

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИРОВОК В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И ПОСТУРАЛЬНЫЕ НАРУШЕНИЯ У ПОЖИЛЫХ

А. Е. Хижникова [✉], А. С. Клочков, А. А. Фукс, А. М. Котов-Смоленский, Н. А. Супонева, М. А. Пирадов

Научный центр неврологии, Москва, Россия

Нарушение равновесия в пожилом возрасте является острой проблемой в современной медицине и часто приводит к серьезным последствиям, снижающим качество жизни. К основным причинам такого нарушения относят замедление скорости реакции и вестибуло-атактический синдром. Для коррекции нарушений равновесия у данной категории больных наибольший интерес представляет технология виртуальной реальности, в частности с комбинированной тренировкой скорости реакции и равновесия. Целью исследования было изучить влияние комбинированных тренировок в виртуальной среде на постуральные и психофизиологические показатели у пожилых пациентов с хронической ишемией головного мозга (ХИГМ). В исследование было включено 24 пациента с диагнозом ХИГМ (медиана возраста составила 66 лет). Все пациенты проходили тренировку в виртуальной реальности. До и после тренировки пациентам проводили психофизиологическое и стабилметрическое тестирование, а также клиническую оценку. Выявлено, что у пациентов значительно улучшается функция равновесия по шкале баланса Берг до 50 [45; 54], после 53 [52; 55] ($p < 0,05$), а также изменяется стратегия поддержания равновесия по результатам стабилметрии, что подтверждено уменьшением коэффициента Ромберга после реабилитации: до 266 [199,5; 478,5], после 221 [149,25; 404] ($p < 0,05$). Среди психофизиологических показателей наиболее значимые изменения наблюдали в улучшении простой слухо-моторной реакции: до 210 [174,25; 245,5], после 180,5 [170,5; 208] ($p < 0,05$). Таким образом, комбинированная тренировка скорости реакции и равновесия в виртуальной среде является эффективным методом реабилитации пациентов пожилого возраста с нарушением функции равновесия.

Ключевые слова: нейрореабилитация, виртуальная реальность, постуральные нарушения, время реакции

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-118.2020.7.

✉ **Для корреспонденции:** Анастасия Евгеньевна Хижникова
ул. Волоколамское шоссе, д. 80, г. Москва, 125367, Россия; nastushkapal@gmail.com

Статья получена: 26.10.2021 **Статья принята к печати:** 24.11.2021 **Опубликована онлайн:** 09.12.2021

DOI: 10.24075/vrgmu.2021.058

EFFECTS OF VIRTUAL REALITY EXERGAME ON PSYCHOPHYSIOLOGICAL AND POSTURAL DISORDERS IN ELDERLY PATIENTS

Khizhnikova AE [✉], Klochkov AS, Fuks AA, Kotov-Smolenskiy AM, Suponeva NA, Piradov MA

Research Center of Neurology, Moscow, Russia

Balance impairment at advanced age is a serious medical problem that often has significant implications and affects the quality of the patient's life. Among the underlying causes are overall slowness of motor response and vestibular syndrome. Virtual reality exergames, including reaction and balance training, hold promise for managing balance dysfunction. The aim of this study was to investigate the effects of a combination rehabilitation program containing elements of virtual reality exergame on the postural and psychophysiological parameters of elderly patients with small vascular disease. The study was conducted in 24 patients with small vascular disease (median age: 66 years). All patients underwent a virtual reality rehabilitation program. Psychophysiological, postural and clinical evaluations were performed at baseline and after the program was completed. Balance function measured on the Berg scale improved significantly and was 53 [52; 55] after the training program vs 50 [45; 54] at baseline ($p < 0.05$). The strategy of balance control also changed: the Romberg ratio was 266 [199.5; 478.5] before rehabilitation and 221 [149.25; 404] after the program was completed ($p < 0.05$). The most pronounced changes in the measured psychophysiological parameters occurred in the simple audiomotor reaction, which improved from 210 [174.25; 245.5] at baseline to 180.5 [170.5; 208] after rehabilitation ($p < 0.05$). Thus, the combination balance and reaction virtual reality training is an effective rehabilitation method for advanced-age patients with balance impairment.

Keywords: neurorehabilitation, virtual reality, balance impairment, reaction time

Funding: the study was supported by the Presidential Grant MK-118.2020.7.

✉ **Correspondence should be addressed:** Anastasia E. Khizhnikova
Volokolamskoe shosse, 80, Moscow, 125367, Russia; nastushkapal@gmail.com

Received: 26.10.2021 **Accepted:** 24.11.2021 **Published online:** 09.12.2021

DOI: 10.24075/brsmu.2021.058

Нарушение двигательной функции и равновесия является главной причиной повышения риска падения в пожилом возрасте. Более трети пожилых людей старше 60 лет имеют нарушения походки. Если в возрасте 60–69 лет распространенность такого расстройства составляет около 10,7%, то в возрасте более 80 лет — уже 61,7%. У трех четвертей пациентов в основе нарушения походки и равновесия лежат причины, связанные с нервной системой [1]. К ведущим неврологическим причинам двигательной дисфункции можно отнести сенсорную атаксию различного генеза, паркинсонизм, повреждения головного мозга, а

также цереброваскулярные заболевания, среди которых наиболее распространена хроническая ишемия головного мозга (ХИГМ) [2]. Наиболее частыми проявлениями ХИГМ принято считать: нарушение походки (до 85% случаев при ХИГМ II ст.); пирамидные нарушения, акинетико-ригидный синдром, снижение координационных способностей (в том числе сохранение равновесия) и др. [3].

Одним из факторов, влияющих на ухудшение функции поддержания равновесия в пожилом возрасте, является снижение скорости реакции на различные внешние стимулы. Пожилые люди хуже адаптируются к

резкому изменению положения тела, для них характерны чрезмерный мышечный ответ и повышенная жесткость суставов, не дающие достаточно эффективной амортизации [4]. При попытке резко изменить позу (поднять стопу) в ответ на визуальный стимул пациенты пожилого возраста демонстрируют замедленную реакцию, чаще при подготовке к шагу ошибочно смещают массу тела, причем временные различия снижаются, если из анализа исключить подготовительный компонент. Соответственно, замедленная реакция связана не только с общим замедлением, но и с неправильной предварительной подготовкой к движению [5]. Помимо увеличения времени реакции, на снижение устойчивости у пожилых людей оказывает влияние увеличение времени торможения. В экспериментальных условиях при серии движений «назад-вперед» пожилые участники продемонстрировали увеличение скорости движения вперед (второго движения) для компенсации общего замедления. Кроме того значительно изменялась стратегия управления движением, что вело к замедлению торможения. Соответственно, попытка адаптации к общей замедленности может приводить к увеличению неустойчивости [6].

