ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА, 2024, том 50, № 3, с. 3–13

УДК 612.821

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОСМОТРА ВИДЕОРЯДА В ШЛЕМЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ И НА ЭКРАНЕ ТЕЛЕВИЗОРА НА ПОСТУРАЛЬНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

© 2024 г. Л. М. Бикчентаева[1], А. А. Шульман[1, *], М. Э. Балтин[1, 2], С. О. Бикеева[1], А. Ф. Желтухина[1], Т. В. Балтина[1]

[1]*ФГАОУВО Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

[2]*ФГБОУВО Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, Казань, Россия*

**E-mail: ani_07@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.09.2023 г.
После доработки 22.01.2024 г.
Принята к публикации 06.03.2024 г.

В данной работе представлен анализ изменения постуральной устойчивости при предъявлении человеку видеоряда в шлеме виртуальной реальности и с экрана телевизора. Постуральная устойчивость оценивалась с помощью компьютерного стабилометрического комплекса. Было показано, что как при просмотре видео на экране, так и в шлеме виртуальной реальности по сравнению с контрольными тестами (до просмотра) наблюдались изменения стабилометрических показателей участников исследования. Просмотр видеоряда в шлеме виртуальной реальности оказывал большее влияние на стабилографические параметры в сторону увеличения постуральной неустойчивости. Во время просмотра видео с экрана телевизора и в шлеме виртуальной реальности снижался вклад зрительной информации в поддержание равновесия в сагиттальной плоскости, однако при просмотре с экрана телевизора при этом увеличивался вклад вестибулярной информации для регулирования позы, а при просмотре в очках виртуальной реальности увеличивался вклад соматосенсорной информации и мозжечка, это может говорить о том, что виртуальная реальность требует подключения более осознанных корректирующих механизмов для стабилизации позы.

Ключевые слова: постуральная устойчивость, стабилография, центр давления, виртуальная реальность.

DOI: 10.31857/S0131164624030016, **EDN:** BVEMVZ

Использование интерактивных вычислительных систем получает широкое распространение. Технологии виртуальной реальности (ВР) внедряются в различные области, такие как медицина, индустрия игр и образование [1, 2]. ВР как концепция стала включать в себя широкий спектр приложений, в которых пользователь воспринимает и взаимодействует с виртуальной средой, созданной компьютером, будь то через традиционный двухмерный (2*D*) дисплей, проекционный дисплей в паре с 3*D*-очками или головным дисплеем (*HMD – head-mounted display*). Кроме того, наблюдается быстрый рост использования систем ВР, поскольку они стали более доступными [3]. Учитывая различные возможности ВР, были разработаны игры для того, чтобы дать возможность людям быть более активными и вести здоровый образ жизни [4]. Предполагается, что такие виртуальные игры могут быть полезны пользователям для поддержания физической формы или в реабилитации. Было показано, что тренировки в виртуальной реальности могут быть столь же эффективны, как и традиционные физические нагрузки легкой и средней интенсивности [5], также показана эффективность для тренировки равновесия [6, 7], скорости движения и общей подвижности у пожилых людей [8].

Ключевым элементом в медицинских приложениях *HMD* является использование иммерсивного медиа-контента для вовлечения пользователей в симулирующий контент, когда они испытывают ощущение присутствия в другой, новой среде [9, 10]. Это сильно отличается от двухмерных компьютерных игровых реализаций. Присутствие здесь относится к ощущению фактического пребывания в среде, созданной технологическими средствами [11]. Движение, испытываемое в программе виртуальной реальности, содержит элементы, которые могут вызывать изменение соматосенсорных и вестибулярных

систем, тесно связанных с равновесием [12]. Более того, при движении в виртуальной среде визуальная информация, которая в основном влияет на контроль баланса, изменяет активность системы концентрации внимания, опорно-двигательного аппарата [13]. Отмечается, что иммерсивная ВР-игра с движущимся фоном оказывает более негативное влияние на способность к статическому равновесию или нестабильность позы по сравнению с фиксированным фоном в положении стоя, а игра с движущимся фоном в соответствии с теорией постуральной нестабильности с большей вероятностью вызывает кибер-болезнь [14-16]. В виртуальной реальности пользователи могут испытывать симптомы укачивания, которые и называются виртуальной болезнью или кибер-болезнью. Возникновение кибер-болезни тесно связано с сенсорным конфликтом и ощущением отклонения или переноса ("*vection*"). Векция — это ощущение самодвижения в противоположном направлении. То есть ощущение самодвижения, когда большая область поля зрения движется, в то время как наблюдатель неподвижен [17–19]. Отклонение происходит потому, что картина оптического потока диктует направление и скорость движения объекта, возникающие в результате собственного движения наблюдателя [20]. Кроме того, исследователи обнаружили, что индивидуальные различия влияют на уровень ВР-болезни [21]. Хотя люди могут просматривать один и тот же ВР-контент через одно и то же устройство, уровень дискомфорта варьируется в зависимости от их индивидуальных особенностей.

Учитывая недавнее появление технологии иммерсивной виртуальной реальности [4], в которой используются дисплеи *HMD*, существуют ограниченные и только предварительные исследования влияния виртуальной среды на человека, отличия между играми с обычным дисплеем и иммерсивной виртуальной реальностью все еще в значительной степени недостаточно изучены, особенно в том, что касается их физической пользы для здоровья человека.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 26 здоровых испытуемых в количестве 10 мужчин и 16 женщин в возрасте от 20 до 26 лет. После проведенного клинического осмотра участников, патологий опорно-двигательного аппарата, а так же неврологических заболеваний выявлено не было. Для оценки вертикальной устойчивости применяли компьютерный стабилометрический комплекс "Стабилан 01–02" (Россия). Участники стояли без обуви, в носках на силовой платформе в стандартной европейской позиции пятки на расстоянии 2 см, носки врозь, руки вдоль туловища в нейтральном положении. Перед началом тестирования проводили центрирование – совмещение положения центра давления (ЦД) человека с началом координат.

