

Реабилитация пожилых пациентов с риском падения: значение психофизиологических показателей и когнитивно-моторных тренировок с применением виртуальной реальности

А.С. Клочков¹, А.Е. Хижникова¹, А.А. Фукс², А.М. Котов-Смоленский¹, Н.А. Супонева¹, М.А. Пирадов¹

¹ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия;

²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», Москва, Россия

Вследствие замедления нейродинамических и когнитивных процессов, а также изменений опорно-двигательного аппарата в процессе старения происходит ухудшение внимания, реакции и нарушается координация движений. Уменьшение общей адаптивности головного мозга в пожилом и старческом возрасте ведет к увеличению риска падений и инвалидизации, снижая возраст активного долголетия. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно происходит 37,3 млн падений, которые не являются смертельными, но имеют достаточно тяжелые последствия, при которых требуется медицинская помощь. Такие падения наиболее распространены среди людей в возрасте старше 65 лет. Объективная оценка психофизиологических характеристик позволила выявить связь времени простой и сложной реакций с риском падений, а также послужила инструментом оценки эффективности методик коррекции равновесия. Исследования показали, что когнитивно-моторная тренировка улучшает поструральную устойчивость и функциональные показатели повседневной жизни. Данный вид тренировки получил широкое распространение в реабилитации пациентов с нарушениями равновесия, и все чаще для его реализации применяют системы виртуальной реальности. Существует предположение, что виртуальная среда может способствовать улучшению реакции на быструю смену обстановки, а также модулировать различные характеристики внимания, пространственно-временной памяти и планирования, что благоприятно сказывается на поструральных функциях. В обзоре описаны особенности изменения психофизиологических параметров у пожилых людей, а также методы коррекции нарушений равновесия с помощью когнитивно-моторных тренировок, в том числе с применением технологии виртуальной реальности.

Ключевые слова: пожилой возраст; падения; когнитивно-моторная тренировка; виртуальная реальность.

Источник финансирования. Данная публикация поддержана грантом Президента РФ № МК-118.2020.7.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Адрес для корреспонденции: 125367, Москва, Волоколамское шоссе, д. 80. ФГБНУ НЦН. E-mail: nastushkapal@gmail.com. Хижникова А.Е.

Для цитирования: Клочков А.С., Хижникова А.Е., Фукс А.А., Котов-Смоленский А.М., Супонева Н.А., Пирадов М.А. Реабилитация пожилых пациентов с риском падения: значение психофизиологических показателей и когнитивно-моторных тренировок с применением виртуальной реальности. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии* 2020; 14(4): 66–74.

DOI: 10.25692/ACEN.2020.4.9

Поступила 12.05.2020 / Принята в печать 08.10.2020

Rehabilitation of elderly patients at risk of falling: the value of psychophysiological parameters and cognitive-motor training using virtual reality

Anton S. Klochkov¹, Anastasia E. Khizhnikova¹, Anna A. Fuks², Artem M. Kotov-Smolenskiy¹, Natalia A. Suponeva¹, Mikhail A. Piradov¹

¹Research Center of Neurology, Moscow, Russia;

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Due to the slowing of the neurodynamic and cognitive processes, as well as changes in the musculoskeletal system that accompany aging, attention, reaction, and movement coordination are impaired in elderly patients. Decreased overall brain adaptability leads to an increased risk of falls and disability, thus reducing the age of active aging. According to the World Health Organization, 37.3 million falls occur annually that are not fatal but have serious consequences requiring medical attention. These falls are most common among people over the age of 65 years. An objective assessment of psychophysiological characteristics identified a correlation between the duration of simple and complex reactions and the risk of falls and served as a tool for evaluating the effectiveness of balance retraining. Studies have shown that cognitive-motor training improves postural stability and functional performance in daily life. This type of training is widely used to rehabilitate patients with balance disorders, and virtual reality systems are increasingly being used in its implementation. There is a theory that the virtual environment can improve responses to rapid environmental changes, as well as modulate various characteristics of attention, spatiotemporal memory, and planning, which favorably affects postural function. This review describes the changes in psychophysiological parameters in the elderly, as well as balance retraining techniques using cognitive-motor training, including the use of virtual reality technology.

Keywords: *old age; falls; cognitive-motor training; virtual reality.*

Acknowledgments. This publication was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-118.2020.7.

Conflict of interest. The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For correspondence: 125367, Russia, Moscow, Volokolamskoye shosse, 80. Research Center of Neurology. E-mail: nastushkapal@gmail.com. Khizhnikova A.E.

For citation: Klochkov A.S., Khizhnikova A.E., Fuks A.A., Kotov-Smolenskiy A.M., Suponeva N.A., Piradov M.A. [Rehabilitation of elderly patients at risk of falling: the value of psychophysiological parameters and cognitive-motor training using virtual reality]. *Annals of clinical and experimental neurology* 2020; 14(4): 66–74. (In Russ.)

DOI: 10.25692/ACEN.2020.4.9

Received 21.07.2020 / Accepted 08.10.2020

Введение

В процессе старения происходит замедление большого количества нейродинамических и когнитивных процессов [1], что влияет на ухудшение выполнения задач, требующих внимания и скорости реакции [2]. Для комплексной оценки сенсомоторной функции проводится регистрация времени, необходимого для восприятия и моторного планирования, затрачиваемого на подготовку корректного моторного ответа — «времени реакции» [3]. Основными тестами являются определение времени простой реакции, времени реакции распознавания и времени реакции выбора. Одними из главных психофизиологических показателей, ухудшающихся в пожилом возрасте, являются процессы активации (скорость простой моторной реакции). При этом основным рубежом, после которого скорость моторной реакции начинает выражено снижаться, является возраст 50 лет [4]. Помимо процессов активации и возбуждения у пожилых людей ухудшаются процессы ингибирования и, соответственно, переключения между разными каналами информации, что негативно влияет на скорость реакции и поддержание баланса [5]. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно происходит 37,3 млн падений, которые не являются смертельными, но имеют достаточно тяжелые последствия [6]. В возрасте старше 60 лет вероятность падения составляет около 30%, в дальнейшем она увеличивается пропорционально возрасту и к 70 годам достигает уже 45% [7].

Помимо общих процессов, характерных для стареющего головного мозга, наиболее частым сопутствующим фактором в пожилом и старческом возрасте являются цереброваскулярные заболевания (ЦВЗ), приводящие к нарушению постуральных функций. Пациенты с хронической ишемией головного мозга, на которую приходится 68,8% случаев ЦВЗ, часто испытывают ощущение «замедленного мышления», трудности с концентрацией внимания, запоминанием и принятием решений [8]. Для поддержания качества жизни и уровня социальной и бытовой активности, а так-

же профилактики падений практически всем пациентам необходима реабилитация [9]. Технологический прогресс последних двух десятилетий привнес в рутинную реабилитацию большое количество технологичных методов, многие из которых уже обладают существенной доказательной базой. Это тренировки равновесия с обратной связью по статокинезограмме или акселерометрическим сигналам [10]. Однако появляются и новые перспективные методы с применением когнитивно-моторных тренировок в виртуальной реальности, требующие изучения механизма их действия [11].

В условиях избыточности технологий особенно важным становится вопрос персонализированного подхода к выбору методов реабилитации, оценки эффективности реабилитационных мероприятий, а также разработки предикторов эффективности как конкретного метода, так и всего процесса в целом. Оценка психофизиологических параметров может дать полезную информацию для прогнозирования приверженности пациента технологичным методам реабилитации. Кроме того, психофизиологическая оценка может быть использована для изучения механизмов действия методов тренировки, т.к. широко применяемые формализованные шкалы достаточно наглядно отражают улучшение моторики, но значительно хуже фиксируют состояние нейродинамических процессов.