Для профилактики и снижения риска падений у пожилых пациентов необходимо проведение реабилитационных мероприятий. Технологический прогресс последних двух десятилетий привнес в рутинную реабилитацию немало высокотехнологичных реабилитационных методов. Многие из них уже обладают существенной доказательной базой: роботизированные технологии, экзоскелетные системы, нейронтерфейсы, неинвазивные методы стимуляции головного мозга и др. [7–12]. В условиях избыточности технологий особенно важным становится персонализированный подход к выбору методов реабилитации, оценки эффективности реабилитационных мероприятий, а также разработки предикторов эффективности как при использовании конкретного метода, так и всего процесса в целом [13]. В рамках такого подхода особый интерес представляют методики, позволяющие определять потенциальную эффективность определенного комплекса реабилитационных мероприятий для конкретного пациента. Таким образом, целью настоящего исследования было определить влияние комбинированной тренировки равновесия и скорости реакции на постуральные и психофизиологические показатели.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

В исследование было включено 24 пациента с диагнозом ХИГМ: 5 мужчин и 19 женщин. Медиана возраста составила 66 лет (61; 72).

Критерии включения в исследование: пациенты мужского и женского пола в возрасте 60–80 лет; диагноз ХИГМ. Критерии исключения: грубое нарушение зрения, не позволяющее различать изображения на экране прибора; выраженные когнитивные нарушения, затрудняющие выполнение инструкций, значение по Монреальской шкале оценки когнитивных функций (Montreal Cognitive Assessment — MoCA) менее 20 баллов; грубая сенсорная или моторная афазия; наличие других заболеваний, приводящих к нарушению статического и динамического равновесия.

Курс реабилитации проводили на системе виртуальной реальности Rehabunculus («Интеллект и Инновации»; Россия) на базе бесконтактного сенсора Kinect (Microsoft; США).

Продолжительность курса составила 10 дней, по 5 дней в неделю, длительность одной тренировочной сессии — 30 мин. Курс тренировок включал ряд упражнений, направленных на развитие функции поддержания статического и динамического равновесия и скорости реакции, такие как «Дартс», «Перешагивание через планку» для левой и правой ноги, «Уклонение», «Вышибалы», «Футбол» для левой и правой ног, «Пятнашки» [14].

Оценку психофизиологических параметров проводили на УПФТ-1/30 «Психофизиолог» («Медиком МТД»; Россия).

В батарею тестов были включены следующие.

1. *Тест простой зрительно-моторной реакции (ПЗМР)*. В ответ на зрительный стимул (загоревшийся светодиодный индикатор на корпусе пульта) необходимо было как можно быстрее нажать рабочей рукой кнопку «да» или «нет».

2. *Тест сложной зрительно-моторной реакции (СЗМР)*. В данном тесте от пациента требовалось как можно быстрее нажать одну из кнопок в ответ на аналогичный зрительный стимул (красный — «нет», зеленый — «да»).

3. *Тест простой зрительно-моторной реакции на движение стрелки (ПЗМР-ДС)*. В данном тесте от пациента требовалось как можно быстрее нажать рабочей рукой кнопку «да» или «нет» в ответ на начало движения стрелки на «циферблате» модуля психомоторных тестов.

4. *Тест простой слухо-моторной реакции (ПСМР)*. Тестирование проводили без наушников, громкий звуковой стимул шел из корпуса прибора, пациенту необходимо было как можно быстрее нажать рабочей рукой кнопку «да» или «нет» в ответ на стимул.

5. *Тест сложной зрительно-моторной реакции на световую комбинацию (СЗМР-СК)*. От пациента требовалось как можно быстрее нажать рабочей рукой кнопку «да» или «нет» в ответ на определенную трехцветную комбинацию загоревшихся лампочек на корпусе модуля психомоторных тестов (крайняя левая лампочка зеленая, крайняя правая — красная).

6. *Тест функциональной подвижности нервных процессов (ФПНП)*. Тест ФПНП подразумевал нажатие кнопки «да» на красный стимул, «нет» — на зеленый и пропуск желтого стимула быстро мигающей средней лампочки на корпусе модуля психомоторных тестов.

7. *Тест реакции на движущийся объект (РДО)*. При выполнении этого теста от пациента требовалось нажать рабочей рукой кнопки «да» или «нет» для остановки движущейся в произвольную сторону стрелки напротив загоревшейся лампочки на «циферблате».

Общая длительность психофизиологического тестирования составляла 30 мин. Перед каждым тестом пациента инструктировали и получали от него вербальное подтверждение понимания требований. Пациент располагал пальцы обеих рук в удобном положении над кнопками прибора. Стимулы подавали неритмично для исключения приспособления.

Для оценки функции статического и динамического равновесия пациентов до и после курса тренировок применяли стабилметрический анализ на комплексе «Стабилан-01-2» (ЗАО ОКБ «РИТМ»; Россия), анализировали по шкале баланса Берг [15].

Статистическую обработку результатов проводили с помощью критериев Манна–Уитни (при сравнении независимых выборок), Уилкоксона (при сравнении зависимых выборок), коэффициента корреляции Спирмена, на персональном компьютере с применением пакета прикладных программ Statistica v. 7.0 (StatSoft; США). Данные

представляли в виде медианы и квартилей (25, 75%) медианы. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние тренировок в виртуальной реальности на функцию равновесия у пожилых пациентов

При анализе изменений по шкале баланса Берг были получены следующие результаты: медиана показателя

увеличилась на 3 балла ($p < 0,05$) и составила до реабилитации 50 [45; 54] после реабилитации 53 [52; 55] балла. При этом начальный показатель по шкале баланса Берг отрицательно коррелировал с изменением этого же показателя (коэффициент корреляции равен $-0,823$ при $p = 0,000005$).

Для анализа стабиллометрии использовали стандартные показатели с расшифровкой для каждого из них (табл. 1).