Эксперимент проходил в 2 этапа: первый этап участники смотрели видеоряд в шлеме виртуальной реальности, затем перерыв 30 мин и второй этап — просмотр видеоряда с экрана телевизора. Каждая проба включала в себя запись статокинезиограммы в условиях: 1) до просмотра видеоряда; 2) в течение 1 мин во время просмотра видеоряда, 3) в течение 1 мин после просмотра видеоряда.

Для просмотра видеоряда в 3*D* режиме использовали шлем виртуальной реальности *HTC Vive*, из библиотеки *SteamVR* был выбран видеоряд "Скоростной поезд 360". В видео демонстрировали полет камеры над смоделированным на компьютере ландшафтом с видом от первого лица. Кроме гор, деревьев, моста, присутствовал движущийся объект — поезд.

При просмотре видео с экрана использовали телевизор *LG* 43*UK*6450 42.5 с диагональю 42.5 дюйма; экран телевизора был расположен на уровне глаз участника, расстояние от участника до экрана составляло 1.5 м. Был выбран аналогичный видеоряд "Скоростной поезд 360".

Оценку постуральной устойчивости проводили с использованием компьютерного стабилоанализатора, состоящий из двух блоков — воспринимающего (стабилоплатформа) и регистрирующего (компьютер и программное обеспечение). Воспринимающий блок представлял собой прямоугольную платформу, помещенную на металлические опоры с тензодатчиками, соединенными в виде двух независимых мостовых схем. Одна из них предназначена для регистрации колебаний ЦД тела в сагиттальной, вторая — во фронтальной плоскости. С помощью этих систем измеряется реакция опоры и вычисляется положение проекции ЦД. Регистрация колебаний ЦД и проведение всех расчетов обеспечивали соответствующим программным обеспечением стабилоанализатора *StabMed*.

При обработке статокинезиограммы анализировали следующие параметры: смещение ЦД по оси *X* (фронтальная плоскость, *MO* (*x*), мм) и по оси *Y* (сагиттальная плоскость *MO* (*y*), мм), среднеквадратическое отклонение смещения ЦД во фронтальной и сагиттальной плоскостях (*Qx* и *Qy*, мм); среднюю скорость перемещения ЦД во фронтальной и сагиттальной плоскостях, представленную отношением длины пути ЦД ко времени исследования (ЛСС, мм/с); площадь эллипса — показатель, описывающий 90% поверхности, занимаемой статокинезиограммой и отражающий площадь опоры испытуемого за время обследования (*ELLS*, мм^2); качество функции равновесия (КФР) – интегральный по-

казатель, рассчитанный по функции распределения векторов линейной скорости [22–24].

Стабилограмма состоит из хорошо видимых крупных волн, медленных изменений положения ЦД и накрадывающихся на них колебаний средней и малой величины. Сигналы с силовой платформы обрабатывали в автономном режиме с использованием программного обеспечения *MATLAB*. Для спектрального анализа были рассчитаны смещения ЦД методом быстрого преобразования Фурье, после чего был получен спектр плотности мощности по оригинальной методике (ID: 49196502. А.Д. Иванова, Т.В. Балтина, Г.Г. Яфарова, Л.М. Бикчентаева, М.В. Дакинова, Е.В. Семенова, свидетельство о государственной регистрации ПЭВМ № 2022661135: заявл. 08.06.2022, опубл. 15.06.2022). Затем спектр мощности был разделен на четыре частотных диапазона: зона сверх низких частот от 0 до 0.1 Гц, зона низких частот от 0.1 до 0.5 Гц, зона средних частот от 0.5 Гц до 2 Гц, зона высоких частот более 2 Гц [25]. Такое разделение на зоны было сделано на основе литературных данных, связывающий сверхнизкочастотный диапазон с вкладом визуальной информации в раскачивание тела, низкочастотный-диапазон с вестибулярной, средне-высокий диапазон с соматосенсорной и мозжечковой информацией, а высокочастотный – с проприоцептивной информацией [26, 27]. После этого общая спектральная мощность каждой области была нормализована суммой четырех областей и представлена в процентах.

Статистический анализ данных проводили с помощью пакетов статистических программ МедСтат. Непараметрические показатели результатов стабилометрии были оценены и представлены средним (*M*) и стандартным отклонением (±*SD*). Для сравнения групп использовали непараметрический метод (критерий Вилкоксона). Пороговый уровень статистической значимости принимали при значении критерия $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен анализ смещения ЦД по оси *X* (фронтальная плоскость, *МО* (*x*)) и по оси *Y* (сагиттальная плоскость, *МО* (*y*)), этот показатель, по литературным данным, может быть информативным при описании изменения равновесия в ответ на движущиеся в разном направлении стимулы [28, 29] (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что наибольшие смещения ЦД были во фронтальной плоскости, влево на 3.0 ± 1.0 мм при предъявлении видео в шлеме ВР. В сагиттальной плоскости (по оси *Y*) произошло изменение смещения ЦД у участников при предъявлении видео в шлеме ВР на 1.2 ± 0.7 мм вперед ($p < 0.05$), и это смещение совпадало с направлением движущегося объекта. При предъявлении видео на экране ТВ все участники в среднем продемонстрировали смещение