Цель обзора — определить роль психофизиологических показателей в комплексной оценке постуральных нарушений и оценить возможности когнитивно-моторных тренировок для коррекции постуральных нарушений у пожилых людей.

Материалы и методы

Анализ литературы проводился в базах данных PubMed и Elsevier за последние 18 лет. В обзор литературы были включены 64 публикации по изучению психофизиологических параметров и когнитивно-моторных тренировок у пожилых людей.

Результаты

Психофизиологические показатели как маркеры риска падений

Многочисленные исследования, проводимые на здоровых добровольцах, выявили ряд закономерностей, которые в дальнейшем позволили сформировать основные представления о психофизиологических изменениях, происходящих в головном мозге при старении. Лучшие результаты по скорости и точности наблюдаются в возрасте 20–30 лет [4, 12], но в процессе старения происходят изменения в показателях точности и во времени реакции, которое постепенно, но незначительно увеличивается, при этом динамика прогрессии резко возрастает после 50 лет [4, 13]. У женщин наблюдается большая индивидуальная вариабельность времени реакции (ИВВР), более низкая скорость, но более высокая точность выполнения тестов по сравнению с мужчинами [14]. С возрастом среднее время реакции при выполнении тестов у женщин увеличивается более выражено, чем у мужчин [4]. В целом ИВВР также увеличивается с возрастом, а в группе людей старше 75 лет наблюдается ее наибольший рост [15, 16]. В свою очередь показатели ИВВР позволяют отличить группы с повреждениями когнитивной сферы от здоровых, а также спрогнозировать риск развития когнитивных нарушений и деменции [17, 18]. Усложнение задачи (при тесте на время реакции распознавания) приводит к увеличению времени реакции за счет времени, предшествующего моторному ответу. У пожилых людей также отмечались худшие показатели точности при выполнении заданий, требующих активации ингибирующей системы (задания с предъявлением стимулов, требующих и не требующих ответа) [13]. В целом ингибирование можно рассматривать как способность центральной нервной системы предотвращать автоматические тенденции, не соответствующие выполнению текущей задачи, при этом выделяются два основных компонента ингибирования: ингибирование сенсорного восприятия и моторное торможение [19]. Именно ингибирование играет решающую роль в поддержании равновесия у пожилых людей при одновременном воздействии нескольких сенсорных стимулов [5], а тесты времени реакции ингибирования могут служить предиктором риска падений у пожилых людей [20].

Помимо описанной выше значимости для когнитивных нарушений показателя вариабельности времени реакции, в отдельных исследованиях описана его взаимосвязь с риском падения у пожилых людей. Так, в исследовании 2016 г. изучались отдельные компоненты (премоторный и моторный) времени реакции выбора нижней конечности. В результате было показано, что большая длительность премоторного компонента ассоциирована с высоким риском падения у пожилых людей, что может быть объяснено ухудшением у пожилых способности к быстрому планированию действий в ответ на стимул [21]. У пожилых людей именно снижение исполнительных функций, а не общая когнитивная деятельность является предопределяющим фактором и в большей степени влияет на постральные нарушения и риск падений [22, 23]. Нарушение исполнительных функций имеет тесную взаимосвязь с увеличением страха падения и скоростью выполнения моторной задачи, усложненной функциональным и целенаправленным компонентом, например выполнения шаговой задачи с предъявлением визуальных стимулов для обеих ног в рамках одной тренировки [24]. Одним из показателей нарушения

исполнительной функции является увеличение ИВВР. Более высокий уровень ИВВР, возникающей за счет измененной моторной функции, а также дефицит исполнительных и моторной функций связаны с более высокой вероятностью падения в пожилой выборке. При этом показатели именно моторной, а не исполнительной функции объясняют связь между ИВВР и падением.

В качестве маркера высокого риска падений и критерия эффективной реабилитации может быть использовано время простой реакции, варьирующее в зависимости от наличия у пациентов падений в анамнезе и переломов в результате падений, а также время реакции выбора, значительно увеличенное у пожилых людей [25]. Метаанализ 2015 г. выявил интересные закономерности относительно ИВВР и риска падений. В 5 исследованиях, включенных в обзор, рассматривались ассоциации ИВВР и риска падений и без исключения сообщалось о положительных ассоциациях [26]. В то же время только ИВВР, выявляемая при тесте реакции нижней конечности, коррелирует с риском падений [27].

В качестве одной из защитных стратегий при страхе падений является снижение скорости ходьбы и замещение автоматизированной ходьбы более осознанной, что, в свою очередь, снижает внимание и замедляет время реакции при появлении других задач [28–30]. Вполне вероятно, что снижение когнитивных функций уменьшает ресурсы, доступные для компенсации ухудшения автоматических моторных процессов, что объясняет взаимосвязь между выполнением нескольких задач и равновесием [31].

Таким образом, основываясь на анализе проведенных исследований, можно заключить, что:

- а) скорость реакции напрямую связана с возрастом пациентов и их когнитивными функциями;
- б) при замедлении показателей скорости реакции ухудшается функция равновесия;
- в) возраст пациентов, а также сопутствующие ЦВЗ вносят существенный вклад в ухудшение психофизиологических показателей.

Все это говорит о необходимости проведения адекватных реабилитационных мероприятий, направленных на восстановление функции равновесия, с учетом индивидуального психофизиологического статуса пациента. Одним из интересных и важных направлений исследований в данной области является изучение влияния комбинации когнитивной и моторной задач на страх падения.

Когнитивно-моторные тренировки как метод реабилитации при нарушениях равновесия

В последние годы в исследованиях времени реакции все чаще стал подниматься вопрос влияния на психофизиологические параметры физической активности и реабилитационных мероприятий. Накопленный опыт и недавние метаанализы показали, что тренировки целенаправленных движений, и тренировки реакции снижают вероятность падения среди пожилых людей примерно на 50%. При этом снижение риска падения связано с улучшением баланса, походки и показателей времени реакции, а не с увеличением мышечной силы [32]. Наличие же у пациентов сопутствующих заболеваний, влияющих на устойчивость, равновесие и координацию, например диабетической полиневропатии, ассоциируется с более выраженным эффектом по сравнению с пожилыми людьми без сопутствующих

заболеваний [33]. Также интересным представляется тот факт, что физическая тренировка баланса и времени реакции у пожилых не влияет на время реакции, координацию нижних конечностей, силу и другие показатели [34].

Классические физические и координационные тренировки, как и тренировки скорости реакции, эффективны для снижения риска падения и улучшения равновесия, но не влияют на когнитивные функции, что позволило предположить, что добавление в тренировку когнитивного компонента может значимо улучшить показатели равновесия у пожилых пациентов, особенно при выполнении сложных задач, требующих активизации когнитивных функций.

Исследования показали, что тренировки с включением в двигательную задачу когнитивного домена приводят к большему улучшению поструральной устойчивости и скорости реакции, чем исключительно двигательные тренировки [35, 36]. В то же время включение в когнитивную тренировку физического компонента не приводит к улучшению когнитивных показателей по окончании курса, хотя известно, что добавление физического компонента в долгосрочной перспективе способствует более высоким показателям когнитивной функции [37]. Однако при комбинированных тренировках, в которых когнитивный компонент не является составной частью двигательной задачи, или когнитивных тренировках, которые проводятся отдельно от двигательных, изменения времени реакции и поструральной устойчивости не превышали показателей группы с физическими тренировками [38, 39].