При анализе теста Ромберга были получены следующие результаты. После тренировок происходили значимое

Таблица 1. Стабиллометрические показатели для тестов Ромберга и устойчивости

Показатель	Определение показателя
Тест Ромберга	
Коэффициент Ромберга (KoeffRomb)	Отношение площадей доверительного эллипса в пробе с открытыми глазами к пробе с закрытыми глазами. Применяется для количественного определения степени использования пациентом зрения для контроля баланса в положении стоя
Длина в зависимости от площади (LFS_c)	Отношение длины статокинезиграммы к ее площади с закрытыми глазами. Отражает длину пути за единицу площади
VFY_o	Корреляционная зависимость между положением центра давления в сагиттальной плоскости относительно межлодыжечной линии и скоростью перемещения центра давления с открытыми глазами. Показывает расстояние от экспериментальной кривой регрессии между координатой центра давления в сагиттальной плоскости и вариацией скорости перемещения центра давления
Средняя скорость перемещения центра давления (V_o)	Определяет среднеамплитудное значение скорости перемещения центра давления пациента за время обследования
Индекс скорости (IV_o)	Среднеамплитудное значение скорости перемещения центра давления
Нормированная по времени длина кривой статокинезиграммы по оси Y (LY_o)	Определяет длину пути центра давления относительно оси Y при проведении обследования
Нормированная по времени длина кривой статокинезиграммы по оси X (LX_o)	Определяет длину пути центра давления относительно оси X при проведении обследования
Качество функции равновесия (КФР_o)	Рассчитывается в виде процентного отношения площади, ограниченной функцией распределения длин векторов скоростей, и константы, равной площади прямоугольника, ограниченного осями координат, горизонтальной асимптотой функции кривой распределения длин скоростей и вертикальной границей. Оценивает, насколько минимальна скорость движения центра давления
Площадь векторограммы (НПВ_o)	Суммарная площадь векторограммы, отнесенная ко времени записи сигнала. Чем больше скорости перемещения центра давления и резче повороты вектора скорости, тем выше данный показатель
Средняя линейная скорость (ЛСС_o)	Среднее значение линейной скорости в процессе исследования
Оценка движения (OD_o)	Отношение длины статокинезиграммы к среднему разбросу, отнесенное ко времени исследования
Коэффициент резкого изменения направления движения вектора (КРИНД_c)	Представляет собой процент резких поворотов вектора скорости центра давления (более 45 градусов) относительно общего количества векторов
Средняя угловая скорость (УСС_c)	Средняя скорость изменения направления векторов скорости движения центра давления
Средняя амплитуда вариации угловой скорости (АВУС_c)	Среднее абсолютное значение изменений угловой скорости в точках локальных пиков
Коэффициент асимметрии угловой скорости (КАУС_c)	Характеризует среднее направление вращения вектора скорости перемещения центра давления
Накопленный угол смещения векторов (НУС_c)	Значение угла поворота вектора за период исследования
Тест устойчивость	
Площадь зоны перемещений (SZone)	Площадь квадрата со сторонами, равными сумме величин отклонений вперед-назад и вправо-влево
Смещение по фронтالي (МО)	Смещение центра давления во фронтальной плоскости
Средний разброс отклонения центра давления (R)	Средний радиус отклонения центра давления. Данный показатель определяет средний суммарный разброс колебаний центра давления
Средняя скорость перемещения центра давления (V)	Определяет среднеамплитудное значение скорости перемещения центра давления пациента за время обследования.
Скорость изменения площади статокинезиграммы (SV)	Характеризует среднеамплитудную скорость изменения площади статокинезиграммы
Индекс скорости (IV)	Среднеамплитудное значение скорости перемещения центра давления
Коэффициент асимметрии относительно смещения (фронталь) (KAssM(x))	Определяет, насколько и в какую сторону смещается гистограмма относительно значения независимой величины (середины интервала гистограммы, на который приходится наибольшее количество значений)
Средняя линейная скорость (ЛСС)	Среднее значение линейной скорости в процессе исследования
Накопленный угол смещения векторов (НУС_c)	Значение угла поворота вектора за период исследования

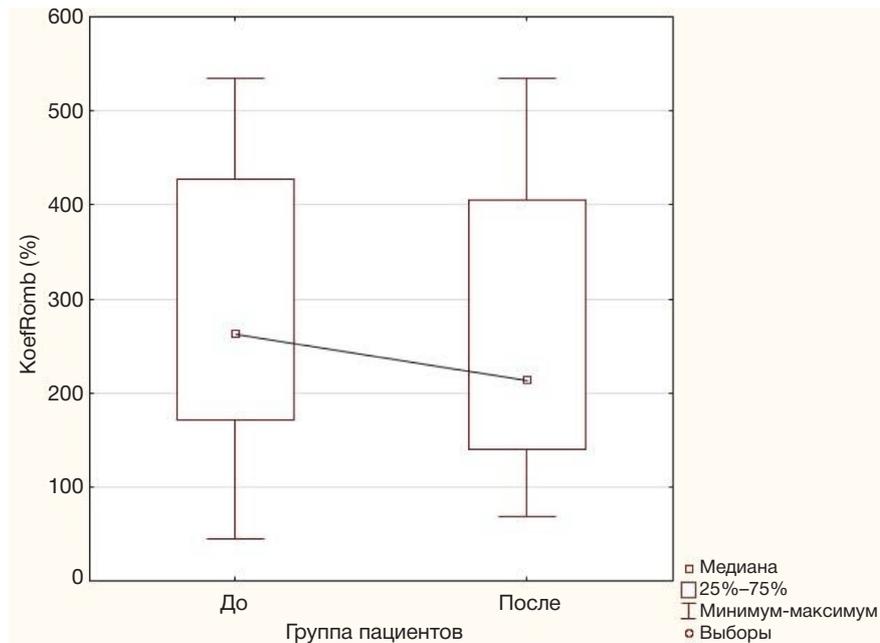


Рис. 1. Изменение коэффициента Ромберга до реабилитации 266 [199,5; 478,5], после реабилитации 221 [149,25; 404] ($p < 0,05$)

($p < 0,05$) уменьшение коэффициента Ромберга (KoeffRomb) (рис. 1), увеличение показателя длины в зависимости от площади с закрытыми глазами (LFS_c) и корреляционной зависимости между положением ЦД в сагиттальной плоскости относительно межлодыжечной линии и скоростью перемещения ЦД с открытыми глазами (VFY_o).

