

<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-3-113-118>

Виртуальная реальность в зрительной реабилитации

М.В. Зуева[✉], В.И. Котелин, Н.В. Нероева, А.Н. Журавлева, И.В. Цапенко

ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19, 105062, Москва, Россия

В обзоре обсуждается текущее состояние и перспективы применения технологий виртуальной реальности (VR) в стратегиях зрительной реабилитации, основанных на активации нейропластичности. Тренировки зрения в VR имеют ряд преимуществ перед традиционными реабилитационными мероприятиями. VR-занятия в игровом формате увлекают и мотивируют пользователя к активному участию в терапии и соблюдению им плана лечения, проводятся в безопасной и контролируемой среде. В VR-системах имеется возможность создавать индивидуальные программы лечения, адаптированные к конкретным потребностям и способностям каждого пациента. Системы VR только начинают применяться для реабилитации слабовидящих и показывают в целом многообещающие результаты. Однако требуется более тщательная оценка результатов и дополнительные исследования для преодоления таких ограничений, как небольшой размер выборки и отсутствие контрольных групп. Необходимо привлечение объективных способов диагностики для создания доказательной базы на высоком методическом уровне. Представляется перспективным расширение возможностей VR-технологий для зрительной реабилитации пациентов с ретиальной патологией разной этиологии за счет совмещения зрительных тренировок в виртуальном мире с ритмической фотостимуляцией с оптимальными параметрами оптических сигналов.

Ключевые слова: виртуальная реальность; дополненная реальность; зрительная реабилитация; нейропластичность; заболевания сетчатки

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Зуева М.В., Котелин В.И., Нероева Н.В., Журавлева А.Н., Цапенко И.В. Виртуальная реальность в зрительной реабилитации. Российский офтальмологический журнал. 2024; 17 (3):113-8. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-3-113-118>

Virtual reality in visual rehabilitation

Marina V. Zueva[✉], Vladislav I. Kotelin, Natalia V. Neroeva, Anastasia N. Zhuravleva, Irina V. Tsapenko

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia
visionlab@yandex.ru

The review discusses the current state of affairs and prospects for the use of virtual reality (VR) technologies in visual rehabilitation strategies based on neuroplasticity activation. Vision training in VR has a number of advantages compared to traditional rehabilitation activities. Play-based VR exercises, practices in a safe and controlled environment, attract the users and encourage them to actively participate in therapy and comply with the treatment plan. VR systems have options that enable the creation of individual treatment programs tailored to the specific needs and abilities of each patient. VR systems are only beginning to be used in the rehabilitation of visually impaired but on the whole show promising results already. Yet, more careful evaluation of the results and additional research are required to overcome the existing limitations of the approach, such as a small size of the sample and lack of control groups. Objective diagnostic methods are needed to create a solid and high-quality evidence base. It seems promising to expand the potentials of VR technologies for visual rehabilitation of diverse retinal pathology patients by combining visual training in the virtual world with rhythmic photostimulation using optimal parameters of optical signals.

Keywords: virtual reality; augmented reality; visual rehabilitation; neuroplasticity; retinal diseases

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Zueva M.V., Kotelin V.I., Neroeva N.V., Zhuravleva A.N., Tsapenko I.V. Virtual reality in visual rehabilitation. Russian ophthalmological journal. 2024; 17 (3):113-8 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-3-113-118>

Технологии расширенной реальности. Увеличение продолжительности жизни является одной из причин значительного повышения среднего возраста и общего старения популяции. Население мира составляет сегодня более 8 млрд человек, из них около 1 млрд — люди пожилого возраста. Увеличение доли пожилых людей в общей численности населения приводит к росту распространенности связанных с возрастом заболеваний, в том числе нейродегенеративных расстройств и деменции [1, 2]. Низкое зрение связано с глазными патологиями, такими как аномалии рефракции, катаракта, глаукома, диабетическая ретинопатия, отслойка сетчатки, возрастная макулярная дегенерация (ВМД), пигментный ретинит, альбинизм, ретинопатия недоношенных и болезнь Штаргардта. Эти заболевания приводят к жалобам на дефекты периферического или центрального поля зрения, нечеткость зрения [3], трудности с чтением, повседневной активностью, образованием и работой.

В современных технологиях зрительной реабилитации слабовидящих пациентов и нейрореабилитации используется принцип нейропластичности. Нейропластичность зрительной системы и других сенсорных систем относится к внутренне присущей головному мозгу способности постоянно меняться на основе опыта, приспосабливаясь к меняющемуся миру, создавая новые нейроны и новые связи между нейронами. Пластичность мозга сохраняется на протяжении всей жизни человека [4–6]. Она играет важную роль в созревании и развитии ЦНС и приобретении новых навыков [7]. Потенциал пластичности наиболее высок в критические и сенситивные периоды раннего развития ребенка, когда входящая информация необходима для правильного формирования специфических нейронных соединений [8–13]. Однако даже у пожилого человека схемы нейронных сетей могут быть реконструированы опытом. В многочисленных исследованиях описаны различные проявления пластичности мозга [14] и зрительной системы взрослых [15]. Высокая пластичность зрелых нейронных сетей позволяет адаптироваться к количественному и качественному изменению сенсорных входов в соответствии с получаемым опытом [16–18]. Структурно-функциональные перестройки нейронных сетей обеспечивают адаптацию ЦНС к экзогенным стимулам. Пластические изменения могут быть вызваны потерей или избытком сенсорной стимуляции и возникать в результате повторяющихся тренировок и при приобретении новых навыков [19]. Зависимое от активности нейронов изменение силы синапсов является одним из основных положений в концепции нейропластичности, теорий обучения и памяти [20].