В свою очередь исследования, в которых когнитивный компонент был внедрен в двигательную тренировку, показали достаточно высокий уровень эффективности. Сочетанные физические и когнитивные тренировки оказывают положительное воздействие на время реакции, поструральную устойчивость и функциональные показатели повседневной жизни [40]. Сочетанная тренировка также может быть реализована посредством активных видеоигр, которые способствуют увеличению скорости моторной реакции и улучшают когнитивную гибкость [41].

Появившийся в процессе исследований термин «когнитивно-моторная тренировка» объединяет все двигательные тренировки, включающие сочетание двигательной активности и когнитивной задачи. Данный вид тренировки получил широкое распространение в реабилитации пациентов с нарушениями равновесия.

Для снижения риска и уменьшения страха падений, улучшения функции равновесия и расширения повседневной активности активно применяются тренировки с использованием биологической обратной связи (БОС) по стабилотрамме. В последние годы широкое распространение получили методы тренировки устойчивости посредством систем виртуальной реальности (VR), позволяющих составлять трехмерную модель тела и использовать математически вычисляемый общий центр масс в качестве источника БОС [42]. Преимуществом данной методики является возможность комбинированной тренировки как статического, так и динамического равновесия с трехмерной виртуальной БОС. Обучение с одновременным воздействием на когнитивные и двигательные функции (когнитивно-моторная тренировка) реализовано практически во всех системах VR для тренировки устойчивости, данные системы хорошо зарекомендовали себя в реабилитации постинсультных

больных и пожилых пациентов с двигательными расстройствами [43–45]. В ряде исследований было показано, что на фоне подобной тренировки улучшаются не только показатели устойчивости, но и память пациентов [46].

Существенным преимуществом VR является то, что когнитивная и двигательная тренировки проводятся в единой среде. Кроме того, возможность объективной регистрации движений рук, ног и общего центра масс на фоне когнитивных задач предоставляет широкие возможности для оценки и тренировки нейродинамических процессов [47]. Еще с 1990-х гг. стали появляться работы, исследующие изменение времени реакции под влиянием тренировок в VR. Работа В.Р. Kim и коллег (2011) была посвящена сравнению изменений различных когнитивных показателей после компьютеризированной тренировки и реабилитации с применением VR. Скорость реакции проверялась в составе зрительных и слуховых тестов. В результате тренировок показатели скорости реакции улучшились в обеих группах относительно начального состояния, но показатели в группе VR были значимо лучше, чем в группе компьютерной тренировки [48]. На основании полученных данных было сформировано предположение о том, что VR может способствовать улучшению реакции на быструю смену обстановки, а также модулировать различные характеристики внимания, пространственно-временной памяти и планирования, что благоприятно сказывается на поструральных функциях.

Особенности воздействия VR во многом зависят от тренировочного сценария, лежащего в основе VR-реабилитации. Широко распространенные коммерческие игровые консоли и VR-системы часто используются в реабилитации, однако в большинстве случаев исследования подтверждают большую эффективность специально разработанных для реабилитации систем VR [49]. Тем не менее игровые системы с VR могут иметь потенциальный эффект, однако сам контент видеоигр должен быть значительно переработан для реабилитации пожилых людей [50]. Большое значение имеет также качество изображения и уровень детализации виртуального пространства, высокое разрешение (4K), реалистичное изображение — как 2D, так и 3D, уменьшающие время простой реакции [52]. В то же время чрезмерное усложнение визуальной обратной связи приводит к замедлению реакции [53].

Благодаря возможности предоставлять мультимодальную объективную обратную связь в обогащенной трехмерной среде VR может дополнять и использоваться параллельно с традиционными подходами, такими как эрготерапия, и в ряде случаев оказывается более эффективной, чем классическая реабилитация. VR также способствует улучшению рабочей памяти и мотивации, причем реабилитация в специализированной виртуальной среде эффективнее, чем коммерческие игры, у пациентов как в острой, так и в хронической стадии восстановления после инсульта [54, 55].

В целом применению систем VR у пожилых людей с риском падения и когнитивными нарушениями в последнее время уделяется большое внимание. Согласно базе данных PubMed, основная доля публикаций, посвященных данному вопросу, приходится на период с 2016 по 2020 г. При этом основное внимание исследователей сосредоточено на влиянии когнитивно-моторных тренировок в VR на устойчивость и когнитивные функции. Так, метаанализ 2017 г. показал, что VR-системы, применяемые для предотвра-



Рис. 1. Тренировка равновесия с использованием системы NIRVANA [57].

Fig. 1. Balance training on NIRVANA system [57].

шения риска падения у пожилых, более эффективны, чем отсутствие реабилитации, а также превосходят традиционные методы, применяемые для тренировки нарушений равновесия и страха падений. Они положительно влияют на такие показатели, как устойчивость, время реакции и страх падения, однако большинство работ были достаточно разрозненными, что не позволило их объединить в общий анализ. В итоге из общего числа включенных в первичный анализ публикаций (376) в метаанализ вошли лишь 28 [56]. В целом исследования по использованию VR-систем в реабилитации пожилых пациентов с риском падения можно подразделить на 2 большие группы: реабилитация в стационаре с применением специализированного оборудования и реабилитация на дому с применением простого оборудования со специализированным программным обеспечением.

Ввиду своей доступности и простоте использования чаще всего в реабилитации применяются системы на основе сенсора Kinect, но в последние несколько лет все чаще используются системы на основе шлема VR, в стационарной реабилитации — также менее мобильные и более дорогостоящие CAVE-системы. CAVE-системы обладают возможностью отображения проекции на любые горизонтальные и вертикальные поверхности, а также, в отличие от прочих систем, не полностью замещают реальный мир виртуальным, что зачастую облегчает ориентацию в игровом пространстве пожилых пациентов. Системы данного вида показали свою эффективность при восстановлении равновесия у пожилых пациентов (рис. 1).

Проведенное в 2016 г. исследование показало, что у группы пациентов, получавших тренировки в VR, наблюдались более значимые улучшения по шкале баланса Берг, а также при оценке мобильности по сравнению с пациентами, получавшими традиционную реабилитацию, однако данные улучшения не способствовали снижению уровня страха падения [57]. Помимо CAVE-систем в качестве стационарной методики реабилитации активно внедряются системы с использованием шлема VR. Ранее считалось, что подобные системы плохо переносятся в пожилом возрасте, и пациенты чувствуют выраженный дискомфорт, головокружение и тошноту, что, по всей видимости, было связано с плохим качеством разрешения экрана и десинхронизацией виртуального изображения и движений головы. Современные устройства шлемов VR позволили исключить подобные эффекты, а последующие исследования показали, что частота негативных эффектов VR с полным погружением у пожилых людей минимальная [58, 59].

Данные о безопасности шлемов VR дали старт исследованиям на пожилых людях, в том числе для домашней ре-

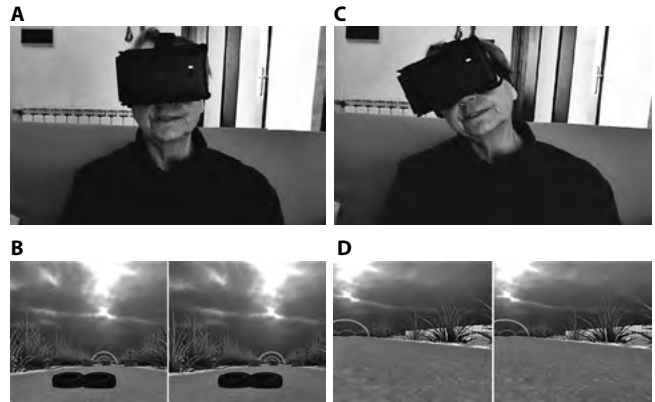


Рис. 2. Тренировка в VR-шлеме с полным погружением [60].