Среди стабилметрических показателей при проведении теста с открытыми глазами было получено значимое ($p < 0,05$) увеличение средней скорости перемещения центра давления (V_o), увеличение индекса скорости (IV_o), увеличение нормированной по времени длины кривой статокинезиограммы по оси Y (LY_o), уменьшение качества функции равновесия (КФР_o), увеличение нормированной площади векторограммы (НПВ_o), увеличение средней линейной скорости ($ЛСС_o$), особенно в сагиттальной плоскости ($ЛСС_o_{саг}$), тенденция к увеличению оценки

движения (OD_o) ($p = 0,055$), увеличению нормированной по времени длины кривой статокинезиограммы по оси X (LX_o) ($p = 0,058$).

Среди стабилметрических показателей при проведении теста с закрытыми глазами было получено значимое ($p < 0,05$) увеличение оценки движения (OD_c), увеличение комплексного коэффициента (LFS_c), увеличение коэффициента резкого изменения направления движения вектора (КРИНД_c), увеличение средней угловой скорости ($УСС_c$), увеличение средней амплитуды вариации угловой скорости (АВУС_c), увеличение коэффициента асимметрии угловой скорости (КАУС_c), увеличение накопленного угла смещения векторов (НУС_c).

При анализе теста на устойчивость получено значимое ($p < 0,05$) увеличение площади зоны перемещений (SZone) (рис. 2), увеличение смещения по фронтالي (MO) ($p < 0,01$),

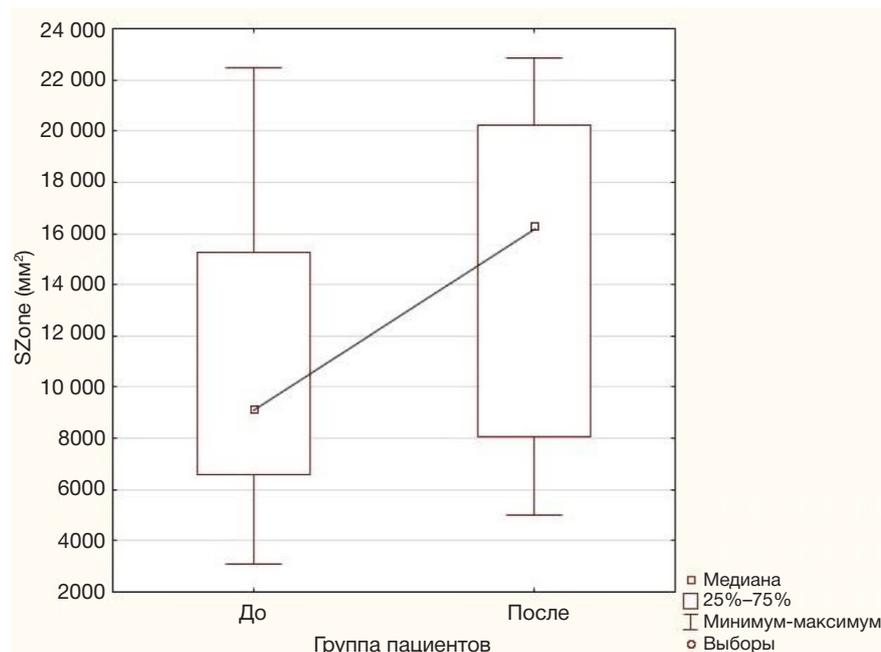


Рис. 2. Изменение площади зоны перемещений до реабилитации 9153 [7251,5; 14805], после реабилитации 16289 [9006,5; 19830] ($p < 0,05$)

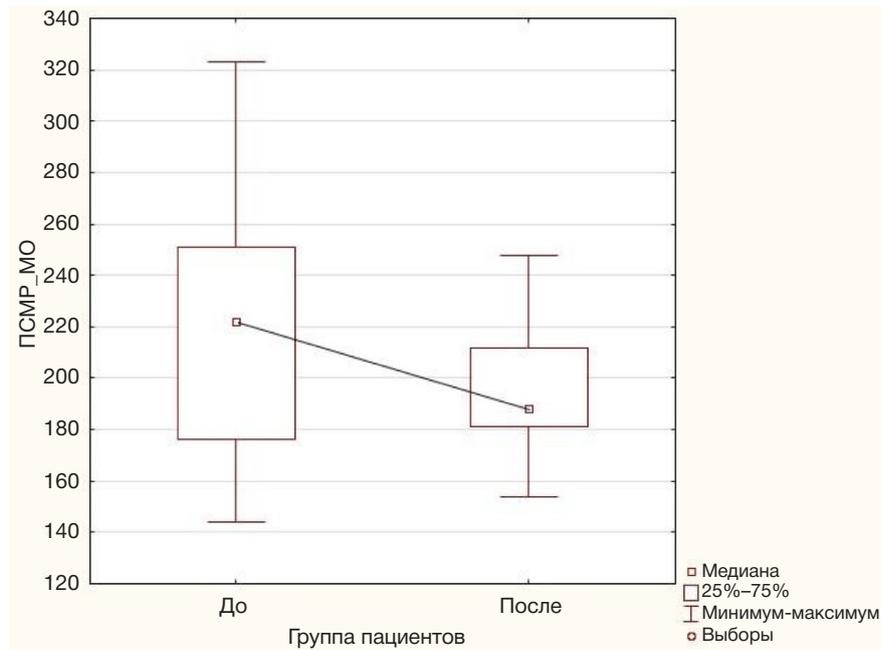


Рис. 3. Изменение среднего времени ПСМР до реабилитации 210 [174,25; 245,5], после реабилитации 180,5 [170,5; 208] ($p < 0,05$)

увеличение среднего разброса отклонения центра давления (R), увеличение средней скорости перемещения центра давления (V), увеличение скорости изменения площади статокинезиограммы (SV), увеличение индекса скорости (IV), уменьшение коэффициента асимметрии относительно смещения (фронталь) (KAssM(x)), увеличение средней линейной скорости (ЛСС), увеличение накопленного угла смещения векторов (НУС_c).