Нейропластическая терапия использует способность мозга переучиваться на различные модели поведения, создавать новые сети нейронов и восстанавливать или поддерживать его функциональность. Главный принцип нейропластичности состоит в том, что чем чаще при повторяющихся воздействиях индуцируется (активируется, востребуется) взаимосвязь нейронов, тем крепче она становится. Согласно хеббовской теории обучения нейронных сетей, увеличение синаптической эффективности возникает в результате повторяющейся стимуляции пресинаптической клеткой постсинаптического нейрона по принципу «клетки, которые активируются вместе, соединяются вместе» (“cells that fire together, wire together”) [21, 22].

Сегодня лавинообразно нарастают предложения технологий для медицинской нейрореабилитации, использующих дополненную и виртуальную реальность. Отметим

кратко принятую терминологию в этой области. К иммерсивным технологиям относят технологии полного или частичного погружения в виртуальный мир. Объективная реальность, в которой мы находимся и которую воспринимаем органами чувств, называется также «реальной реальностью» (RR). «Виртуальной реальностью» (VR) называют полностью смоделированную реальность с применением современных технологий. К «дополненной», или «добавленной реальности» (AR), относят дополнение RR элементами VR. Общим термином, обозначающим технологии AR и VR, является «расширенная реальность» (XR).

Области применения технологий VR и AR включают визуализацию и анализ результатов исследований, обучение хирургии и анатомии, создание интерфейсов для образования и телемедицины. VR в компьютерных играх давно используется для стимуляции когнитивных функций, и лишь недавно VR нашла применение в секторе нейрореабилитации.

Существует множество разновидностей устройств VR, разработанных для различных целей, которые оснащены как минимум экраном, набором датчиков и вычислительных компонентов (игровой компьютер, наголовный дисплей, трекерная система, джойстик или игровые перчатки).

Виртуальная реальность и нейропластическая терапия. Поскольку синхронная активация в нейронных популяциях приводит к усилению синаптической силы между нейронами, технологии VR с повторяющимися тренировками полезны в качестве реабилитационного инструмента для стимуляции мозга и запуска механизмов нейропластичности, способствующих устранению зрительных и сенсомоторных нарушений при различных нейродегенеративных заболеваниях и травмах. В многочисленных исследованиях документировано, что лечение на основе VR вызывает реорганизацию коры головного мозга и способствует активации различных нейронных связей [23–27]. Это приводит к улучшению моторной активности и сенсорных функций [27–32].

Компьютерные игры, адаптированные для медицинских целей, в научной литературе называют «серьезными играми» (serious games, SG). Главной особенностью SG в VR является присущая им способность вовлекать игроков на когнитивном, физическом и перцептивном уровнях и мотивировать их на повторение игрового процесса [33]. Сегодня многими научными группами изучается польза для здоровья различных SG с погружением и без погружения (иммерсивные и неиммерсивные) для обеспечения контролируемой, безопасной среды обучения, позволяющей проводить индивидуальные тренировки и нейрореабилитацию [34–36]. Игровые тренировки в виртуальном мире не требуют от пациента активного манипулирования программой, в отличие от видео- или компьютерных игр без VR [37].

Применение VR позволяет изменять параметры сенсорного воздействия и обратной сенсорной связи для создания индивидуальных парадигм лечения. В VR-системах зрительные стимулы предъявляются пользователю двумя способами: на экране монитора или в иммерсивной среде, созданной с помощью соответствующего оборудования, такого как наголовные дисплеи и системы захвата движения. Технологии VR с полным или частичным погружением вызывают ощущение физического присутствия в нефизическом компьютерном мире. VR с помощью смоделированных 3D-сред позволяет пользователям погрузиться в виртуальный мир, в котором они могут использовать зрительные, слуховые или тактильные сенсорные каналы [25, 34].

Неиммерсивные VR-системы также используются для улучшения когнитивных и двигательных способностей пациентов с неврологическими расстройствами [38]. Эти системы позволяют взаимодействовать с окружающей средой с помощью мыши и более просты для понимания пользователями, чем иммерсивные VR-технологии, однако слабо изучено применение этих технологий при зрительных нарушениях.