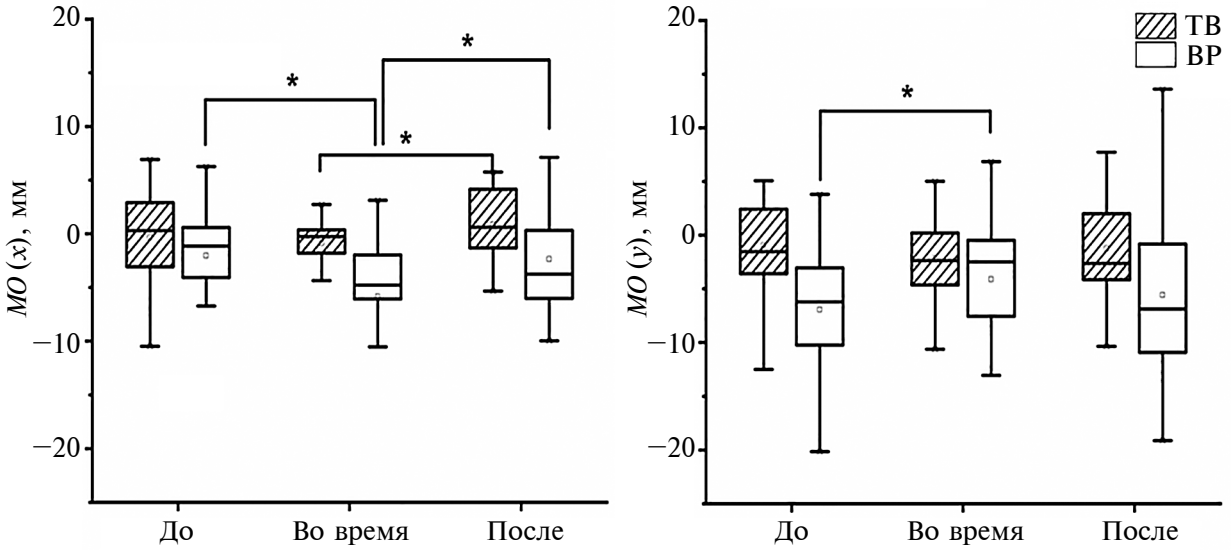

Рис. 1. Смещение центра давления (ЦД) во фронтальной плоскости, *МО* (*x*), и сагиттальной плоскости, *МО* (*y*). Белые столбики – значения параметра до, во время и после просмотра видео в шлеме виртуальной реальности (ВР): серые столбики – значения параметра до, во время и после просмотра видео с экрана телевизора; данные представлены в виде среднего, планки погрешностей — стандартное отклонение. * – $p \leqslant 0.05$, достоверность различий.

ЦД назад, т.е. в противоположную сторону движения объекта.

Наглядное смещение ЦД в целом демонстрирует площадь эллипса статокинезиограммы, изменение средних значений которого представлено на рис. 2. Как видно из рис. 2, при просмотре видео в шлеме ВР площадь эллипса увеличилась в 1.5 раза по сравнению с контролем ($p < 0.05$) (составила в среднем — 246.0 ± 34.7 мм^2), и не вернулась в исходное состояние после окончания просмотра. При просмотре видео на экране ТВ изменение площади эллипса статокинезиограммы не происходило.

Средняя линейная скорость (ЛСС) является производной длины траектории по времени и ее изменения характеризуют равномерность перемещения ЦД. Различия в изменении линейной скорости между периодами до и во время, а также до и после предъявления видеоряда участникам были аналогичны уже описанным изменениям колебания ЦД: наблюдали увеличение ЛСС при просмотре видеоряда в шлеме ВР, и отсутствие изменений при просмотре видео на экране ТВ (рис. 2).

Разброс среднеквадратического отклонения ЦД, характеризующий амплитуду колебаний ЦД в последовательные временные периоды во фронтальной плоскости увеличивался при просмотре видеоряда в шлеме ВР в среднем на 20% ($p < 0.05$) и не изменялся при просмотре на экране ТВ (рис. 3). Аналогичные изменения отклонения ЦД происходили и в сагиттальной плоскости (рис. 3). Наши результаты показали, что разброс среднеквадратического отклонения ЦД меньше при просмотре видео на экране ТВ, как во фронтальной, так и в сагиттальной плоскостях. Кроме того мы наблюдали, что при просмотре видео в шлеме ВР отклонение ЦД сохранялось и после просмотра ($p < 0.05$).

Оценка изменения функции качества равновесия (КФР) подтвердила разницу в позных ответах участников на предъявление видеоряда в шлеме ВР и на экране ТВ (рис. 4). При просмотре видеоряда в шлеме ВР значение КФР снижалось ($p < 0.05$), что говорит о низком качестве равновесия у этих участников. При просмотре видео на экране ТВ КФР не изменилось. До просмотра видеоряда на экране телевизора КФР участников в стандартной позе составило в среднем 86.4 ± 1.2%, во время просмотра — 86.8 ± 1.6%, после — 86.5 ± 1.8%; до просмотра видео в шлеме ВР — 84.9 ± 1.4%, во время просмотра — 79.0 ± 2.2% ($p < 0.05$), после — 85.3 ± 1.3% ($p < 0.05$) (рис. 4).

Таким образом, при просмотре видеоряда в шлеме ВР, по сравнению с экраном ТВ, колебания ЦД были более выражены, участники реагировали на движущиеся стимулы большими колебаниями ЦД в сагиттальной и, особенно, во фронтальной плоскости. Изменение равновесия сохранялось после окончания видео.