Влияние тренировок в виртуальной реальности на психофизиологические показатели у пожилых пациентов

Тестирование простой зрительно-моторной реакции показало тенденцию ($p = 0,052$) к уменьшению среднего времени реакции (ПЗМР_МО) и тенденцию ($p = 0,061$) к уменьшению среднеквадратичного отклонения времени реакции (ПЗМР_SD). Статистический анализ показал тенденцию ($p = 0,069$) к увеличению интегрального показателя надежности (ПЗМР_ИПН) на фоне тренировок.

При тестировании сложной зрительно-моторной реакции выявлено значимое ($p < 0,05$) увеличение уровня сенсомоторных реакций (СЗМР_УАЦНС) и оценки уровня сенсомоторных реакций (СЗМР_Р), и увеличение амплитуды моды времени реакции, отражающей процент максимальных значений скорости реакции (СЗМР_АМОДА).

Изменения простой зрительно-моторной реакции на движение стрелки после реабилитации показало тенденцию ($p = 0,053$) к увеличению интегрального показателя надежности (ПЗМРДС_ИПН).

Наиболее значимые изменения обнаружены в показателях простой слухо-моторной реакции ($p < 0,05$):

увеличился интегральный показатель надежности (ПСМР_ИПН), уменьшилось среднее время реакции (ПСМР_МО) (рис. 3), медиана (ПСМР_Ме).

При тестировании реакции на движущийся объект произошли значимое ($p < 0,01$) увеличение числа (РДО_ЧОР) и процента опережений (РДО_ПОР), уменьшение числа (РДО_ЧП) и процента пропусков (РДО_ППР) (табл. 2).

Тестирования функциональной подвижности нервных процессов и сложной зрительно-моторной реакции на световую комбинацию не выявили значимых изменений на фоне тренировок.

По результатам корреляционного анализа обнаружено, что начальные показатели числа запаздываний РДО и процента запаздываний РДО положительно коррелируют с изменениями КАУС ($r = 0,53$; $p < 0,05$) и НУС ($r = 0,57$; $p < 0,05$) в тесте Ромберга с закрытыми глазами. Изменение коэффициента асимметрии угловой скорости и накопления угловой скорости показывает, что пациентам с изначально худшими показателями реакции на движущийся объект требовалось чаще и в большей степени корректировать положение ЦМ для поддержания равновесия.

Изменение показателя по шкале баланса Берг значимо ($p < 0,05$) коррелировало с начальным интегральным показателем надежности ПСМР (ПСМР_ИПН), уровнем активации ЦНС (ПСМР_КАЦНС), оценкой уровня активации ЦНС (ПСМР_ОУАЦНС), номером квадрата классификации (ПСМР_НКК), средним временем ПСМР (ПСМР_МО), уровнем быстродействия (ПСМР_Убыстр), оценкой быстродействия (ПСМР_ОБ), средним квадратичным отклонением скорости (ПСМР_СКО), медианой времени ПСМР (ПСМР_Ме), модой времени ПСМР (ПСМР_Мо), максимальным временем ПСМР (ПСМР_MaxВ) (табл. 3).

Таблица 2. Результаты тестирования РДО

Показатель	Результаты до	Результаты после	p
РДО_ЧОР (шт.)	7,5 [4,75; 9,25]	9 [7,75; 11,25]	0,003
РДО_ПОР (%)	25 [16; 30,75]	30 [26; 37,75]	0,002
РДО_ЧП	2 [1; 5]	1 [0; 2]	0,007
РДО_ППР	7 [3; 17]	3 [0; 7]	0,005

Таблица 3. Корреляция начальных показателей теста ПСМР с изменением по шкале баланса Берг

Показатель	ПСМР_ИПН (%)	ПСМР_КАЦНС	ПСМР_ОУАЦНС (отн.ед.)	ПСМР_НKK
Изменение по шкале Берг	-0,72323	-0,731143	-0,694082	-0,694082
	ПСМР_МО (мс)	ПСМР_Убыстр	ПСМР_ОБ (отн.ед.)	ПСМР_СКО (мс)
Изменение по шкале Берг	0,659752	-0,731143	-0,731143	0,529675
	ПСМР_Ме (мс)	ПСМР_Мо (мс)	ПСМР_MaxB (мс)	
Изменение по шкале Берг	0,662874	0,507568	0,554416	

Примечание: уровень значимости корреляций $p < 0,05$.

Наблюдаемые корреляционные связи, вероятно, связаны с тем, что наибольшее изменение по шкале баланса Берг показывали пациенты с худшими начальными показателями равновесия, и эти же пациенты демонстрировали худшее начальное состояние ЦНС по результатам ПСМР.

Корреляционной связи изменений психофизиологических показателей с динамикой изменений равновесия на фоне тренировок по данным теста Ромберга и теста устойчивости выявлено не было.

Изменение показателя по шкале баланса Берг значимо ($p < 0,05$) коррелировало с изменением интегрального показателя надежности ПСМР ($r = 0,72$; $p < 0,05$), изменением среднего времени реакции ($r = -0,73$, $p < 0,05$) и изменением медианы ПСМР ($r = -0,69$; $p < 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов стабилотрии позволил сделать следующие выводы: по данным изменения коэффициента Ромберга пациенты стали меньше ориентироваться на зрение при поддержании равновесия и начали использовать в качестве основной стратегии поддержания равновесия проприоцептивное чувство. Данные изменения можно объяснить использованием биологической обратной связи в виртуальном пространстве, что требовало от пациентов сопоставления проприоцептивной информации с текущим положением ЦД, отображаемым на экране. Отображение на экране во время тренировок трехмерного аватара с видом от третьего лица не только позволяло использовать в качестве источника обратной связи вид горизонта виртуального пространства, но и способствовало тренировке проприоцептивной чувствительности.

Увеличение плотности статокинезиограммы (LFS_c) указывает на большую концентрацию положений ЦМ на меньшей площади, что говорит об улучшении функции поддержания равновесия. Изменение значения показателя корреляционной зависимости между положением ЦД в сагиттальной плоскости относительно межлодыжечной линии и скоростью перемещения ЦД (VFY) с отрицательных значений на положительные связано с изменением стратегии поддержания баланса. Положительные значения этого показателя указывают на уменьшение напряженности трехглавой мышцы голени и на смещение ЦД вперед, что соответствует более физиологичной стратегии.