Технологии AR, в отличие от VR, включают прямой просмотр в реальном времени физической среды объективного (реального) мира, элементы которой дополняются сгенерированными компьютером сенсорными входными данными, такими как звук, видео и графика [39]. Системы AR, включающие наложение и взаимодействие реального и цифрового 3D-мира, давно применяются в медицине: в хирургии, обезболивании и терапии психических расстройств [36]. Работы по применению AR для улучшения зрения на сегодняшний день немногочисленны. Совмещение VR с высокоточными методами функциональной визуализации, такими как функциональная магнитно-резонансная томография, позволяет предъявлять в VR мультимодальные стимулы с контролем изменений активности мозга пациента [40]. С другой стороны, клиническому применению VR помогают интерфейсы «мозг — компьютер» (МКИ), называемые также нейрональными интерфейсами, или нейроадаптивными технологиями. МКИ позволяют напрямую (по принципу биологической обратной связи) подключаться к электрической активности, генерируемой корой головного мозга, для точного произвольного управления подключенными роботизированными устройствами [41, 42]. Технологии МКИ используют данные регистрации активности мозга, полученные с помощью электроэнцефалографии, магнитоэнцефалографии, ближней инфракрасной спектроскопии. Компьютер фиксирует и расшифровывает изменения активности головного мозга, которые отображают желание человека совершить какое-то действие. Биопотенциалы мозга, связанные, например, с попытками движений парализованной рукой и пальцами после инсульта, переводятся в онлайн-обратную связь или управляют транскраниальной электрической стимуляцией для усиления нейропластичности [43]. На сегодняшний день лидерами в области применения МКИ выступают такие сферы деятельности человека, как медицина, развлечения и саморазвитие.

Виртуальная реальность в современных стратегиях зрительной реабилитации. Отмечают следующие четыре ключевых фактора, которые определяют перспективность применения VR в стратегиях зрительной реабилитации: повторение (прерывистое воздействие и курсовое применение), обратную сенсорную связь, мотивацию и индивидуализацию [27]. Поскольку нейропластичность зависит от частого использования обучаемых нейронных сетей по принципу *use it or lose it* — «используй или потеряй», повторяющиеся тренировки имеют решающее значение для усиления функциональных изменений в схемах нейронных соединений [44]. Учитывая, что оптимальное развитие нейронных сетей при созревании ЦНС может быть достигнуто только при активации разных сенсорных каналов, то есть при должном развитии мультисенсорных входов, фактор мультимодальной сенсорной стимуляции также считают важным компонентом в реабилитации для реструктуризации нейронных сетей головного мозга [45]. VR-игры обеспечивают сенсорную мультимодальную стимуляцию с комбинацией зрительной, тактильной и слуховой обратной связи [45]. Личная заинтересованность (мотивация)

и комплаентность пользователя благоприятствуют механизмам нейропластичности при сосредоточении его внимания на различных видах деятельности, делающих терапию приятной и привлекательной [46, 47]. И наконец, индивидуализация состоит в том, что VR-терапия может быть адаптирована к каждому пациенту путем изменения параметров стимулов и окружающего контента 3D-среды [27].

Потенциальный вклад систем VR в улучшение функциональности зрительной системы пока остается недостаточно изученным. Большинство исследователей, которые изучали влияние VR на зрение, сосредотачивали свое внимание на описании краткосрочных и долгосрочных побочных эффектов от применения VR и на создании тестов для идентификации распространенных нарушений зрения и сопутствующих нарушений [48, 49]. Лишь немногие авторы пытались использовать технологии VR для улучшения зрительных способностей, которые не устраняются существующими вариантами лечения [50, 51].

Установлена тесная взаимосвязь между практикой игры в SG и улучшением зрительного восприятия [52]. Виртуальные SG связаны с улучшением периферического зрения [53] и контрастной чувствительности [54]. Сенсорная тренировка с помощью видеоигр на основе виртуальной реальности может улучшать зрительные способности у детей, страдающих амблиопией. Способ лечения, известный как зрительное перцептивное обучение и реализованный в различных SG в VR, уже показал себя как полезный терапевтический подход для уменьшения нарушений зрения, возникающих при амблиопии, даже после окончания критического периода в развитии зрительной системы [55].

Потенциал использования технологии VR для улучшения зрения при амблиопии вызывает особый интерес из-за возможности тренировки каждого глаза независимо, без необходимости окклюзии. Полагают, что дихоптическая стимуляция может устранить одну из основных причин неэффективности лечения амблиопии, особенно среди педиатрической популяции, которая заключается в плохой приверженности пациентов к окклюзии [27, 56–58]. Действительно, исследования показали, что зрительные улучшения, вызванные 20-часовым перцептивным обучением у детей старшего возраста и взрослых с амблиопией, эквивалентны улучшениям, полученным в результате примерно 500-часового наложения окклюдеров [59]. У маленьких детей перцептивное обучение посредством SG привело к аналогичным результатам [54]. Продемонстрирована полезность объединения перцептивного подхода с дихоптической тренировкой, состоящей в просмотре отдельного и независимого поля каждым глазом с повышенной стимуляцией амблиопичного глаза [60–62].