Fig. 2. Full immersion virtual reality training [60].

билитации. В 2019 г. показано, что использование домашней реабилитации на системе VR с полным погружением «EyeSeeCam™» (рис. 2) у пожилых людей усиливает вестибулярную реабилитацию, особенно у пациентов с когнитивными нарушениями [60].

В большей степени VR-системы у пожилых людей для предотвращения риска падений рассматриваются на третьем этапе (амбулаторная реабилитация). Одно из крупных исследований, включавшее 195 пожилых пациентов с потенциально высоким риском падений, показало, что по эффективности тренировка в VR не уступает классической методике при соблюдении рекомендаций по частоте и длительности выполнения упражнений [61]. Для достижения эффекта и снижения риска падений у пожилых людей рекомендуемая длительность тренировки должна составлять не менее 3 ч в неделю [62].

В разных странах в зависимости от культурных особенностей упор делается на наиболее традиционные и распространенные методики. Так, в Тайване хороший эффект в реабилитации пожилых пациентов на VR-системе на базе бесконтактного сенсора «Kinect» показала методика с комплексом «Тай Чи», направленным на улучшение равновесия и координации с применением дыхательных техник и различных упражнений, реализованных в виртуальном пространстве [63].

Помимо несомненно хорошего эффекта на функцию равновесия и когнитивные функции VR может помочь пожилым людям справляться со сложными эмоционально насыщенными жизненными ситуациями, обучая более адаптивным к контексту стратегиям регуляции эмоций — к такому выводу пришли авторы систематического обзора в 2020 г. [64]. Все вышеперечисленное позволяет сделать вывод о том, что системы VR для реабилитации пожилых людей обладают эффективностью и способствуют улучшению постуральных и когнитивных функций, а адаптивность и универсальность виртуального интерфейса может послужить хорошим инструментом в руках реабилитолога для улучшения качества жизни данной категории пациентов.

Закключение

Высокий травматизм пожилых людей, наряду с необходимостью повышения возраста активного образа жизни,

требует широкого применения высокотехнологичных реабилитационных технологий, направленных на восстановление утраченной функции, а также профилактики травм в результате потери равновесия и падений пожилых людей. Объективная оценка психофизиологических параметров и тесты на время реакции хорошо проявили себя в качестве маркеров риска падений, возрастных изменений, эффективности различных аспектов реабилитационных мероприятий и имеют высокий потенциал для оценки эффективности реабилитационного процесса, особенно у пожилых пациентов. Их использование в реабилитационной практике может позволить определить основные предикторы восстановления пациентов, оценить приверженность к реабилитационной технологии и сформировать

индивидуальную реабилитационную программу у пожилых пациентов с риском падения. В условиях растущего числа пациентов, требующих длительной реабилитации, а также повышения средней продолжительности жизни актуальными являются технологии телемедицины и тренировок в виртуальной среде. В то же время остаются не до конца изученными механизмы влияния на сенсомоторную функцию интерактивных моторных и когнитивных тренировок в условиях ВР как модели обучающей среды с высокой плотностью афферентных стимулов. Также требует исследования возможность использования психофизиологических показателей в качестве маркеров эффективной реабилитации с использованием высокотехнологичных реабилитационных методик.

Список литературы

1. Salthouse T.A. When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiol Aging* 2009; 30: 507–514. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2008.09.023. PMID: 19231028.
2. Salthouse T. Consequences of age-related cognitive declines. *Annu Rev Psychol* 2012; 63: 201–226. DOI: 10.1146/annurev-psych-120710-100328. PMID: 21740223.
3. Wong A.L., Goldsmith J., Forrence A.D. et al. Reaction times can reflect habits rather than computations. *Elife* 2017; 6: 1–18 (e28075). DOI: 10.7554/eLife.28075. PMID: 28753125.
4. Der G., Deary I.J. Age and sex differences in reaction time in adulthood: results from the United Kingdom Health and Lifestyle Survey. *Psychol Aging* 2006; 21: 62–73. DOI: 10.1037/0882-7974.21.1.62. PMID: 16594792.
5. Mendelson D.N., Redfern M.S., Nebes R.D., Richard Jennings J. Inhibitory processes relate differently to balance/reaction time dual tasks in young and older adults. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 2010; 17: 1–18. DOI: 10.1080/13825580902914040. PMID: 19526388.
6. World Health Organization. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age. 2007. DOI: 978 92 4 156353 6.
7. Ou L.C., Chang Y.F., Chang C.S. et al. Epidemiological survey of the feasibility of broadband ultrasound attenuation measured using calcaneal quantitative ultrasound to predict the incidence of falls in the middle aged and elderly. *BMJ Open* 2017; 7: e013420. DOI: 10.1136/bmjopen-2016-013420. PMID: 28069623.
8. van Rijsbergen M.W., Mark R.E., de Kort P.L., Sitskoorn M.M. Subjective cognitive complaints after stroke: a systematic review. *J Stroke Cerebrovasc Dis* 2014; 23: 408–420. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.05.003. PMID: 23800498.
9. Winstein C.J., Stein J., Arena R. et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2016; 47: 98–169. DOI: 10.1161/STR.0000000000000098. PMID: 27145936.
10. Hamed A., Bohm S., Mersmann F., Arampatzis A. Follow-up efficacy of physical exercise interventions on fall incidence and fall risk in healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Sport Med Open* 2018; 4: 56. DOI: 10.1186/s40798-018-0170-z. PMID: 30547249.
11. Nawaz A., Skjæret N., Helbostad J.L. et al. Usability and acceptability of balance exergames in older adults: a scoping review. *Health Informatics J* 2016; 22: 911–931. DOI: 10.1177/1460458215598638. PMID: 26303810.
12. Li S.C., Lindenberger U., Hommel B. et al. Transformations in the couplings among intellectual abilities and constituent cognitive processes across the life span. *Psychol Sci* 2004; 15: 155–163. DOI: 10.1111/j.0956-7976.2004.01503003.x. PMID: 15016286.
13. Eckner J.T., Richardson J.K., Kim H. et al. A novel clinical test of recognition reaction time in healthy adults. *Psychol Assess* 2012; 24: 249–254. DOI: 10.1037/a0025042. PMID: 21859222.
14. Reimers S., Maylor E.A. Gender effects on reaction time variability and trial-to-trial performance: reply to Deary and Der (2005). *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 2006; 13: 479–489. DOI: 10.1080/1382558090969375. PMID: 16887784.
15. Haynes B.I., Bauermeister S., Bunce D. A systematic review of Longitudinal Associations between reaction time intraindividual variability and age-related cognitive decline or impairment, dementia, and mortality. *J Int Neuropsychol Soc* 2017; 23: 431–445. DOI: 10.1017/S1355617717000236. PMID: 28462758.
16. Kochan N.A., Bunce D., Brodaty H. et al. P4-157: Intra-individual variability of reaction time performance is a sensitive marker of mortality risk in old age: findings from the sydney memory and ageing study. *Alzheimer's Dement* 2014; 10: 847–847. DOI: 10.1016/j.jalz.2014.05.1674.
17. Bielak A.A.M., Hultsch D.F., Strauss E. et al. Intraindividual variability in reaction time predicts cognitive outcomes 5 years later. *Neuropsychology* 2010; 24: 731–741. DOI: 10.1037/a0019802. PMID: 20853957.