Увеличение скоростных показателей теста Ромберга связано с уменьшением ригидности пациентов и переходом от компенсаторной стратегии поддержания равновесия к более физиологичной по сравнению с состоянием до тренировок. Отказ от компенсаторной стратегии поддержания равновесия являлся необходимой мерой для обеспечения достаточной степени свободы

перемещения ЦМ с целью улучшения устойчивости. Изменения стабилотрических показателей теста на устойчивость указывают на улучшение двигательного контроля после курса тренировок. Пациенты стали значимо легче перемещать ЦД по большей площади и с большей скоростью [16, 17].

Увеличение итогового показателя по шкале баланса Берг говорит об общем улучшении статического и динамического, а также функционального баланса после терапии. Пациенты, изначально имевшие худшие результаты, продемонстрировали наибольшее изменение в процессе тренировок.

Таким образом, десятидневный курс тренировок положительно повлиял на функцию равновесия у пациентов с ХИГМ, что соотносится с данными предыдущих исследований [18–20] и подтверждает предположение об эффективности ВР для тренировки функции равновесия [21].

Результаты психофизиологического тестирования показали, что тренировки в системе ВР ведут к уменьшению среднего времени ПСМР и ПЗМР, а также увеличению интегрального показателя надежности тестирования. Интегральный показатель надежности (ИПН) позволяет в процентном отношении оценить число допущенных ошибок во время каждого ответа. ИПН рассчитывают как среднее коэффициентов надежности (КН1) каждого ответа. При исследовании сложных сенсомоторных реакций не было получено результатов в отношении времени реакции, но было уменьшено число ошибок разного рода и получены данные об улучшении функционального состояния ЦНС. Сложные реакции, рассматриваемые в нашем исследовании, относились к реакциям как распознавания, так и выбора. Не все типы тестов показали достоверные изменения после курсов тренировок: тестирования функциональной подвижности нервных процессов и сложной зрительно-моторной реакции на световую комбинацию не показали значимых изменений результатов. Это, вероятно, связано с тем, что данные тесты были наиболее сложными из всей батареи и требовали значительного вовлечения когнитивных резервов. Увеличение скорости реакции согласуется с литературными данными [22–24], однако мнения расходятся: ряд исследователей получили ухудшение показателей времени реакции [25], другие не отметили влияния тренировок на скорость реакции [26]. Насколько нам известно, ни одна исследовательская группа не анализировала взаимосвязь тренировок в системе ВР с надежностью тестирования, ошибочными реакциями и аналогичными показателями. Вероятно, это обусловлено особенностями прибора, на котором проводили тестирование.

Пациенты, продемонстрировавшие большее улучшение показателя по шкале Берг (т. е. пациенты в изначально

худшем состоянии), показали большее улучшение интегрального показателя надежности ПСМР, средней скорости и медианы ПСМР. Это свидетельствует об эффективности реабилитационной программы как в отношении баланса, так и в отношении когнитивной составляющей, а также демонстрирует некоторую предиктивную силу теста ПСМР. Интегральный показатель надежности и средняя скорость ПСМР позволяют выявить пациентов в худшем начальном состоянии, для которых ВР-реабилитация будет высокоэффективна.

Как известно, поддержание баланса зависит от афферентативной интеграции зрительной, вестибулярной и проприоцептивной систем. Слуховой системе не приписывают подобную вспомогательную роль, несмотря на ее способность обеспечивать пространственные ориентиры с чрезвычайной скоростью и точностью [27]. Тем не менее ряд авторов предполагают, что слуховые стимулы могут играть возрастающую роль, если одна из задействованных систем нарушена [28]. Наличие корреляционной связи изменений скорости слухомоторной реакции и динамики функции равновесия на фоне тренировок может быть обусловлено повышением роли аудиальной афферентации в рамках изменения компенсаторной стратегии.

На данном этапе не было получено однозначных данных о наличии единственного предиктора моторного восстановления, однако как один из возможных вариантов может быть рассмотрен тест ПСМР. Вероятно, отсутствие единого предиктора связано с разнородностью механизмов нарушения равновесия в группе пациентов. Помимо когнитивных нарушений к ухудшению баланса могут вести саркопения, моторные дефициты, проприоцептивные нарушения и др.

Для детализации требуется дальнейшее исследование большего числа пациентов и формирования групп с однородной причиной нарушения равновесия. Большой объем выборки и анализ вестибулярной функции с учетом физиологических особенностей испытуемых позволят

выделить различные паттерны нарушений равновесия и разработать инструмент определения мишенной реабилитационного воздействия при тренировках равновесия.

ВЫВОДЫ

На основании предварительных данных проведенного исследования можно сделать следующие выводы: 1) нарушения равновесия у пожилых пациентов могут быть обусловлены как нарушением процессов активации и ингибирования ЦНС, так и постуральными и двигательными нарушениями; 2) комбинированная тренировка равновесия и скорости реакции в виртуальной среде является эффективным методом реабилитации пожилых пациентов, способствующим развитию как статического, так и динамического равновесия; тренировки способствуют также переходу от компенсаторной стратегии поддержания равновесия к более физиологичной с точки зрения биомеханики; 3) тренировки равновесия и устойчивости с применением технологий виртуальной реальности позволяют улучшить не только навык поддержания равновесия, но и процессы активации ЦНС, в то же время стимулируя пациентов к использованию дополнительных афферентных источников для поддержания равновесия; 4) для пациентов с выраженными нарушениями равновесия, проходящих курс тренировок с обратной связью в виртуальной среде, характерно более значительное увеличение точности и скорости реагирования на зрительный и слуховой стимул. Таким образом, комбинированная тренировка равновесия и скорости реакции в виртуальной среде может стать эффективным методом реабилитации, однако для выявления достоверных психофизиологических и стабиллометрических предикторов требуется продолжение исследования с разделением пациентов на группы в зависимости от причины и степени нарушения равновесия.