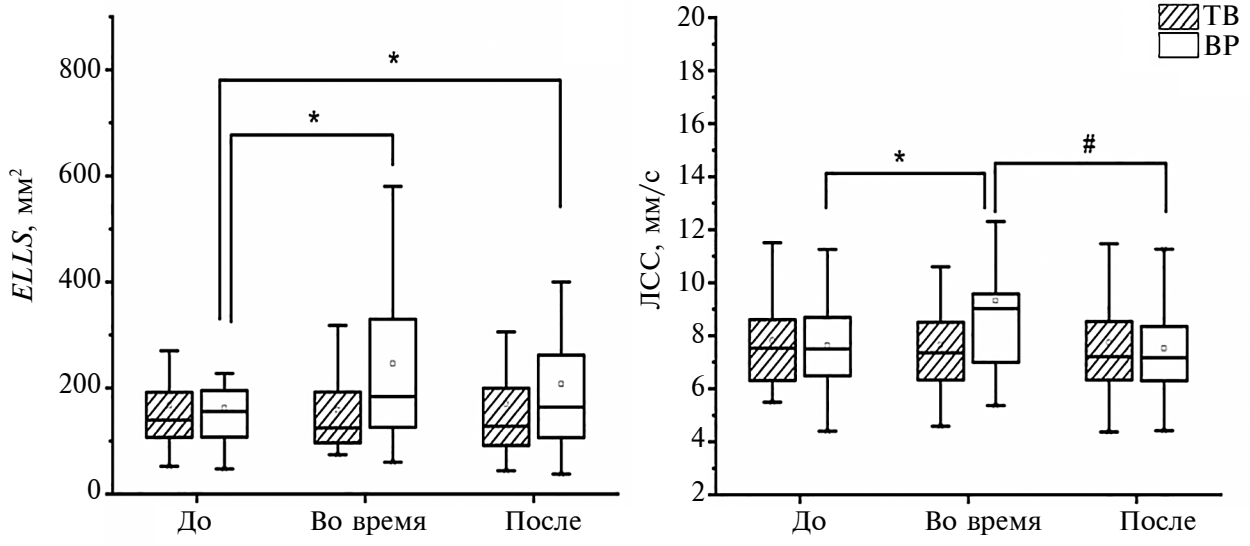

Рис. 2. Площадь статокинезиограммы участников (*ELLS*) и средняя линейная скорость смещения ЦД (ЛСС) до, во время и после просмотра видеоряда.
Заштрихованные столбики – при просмотре видео с экрана телевизора (ТВ); белые столбики – при просмотре видео в шлеме виртуальной реальности (ВР); данные представлены в виде медианы, разброс в группах — в виде интерквартильного размаха, усы — минимальное и максимальные значения, точка внутри бокса — среднее значение, точка за пределами бокса – выброс; * – $p \leqslant 0.05$, достоверность различий.

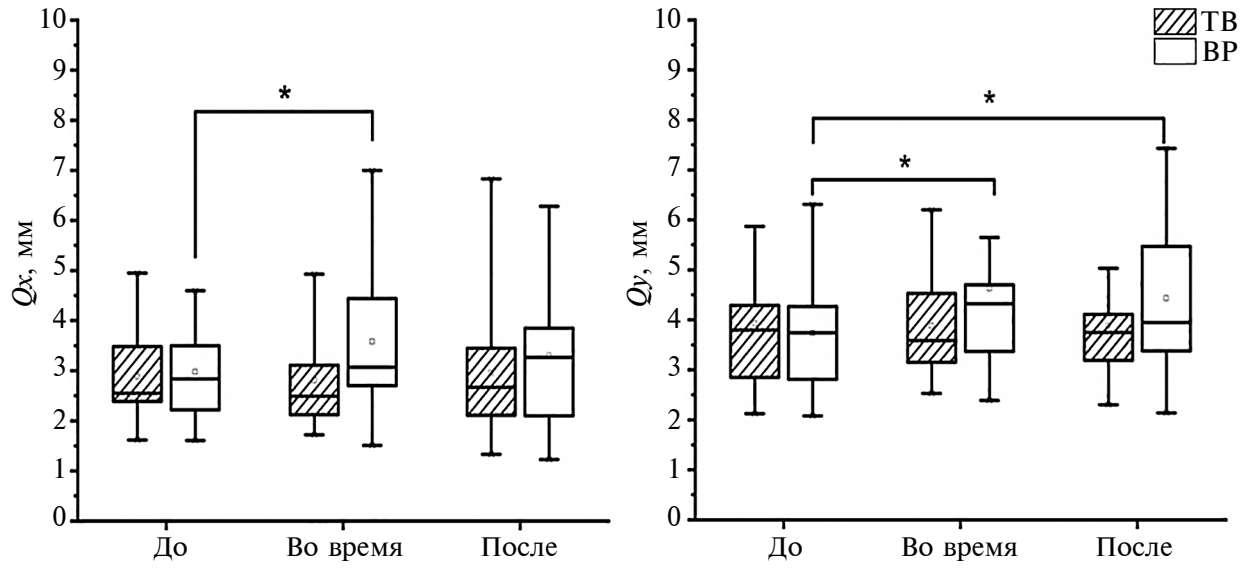

Рис. 3. Среднеквадратическое отклонение смещения ЦД во фронтальной (*Qx*) и сагиттальной (*Qy*) плоскостях. Остальные обозначения см. рис. 2.

Для оценки частотной характеристики колебаний ЦД участников были проанализированы спектры стабилограммы.

Во фронтальной плоскости во время просмотра видеоряда с экрана ТВ увеличивались низкочастотные колебания ЦД (*Pw*2, от 0.1 до 0.5 Гц), до просмотра значение *Pw*2 составляло в среднем 34 ± 6%, во время просмотра 38 ± 5%, после просмотра значение параметра увеличивалось и составляло в среднем 39 ± 6%; одновременно снижался вклад сверх-низкочастотных колебаний ЦД в среднем на 2%. В сагиттальной плоскости вклад разных частот колебаний ЦД во время просмотра видеоряда практически не изменялся.

При просмотре видеоряда в шлеме ВР были получены следующие изменения частотной составляющей спектра: фронтальные среднечастотные колебания ЦД уменьшились в среднем на 4%, одновременно возрастал вклад низкочастотных колебаний ЦД (в среднем на 2%). Сагиттальные сверх- и низкочастотные колебания ЦД уменьшились во время просмотра видеоряда, одновременно возрастал вклад более высокочастотных колебаний (зона *Pw*3 и *Pw*4). После прекращения просмотра вклад более высокочастотных колебаний возвращался к исходному уровню, вклад низкочастотных колебаний ЦД оставался сниженным, однако увеличивался вклад сверхнизкочастотных колебаний ЦД в общую суммарную мощность спектра.