Присущая VR-играм способность мотивировать пользователей на повторение игрового процесса в случае детей с амблиопией представляется большим преимуществом с учетом имеющейся неудовлетворительной приверженности этих пациентов традиционной терапии. Исследования показали, что у детей, которые играют с использованием VR-систем, повышена толщина коры и имеется больший региональный объем серого вещества в дорсолатеральной префронтальной коре и других областях мозга [63, 64], что способствует улучшению ряда когнитивных навыков [65, 66].

Предполагается также, что предъявление зрительных стимулов, интегрированных в динамику различных SG, может способствовать клиническому улучшению при различных других зрительных нарушениях, таких как миопия, пресбиопия, ВМД [67, 68]. Сообщалось, что тренировка

бинокулярного зрения в VR с помощью стереоскопического дисплея способствует профилактике миопии и уменьшает зрительное утомление при тренировках цилиарной мышцы с помощью зрительных упражнений, фильмов, игр и другого виртуального контента [69–71].

В настоящее время зрительная реабилитация больных ВМД в основном сосредоточена на задачах скорости чтения и различительной способности зрительной системы [72–75]. Однако потеря зрения негативно влияет на всю повседневную деятельность человека, и повышение физической самостоятельности (автономии) человека и субъективно воспринимаемого им качества жизни считается приоритетной задачей любой программы реабилитации.

Предполагается использование VR-технологий для реабилитации пациентов с ВМД и глаукомой. Пациента можно научить максимально использовать свое остаточное зрение, имитируя реальные ситуации в виртуальной реальности, например при игровой покупке товаров в виртуальном супермаркете. По мере того как пациенту становится комфортно ориентироваться в относительно простых смоделированных средах, он постепенно переходит к все более сложным сценариям, например к ориентации на виртуальных городских улицах с движущимися пешеходами и транспортными средствами [37, 76].

Упражнения на основе VR повышают физическую самостоятельность и улучшают качество жизни, связанное со зрением, помогая пациенту приспособиться и наилучшим образом использовать оставшиеся зрительные функции. Другим примером является система с дополненной реальностью eSight — надеваемое на голову устройство, используемое в качестве оптического вспомогательного средства, которое помогает людям с нарушениями зрения ориентироваться в повседневных жизненных ситуациях, улучшая их восприятие мира [51]. Однако оно не служит инструментом реабилитации. Заметим, что до настоящего времени у больных ВМД и первичной открытоугольной глаукомой не применялись технологии VR для активации нейропластичности и восстановления нарушенных нейронных сетей и зрительных функций, т. е. реституционные методы реабилитации.

В разрабатываемом нами способе фрактальной фототерапии в VR стимуляция активности зрительной системы осуществляется путем объемной, комбинированной фототерапии с использованием стереоскопического дисплея [77]. Стимулирующее полотно с нелинейными фрактальными мельканиями, создаваемыми на основе функции Вейерштрасса — Мандельброта, предъявляется в контексте псевдообъемной сцены. В настоящее время организуются клинические исследования новой технологии.

Мы полагаем, что технологии VR, совмещенные с фотостимуляцией и использующие фрактальную временную организацию световых сигналов, могут быть особенно полезны в зрительной реабилитации при заболеваниях, которые характеризуются нарушением структуры нейронных сетей с дисфункцией ганглиозных клеток сетчатки, таких как глаукома, ВМД и другие патологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологии VR, первоначально создававшиеся только для игровой индустрии, сегодня рассматриваются в качестве средства для лечения различных состояний и в том числе в качестве нового инструмента зрительной реабилитации. VR-тренировки зрения имеют ряд преимуществ перед традиционными реабилитационными упражнениями. Они увлекательные и мотивируют пользователя к более

активному участию в терапии и соблюдению им плана лечения. VR-тренировки можно проводить в безопасной и контролируемой среде, что помогает пациентам чувствовать себя более комфортно и уверенно в процессе реабилитации. Технологии VR обеспечивают реалистичную сенсорную стимуляцию, что особенно полезно именно для пациентов с нарушениями зрения, лишенных вследствие этого ярких зрительных впечатлений. В VR-системах имеется возможность создавать индивидуальные программы лечения, адаптированные к конкретным потребностям и способностям каждого пациента. Системы VR только начинают применяться в области реабилитации слабовидящих. По данным литературы, технологии VR в целом показывают многообещающие результаты. Однако требуется более тщательная оценка результатов и проведение дополнительных исследований для преодоления таких ограничений, как небольшой размер выборки и отсутствие контрольных групп. Необходимо привлечение объективных методов диагностики для создания доказательной базы на высоком методическом уровне. Основной практической проблемой на международном уровне признается отсутствие системного подхода и алгоритмов применения технологии, что подтверждает необходимость улучшения существующих методологий зрительной реабилитации и разработки новых [78]. Перспективным представляется расширение возможностей VR-технологий для зрительной реабилитации путем совмещения зрительных тренировок в виртуальном мире с ритмической фотостимуляцией с оптимальными параметрами оптических сигналов.