References

1. Salthouse T.A. When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiol Aging* 2009; 30: 507–514. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2008.09.023. PMID: 19231028.
2. Salthouse T. Consequences of age-related cognitive declines. *Annu Rev Psychol* 2012; 63: 201–226. DOI: 10.1146/annurev-psych-120710-100328. PMID: 21740223.
3. Wong A.L., Goldsmith J., Forrence A.D. et al. Reaction times can reflect habits rather than computations. *Elife* 2017; 6: 1–18 (e28075). DOI: 10.7554/eLife.28075. PMID: 28753125.
4. Der G., Deary I.J. Age and sex differences in reaction time in adulthood: results from the United Kingdom Health and Lifestyle Survey. *Psychol Aging* 2006; 21: 62–73. DOI: 10.1037/0882-7974.21.1.62. PMID: 16594792.
5. Mendelson D.N., Redfern M.S., Nebes R.D., Richard Jennings J. Inhibitory processes relate differently to balance/reaction time dual tasks in young and older adults. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 2010; 17: 1–18. DOI: 10.1080/13825580902914040. PMID: 19526388.
6. World Health Organization. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age. 2007. DOI: 978 92 4 156353 6.
7. Ou L.C., Chang Y.F., Chang C.S. et al. Epidemiological survey of the feasibility of broadband ultrasound attenuation measured using calcaneal quantitative ultrasound to predict the incidence of falls in the middle aged and elderly. *BMJ Open* 2017; 7: e013420. DOI: 10.1136/bmjopen-2016-013420. PMID: 28069623.
8. van Rijsbergen M.W., Mark R.E., de Kort P.L., Sitskoorn M.M. Subjective cognitive complaints after stroke: a systematic review. *J Stroke Cerebrovasc Dis* 2014; 23: 408–420. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.05.003. PMID: 23800498.
9. Winstein C.J., Stein J., Arena R. et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke* 2016; 47: 98–169. DOI: 10.1161/STR.0000000000000098. PMID: 27145936.
10. Hamed A., Bohm S., Mersmann F., Arampatzis A. Follow-up efficacy of physical exercise interventions on fall incidence and fall risk in healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Sport Med Open* 2018; 4: 56. DOI: 10.1186/s40798-018-0170-z. PMID: 30547249.
11. Nawaz A., Skjæret N., Helbostad J.L. et al. Usability and acceptability of balance exergames in older adults: a scoping review. *Health Informatics J* 2016; 22: 911–931. DOI: 10.1177/1460458215598638. PMID: 26303810.
12. Li S.C., Lindenberger U., Hommel B. et al. Transformations in the couplings among intellectual abilities and constituent cognitive processes across the life span. *Psychol Sci* 2004; 15: 155–163. DOI: 10.1111/j.0956-7976.2004.01503003.x. PMID: 15016286.
13. Eckner J.T., Richardson J.K., Kim H. et al. A novel clinical test of recognition reaction time in healthy adults. *Psychol Assess* 2012; 24: 249–254. DOI: 10.1037/a0025042. PMID: 21859222.
14. Reimers S., Maylor E.A. Gender effects on reaction time variability and trial-to-trial performance: reply to Deary and Der (2005). *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 2006; 13: 479–489. DOI: 10.1080/1382558090969375. PMID: 16887784.
15. Haynes B.I., Bauermeister S., Bunce D. A systematic review of Longitudinal Associations between reaction time intraindividual variability and age-related cognitive decline or impairment, dementia, and mortality. *J Int Neuropsychol Soc* 2017; 23: 431–445. DOI: 10.1017/S1355617717000236. PMID: 28462758.
16. Kochan N.A., Bunce D., Brodaty H. et al. P4-157: Intra-individual variability of reaction time performance is a sensitive marker of mortality risk in old age: findings from the sydney memory and ageing study. *Alzheimer's Dement* 2014; 10: 847–847. DOI: 10.1016/j.jalz.2014.05.1674.
17. Bielak A.A.M., Hultsch D.F., Strauss E. et al. Intraindividual variability in reaction time predicts cognitive outcomes 5 years later. *Neuropsychology* 2010; 24: 731–741. DOI: 10.1037/a0019802. PMID: 20853957.