Литература

1. Ткачева О. Н. Нарушения походки в пожилом и старческом возрасте: Методические рекомендации. М.: Изд-во Прометей, 2019; 48 с.
2. Mahlknecht P, Kiechl S, Bloem BR, Willeit J, Scherfler C, Gasperi A et al. Prevalence and Burden of Gait Disorders in Elderly Men and Women Aged 60–97 Years: A Population-Based Study. *PLoS ONE*. 2013; 8 (7): 1–7.
3. Антипенко Е. А. Хроническая ишемия головного мозга (клинико-экспериментальное исследование). М., 2015.
4. Sanders O, Hsiao HY, Savin DN, Creath RA, Rogers MW. Aging changes in protective balance and startle responses to sudden drop perturbations. *Journal of neurophysiology*. 2019; 122 (1): 39–50.
5. Verrel J, Lisofsky N, Kühn S, Lindenberger U. Normal aging increases postural preparation errors: Evidence from a two-choice response task with balance constraints. *Gait and Posture*. 2016; 44: 143–148.
6. Kasahara S, Saito H. The effect of aging on termination of voluntary movement while standing: A study on community-dwelling older adults. *Human Movement Science*. 2019; 64 (August 2018): 347–354.
7. Ахмадеева Л. Р., Уразбахтина Ю. О., Камалова К. Р., Шаймухаметова Ф. Х., Ахмадеева Э. Н., Батаев Х. М. и др. Транскраниальная магнитная стимуляция в неврологии и нейрореабилитации. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. 2019; 21 (12): 55–59.
8. Черникова Л. А. Роботизированные системы в нейрореабилитации. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2009; 3 (3): 30–36.
9. Fasoli SE. Rehabilitation technologies to promote upper limb recovery after stroke. Elsevier Ltd., 2016; 510 p.
10. Hatem SM, Saussez G, Della Faille M, Prist V, Zhang X, Dispa D et al. Rehabilitation of motor function after stroke: A multiple systematic review focused on techniques to stimulate upper extremity recovery. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2016; (10): 1–22.
11. Oña ED, Cano-de la Cuerda., Sánchez-Herrera P, Balaguer C, Jardón AA. review of Robotics in Neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb. *Journal of Healthcare Engineering*. 2018; 2018: 1–19.
12. Paolo M, Salvo FDe, Peccini MC, Sfaldaroli A, Cadri S, Caserio M, et al. Exoskeleton in the neurorehabilitation process: Neuropsychological effects in patients affected by spinal cord injury and stroke. *Digital Medicine*. 2018; 4 (4): 76–85.
13. Donath L, Rössler R, Faude O. Effects of Virtual Reality Training (Exergaming) Compared to Alternative Exercise Training and Passive Control on Standing Balance and Functional Mobility in Healthy Community-Dwelling Seniors: A Meta-Analytical Review. *Sports Medicine*. 2016; 46 (9): 1293–309.
14. Хижникова А. Е., Клочков А. С., Котов-Смоленский А. М., Фукс А. А., Супонева Н. А., Пирадов М. А. Влияние когнитивно-моторных тренировок в виртуальной среде на

- психофизиологические параметры и функцию равновесия в пожилом возрасте. Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2020; 2 (4): 292–302.
15. Супонева Н. А., Юсупова Д. Г., Зимин А. А., Зайцев А. Б., Яцко К. А., Мельченко Д. А. и др. Валидация шкалы баланса Берг в России. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2021; 13 (3): 12–18.
 16. Сафонова Ю. А., Емельянов В. Д. Анализ стабилметрических показателей у людей старше 65 лет. Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И. И. Мечникова. 2017; 9 (1): 89–95.
 17. Скворцов Д. В. Стабилметрическое исследование: краткое руководство. М.: Мера-ТСП, 2010; 176 с.
 18. Laatar R, Kachouri H, Borji R, Rebai H, Sahli S. Combined physical-cognitive training enhances postural performances during daily life tasks in older adults. *Experimental Gerontology*. 2018; 107: 91–97.
 19. Lacroix A, Kressig RW, Muehlbauer T, Gschwind YJ, Pfenninger B, Bruegger O, et al. Effects of a supervised versus an unsupervised combined balance and strength training program on balance and muscle power in healthy older adults: A randomized controlled trial. *Gerontology*. 2016; 62 (3): 275–88.
 20. van het Reve E, de Bruin ED. De Strength-balance supplemented with computerized cognitive training to improve dual task gait and divided attention in older adults: A multicenter randomized-controlled trial. *BMC Geriatrics*. 2014; 14 (1): 1–15.
 21. Kamińska MS, Miller A, Rotter I, Szylińska A, Grochans E. The effectiveness of virtual reality training in reducing the risk of falls among elderly people. *Clinical Interventions in Aging*. 2018; 13: 2329–38.
 22. Fu AS, Gao KL, Tung AK, Tsang WW, Kwan MM. Effectiveness of Exergaming Training in Reducing Risk and Incidence of Falls in Frail Older Adults with a History of Falls. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2015; 96 (12): 2096–102.
 23. Gschwind YJ, Schoene D, Lord SR, Ejupi A, Valenzuela T, Aal K, et al. The effect of sensor-based exercise at home on functional performance associated with fall risk in older people - A comparison of two exergame interventions. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2015; 12 (1): 1–9.
 24. Neri SGR, Cardoso JR, Cruz L, Lima RM, de Oliveira RJ, Iversen MD, et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*. 2015; 31 (10): 1292–304.
 25. Gschwind YJ, Eichberg S, Ejupi A, de Rosario H, Kroll M, Marston HR, et al. ICT-based system to predict and prevent falls (iStoppFalls): Results from an international multicenter randomized controlled trial. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2015; 12 (1): 1–11.
 26. Bootsman NJM, Skinner TL, Lal R., Glindemann D, Lagasca C, Peeters GMEEG. The relationship between physical activity, and physical performance and psycho-cognitive functioning in older adults living in residential aged care facilities. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2018; 21 (2): 173–8.
 27. Palm HG, Strobel J, Achatz G, von Luebken F, Friemert B. The role and interaction of visual and auditory afferents in postural stability. *Gait Posture*. 2009; 30 (3): 328–33.
 28. Stevens MN, Barbour DL, Gronski MP, Hullar TE. Auditory contributions to maintaining balance. *J Vestib Res*. 2016; 26 (5–6): 433–8.