Литература/References

1. Jin K, Simpkins JW, Ji X, Leis M, Stambler I. The critical need to promote research of aging and aging-related diseases to improve health and longevity of the elderly population. *Aging Dis.* 2015; 6 (1): 1–5. doi: 10.14336/AD.2014.1210
2. Kennedy BK, Berger SL, Brunet A, et al. Geroscience: linking aging to chronic disease. *Cell.* 2014; 159 (4): 709–13. doi: 10.1016/j.cell.2014.10.039
3. Evans K, Law SK, Walt J, Buchholz P, Hansen J. The quality-of-life impact of peripheral versus central vision loss with a focus on glaucoma versus age-related macular degeneration. *Clin Ophthalmol.* 2009; 3: 433–45. doi: 10.2147/oph.s6024
4. Eysel UT. Adult cortical plasticity. Bochum, Germany: Ruhr-University Bochum. 2009:141–47.
5. Gilbert CD, Li W. Adult visual cortical plasticity. *Neuron.* 2012; 75 (2): 250–64. doi: 10.1016/j.neuron.2012.06.030
6. Sur M, Nagakura I, Chen SH. Mechanisms of plasticity in the developing and adult visual cortex. Chapter 9. *Prog Brain Res.* 2013; 207: 243–54.
7. Pascual-Leone A, Freitas C, Oberman L, et al. Characterizing brain cortical plasticity and network dynamics across the age-span in health and disease with TMS-EEG and TMS-fMRI. *Brain Topogr.* 2011; 24: 302–15. <https://doi.org/10.1007/s10548-011-0196-8>
8. Hebb DO. The effects of early experience on problem solving at maturity. *Am Psychol.* 1947; 2: 737–45.
9. Hubel DH, Wiesel TN. The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *J Physiol.* 1970; 206: 419–36. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1970.sp009022>
10. Hensch T. Critical period plasticity in local cortical circuitries. *Nat Rev Neurosci.* 2005; 6: 877–88. <https://doi.org/10.1038/nrn1787>
11. Merabet LB, Pascual-Leone A. Neural reorganization following sensory loss: The opportunity of change. *Nat Rev Neurosci.* 2010; 11 (1): 44–52. <https://doi.org/10.1038/nrn2758>
12. Bengoetxea H, Ortuzar N, Bulnes S, et al. Enriched and deprived sensory experience induces structural changes and rewires connectivity during the postnatal development of the brain. *Neural Plast.* 2012; 2012:305693. doi: 10.1155/2012/305693
13. Espinosa JS, Stryker MP. Development and plasticity of the primary visual cortex. *Neuron.* 2012; 75: 230–49. doi: 10.1016/j.neuron.2012.06.009
14. Dragoi V, Sharma J, Sur M. Adaptation-induced plasticity of orientation tuning in adult visual cortex. *Neuron.* 2000; 28 (1): 287–98. doi: 10.1016/s0896-6273(00)00103-3
15. Strettoi E, Di Marco B, Orsini N, Napoli D. Retinal plasticity. *Int J Mol Sci.* 2022 Jan 20; 23 (3): 1138. doi: 10.3390/ijms23031138