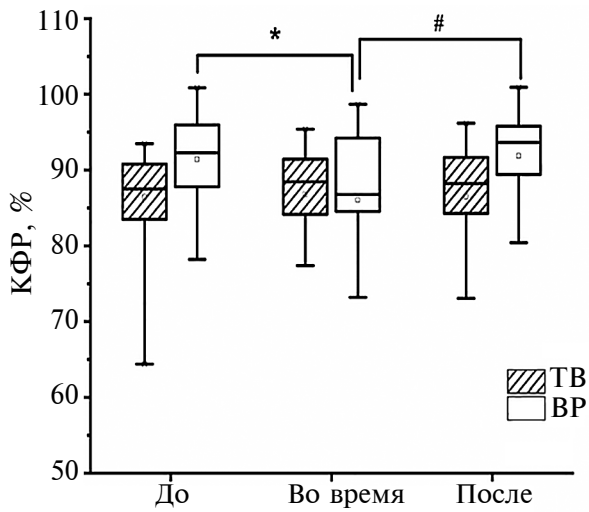

Рис. 4. Качество функции равновесия (КФР) испытуемых до, во время и после просмотра видеоряда. * – $p \leqslant 0.05$, достоверность различий. Остальные обозначения см. рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поддержание равновесия предполагает обработку трех типов информации: зрительной, соматосенсорной и вестибулярной [30]. Как правило, системы виртуальной реальности могут приводить к сенсорным конфликтам [31], особенно когда визуально воспринимаемая информация отличается от вестибулярной информации (например, зрительное восприятие смещения, когда тело неподвижно) [32]. Основная цель представленного исследования состояла в том, чтобы проанализировать как изменяется стабильность позы

в результате использования технологии ВР при предъявлении изображения в шлеме ВР и с экрана телевизора. Мы показали, что как при просмотре видео на экране, так и в шлеме виртуальной реальности в сравнении с контрольными тестами (до просмотра) наблюдались изменения стабилометрических показателей участников исследования. Однако при просмотре участниками видеоряда с применением *HMD* наблюдалось более значимое смещение классических и векторных показателей статокинезиограммы. Аналогичные результаты были получены при изучении различий в постуральной устойчивости при тестировании в реальных и виртуальных средах. Так, было показано, что воздействие виртуальной среды изменяет постуральную устойчивость аналогично изменениям в пробе с закрытыми глазами [33]. В исследовании, с участием здоровых молодых людей, было продемонстрировано отрицательное влияние *HMD* на динамическое равновесие, связанное, как полагают авторы с развитием сенсомоторного конфликта [34]. Тем не менее, некоторые исследования не обнаружили изменения постуральной устойчивости, например, при спокойной стойке в шлеме ВР [35], или при игре в шлеме ВР по сравнению с демонстрацией игры на экране телевизора [36], что связано, возможно, с различными условиями погружения в ВР.

Большинство авторов считают, что просмотр видео в ВР оказывает больший эффект по сравнению с просмотром на экране дисплея на баланс человека, так как происходит погружение человека в среду (в нашем случае это движение, полет рядом с движущимся поездом), где визуальная информация дает мозгу команду о том, что в данный момент совершается движение, хотя тело человека неподвижно стоит в вертикальной стойке. Эта рассогласованность информации ведет к увеличению колебаний ЦД [37]. Постуральная нестабильность возникает, когда визуальные, проприоцептивные и вестибулярные сигналы не совпадают с ожидаемыми ощущениями человека [38]. Когда пользователи ВР испытывают ощущения собственного движения в отсутствие фактического физического движения, эти изменения в динамике окружающей среды приводят к изменениям в центральной нервной системе (ЦНС). Сенсорные конфликты вызывают постуральную нестабильность. Со временем ЦНС адаптируется к виртуальной среде, воспринимая динамику виртуальной среды как динамику реального мира, что влияет на контроль равновесия [17, 18]. Как только воздействие виртуальной среды завершается, и пользователи возвращаются к нормальным условиям реальной жизни, адаптированная ЦНС может неблагоприятно повлиять на способность поддерживать постуральную стабильность в их обычной среде [38].

В настоящем исследовании после просмотра видеоряда в шлеме ВР также не наблюдалось восстановление стабилометрических показателей, что говорит о том, что кратковременное пребывание в иммерсивной виртуальной среде даже с отсутствием динамической составляющей приводит к нарушению равновесия, хотя и кратковременному. Схожие данные получили *B. Cieślik et al.*, они показали, что после сеанса ВР произошло увеличение исследуемых параметров смещения ЦД у пожилых женщин, и только через 2 мин все исследованные параметры вернулись к исходному уровню [39]. В работе были даны рекомендации о том, что после сеансов погружения в ВР необходим небольшой отдых в сидячем положении, для восстановления равновесия.

Наши результаты показали, что просмотр видео в шлеме ВР изменил визуальную обратную связь, что привело к более быстрому (более высокая средняя скорость смещения ЦД, ЛСС), вариабельному (увеличение среднеквадратичного отклонения ЦД, Q) и более регулируемому (большее отклонение ЦД, особенно во фронтальной плоскости, и увеличение площади статокинезиограммы) раскачиванию тела. В качестве динамических характеристик управления балансом принято рассматривать ЛСС и Q. В частности, было показано, что Q, характеризует постуральную нестабильность [40], а ЛСС рассматривается как более надежная величина, содержащая как пространственную, так и частотную информацию о смещении ЦД, а также отражает количество корректировок, выполняемых системой постурального контроля [41, 42]. В целом, большее смещение ЦД (большее Q) должно сопровождаться более быстрой регулировкой ЦД (более высокая ЛСС) для поддержания баланса, что и наблюдалось в нашем эксперименте. Изменение колебаний в сагиттальной плоскости было меньше, чем во фронтальной. Контроль равновесия во фронтальной и сагиттальной плоскостях производятся скоординированной активацией различных мышц (соответственно бедра и голени) [43, 44], и обусловлен взаимодействием двух независимых постуральных подсистем, синергетическое действие которых соответствует задаче удержания равновесия. По-видимому, стабилизация в сагиттальной плоскости была связана со сложностью многоуровневой активной нервно-мышечной регуляцией, в то время как колебания ЦД во фронтальной плоскости не могло хорошо контролироваться с помощью аналогичных стратегий.

