентов с низкой мотивацией к упражнениям. Метавселенная дает возможность создавать мультисенсорное геймифицированное пространство, которое поощряет мотивацию к физической активности. Так, исследование Momosaki и соавт. (2024) показало, что такой подход позволяет охватить тех, кто редко занимается спортом или выходит на улицу, и стимулировать их к активным действиям [38]. РКИ, проведенное в 2024 году в Японии, показало, что распространение видео тренировок в метавселенной значительно повышает уровень физической активности молодых людей по сравнению с обычными видео или их отсутствием. В течение 8 недель 48 молодых людей в возрасте от 18 до 30 лет были распределены на 3 группы, одна из которых получала видео для выполнения упражнения в метавселенной, вторая — видео обычных тренировок с теми же упражнениями, третья группа не получала ничего. Апостериорный тест показал значительное увеличение физической активности в группе метавселенной после вмешательства ($p = 0,006$): до — 737,1, после — 1575,4, тогда как в группе смотрящих видео обычных тренировок аналогичные показатели составили 661,7 до, 911,9 после. Степень физической активности оценивалась с помощью сокращенной формы международного опросника для определения физической активности (International Physical Activity Questionnaire) [40].

Двигательные нарушения, возникающие вследствие острых нарушений мозгового кровообращения (ОНМК), могут успешно корректироваться с помощью VR-тренировок в метавселенной с использованием всенаправленной беговой дорожки [10].

Реабилитация в метавселенной пациентов с детским церебральным параличом (ДЦП) имеет большой потенциал, так как помимо трудностей с движением, дети с ДЦП могут испытывать проблемы с общением. Опираясь на это, Moon I. и соавт. (2023) разработали и провели РКИ по оценке эффективности и безопасности программы реабилитации в метавселенной на смартфоне с камерой для детей с ДЦП. Для каждого участника ($n = 26$) была разработана индивидуальная

программа реабилитации, группа вмешательства (n = 13) проходила эту программу в метавселенной, в которой она автоматически корректировалась на основе того, как ребенок выполнял те или иные упражнения. После прохождения программы у ее участников было зафиксировано улучшение выполнения упражнений на крупную моторику на 21% (p<0,001) [27].

ОБСУЖДЕНИЕ

Технологии метавселенной уже используются в различных областях реабилитации. Чтобы раскрыть весь спектр применяемых разработок, авторы адаптировали классификацию, предложенную Wu и соавт. (2022), которая была создана для концептуального объединения разных типов метавселенной (рисунок 3) [11]. В данной классификации выделяются четыре тематические категории — AR, VR, лайфлоггинг и зеркальные миры (mirror world). Технология AR вводит

в зрительное поле новые сенсорные данные с целью дополнения сведений об окружающей среде и изменении восприятия окружающей среды. Наблюдение за своим цифровым двойником, которые используются во время тренировки, позволяет более эффективно корректировать неправильные паттерны движений [17]. Технология VR полностью имитирует среду, таким образом, посредством технических средств создается уникальный мир, в котором появляются новые возможности для коммуникации, что может мотивировать людей с когнитивными, физическими и психическими нарушениями к физическим нагрузкам и вовлекать их в налаживание социальных связей [10, 25, 28, 29, 32, 34]. Также VR делает возможным воссоздание знакомых, но уже не существующих локаций, что является важным компонентом «терапии воспоминаний» для пациентов с деменцией [18]. Смежная с VR технология зеркальных миров отличается