16. Katz LC, Shatz CJ. Synaptic activity and the construction of cortical circuits. *Science*. 1996; 274 (5290): 1133–8.
17. Buonomano DV, Merzenich MM. Cortical plasticity: from synapses to maps. *Ann Rev Neurosci*. 1998; 21: 149–86. doi: 10.1146/annurev.neuro.21.1.149
18. Carcea I, Froemke RC. Cortical plasticity, excitatory-inhibitory balance and sensory perception. *Prog Brain Res*. 2013; 207: 65–90. doi: 10.1016/B978-0-444-63327-9.00003-5
19. Moucha R, Kilgard MP. Cortical plasticity and rehabilitation. *Prog Brain Res*. 2006; 157: 111–22. doi: 10.1016/S0079-6123(06)57007-4
20. Magee JC, Grienberger C. Synaptic plasticity forms and functions. *Annu Rev Neurosci*. 2020; 43:95–117. doi: 10.1146/annurev-neuro-090919-022842
21. Hebb DO. The organization of behaviour. A neuropsychological theory. John Wiley & Sons, New York, NY, USA; 1949.
22. Löwel S, Singer W. Selection of intrinsic horizontal connections in the visual cortex by correlated neuronal activity. *Science*. 1992; 255 (5041): 209–12. doi: 10.1126/science.1372754
23. You SH, Jang S-H, Kim Y-H, et al. Cortical reorganization induced by virtual reality therapy in a child with hemiparetic cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2005; 47 (9): 628–35.
24. Prochnow D, Bermúdez i Badia S, Schmidt J, et al. A functional magnetic resonance imaging study of visuomotor processing in a virtual reality-based paradigm: rehabilitation gaming system. *Eur J Neurosci*. 2013; 37 (9): 1441–7. doi: 10.1111/ejn.12157
25. Deutsch J, McCoy SW. Virtual reality and serious games in neurorehabilitation of children and adults: prevention, plasticity and participation. *Pediatr Phys Therapy*. 2017; 29: S23. doi: 10.1097/PEP.0000000000000387
26. Chen Y, Fanchiang HD, Howard A. Effectiveness of virtual reality in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Physical Therapy*. 2018; 98 (1): 63–77. doi: 10.1093/ptj/pzx107
27. Coco-Martin MB, Piñero DP, Leal-Vega L, et al. The potential of virtual reality for inducing neuroplasticity in children with amblyopia. *J Ophthalmol*. 2020; 2020: 7067846. doi: 10.1155/2020/7067846
28. Ghai S, Ghai I. Virtual reality enhances gait in cerebral palsy: a training dose-response meta-analysis. *Front Neurol*. 2019; 10: 236. doi: 10.3389/fneur.2019.00236
29. Chen X, Liu F, Lin S, Yu L, Lin R. Effects of virtual reality rehabilitation training on cognitive function and activities of daily living of patients with poststroke cognitive impairment: A Systematic review and meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2022; 103 (7): 1422–35. doi: 10.1016/j.apmr.2022.03.012
30. Bonanno M, De Luca R, De Nunzio AM, Quartarone A, Calabro RS. Innovative technologies in the neurorehabilitation of traumatic brain injury: A systematic review. *Brain Sci*. 2022; 12 (12): 1678. doi: 10.3390/brainsci12121678
31. Hao J, Xie H, Harp K, Chen Z, Siu KC. Effects of virtual reality intervention on neural plasticity in stroke rehabilitation: A systematic review. *Arch Phys Med Rehabil*. 2022; 103 (3): 523–41. doi: 10.1016/j.apmr.2021.06.024
32. Zhang Q, Fu Y, Lu Y, et al. Impact of virtual reality-based therapies on cognition and mental health of stroke patients: Systematic review and meta-analysis. *J Med Internet Res*. 2021; 23 (11): e31007. doi: 10.2196/31007
33. Stanmore E, Stubbs B, Vancampfort D, de Bruin ED, Firth J. The effect of active video games on cognitive functioning in clinical and non-clinical populations: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Neurosci Biobehav Rev*. 2017; 78: 34–43. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.04.011
34. Georgiev DD, Georgieva I, Gong Z, Nanjappan V, Georgiev GV. Virtual reality for neurorehabilitation and cognitive enhancement. *Brain Sci*. 2021; 11: 221. <https://doi.org/10.3390/brainsci11020221>
35. Venkatesan M, Mohan H, Ryan JR, et al. Virtual and augmented reality for biomedical applications. *Cell Reports Medicine*. 2021; 7 (20): 100348. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2021.100348>
36. Kohli V, Tripathi U, Chamola V, Rout BK, Kanhere SS. A review on virtual reality and augmented reality use-cases of brain computer interface based applications for smart cities. *Microprocess. Microsystems*. 2022; 88: 104392. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104392>
37. Raphanel M, Shaughness G, Seiple WH, Arleo A. Current practice in low vision rehabilitation of age-related macular degeneration and usefulness of virtual reality as a rehabilitation tool. *Aging Sci*. 2018; 6: 194. doi: 10.4172/2329-8847.1000194
38. Mohammadi R, Semnani AV, Mirmohammadkhani M, Grampurohit N. Effects of virtual reality compared to conventional therapy on balance poststroke: a systematic review and meta-analysis. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2019; 28 (7): 1787–98. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.03.054
39. McKalin V. Augmented reality vs virtual reality: What are the differences and similarities. *Tech Times*. 2015; 5: 1–6. <https://www.techtimes.com/articles/5078/20140406/augmented-reality-vs-virtual-reality-what-are-the-differences-and-similarities.htm>
40. Bohil CJ, Alicea B, Biocca FA. Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci*. 2011; 12 (12): 752–62. <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
41. Wang W, Collinger JL, Perez MA, et al. Neural interface technology for rehabilitation: exploiting and promoting neuroplasticity. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2010; 21 (1): 157–78. doi: 10.1016/j.pmr.2009.07.003
42. Valeriani D, Santoro F, Ienca M. The present and future of neural interfaces. *Front Neurobot*. 2022; 16: 953968. doi: 10.3389/fnbot.2022.953968
43. Soekadar SR, Birbaumer N, Slutzky MW, Cohe LG. Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke. *Neurobiol Dis*. 2015; 83: 172–9. doi: 10.1016/j.nbd.2014.11.025
44. Mahncke HW, Bronstone A, Merzenich M.M. Brain plasticity and functional losses in the aged: scientific bases for a novel intervention. *Prog Brain Res*. 2006; 157: 81–109. doi: 10.1016/S0079-6123(06)57006-2
45. Adamovich SV, Fluet GG, Tunik EJ, Merians A.S. Sensorimotor training in virtual reality: a review. *NeuroRehabilitation*. 2009; 25 (1): 29–44. doi: 10.3233/NRE-2009-0497
46. Shaffer J. Neuroplasticity and clinical practice: building brain power for health. *Front Psychol*. 2016; 7: 1118. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01118
47. Piccione J, Collett J, De Foe A. Virtual skills training: the role of presence and agency. *Heliyon*. 2019; 5 (11): e02583. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02583>
48. Turnbull PRK, Phillips JR. Ocular effects of virtual reality headset wear in young adults. *Sci Rep*. 2017; 7: 16172. doi: 10.1038/s41598-017-16320-6
49. Tychsen L, Foeller P. Effects of immersive virtual reality headset viewing on young children: visuomotor function, postural stability, and motion sickness. *Am J Ophthalmol*. 2020 209: 151–9. doi: 10.1016/j.ajo.2019.07.020
50. Vadamurthy I, Knill DC, Huang SJ, et al. Recovering stereo vision by squashing virtual bugs in a virtual reality environment. *Philos Trans R Soc. B: Biol Sci*. 2016; 371 (1697): 20150264. doi: 10.1098/rstb.2015.0264
51. Ehrlich JR, Ojeda LV, Wicker D, et al. Head-mounted display technology for low-vision rehabilitation and vision enhancement. *Am J Ophthalmol*. 2017; 176: 26–32. doi: 10.1016/j.ajo.2016.12.021
52. Oei AC, Patterson MD. Enhancing cognition with video games: a multiple game training study. *PLoS ONE*. 2013; 8:e58546. doi: 10.1371/journal.pone.0058546
53. Green CS, Bavelier D. Effect of action video games on the spatial distribution of visuospatial attention. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2006; 32: 1465. doi: 10.1037/0096-1523.32.6.1465
54. Polat U, Ma-Naim T, Spierer A. Treatment of children with amblyopia by perceptual learning. *Vis Res*. 2009; 49 (21): 2599–603. doi: 10.1016/j.visres.2009.07.008
55. Astle AT, Webb BS, McGraw PV. Can perceptual learning be used to treat amblyopia beyond the critical period of visual development? *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2011; 31 (6): 564–73, 2011. doi: 10.1111/j.1475-1313.2011.00873.x
56. Waddingham PE, Cobb SV, Eastgate RM, Gregson RM. Virtual reality for interactive binocular treatment of amblyopia. *Int J Disabil Hum Dev*. 2006; 5: 155–62. doi: 10.1515/IJDHD.2006.5.2.155
57. Herbison N, MacKeith D, Vivian A, et al. Randomised controlled trial of video clips and interactive games to improve vision in children with amblyopia using the I-BiT system. *Brit J Ophthalmol*. 2016; 100 (11): 1511–16. doi: 10.1136/bjophthalmol-2015-307798
58. Ved T, Chauhan J, Katre N. Syt-AJ: Treating lazy eye using virtual reality. In: *Advanced Computing Technologies and Applications*. Mumbai: Springer. 2020: 281–92.
59. Levi DM, Li RW. Perceptual learning as a potential treatment for amblyopia: a mini-review. *Vis Res*. 2009; 49 (21): 2535–49. doi: 10.1016/j.visres.2009.02.010
60. Hess RF, Mansouri B, Thompson B. A new binocular approach to the treatment of amblyopia in adults well beyond the critical period of visual development. *Restorat Neurol Neurosci*. 2010; 28 (6): 793–802. doi: 10.3233/RNN-2010-0550
61. Li J, Thompson B, Deng D, et al. Dichoptic training enables the adult amblyopic brain to learn. *Curr Biol*. 2013; 23 (8): 308–9. doi: 10.1016/j.cub.2013.01.059
62. Li SL, Reynaud A, Hess RF, et al. Dichoptic movie viewing treats childhood amblyopia. *J Am Assoc Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 2015; 19: 401–5. doi: 10.1016/j.jaapos.2015.08.003
63. Kühn S, Gleich T, Lorenz RC, Lindenberger U, Gallinat J. Playing Super Mario induces structural brain plasticity: gray matter changes resulting from training with a commercial video game. *Molecular Psychiatry*. 2014; 19 (2): 265–71. <https://doi.org/10.1038/mp.2013.120>
64. Gong D, He H, Liu D, et al. Enhanced functional connectivity and increased gray matter volume of insula related to action video game playing. *Sci Rep*. 2015; 5 (1): 9763. <https://doi.org/10.1038/srep09763>
65. Boot WR, Kramer AF, Simons DJ, Fabiani M, Gratton G. The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta Psychol*. 2008; 129 (3): 387–98. doi: 10.1016/j.actpsy.2008.09.005
66. Bavelier D, Green CS. The brain-boosting power of video games. *Sci Am*. 2016; 315: 26–31. doi: 10.1038/scientificamerican0716-26