Проведенный нами спектральный анализ стабилографического сигнала может облегчить интерпретацию полученных результатов. При просмотре видео в шлеме ВР наблюдали значимое снижение доли полосы пропускания <0.10 Гц (связанной со зрительной системой). Во фронтальной плоскости снижение было компенсиро-

вано увеличением доли частот низкочастотного диапазона 0.10–0.39 Гц (вестибулярная система), а в сагиттальной плоскости компенсация происходила за счет смещения спектра в среднечастотный диапазон 0.39–1.56 Гц (мозжечок). Снижение доли сверхнизких частот описано для испытания с закрытыми глазами [45]. Можно предполагать, что уменьшение сверхнизких частот связано с изменением визуального восприятия, вызванного очками ВР. И для достижения постуральной стабильности ЦНС использует доступную сенсорную информацию для задействования вестибулярного аппарата и мозжечка. В общем, на твердой поверхности всем участникам удавалось сохранять равновесие при просмотре видео в шлеме ВР. На твердой поверхности система постурального контроля получает стабильные сенсорные сигналы от проприоцептивных сигналов для поддержания стабильности. Проприоцептивные сигналы дают референтное представление о положении тела в пространстве относительно опорной поверхности и позволяют испытуемому сохранять равновесие, даже при изменении зрительной информации, поскольку первичным сенсорным источником информации об ориентации тела в пространстве считается проприоцептивный [46].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании было показано, что у здоровых молодых людей возникают нарушения равновесия при просмотре видеоряда в шлеме виртуальной реальности, но не при просмотре этого видео на экране телевизора. Просмотр видеоряда в шлеме ВР оказывал большее влияние на стабилографические параметры в сторону увеличения постуральной неустойчивости. Во время просмотра видео с экрана ТВ и в шлеме ВР снижался вклад зрительной информации в поддержание постуральной устойчивости в сагиттальной плоскости, однако при просмотре с экрана ТВ при этом увеличивалась роль вестибулярной информации для регулирования позы, а при просмотре в ВР увеличивался вклад соматосенсорной информации и мозжечка, это может говорить о том, что виртуальная реальность требует подключения более осознанных корректирующих механизмов для стабилизации позы.

Можно полагать, что использование виртуальной иммерсивной среды может иметь большое значение в реабилитации, поскольку может помочь в оценке и улучшении равновесия в различных условиях, а также позволяет моделировать проблемные ситуации. Оценка статического и динамического равновесия обычно проводится в контролируемой среде с ограниченными стимулами, что не соответствует реальным жизненным ситуациям. Обеспечивая комбинацию визуальных и слуховых стимуляций, *HMD* может воссоздавать сцены повседневной жизни и, таким образом, может обеспечивать более точную оценку баланса.

Соблюдение этических стандартов. Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Локальным этическим комитетом Казанского (Приволжского) федерального университета (Казань), протокол № 34 от 27.01.2022 г.

Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов в публикацию. М.Э. Балтин, А.А. Шульман, Т.В. Балтина — идея работы и планирование эксперимента, обсуждение результатов, написание и редактирование манускрипта. Л.М. Бикчентаева, С.О. Бикеева, А.Ф. Желтухина — проведение эксперимента, сбор и обработка экспериментальных данных. Л.М. Бикчентаева, М.Э. Балтин — статистический анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kari T., Kosa M.* Acceptance and use of virtual reality games: an extension of HMSAM // Virtual Reality. 2023. V. 27. P. 1585.
2. *Chang E., Kim H., Yoo B.* Virtual reality sickness: A review of causes and measurements // Int. J. Hum. Comput. Interact. 2020. V. 36. № 17. P. 1658.
3. *Tao G., Garrett B., Taverner T. et al.* Immersive virtual reality health games: A narrative review of game design // J. Neuroeng. Rehabil. 2021. V. 18. № 1. P. 31.
4. *Zeng N., Pope Z., Lee J., Gao Z.* Virtual reality exercise for anxiety and depression: A preliminary review of current research in an emerging field // J. Clin. Med. 2018. V. 7. № 3. P. 42.
5. *Aygün C., Çakir-Atabek H.* Alternative model for physical activity: Active video games lead to high physiological responses // Res. Q. Exerc. Sport. 2022. V. 93. № 3. P. 447.
6. *Sápi M., Domján A., Fehérné Kiss A., Pintér S.* Is Kinect training superior to conventional balance training for healthy older adults to improve postural control? // Games Health J. 2018. V. 8. № 1. P. 41.
7. *Bacha J.M.R., Gomes G.C.V., de Freitas T.B. et al.* Effects of Kinect adventures games versus conventional physical therapy on postural control in elderly people: A randomized controlled trial // Games Health J. 2017. V. 7. № 1. P. 24.