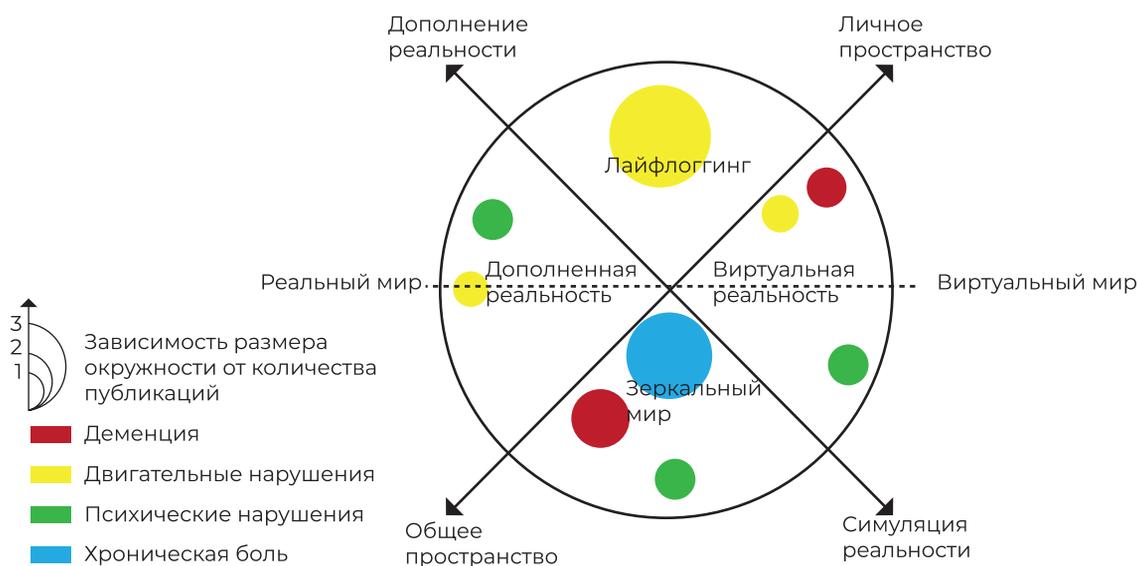


Рисунок 3 — Схема распределения литературных источников обзора с учетом использованных методов воздействия в метавселенных. Расположение, которое занимает круг, зависит от методов, используемых у пациентов с определенной нозологией в проанализированных литературных источниках. Размер круга пропорционален количеству источников, в которых упоминается метод, в том числе источников, процитированных в обзорах.

тем, что созданная среда является «зеркалом» реального мира, воспроизводя в виртуальном пространстве максимально точные копии существующих в реальности объектов. Такие пространства могут использоваться для отработки социально-бытовых навыков у людей с психическими заболеваниями [26, 36, 37]. Зеркальная терапия, применяющаяся в реабилитации пациентов с фантомными болями, имеет доказанную эффективность по данным метаанализа [9]. Лайфлоггинг — автоматическое фиксирование данных о протекании жизнедеятельности человека. Фиксация паттернов движений может помочь в разработке индивидуализированных реабилитационных упражнений, более точно отслеживать положительную или отрицательную двигательную динамику [27, 30, 56]. В терапии фантомных болей используются трекеры движения, воспроизводя в VR отсутствующую конечность на основе фиксации активности мышц культи [9, 33].

Доступность методов варьирует: для выхода в метавселенную может требоваться как дорогостоящее оборудование и специальное помещение, так и смартфон и стабильный доступ в интернет. Часть программ реализованы только для участников пилотных исследований, однако, есть и доступные для простых пользователей приложения [12].

Метавселенная открывает новые возможности в персонализации реабилитационных программ, собирая данные об особенностях действий человека или его аватара. Впоследствии, накопление и анализ больших объемов данных может помочь в фенотипировании редких и малоизученных патологий [16]. Однако открытым остается вопрос о конфиденциальности и защите персональных данных людей, получающих реабилитационные мероприятия в метавселенной. На настоящий момент ни в одной стране не существует законодательного регулирования процессов и взаимодействий, происходящих в VR [13].

Несмотря на то, что в обзоре описано успешное применение метавселенной в психиатрической и психологической реабилитации, влияние длительного пребывания в виртуальном пространстве на психику требует более пристального внимания и изучения. Уже имеются данные, доказывающие развитие депрессии,

тревоги и нарушений сна при интенсивном использовании цифровых технологий [2].