67. Durrie D, McMinn PS. Computer-based primary visual cortex training for treatment of low myopia and early presbyopia. *Trans Am Ophthalmol Soc.* 2007; 105: 132–40.
68. Maniglia M, Cottureau BR, Soler V, Trotter Y. Rehabilitation approaches in macular degeneration patients. *Front Syst Neurosci.* 2016; 10: 107. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00107>
69. Zhao F, Chen L, Ma H, Zhang W. Virtual reality: a possible approach to myopia prevention and control? *Med Hypotheses.* 2018; 121: 1–3. doi: 10.1016/j.mehy.2018.09.021
70. Huang Y, Li M, Shen Y, et al. Study of the immediate effects of autostereoscopic 3D visual training on the accommodative functions of myopes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2022; 63:9. doi: 10.1167/iops.63.2.9
71. Ali SG, Wang X, Li P. et al. A systematic review: Virtual-reality-based techniques for human exercises and health improvement. *Front Public Health.* 2023; 11: 1143947. doi: 10.3389/fpubh.2023.1143947
72. Seiple W, Grant P, Szlyk JP. Reading rehabilitation of individuals with AMD: relative effectiveness of training approaches. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2011; 52 (6): 2938–44. doi: 10.1167/iops.10-6137
73. Chung ST. Improving reading speed for people with central vision loss through perceptual learning. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2011; 52 (2): 1164–70. doi: 10.1167/iops.10-6034
74. Coco-Martín MB, Cuadrado-Asensio R, López-Miguel A. Design and evaluation of a customized reading rehabilitation program for patients with age-related macular degeneration. *Ophthalmology.* 2013; 120 (1): 151–9. doi: 10.1016/j.ophtha.2012.07.035
75. Virgili G, Acosta R, Bentley SA, et al. Reading aids for adults with low vision. *Cochrane Database Syst Rev.* 2018 Apr 17; 4 (4): CD003303. doi: 10.1002/14651858.CD003303.pub4
76. Bowman EL, Liu L. Individuals with severely impaired vision can learn useful orientation and mobility skills in virtual streets and can use them to improve real street safety. *PLoS One.* 2017; 12: e0176534. doi: 10.1371/journal.pone.0176534
77. Нероев В.В., Зуева М.В., Манахов П.А., Нероева Н.В. и др. Способ улучшения функциональной активности зрительной системы с помощью фрактальной фототерапии с использованием стереоскопического дисплея. Патент РФ № 2773684. 2022. [Neroev V.V., Zueva M.V., Manakhov P.A., Neroeva N.V., et al. A method for improving the functional activity of the visual system using fractal phototherapy using a stereoscopic display. Patent RF No. 2773684. 2022 (In Russ.)].
78. Markowitz SN. State-of-the-art: low vision rehabilitation. *Can J Ophthalmol.* 2016; 51 (2): 59–66. doi: 10.1016/j.jcjo.2015.11.002