8. *Doré B., Gaudreault A., Everard G. et al.* Acceptability, feasibility, and effectiveness of immersive virtual technologies to promote exercise in older adults: A systematic review and meta-analysis // Sensors (Basel). 2023. V. 23. № 5. P. 2506.
9. *Lyu K., Globa A., Brambilla A., de Dear R.* An immersive multisensory virtual reality approach to the study of human-built environment interactions: Technical workflows // MethodsX. 2023. V. 11. P. 102279.
10. *Garrett B., Taverner T., Gromala D. et al.* Virtual reality clinical research promises and challenges // JMIR Serious Games. 2018. V. 6. № 4. P. e10839.
11. *Borrego A., Latorre J., Alcañiz M., Llorens R.* Embodiment and presence in virtual reality after stroke. A comparative study with healthy subjects // Front. Neurol. 2019. V. 10. P 1061.
12. *Tossavainen T., Juhola M., Pyykkö I. et al.* Development of virtual reality stimuli for force platform posturography // Int. J. Med. Inform. 2003. V. 70. № 2–3. P. 277.
13. *Luo H., Wang X., Fan M. et al.* The effect of visual stimuli on stability and complexity of postural control // Front. Neurol. 2018. V. 9. P. 48.
14. *Oh H., Lee G.* Feasibility of full immersive virtual reality video game on balance and cybersickness of healthy adolescents // Neurosci. Lett. 2021. V. 760. P. 136063.
15. *Chang E., Kim H.T., Yoo B.* Virtual reality sickness: A review of causes and measurements // Int. J. Hum. Comput. Interact. 2020. V. 36. № 17. P. 1658.
16. *Pettijohn K.A., Geyer D., Gomez J. et al.* Postural instability and simulator seasickness // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2018. V. 89. № 7. P. 634.
17. *Bos J.E., Bles W., Groen E.L.* A theory on visually induced motion sickness // Displays. 2008. V. 29. P. 47.
18. *Nooij S.A.E., Pretto P., Oberfeld D. et al.* Vection is the main contributor to motion sickness induced by visual yaw rotation: Implications for conflict and eye movement theories // PLoS One. 2017. V. 12. № 4. P. e0175305.
19. *Palmisano S., Allison R.S., Schira M.M.* Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases // Front. Psychol. 2015. V. 6. P. 193.
20. *Widdowson C., Becerra I., Merrill C. et al.* Assessing postural instability and cybersickness through linear and angular displacement // Hum. Factors. 2021. V. 63. № 2. P. 296.
21. *Dennison M.S., Wisti A.Z., D'Zmura M.* Use of physiological signals to predict cybersickness // Displays. 2016. V. 44. P. 42.
22. *Усачев В.И., Слива С.С., Беляев В.Е. и др.* Новая методология обработки стабилометрической информации и проблемы широкого внедрения ее в практику // Известия ЮФУ. Технические науки. 2006. Т. 11. С. 138.
23. *Доценко В.И., Усачев В.И., Морозова С.В., Скедина М.А.* Современные алгоритмы стабилометрической диагностики постуральных нарушений в клинической практике // Медицинский Совет. 2017. Т. 8. С. 116.
24. *Błaszczyk J.W., Beck M.* Posturographic standards for optimal control of human standing posture // J. Hum. Kinet. 2023. V. 86. P. 7.
25. *Lin I.S., Lai D.M., Ding J.J. et al.* Reweighting of the sensory inputs for postural control in patients with cervical spondylotic myelopathy after surgery // J. Neuroeng. Rehabil. 2019. V. 16. № 1. P. 96.
26. *Дакинова М.В., Бикчентаева Л.М., Саченков О.А. и др.* Спектральный анализ стабилографических сигналов методами Фурье и Гильберта–Хуанга / VIII Международная конференция по информационным технологиям и нанотехнологиям (ITNT). Самара, 23-27 мая 2022 г. // IEEE Xplore. doi: 10.1109/ITNT55410.2022. 9848704
27. *Wodarski P.* Trend change analysis as a new tool to complement the evaluation of human body balance in the time and frequency domains // J. Hum. Kinet. 2023. V. 87. P. 51.
28. *Андреева И.Г., Гвоздева А.П., Боброва Е.В.* Постуральные ответы на движущиеся звуковые образы в зависимости от ведущей сенсорной модальности при ориентации в пространстве // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2019. Т. 105. № 2. С. 178.
29. *Кожина Г.В., Левик Ю.С., Попов А.К., Сметанин Б.Н.* Поддержание вертикальной позы на твердой податливой опорах при разных размерах объекта, обеспечивающего зрительную обратную связь // Физиология человека. 2022. Т. 48. № 1. С. 5.
30. *Mergner T., Schweigart G., Maurer C., Blumle A.* Human postural responses to motion of real and virtual visual environments under different support base conditions // Exp. Brain Res. 2005. V. 167. № 4. P. 535.
31. *Reed-Jones R.J., Vallis L.A., Reed-Jones J.G., Trick L.M.* The relationship between postural stability and virtual environment adaptation // Neurosci. Lett. 2008. V. 435. № 3. P. 204.
32. *Nishiike S., Okazaki S., Watanabe H. et al.* The effect of visual-vestibulosomatosensory conflict induced by virtual reality on postural stability in humans // J. Med. Invest. 2013. V. 60. № 3–4. P. 236.
33. *Michnik R., Jurkojć J., Wodarski P. et al.* The influence of the scenery and the amplitude of visual disturbances in the virtual reality on the maintaining the balance // Arch. Budo. 2014. V. 10. P. 133.
34. *Robert MT., Ballaz L., Lemay M.* The effect of viewing a virtual environment through a head-mounted display on balance // Gait Posture. 2016. V. 48. P. 261.
35. *Chiarovano E., de Waele C., MacDougall H.G. et al.* Maintaining balance when looking at a virtual reality three-dimensional display of a field of moving dots

or at a virtual reality scene // Front. Neurol. 2015. V. 6. P. 164.

36. *Xu W., Liang H.N., Yu. Y. et al.* Assessing the effects of a full-body motion-based exergame in virtual reality / Proceedings of the Seventh International Symposium of Chinese CHI. Association for computing machinery, Xiamen, China, June 2019. doi: 10.1145/3332169.3333574
37. *Urabe Y., Kazuki F., Keita H. et al.* The application of balance exercise using virtual reality for rehabilitation // Healthcare. 2002. V. 10. № 4. P. 680.
38. *da Silva Marinho A., Terton U., Jones C.* Cybersickness and postural stability of first time VR users playing VR videogames // Appl. Ergon. V. 101. P. 103698.
39. *Cieślik B., Szczepańska-Gieracha J., Serweta-Pawlik A., Klajs K.* Virtual therapeutic garden: A promising method supporting the treatment of depressive symptoms in late-life: A randomized pilot study // J. Clin. Med. 2021. V. 10. № 9. P. 1942.
40. *Raymakers J.A., Samson M.M., Verhaar H.J.* The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s) // Gait Posture. 2005. V. 21. № 1. P. 48.
41. *Piirtola M., Era P.* Force platform measurements as predictors of falls among older people – A review // Gerontology. 2006. V. 52. № 1. P. 1.
42. *Quijoux F., Nicolaï A., Chairi I. et al.* A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code // Physiol. Rep. 2021. V. 9. P. 22. P. e15067.
43. *Warnica M.J., Weaver T.B., Prentice S.D., Laing A.C.* The influence of ankle muscle activation on postural sway during quiet stance // Gait Posture. 2014. V. 39. № 4. P. 1115.
44. *Zhang Y., Kiemel T., Jeka J.* The influence of sensory information on two-component coordination during quiet stance // Gait Posture. 2007. V. 26. № 2. P. 263.
45. *Chagdes J.R., Rietdyk S., Haddad J.M. et al.* Multiple timescales in postural dynamics associated with vision and a secondary task are revealed by wavelet analysis // Exp. Brain Res. 2009. V. 197. № 3. P. 297.
46. *Hwang S., Agada P., Kiemel T., Jeka J.J.* Dynamic reweighting of three modalities for sensor fusion // PLoS One. 2014. V. 31. № 9. P. e88132.