18. Burton C.L., Strauss E., Hultsch D.F., Hunter M.A. The relationship between everyday problem solving and inconsistency in reaction time in older adults. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 2009; 16: 607–632. DOI: 10.1080/13825580903167283. PMID: 19728187.
19. Nassauer K.W., Halperin J.M. Dissociation of perceptual and motor inhibition processes through the use of novel computerized conflict tasks. *J Int Neuropsychol Soc* 2003; 9: 25–30. DOI: 10.1017/S1355617703910034. PMID: 12570355.
20. Schoene D., Delbaere K., Lord S.R. Impaired response selection during stepping predicts falls in older people—a cohort study. *J Am Med Dir Assoc* 2017; 18: 719–725. DOI: 10.1016/j.jamda.2017.03.010. PMID: 28526585.
21. Wang D., Zhang J., Sun Y. et al. Evaluating the fall risk among elderly population by choice step reaction test. *Clin Interv Aging* 2016; 11: 1075–1082. DOI: 10.2147/CIA.S106606. PMID: 27563238.
22. Salvà A., Roqué M., Rojano X. et al. Falls and risk factors for falls in community-dwelling adults with dementia (NutriAlz trial). *Alzheimer Dis Assoc Disord* 2012; 26: 74–80. DOI: 10.1097/WAD.0b013e318215ca90. PMID: 22354139.
23. Taylor M.E., Lord S.R., Delbaere K. et al. Reaction time and postural sway modify the effect of executive function on risk of falls in older people with mild to moderate cognitive impairment. *Am J Geriatr Psychiatry* 2017; 25: 397–406. DOI: 10.1016/j.jagp.2016.10.010. PMID: 28063853.
24. Viaje S., Crombez G., Lord S.R. et al. The role of concern about falling on stepping performance during complex activities. *BMC Geriatr* 2019; 19: 333. DOI: 10.1186/s12877-019-1356-z. PMID: 31775634.
25. Lord S.R., Fitzpatrick R.C. Choice stepping reaction time: A composite measure of falls risk in older people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2001; 56: 627–632. DOI: 10.1093/gerona/56.10.M627. PMID: 11584035.
26. Graveson J., Bauermeister S., McKeown D., Bunce D. Intraindividual reaction time variability, falls, and gait in old age: a systematic review. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* 2016; 71: 857–864. DOI: 10.1093/geronb/gbv027. PMID: 25969471.
27. Bunce D., Haynes B.I., Lord S.R. et al. Intraindividual stepping reaction time variability predicts falls in older adults with mild cognitive impairment. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2016; 72: 832–837. DOI: 10.1093/gerona/glw164. PMID: 27591431.
28. Donoghue O.A., Cronin H., Savva G.M. et al. Effects of fear of falling and activity restriction on normal and dual task walking in community dwelling older adults. *Gait Posture* 2013; 38: 120–124. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2012.10.023. PMID: 23200462.
29. Reelick M.F., van Iersel M.B., Kessels R.P., Rikkert M.G. The influence of fear of falling on gait and balance in older people. *Age Ageing* 2009; 38: 435–440. DOI: 10.1093/ageing/afp066. PMID: 19451658.
30. Woollacott M., Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture* 2002; 16: 1–14. DOI: 10.1016/S0966-6362(01)00156-4. PMID: 12127181.
31. Bauermeister S., Sutton G., Mon-Williams M. et al. Intraindividual variability and falls in older adults. *Neuropsychology* 2017; 31: 20–27. DOI: 10.1037/neu0000328. PMID: 27831695.
32. Okubo Y., Schoene D., Lord S.R. Step training improves reaction time, gait and balance and reduces falls in older people: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 586–593. DOI: 10.1136/bjsports-2015-095452. PMID: 26746905.
33. Morrison S., Colberg S.R., Parson H.K., Vinik A.I. Exercise improves gait, reaction time and postural stability in older adults with type 2 diabetes and neuropathy. *J Diabetes Complications* 2014; 28: 715–722. DOI: 10.1016/j.jdiacomp.2014.04.007. PMID: 24929798.
34. Bootsman N.J.M., Skinner T.L., Lal R. et al. The relationship between physical activity, and physical performance and psycho-cognitive functioning in older adults living in residential aged care facilities. *J Sci Med Sport* 2018; 21: 173–178. DOI: 10.1016/j.jsams.2017.07.006. PMID: 28778824.
35. Li K.Z., Roudaia E., Lussier M. et al. Benefits of cognitive dual-task training on balance performance in healthy older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2010; 65: 1344–1352. DOI: 10.1093/gerona/glq151. PMID: 20837662.
36. Eggenberger P., Schumacher V., Angst M. et al. Does multicomponent physical exercise with simultaneous cognitive training boost cognitive performance in older adults? A 6-month randomized controlled trial with a 1-year follow-up. *Clin Interv Aging* 2015; 10: 1335–1349. DOI: 10.2147/CIA.S87732. PMID: 26316729.
37. Rahe J., Becker J., Fink G.R. et al. Cognitive training with and without additional physical activity in healthy older adults: cognitive effects, neurobiological mechanisms, and prediction of training success. *Front Aging Neurosci* 2015; 7: 187. DOI: 10.3389/fnagi.2015.00187. PMID: 26528177.
38. Jehu D., Paquet N., Lajoie Y. Balance and mobility training with or without concurrent cognitive training does not improve posture, but improves reaction time in healthy older adults. *Gait Posture*. 2017; 52: 227–232. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.12.006. PMID: 27939652.
39. Shatil E. Does combined cognitive training and physical activity training enhance cognitive abilities more than either alone? A four-condition randomized controlled trial among healthy older adults. *Front Aging Neurosci* 2013; 5: 8. DOI: 10.3389/fnagi.2013.00008. PMID: 23531885.
40. Laatar R., Kachouri H., Borji R. et al. Combined physical-cognitive training enhances postural performances during daily life tasks in older adults. *Exp Gerontol* 2018; 107: 91–97. DOI: 10.1016/j.exger.2017.09.004. PMID: 28899731.
18. Burton C.L., Strauss E., Hultsch D.F., Hunter M.A. The relationship between everyday problem solving and inconsistency in reaction time in older adults. *Neuropsychol Dev Cogn B Aging Neuropsychol Cogn* 2009; 16: 607–632. DOI: 10.1080/13825580903167283. PMID: 19728187.
19. Nassauer K.W., Halperin J.M. Dissociation of perceptual and motor inhibition processes through the use of novel computerized conflict tasks. *J Int Neuropsychol Soc* 2003; 9: 25–30. DOI: 10.1017/S1355617703910034. PMID: 12570355.
20. Schoene D., Delbaere K., Lord S.R. Impaired response selection during stepping predicts falls in older people—a cohort study. *J Am Med Dir Assoc* 2017; 18: 719–725. DOI: 10.1016/j.jamda.2017.03.010. PMID: 28526585.
21. Wang D., Zhang J., Sun Y. et al. Evaluating the fall risk among elderly population by choice step reaction test. *Clin Interv Aging* 2016; 11: 1075–1082. DOI: 10.2147/CIA.S106606. PMID: 27563238.
22. Salvà A., Roqué M., Rojano X. et al. Falls and risk factors for falls in community-dwelling adults with dementia (NutriAlz trial). *Alzheimer Dis Assoc Disord* 2012; 26: 74–80. DOI: 10.1097/WAD.0b013e318215ca90. PMID: 22354139.
23. Taylor M.E., Lord S.R., Delbaere K. et al. Reaction time and postural sway modify the effect of executive function on risk of falls in older people with mild to moderate cognitive impairment. *Am J Geriatr Psychiatry* 2017; 25: 397–406. DOI: 10.1016/j.jagp.2016.10.010. PMID: 28063853.
24. Viaje S., Crombez G., Lord S.R. et al. The role of concern about falling on stepping performance during complex activities. *BMC Geriatr* 2019; 19: 333. DOI: 10.1186/s12877-019-1356-z. PMID: 31775634.
25. Lord S.R., Fitzpatrick R.C. Choice stepping reaction time: A composite measure of falls risk in older people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2001; 56: 627–632. DOI: 10.1093/gerona/56.10.M627. PMID: 11584035.
26. Graveson J., Bauermeister S., McKeown D., Bunce D. Intraindividual reaction time variability, falls, and gait in old age: a systematic review. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci* 2016; 71: 857–864. DOI: 10.1093/geronb/gbv027. PMID: 25969471.
27. Bunce D., Haynes B.I., Lord S.R. et al. Intraindividual stepping reaction time variability predicts falls in older adults with mild cognitive impairment. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2016; 72: 832–837. DOI: 10.1093/gerona/glw164. PMID: 27591431.
28. Donoghue O.A., Cronin H., Savva G.M. et al. Effects of fear of falling and activity restriction on normal and dual task walking in community dwelling older adults. *Gait Posture* 2013; 38: 120–124. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2012.10.023. PMID: 23200462.
29. Reelick M.F., van Iersel M.B., Kessels R.P., Rikkert M.G. The influence of fear of falling on gait and balance in older people. *Age Ageing* 2009; 38: 435–440. DOI: 10.1093/ageing/afp066. PMID: 19451658.
30. Woollacott M., Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture* 2002; 16: 1–14. DOI: 10.1016/S0966-6362(01)00156-4. PMID: 12127181.
31. Bauermeister S., Sutton G., Mon-Williams M. et al. Intraindividual variability and falls in older adults. *Neuropsychology* 2017; 31: 20–27. DOI: 10.1037/neu0000328. PMID: 27831695.
32. Okubo Y., Schoene D., Lord S.R. Step training improves reaction time, gait and balance and reduces falls in older people: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 586–593. DOI: 10.1136/bjsports-2015-095452. PMID: 26746905.
33. Morrison S., Colberg S.R., Parson H.K., Vinik A.I. Exercise improves gait, reaction time and postural stability in older adults with type 2 diabetes and neuropathy. *J Diabetes Complications* 2014; 28: 715–722. DOI: 10.1016/j.jdiacomp.2014.04.007. PMID: 24929798.
34. Bootsman N.J.M., Skinner T.L., Lal R. et al. The relationship between physical activity, and physical performance and psycho-cognitive functioning in older adults living in residential aged care facilities. *J Sci Med Sport* 2018; 21: 173–178. DOI: 10.1016/j.jsams.2017.07.006. PMID: 28778824.
35. Li K.Z., Roudaia E., Lussier M. et al. Benefits of cognitive dual-task training on balance performance in healthy older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2010; 65: 1344–1352. DOI: 10.1093/gerona/glq151. PMID: 20837662.
36. Eggenberger P., Schumacher V., Angst M. et al. Does multicomponent physical exercise with simultaneous cognitive training boost cognitive performance in older adults? A 6-month randomized controlled trial with a 1-year follow-up. *Clin Interv Aging* 2015; 10: 1335–1349. DOI: 10.2147/CIA.S87732. PMID: 26316729.
37. Rahe J., Becker J., Fink G.R. et al. Cognitive training with and without additional physical activity in healthy older adults: cognitive effects, neurobiological mechanisms, and prediction of training success. *Front Aging Neurosci* 2015; 7: 187. DOI: 10.3389/fnagi.2015.00187. PMID: 26528177.
38. Jehu D., Paquet N., Lajoie Y. Balance and mobility training with or without concurrent cognitive training does not improve posture, but improves reaction time in healthy older adults. *Gait Posture*. 2017; 52: 227–232. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.12.006. PMID: 27939652.
39. Shatil E. Does combined cognitive training and physical activity training enhance cognitive abilities more than either alone? A four-condition randomized controlled trial among healthy older adults. *Front Aging Neurosci* 2013; 5: 8. DOI: 10.3389/fnagi.2013.00008. PMID: 23531885.
40. Laatar R., Kachouri H., Borji R. et al. Combined physical-cognitive training enhances postural performances during daily life tasks in older adults. *Exp Gerontol* 2018; 107: 91–97. DOI: 10.1016/j.exger.2017.09.004. PMID: 28899731.