Вклад авторов в работу: М.В. Зуева — концепция обзора, анализ литературы, написание текста; В.И. Котелин — сбор и анализ литературы, написание текста; Н.В. Нероева — анализ литературы, редактирование; А.Н. Журавлева, И.В. Цапенко — редактирование текста.
Author's contribution: M.V. Zueva — review concept, literature analysis, text writing; V.I. Kotelin — literature collection and analysis, text writing; N.V. Neroeva — literature analysis, text editing; A.N. Zhuravleva, I.V. Tsapenko — text editing.

Поступила: 06.10.2023. Переработана: 09.10.2023. Принята к печати: 10.10.2023
Originally received: 06.10.2023. Final revision: 09.10.2023. Accepted: 10.10.2023

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19 Москва, 105062, Россия

Марина Владимировна Зуева — д-р биол. наук, профессор, начальник отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ORCID 0000-0002-0161-5010

Владислав Игоревич Котелин — канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ORCID 0000-0003-4675-9648

Наталья Владимировна Нероева — канд. мед. наук, руководитель отдела патологии сетчатки и зрительного нерва, ORCID 0000-0002-8480-0894

Анастасия Николаевна Журавлева — канд. мед. наук, научный сотрудник отдела глаукомы, ORCID 0000-0001-8381-2124

Ирина Владимировна Цапенко — канд. биол. наук, главный специалист отдела клинической физиологии зрения им. С.В. Кравкова, ORCID 0000-0002-0148-8517

Для контактов: Марина Владимировна Зуева,
 visionlab@yandex.ru

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

Marina V. Zueva — Dr. of Biol. Sci., professor, head of the department of clinical physiology of vision named after S.V. Kravkov, ORCID 0000-0002-0161-5010

Vladislav I. Kotelin — Cand. of Med. Sci., senior researcher, department of clinical physiology of vision named after S.V. Kravkov, ORCID 0000-0003-4675-9648

Natalia V. Neroeva — Cand. of Med. Sci., head of the department of pathology of the retina and optic nerve, ORCID 0000-0002-8480-0894

Anastasia N. Zhuravleva — Cand. of Med. Sci., researcher of the glaucoma department, ORCID 0000-0001-8381-2124

Irina V. Tsapenko — Cand. of Biol. Sci., chief specialist of the department of clinical physiology of vision named after S.V. Kravkov, ORCID 0000-0002-0148-8517

For contacts: Marina V. Zueva,
 visionlab@yandex.ru