Наконец, не представляется возможным делать конкретные заключения как о позитивных, так и о негативных аспектах реабилитации с использованием технологий метавселенной, ввиду малого количества публикаций и их разнородности. Требуется дальнейшее изучение данной технологии с привлечением специалистов медицинских, технических и иных специальностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение технологий метавселенной открывает множество возможностей в разных областях реабилитации. Несмотря на то, что использование таких технологий как VR, AR, ИИ не ново для этой сферы, концепция метавселенной расширяет возможности их применения и создает уникальную среду, в которой синергия высоких технологий и социального взаимодействия позволит сделать реабилитацию более эффективной и доступной.

По данным существующих исследований, реабилитация в метавселенной оказывает положительное воздействие в той же или большей степени, чем классические методы реабилитации. Возможность отслеживать индивидуальную динамику пациента и впоследствии создавать его цифрового близнеца может сделать метавселенную инструментом повышения персонализации реабилитационных программ, стать ориентиром в модернизировании системы реабилитации.

Однако наряду с многообещающими перспективами внедрение метавселенной в реабилитацию требует решения ряда проблем, таких как низкая доступность устройств VR и AR, отсутствие нормативно-правовой базы, в том числе в отношении хранения и передачи конфиденциальных данных, а также малоизученные риски для психического и физического здоровья.

Таким образом, развитие метавселенной может коренным образом изменить область реабилитации, если будет оказана мультидисциплинарная поддержка посредством привлечения не только медицинского сообщества, но и разработчиков цифровых решений, частных и государственных инвестиций и инициатив.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Стратегия_цифровой_трансформации_отрасли_Здравоохранение.pdf. Accessed May 17, 2023. https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/057/382/original/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D0%B8%D1%8F_%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8_%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BB%D0%B8_%D0%97%D0%B4%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%BE%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5.pdf?1626341177.
2. Usmani SS, Sharath M, Mehendale M. Future of mental health in the metaverse. *Gen Psychiatry*. 2022; 35(4): e100825. doi: 10.1136/gpsych-2022-100825.
3. Yang D, Zhou J, Chen R, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine. *Clin EHealth*. 2022; 5: 1-9. doi: 10.1016/j.ceh.2022.02.001.
4. Лагутин М.Д., Тюфилин Д.С., Кобякова О.С., Деев И.А. Метавселенные в медицине: оценка перспектив применения для практического здравоохранения. *Врач и информационные технологии*. 2023; 2: 4-15. [Lagutin M.D., Tyufilin D.S, Kobyakova O.S., Deev I.A. Metaverses in Medicine: Assessing the Prospects for Practical Healthcare. e. *Medical doctor and information technology*. 2023; 2: 4-15. (In Russ.)] doi: 10.25881/18110193_2023_2_4.
5. Wang C, Kong J, Qi H. Areas of Research Focus and Trends in the Research on the Application of VR in Rehabilitation Medicine. *Healthcare*. 2023; 11(14): 2056. doi: 10.3390/healthcare11142056.
6. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*. Accessed September 7, 2023.
7. Zotero. Your personal research assistant. Accessed December 4, 2023.
8. Moon HJ, Han S. Perspective: Present and Future of Virtual Reality for Neurological Disorders. *Brain Sci*. 2022; 12(12): 1692. doi: 10.3390/brainsci12121692.
9. Cheung JCW, Cheung DSK, Ni M, et al. X-reality for phantom limb management for amputees: A systematic review and meta-analysis. *Eng Regen*. 2023; 4(2): 134-151. doi: 10.1016/j.engreg.2023.02.002.
10. Cho KH, Park JB, Kang A. Metaverse for Exercise Rehabilitation: Possibilities and Limitations. *Int J Environ Res Public Health*. 2023; 20(8): 5483. doi: 10.3390/ijerph20085483.
11. Wu TC, Ho CTB. A scoping review of metaverse in emergency medicine. *Australas Emerg Care*. Published online August 8, 2022. doi: 10.1016/j.auec.2022.08.002.
12. Lee CW. Application of Metaverse Service to Healthcare Industry: A Strategic Perspective. *Int J Environ Res Public Health*. 2022; 19(20): 13038. doi: 10.3390/ijerph192013038.
13. Petrigna L, Musumeci G. The Metaverse: A New Challenge for the Healthcare System: A Scoping Review. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2022; 7(3): 63. doi: 10.3390/jfmk7030063.
14. Zhou H, Gao JY, Chen Y. The paradigm and future value of the metaverse for the intervention of cognitive decline. *Front Public Health*. 2022; 10. doi: 10.3389/fpubh.2022.1016680.
15. Calabrò RS, Cerasa A, Ciancarelli I, et al. The Arrival of the Metaverse in Neurorehabilitation: Fact, Fake or Vision? *Biomedicines*. 2022; 10(10): 2602. doi: 10.3390/biomedicines10102602.
16. Tacchino A, Podda J, Bergamaschi V, Pedullà L, Bricchetto G. Cognitive rehabilitation in multiple sclerosis: Three digital ingredients to address current and future priorities. *Front Hum Neurosci*. 2023; 17: 1130231. doi: 10.3389/fnhum.2023.1130231.
17. Lloyd DG, Saxby DJ, Pizzolato C, et al. Maintaining soldier musculoskeletal health using personalised digital humans, wearables and/or computer vision. *J Sci Med Sport*. 2023; 26: S30-S39. doi: 10.1016/j.jsams.2023.04.001.
18. Qian P, Yang D, Bai C. Metaverse: Freezing the time. *Clin EHealth*. 2023; 6: 29-35. doi: 10.1016/j.ceh.2023.06.002.