41. López-García J., Colado J.C., Guzmán J.F. Acute effects of aerobic exercise and active videogames on cognitive flexibility, reaction time, and perceived exertion in older adults. *Games Health J* 2019; 8: 371–379. DOI: 10.1089/g4h.2018.0143. PMID: 31199694.
42. Lee H.S., Park Y.J., Park S.W. The effects of virtual reality training on function in chronic stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *Biomed Res Int* 2019; 2019: 7595639. DOI: 10.1155/2019/7595639. PMID: 31317037.
43. Kannan L., Vora J., Bhatt T., Hughes S.L. Cognitive-motor exergaming for reducing fall risk in people with chronic stroke: a randomized controlled trial. *NeuroRehabilitation* 2019; 44: 493–510. DOI: 10.3233/NRE-182683. PMID: 31256084.
44. Bisson E., Contant B., Sveistrup H., Lajoie Y. Functional balance and dual-task reaction times in older adults are improved by virtual reality and bio-feedback training. *CyberPsychology Behav* 2007; 10: 16–23. DOI: 10.1089/cpb.2006.9997. PMID: 17305444.
45. Kizony R., Levin M.F., Hughey L. et al. Cognitive load and dual-task performance during locomotion poststroke: a feasibility study using a functional virtual environment. *Phys Ther* 2010; 90: 252–260. DOI: 10.2522/ptj.20090061. PMID: 20023003.
46. Subramaniam S., Wan-Ying Hui-Chan C., Bhatt T. A cognitive-balance control training paradigm using wii fit to reduce fall risk in chronic stroke survivors. *J Neurol Phys Ther* 2014; 38: 216–225. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000056. PMID: 25198867.
47. Ключков А.С., Хижникова А.Е., Котов-Смоленский А.М. и др. Коррекция статического и динамического равновесия с использованием системы виртуальной реальности у пациентов с цереброваскулярными заболеваниями. *Первые болезни* 2018; (3): 28–32. DOI: 10.24411/2071-5315-2018-12030.
48. Kim B.R., Chun M.H., Kim L.S., Park J.Y. Effect of Virtual Reality on Cognition in Stroke Patients. *Ann Rehabil Med* 2011; 35: 450–459. DOI: 10.5535/arm.2011.35.4.450. PMID: 22506159.
49. Laver K., George S., Thomas S. et al. Virtual reality for stroke rehabilitation: An abridged version of a Cochrane review. *Eur J Phys Rehabil Med* 2015; 51: 497–506. PMID: 26158918.
50. Pietrzak E., Cotea C., Pullman S. Using commercial video games for falls prevention in older adults; the way for the future? *J Geriatr Phys Ther* 2014; 37: 166–177. DOI: 10.1519/JPT.0b013e3182abe76e. PMID: 24406711.
51. Rusák Z., Kooijman A., Song Y. et al. A Study of Correlations among Image Resolution, Reaction Time, and Extent of Motion in Remote Motor Interactions. *Adv Human-Computer Interact.* 2014;2014:1–11. DOI:10.1155/2014/463179
52. Brand J., Piccirelli M., Hepp-Reymond M.C. et al. Virtual hand feedback reduces reaction time in an interactive finger reaching task. *PLoS One* 2016; 11: e0154807. DOI: 10.1371/journal.pone.0154807. PMID: 27144927.
53. Kwon M., Christou E.A. Visual information processing in older adults: reaction time and motor unit pool modulation. *J Neurophysiol* 2018; 120: 2630–2639. DOI: 10.1152/jn.00161.2018. PMID: 30207861.
54. Aminov A., Rogers J.M., Middleton S. et al. What do randomized controlled trials say about virtual rehabilitation in stroke? A systematic literature review and meta-analysis of upper-limb and cognitive outcomes. *J Neuroeng Rehabil* 2018; 15: 29. DOI: 10.1186/s12984-018-0370-2. PMID: 29587853.
55. Baltaduonienė D., Kubilius R., Berškienė K. et al. Change of cognitive functions after stroke with rehabilitation systems. *Transl Neurosci* 2019; 10: 118–124. DOI: 10.1515/tncsi-2019-0020. PMID: 31149357.
56. Neri S.G.R., Cardoso J.R., Cruz L. et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil* 2017; 31: 1292–1304. DOI: 10.1177/0269215517694677. PMID: 28933612.
57. Yeşilyaprak S.S., Yıldırım M.Ş., Tomruk M. et al. Comparison of the effects of virtual reality-based balance exercises and conventional exercises on balance and fall risk in older adults living in nursing homes in Turkey. *Physiother Theory Pract* 2016; 32: 191–201. DOI: 10.3109/09593985.2015.1138009. PMID: 27049879.
58. Huygelier H., Schraepen B., van Ee R. et al. Acceptance of immersive head-mounted virtual reality in older adults. *Sci Rep* 2019; 9: 4519. DOI: 10.1038/s41598-019-41200-6. PMID: 30872760.
59. Appel L., Appel E., Bogler O. et al. Older adults with cognitive and/or physical impairments can benefit from immersive virtual reality experiences: a feasibility study. *Front Med* 2020; 6: 329. DOI: 10.3389/fmed.2019.00329. PMID: 32010701.
60. Micarelli A., Viziano A., Micarelli B. et al. Vestibular rehabilitation in older adults with and without mild cognitive impairment: Effects of virtual reality using a head-mounted display. *Arch Gerontol Geriatr* 2019; 83: 246–256. DOI: 10.1016/j.archger.2019.05.008. PMID: 31102927.
61. Phu S., Vogrin S., Al Saedi A., Duque G. Balance training using virtual reality improves balance and physical performance in older adults at high risk of falls. *Clin Interv Aging* 2019; 14: 1567–1577. DOI: 10.2147/CIA.S220890. PMID: 31695345.
62. Sherrington C., Michaleff Z.A., Fairhall N. et al. Exercise to prevent falls in older adults: An updated systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 1750–1758. DOI: 10.1136/bjsports-2016-096547. PMID: 27707740.
63. Hsieh C-C., Lin P-S., Hsu W.C. et al. The effectiveness of a virtual reality-based tai chi exercise on cognitive and physical function in older adults with cognitive impairment. *Dement Geriatr Cogn Disord* 2018; 46: 358–370. DOI: 10.1159/000494659. PMID: 30537752.
41. López-García J., Colado J.C., Guzmán J.F. Acute effects of aerobic exercise and active videogames on cognitive flexibility, reaction time, and perceived exertion in older adults. *Games Health J* 2019; 8: 371–379. DOI: 10.1089/g4h.2018.0143. PMID: 31199694.
42. Lee H.S., Park Y.J., Park S.W. The effects of virtual reality training on function in chronic stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *Biomed Res Int* 2019; 2019: 7595639. DOI: 10.1155/2019/7595639. PMID: 31317037.
43. Kannan L., Vora J., Bhatt T., Hughes S.L. Cognitive-motor exergaming for reducing fall risk in people with chronic stroke: a randomized controlled trial. *NeuroRehabilitation* 2019; 44: 493–510. DOI: 10.3233/NRE-182683. PMID: 31256084.
44. Bisson E., Contant B., Sveistrup H., Lajoie Y. Functional balance and dual-task reaction times in older adults are improved by virtual reality and bio-feedback training. *CyberPsychology Behav* 2007; 10: 16–23. DOI: 10.1089/cpb.2006.9997. PMID: 17305444.
45. Kizony R., Levin M.F., Hughey L. et al. Cognitive load and dual-task performance during locomotion poststroke: a feasibility study using a functional virtual environment. *Phys Ther* 2010; 90: 252–260. DOI: 10.2522/ptj.20090061. PMID: 20023003.
46. Subramaniam S., Wan-Ying Hui-Chan C., Bhatt T. A cognitive-balance control training paradigm using wii fit to reduce fall risk in chronic stroke survivors. *J Neurol Phys Ther* 2014; 38: 216–225. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000056. PMID: 25198867.
47. Ключков А.С., Хижникова А.Е., Котов-Смоленский А.М. et al. [Correction of static and dynamic balance using a virtual reality system in patients with cerebrovascular diseases]. *Nervnyye bolezni* 2018; (3): 28–32. DOI: 10.24411/2071-5315-2018-12030. (In Russ.)
48. Kim B.R., Chun M.H., Kim L.S., Park J.Y. Effect of Virtual Reality on Cognition in Stroke Patients. *Ann Rehabil Med* 2011; 35: 450–459. DOI: 10.5535/arm.2011.35.4.450. PMID: 22506159.
49. Laver K., George S., Thomas S. et al. Virtual reality for stroke rehabilitation: An abridged version of a Cochrane review. *Eur J Phys Rehabil Med* 2015; 51: 497–506. PMID: 26158918.
50. Pietrzak E., Cotea C., Pullman S. Using commercial video games for falls prevention in older adults; the way for the future? *J Geriatr Phys Ther* 2014; 37: 166–177. DOI: 10.1519/JPT.0b013e3182abe76e. PMID: 24406711.
51. Rusák Z., Kooijman A., Song Y. et al. A Study of Correlations among Image Resolution, Reaction Time, and Extent of Motion in Remote Motor Interactions. *Adv Human-Computer Interact.* 2014;2014:1–11. DOI:10.1155/2014/463179
52. Brand J., Piccirelli M., Hepp-Reymond M.C. et al. Virtual hand feedback reduces reaction time in an interactive finger reaching task. *PLoS One* 2016; 11: e0154807. DOI: 10.1371/journal.pone.0154807. PMID: 27144927.
53. Kwon M., Christou E.A. Visual information processing in older adults: reaction time and motor unit pool modulation. *J Neurophysiol* 2018; 120: 2630–2639. DOI: 10.1152/jn.00161.2018. PMID: 30207861.
54. Aminov A., Rogers J.M., Middleton S. et al. What do randomized controlled trials say about virtual rehabilitation in stroke? A systematic literature review and meta-analysis of upper-limb and cognitive outcomes. *J Neuroeng Rehabil* 2018; 15: 29. DOI: 10.1186/s12984-018-0370-2. PMID: 29587853.
55. Baltaduonienė D., Kubilius R., Berškienė K. et al. Change of cognitive functions after stroke with rehabilitation systems. *Transl Neurosci* 2019; 10: 118–124. DOI: 10.1515/tncsi-2019-0020. PMID: 31149357.
56. Neri S.G.R., Cardoso J.R., Cruz L. et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil* 2017; 31: 1292–1304. DOI: 10.1177/0269215517694677. PMID: 28933612.
57. Yeşilyaprak S.S., Yıldırım M.Ş., Tomruk M. et al. Comparison of the effects of virtual reality-based balance exercises and conventional exercises on balance and fall risk in older adults living in nursing homes in Turkey. *Physiother Theory Pract* 2016; 32: 191–201. DOI: 10.3109/09593985.2015.1138009. PMID: 27049879.
58. Huygelier H., Schraepen B., van Ee R. et al. Acceptance of immersive head-mounted virtual reality in older adults. *Sci Rep* 2019; 9: 4519. DOI: 10.1038/s41598-019-41200-6. PMID: 30872760.
59. Appel L., Appel E., Bogler O. et al. Older adults with cognitive and/or physical impairments can benefit from immersive virtual reality experiences: a feasibility study. *Front Med* 2020; 6: 329. DOI: 10.3389/fmed.2019.00329. PMID: 32010701.
60. Micarelli A., Viziano A., Micarelli B. et al. Vestibular rehabilitation in older adults with and without mild cognitive impairment: Effects of virtual reality using a head-mounted display. *Arch Gerontol Geriatr* 2019; 83: 246–256. DOI: 10.1016/j.archger.2019.05.008. PMID: 31102927.
61. Phu S., Vogrin S., Al Saedi A., Duque G. Balance training using virtual reality improves balance and physical performance in older adults at high risk of falls. *Clin Interv Aging* 2019; 14: 1567–1577. DOI: 10.2147/CIA.S220890. PMID: 31695345.
62. Sherrington C., Michaleff Z.A., Fairhall N. et al. Exercise to prevent falls in older adults: An updated systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2017; 51: 1750–1758. DOI: 10.1136/bjsports-2016-096547. PMID: 27707740.
63. Hsieh C-C., Lin P-S., Hsu W.C. et al. The effectiveness of a virtual reality-based tai chi exercise on cognitive and physical function in older adults with cognitive impairment. *Dement Geriatr Cogn Disord* 2018; 46: 358–370. DOI: 10.1159/000494659. PMID: 30537752.