References

1. Tkacheva ON. Narusheniya pohodki v pozhilom i starchyom vozraste: Metodicheskie rekomendacii. M.: Izd-vo Prometej, 2019; 48 с.
2. Mahlknecht P, Kiechl S, Bloem BR, Willeit J, Scherfler C, Gasperi A et al. Prevalence and Burden of Gait Disorders in Elderly Men and Women Aged 60–97 Years: A Population-Based Study. *PLoS ONE*. 2013; 8 (7): 1–7.
3. Antipenko EA. Hronicheskaja ishemija golovnogogo mozga (kliniko-jeksperimental'noe issledovanie). M., 2015.
4. Sanders O, Hsiao HY, Savin DN, Creath RA, Rogers MW. Aging changes in protective balance and startle responses to sudden drop perturbations. *Journal of neurophysiology*. 2019; 122 (1): 39–50.
5. Verrel J, Lisofsky N, Kühn S, Lindenberger U. Normal aging increases postural preparation errors: Evidence from a two-choice response task with balance constraints. *Gait and Posture*. 2016; 44: 143–148.
6. Kasahara S, Saito H. The effect of aging on termination of voluntary movement while standing: A study on community-dwelling older adults. *Human Movement Science*. 2019; 64 (August 2018): 347–354.
7. Ahmadeeva LR, Urazbahtina YuO, Kamalova KR, Shajmuhametova FH, Ahmadeeva YeN, Bataev HM, i dr. Transkranal'naja magnitnaja stimuljacija v nevrologii i nejroreabilitacii. *Mediko-farmaceuticheskiy zhurnal «Pul's»*. 2019; 21 (12): 55–59.
8. Chernikova LA. Robotizirovannye sistemy v nejroreabilitacii. *Annaly klinicheskoy i jeksperimental'noj nevrologii*. 2009; 3 (3): 30–36.
9. Fasoli SE. Rehabilitation technologies to promote upper limb recovery after stroke. Elsevier Ltd., 2016; 510 p.
10. Hatem SM, Saussez G, Della Faille M, Prist V, Zhang X, Dispa D et al. Rehabilitation of motor function after stroke: A multiple systematic review focused on techniques to stimulate upper extremity recovery. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2016; (10): 1–22.
11. Oña ED, Cano-de la Cuerda., Sánchez-Herrera P, Balaguer C, Jardón AA. review of Robotics in Neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb. *Journal of Healthcare Engineering*. 2018; 2018: 1–19.
12. Paolo M, Salvo FDe, Peccini MC, Sfoldaroli A, Cadri S, Caserio M, et al. Exoskeleton in the neurorehabilitation process: Neuropsychological effects in patients affected by spinal cord injury and stroke. *Digital Medicine*. 2018; 4 (4): 76–85.
13. Donath L, Rössler R, Faude O. Effects of Virtual Reality Training (Exergaming) Compared to Alternative Exercise Training and Passive Control on Standing Balance and Functional Mobility in Healthy Community-Dwelling Seniors: A Meta-Analytical Review. *Sports Medicine*. 2016; 46 (9): 1293–309.
14. Khizhnikova AE, Klochkov AS, Kotov-Smolenskii AM, Fuks AA, Suponeva NA, Piradov MA. The effect of virtual reality based cognitive-motor training on psychophysiological parameters and balance function in the elderl. *Physical and Rehabilitation Medicine Medical Rehabilitation*. 2020; 2 (4): 292–302.
15. Suponeva NA, Yusupova DG, Zimin AA, Zaitsev AB, Yatsko KA, Melchenko DA, et al. Validation of a Russian version of the Berg Balance Scale. *Neurology, Neuropsychiatry, Psychosomatics*. 2021; 13 (3): 12–18.
16. Safonova YuA, Emelyanov VD. Analiz stabilometricheskikh pokazatelej u ljudej starshe 65 let. *Vestnik Severo-Zapadnogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta im. I. I. Mechnikova*. 2017; 9 (1): 89–95.
17. Skvortsov DV. Stabilometricheskoe issledovanie: kratkoe rukovodstvo. M.: Mera-TSP, 2010; 176 с.
18. Laatar R, Kachouri H, Borji R, Rebai H, Sahli S. Combined physical-cognitive training enhances postural performances during daily life tasks in older adults. *Experimental Gerontology*. 2018; 107: 91–97.
19. Lacroix A, Kressig RW, Muehlbauer T, Gschwind YJ, Pfenninger B, Bruegger O, et al. Effects of a supervised versus an unsupervised combined balance and strength training program on balance and muscle power in healthy older adults: A randomized controlled trial. *Gerontology*. 2016; 62 (3): 275–88.
20. van het Reve E, de Bruin ED. De Strength-balance supplemented with computerized cognitive training to improve dual task gait and divided attention in older adults: A multicenter randomized-controlled trial. *BMC Geriatrics*. 2014; 14 (1): 1–15.
21. Kamińska MS, Miller A, Rotter I, Szylińska A, Grochans E. The effectiveness of virtual reality training in reducing the risk of falls

- among elderly people. *Clinical Interventions in Aging*. 2018; 13: 2329–38.
22. Fu AS, Gao KL, Tung AK, Tsang WW, Kwan MM. Effectiveness of Exergaming Training in Reducing Risk and Incidence of Falls in Frail Older Adults with a History of Falls. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2015; 96 (12): 2096–102.
 23. Gschwind YJ, Schoene D, Lord SR, Ejuji A, Valenzuela T, Aal K, et al. The effect of sensor-based exercise at home on functional performance associated with fall risk in older people - A comparison of two exergame interventions. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2015; 12 (1): 1–9.
 24. Neri SGR, Cardoso JR, Cruz L, Lima RM, de Oliveira RJ, Iversen MD, et al. Do virtual reality games improve mobility skills and balance measurements in community-dwelling older adults? Systematic review and meta-analysis. *Clinical Rehabilitation*. 2011; 31 (10): 1292–304.
 25. Gschwind YJ, Eichberg S, Ejuji A, de Rosario H, Kroll M, Marston HR, et al. ICT-based system to predict and prevent falls (iStoppFalls): Results from an international multicenter randomized controlled trial. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2015; 12 (1): 1–11.
 26. Bootsman NJM, Skinner TL, Lal R., Glindemann D, Lagasca C, Peeters GMEEG. The relationship between physical activity, and physical performance and psycho-cognitive functioning in older adults living in residential aged care facilities. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2018; 21 (2): 173–8.
 27. Palm HG, Strobel J, Achatz G, von Luebken F, Friemert B. The role and interaction of visual and auditory afferents in postural stability. *Gait Posture*. 2009; 30 (3): 328–33.
 28. Stevens MN, Barbour DL, Gronski MP, Hullar TE. Auditory contributions to maintaining balance. *J Vestib Res*. 2016; 26 (5–6): 433–8.