19. Calabrò RS, Morone G. Advancing Rehabilitation Medicine with the Metaverse: Opportunities and Challenges. *Brain Sci.* 2025; 15(3): 321. doi: 10.3390/brainsci15030321.
20. Donegan T, Sanchez-Vives MV. Perception and control of a virtual body in immersive virtual reality for rehabilitation. *Curr Opin Neurol.* 2024; 37(6): 638. doi: 10.1097/WCO.0000000000001321.
21. Morone G, Ciancarelli I, Calabrò RS, Cerasa A, Iosa M, Gimigliano F. MetaRehabVerse: The Great Opportunity to Put the Person's Functioning and Participation at the Center of Healthcare. *Neurorehabil Neural Repair.* 2025; 39(3): 241-255. doi: 10.1177/15459683241309587.
22. Kaur P, Prakash G, Agarwal R, Virmani N, Alghafes R. Emerging technologies for basic human needs: A TCCM approach to systematically reviewing metaverse intervened wellness. *Technol Forecast Soc Change.* 2025; 217: 124190. doi: 10.1016/j.techfore.2025.124190.
23. Kasrineh MR, Baravati FB, Lee J, Zarei M, Taheri-Soodejani M, Tabatabaei SM. Extended Reality for Rehabilitation and Care of Patients after Open Heart Surgery: A Systematic Review. *Heliyon.* Published online March 6, 2025: e43105. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e43105.
24. Keny SM, Bagaria V, Sahu D, Brkljac M, Logishetty K, Keny AA. Remote patient monitoring: A current concept update on the technology adoption in the realm of orthopedics. *J Clin Orthop Trauma.* 2024; 51: 102400. doi: 10.1016/j.jcot.2024.102400.
25. Parisi A, Bellinzona F, Di Lernia D, et al. Efficacy of Multisensory Technology in Post-Stroke Cognitive Rehabilitation: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2022; 11(21): 6324. doi: 10.3390/jcm11216324.
26. Lan L, Sikov J, Lejeune J, et al. A Systematic Review of using Virtual and Augmented Reality for the Diagnosis and Treatment of Psychotic Disorders. *Curr Treat Options Psychiatry.* Published online June 14, 2023: 1-21. doi: 10.1007/s40501-023-00287-5.
27. Moon I, An Y, Min S, Park C. Therapeutic Effects of Metaverse Rehabilitation for Cerebral Palsy: A Randomized Controlled Trial. *Int J Environ Res Public Health.* 2023; 20(2): 1578. doi: 10.3390/ijerph20021578.
28. Orr E, Arbel T, Levy M, et al. Virtual reality in the management of patients with low back and neck pain: a retrospective analysis of 82 people treated solely in the metaverse. *Arch Physiother.* 2023; 13: 11. doi: 10.1186/s40945-023-00163-8.
29. Lee JH, Lee TS, Yoo SY, et al. Metaverse-based social skills training programme for children with autism spectrum disorder to improve social interaction ability: an open-label, single-centre, randomised controlled pilot trial. *eClinicalMedicine.* 2023; 61: 102072. doi: 10.1016/j.eclinm.2023.102072.
30. Montalban X, Graves J, Midaglia L, et al. A smartphone sensor-based digital outcome assessment of multiple sclerosis. *Mult Scler Houndmills Basingstoke Engl.* 2022; 28(4): 654-664. doi: 10.1177/13524585211028561.
31. Stamm O, Dahms R, Reithinger N, Ruß A, Müller-Werdan U. Virtual reality exergame for supplementing multimodal pain therapy in older adults with chronic back pain: a randomized controlled pilot study. *Virtual Real.* 2022; 26(4): 1291. doi: 10.1007/s10055-022-00629-3.
32. Liang H, Li J, Wang Y, Pan J, Zhang Y, Dong X. Metaverse Virtual Social Center for the Elderly Communication During the Social Distancing. *Virtual Real Intell Hardw.* 2023; 5(1): 68-80. doi: 10.1016/j.vrih.2022.07.007.
33. Vera AD, Yuce MR. Forearm Dual-Triboelectric Sensor (FDTS) for assistive Human-Machine-Interfaces (HMIs) and robotic control with potential uses in prosthetic devices. *Nano Energy.* 2023; 111: 108366. doi: 10.1016/j.nanoen.2023.108366.
34. Shah SHH, Karlsen AST, Solberg M, Hameed IA. A social VR-based collaborative exergame for rehabilitation: codesign, development and user study. *Virtual Real.* Published online November 28, 2022: 1-18. doi: 10.1007/s10055-022-00721-8.
35. Amado I, Brénugat-Herné L, Orriols E, et al. A Serious Game to Improve Cognitive Functions in Schizophrenia: A Pilot Study. *Front Psychiatry.* 2016; 7: 64. doi: 10.3389/fpsy.2016.00064.