64. Montana J.I., Matamala-Gomez M., Maisto M. et al. The benefits of emotion regulation interventions in virtual reality for the improvement of wellbeing in adults and older adults: a systematic review. *J Clin Med* 2020; 9: 500. DOI: 10.3390/jcm9020500. PMID: 32059514.

Информация об авторах

Клочков Антон Сергеевич — к.м.н., с.н.с. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН, Москва, Россия
Хижникова Анастасия Евгеньевна — к.м.н., н.с. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН, Москва, Россия
Фукс Анна Антоновна — студент, факультет фундаментальной медицины, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Котов-Смоленский Артем Михайлович — м.н.с. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН, Москва, Россия
Супонева Наталья Александровна — д.м.н., профессор РАН, член-корреспондент РАН, г.н.с. отд. нейрореабилитации и физиотерапии ФГБНУ НЦН, Москва, Россия
Пирадов Михаил Александрович — д.м.н., проф., академик РАН, директор, ФГБНУ НЦН, Москва, Россия

64. Montana J.I., Matamala-Gomez M., Maisto M. et al. The benefits of emotion regulation interventions in virtual reality for the improvement of wellbeing in adults and older adults: a systematic review. *J Clin Med* 2020; 9: 500. DOI: 10.3390/jcm9020500. PMID: 32059514.

Information about the authors

Anton S. Klochkov — PhD (Med.), senior researcher, Neurorehabilitation department, Research Center of Neurology, Moscow, Russia
Anastasia E. Khizhnikova — PhD (Med.), researcher, Neurorehabilitation department, Research Center of Neurology, Moscow, Russia
Anna A. Fuks — student, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.
Artem M. Kotov-Smolenskiy — junior researcher, Neurorehabilitation department, Research Center of Neurology, Moscow, Russia
Natalia A. Suponeva — D. Sci. (Med.), Prof. of RAS, principal researcher, Neurorehabilitation department, Research Center of Neurology, Moscow, Russia
Mikhail A. Piradov — D. Sci. (Med.), Prof., Full Member of RAS, director, Research Center of Neurology, Moscow, Russia