36. Park KM, Ku J, Choi SH, et al. A virtual reality application in role-plays of social skills training for schizophrenia: a randomized, controlled trial. *Psychiatry Res.* 2011; 189(2): 166-172. doi: 10.1016/j.psychres.2011.04.003.
37. Sohn BK, Hwang JY, Park SM, et al. Developing a Virtual Reality-Based Vocational Rehabilitation Training Program for Patients with Schizophrenia. *Cyberpsychology Behav Soc Netw.* 2016; 19(11): 686-691. doi: 10.1089/cyber.2016.0215.
38. Momosaki R, Tora K, Shirai Y, Funao H. Strategies to Promote Physical Activity among Sedentary Metaverse Residents. *Prog Rehabil Med.* 2024; 9: 20240038. doi: 10.2490/prm.20240038.
39. Pascucci S, Forte G, Angelini E, et al. Michelangelo Effect in Virtual Sculpturing: Prospective for Motor Neurorehabilitation in the Metaverse. *J Cogn.* 7(1): 17. doi: 10.5334/joc.345.
40. Mizuta R, Maeda N, Tashiro T, et al. Effectiveness of Metaverse Space-Based Exercise Video Distribution in Young Adults: Randomized Controlled Trial. *JMIR MHealth UHealth.* 2024; 12: e46397. doi: 10.2196/46397.
41. Chen H, He D, Xiong K, et al. An AI-enabled self-sustaining sensing lower-limb motion detection system for HMI in the metaverse. *Nano Energy.* 2025; 136: 110724. doi: 10.1016/j.nanoen.2025.110724.
42. Zhang C, Zhang L, Tian Y, An Z, Li B, Li D. AI-enabled full-body dynamic avatar reconstruction using triboelectric smart clothing for metaverse applications. *eScience.* Published online January 22, 2025: 100373. doi: 10.1016/j.esci.2025.100373.
43. Wang R, Jiang L, Li J, et al. Tactile and kinesthetic communication glove with fusion of triboelectric sensing and pneumatic actuation. *Nano Energy.* 2024; 131: 110273. doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110273.
44. Антипов В.М., Бадарин А.А., Куркин С.А., Киселев А.Р., Храмов А.Е. Программно-аппаратный комплекс для реабилитации пациентов с когнитивными и моторными нарушениями. *Врач и информационные технологии.* 2024; 4: 38-47. [Antipov V.M., Badarin A.A., Kurkin S.A., Kiselev A.R., Hramov A.E. Hardware-software complex for rehabilitation of patients with cognitive and motor disorders. *Medical doctor and information technology.* 2024; 4: 38-47. (In Russ.)]
45. The Lancet Public Health null. Reinvigorating the public health response to dementia. *Lancet Public Health.* 2021; 6(10): e696. doi: 10.1016/S2468-2667(21)00215-2.

46. Mowszowski L, Batchelor J, Naismith SL. Early intervention for cognitive decline: can cognitive training be used as a selective prevention technique? *Int Psychogeriatr*. 2010; 22(4): 537-548. doi: 10.1017/S1041610209991748.
47. Shen C, Rolls ET, Cheng W, et al. Associations of Social Isolation and Loneliness With Later Dementia. *Neurology*. 2022; 99(2): e164-e175. doi: 10.1212/WNL.0000000000200583.
48. Woods B, O'Philbin L, Farrell EM, Spector AE, Orrell M. Reminiscence therapy for dementia. *Cochrane Database Syst Rev*. 2018; 2018(3): CD001120. doi: 10.1002/14651858.CD001120.pub3.
49. Myles BS, Barnhill GP, Hagiwara T, Griswold DE, Simpson RL. A Synthesis of Studies on the Intellectual, Academic, Social/ Emotional and Sensory Characteristics of Children and Youth with Asperger Syndrome. *Educ Train Ment Retard Dev Disabil*. 2001; 36(3): 304-311.
50. <https://painstudy.ru/org/iasp.htm>. Accessed October 1, 2023.
51. Итоги конференции «Высокие ампутации нижних конечностей у детей и взрослых». <https://www.angiolsurgery.org/news/2019/05/31/>
52. Schone HR, Baker CI, Katz J, et al. Making sense of phantom limb pain. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2022; 93(8): 833-843. doi: 10.1136/jnnp-2021-328428.
53. XRHealth Virtual Clinic: At-Home Virtual Reality Therapy. XRHealth. Accessed September 19, 2023. <https://www.xr.health/>
54. Pizzolato C, Gunduz MA, Palipana D, et al. Non-invasive approaches to functional recovery after spinal cord injury: Therapeutic targets and multimodal device interventions. *Exp Neurol*. 2021; 339: 113612. doi: 10.1016/j.expneurol.2021.113612.
55. Pizzolato C, Saxby DJ, Palipana D, et al. Neuromusculoskeletal Modeling-Based Prostheses for Recovery After Spinal Cord Injury. *Front Neurobotics*. 2019; 13. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2019.00097>
56. Kunz L, Schröder TN, Lee H, et al. Reduced grid-cell-like representations in adults at genetic risk for Alzheimer's disease. *Science*. 2015; 350(6259): 430-433. doi: 10.1126/science.aac8128.