REFERENCES

1. *Kari T., Kosa M.* Acceptance and use of virtual reality games: an extension of HMSAM // Virtual Reality. 2023. V. 27. P. 1585.
2. *Chang E., Kim H., Yoo B.* Virtual reality sickness: A review of causes and measurements // Int. J. Hum. Comput. Interact. 2020. V. 36. № 17. P. 1658.
3. *Tao G., Garrett B., Taverner T. et al.* Immersive virtual reality health games: A narrative review of game design // J. Neuroeng. Rehabil. 2021. V. 18. № 1. P. 31.
4. *Zeng N., Pope Z., Lee J., Gao Z.* Virtual reality exercise for anxiety and depression: A preliminary review of current research in an emerging field // J. Clin. Med. 2018. V. 7. № 3. P. 42.
5. *Aygün C., Çakir-Atabek H.* Alternative model for physical activity: Active video games lead to high physiological responses // Res. Q. Exerc. Sport. 2022. V. 93. № 3. P. 447.
6. *Sápi M., Domján A., Fehérné Kiss A., Pintér S.* Is Kinect training superior to conventional balance training for healthy older adults to improve postural control? // Games Health J. 2018. V. 8. № 1. P. 41.
7. *Bacha J.M.R., Gomes G.C.V., de Freitas T.B. et al.* Effects of Kinect adventures games versus conventional physical therapy on postural control in elderly people: A randomized controlled trial // Games Health J. 2017. V. 7. № 1. P. 24.
8. *Doré B., Gaudreault A., Everard G. et al.* Acceptability, feasibility, and effectiveness of immersive virtual technologies to promote exercise in older adults: A systematic review and meta-analysis // Sensors (Basel). 2023. V. 23. № 5. P. 2506.
9. *Lyu K., Globa A., Brambilla A., de Dear R.* An immersive multisensory virtual reality approach to the study of human-built environment interactions: Technical workflows // MethodsX. 2023. V. 11. P. 102279.
10. *Garrett B., Taverner T., Gromala D. et al.* Virtual reality clinical research promises and challenges // JMIR Serious Games. 2018. V. 6. № 4. P. e10839.
11. *Borrego A., Latorre J., Alcañiz M., Llorens R.* Embodiment and presence in virtual reality after stroke. A comparative study with healthy subjects // Front. Neurol. 2019. V. 10. P 1061.
12. *Tossavainen T., Juhola M., Pyykkö I. et al.* Development of virtual reality stimuli for force platform posturography // Int. J. Med. Inform. 2003. V. 70. № 2–3. P. 277.
13. *Luo H., Wang X., Fan M. et al.* The effect of visual stimuli on stability and complexity of postural control // Front. Neurol. 2018. V. 9. P. 48.
14. *Oh H., Lee G.* Feasibility of full immersive virtual reality video game on balance and cybersickness of healthy adolescents // Neurosci. Lett. 2021. V. 760. P. 136063.
15. *Chang E., Kim H.T., Yoo B.* Virtual reality sickness: A review of causes and measurements // Int. J. Hum. Comput. Interact. 2020. V. 36. № 17. P. 1658.
16. *Pettijohn K.A., Geyer D., Gomez J. et al.* Postural instability and simulator seasickness // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2018. V. 89. № 7. P. 634.
17. *Bos J.E., Bles W., Groen E.L.* A theory on visually induced motion sickness // Displays. 2008. V. 29. P. 47.
18. *Nooij S.A.E., Pretto P., Oberfeld D. et al.* Vection is the main contributor to motion sickness induced by visual yaw rotation: Implications for conflict and eye movement theories // PLoS One. 2017. V. 12. № 4. P. e0175305.
19. *Palmisano S., Allison R.S., Schira M.M.* Future challenges for vection research: definitions,

functional significance, measures, and neural bases // Front. Psychol. 2015. V. 6. P. 193.

20. *Widdowson C., Becerra I., Merrill C. et al.* Assessing postural instability and cybersickness through linear and angular displacement // Hum. Factors. 2021. V. 63. № 2. P. 296.
21. *Dennison M.S., Wisti A.Z., D'Zmura M.* Use of physiological signals to predict cybersickness // Displays. 2016. V. 44. P. 42.
22. *Usachev V.I., Sliva S.S., Belyaev V.E. et al.* [Novaya metodologiya obrabotki stabilometricheskoi informatsii i problemi shirokogo vnedreniya yee v praktiku] // Izvestiya TRTU. 2006. V. 11. P. 138.
23. *Dotsenko V.I., Usachev V.I., Morozova S.V., Skedina M.A.* Modern algorithms of postural disturbances in clinical practice // Meditsinskiy Sovet – Medical Council. 2017. V. 8. P. 116.
24. *Błaszczyk J.W., Beck M.* Posturographic standards for optimal control of human standing posture // J. Hum. Kinet. 2023. V. 86. P. 7.
25. *Lin I.S., Lai D.M., Ding J.J. et al.* Reweighting of the sensory inputs for postural control in patients with cervical spondylotic myelopathy after surgery // J. Neuroeng. Rehabil. 2019. V. 16. № 1. P. 96.
26. *Dakinova M.V., Bikchentaeva L.M., Tagirova I.S. et al.* Spectral analysis of stabilographic signals by Fourier and Hilbert–Huang methods / VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, 23-27 May, 2022 // IEEE Xplore. doi: 10.1109/ITNT55410.2022.9848704
27. *Wodarski P.* Trend change analysis as a new tool to complement the evaluation of human body balance in the time and frequency domains // J. Hum. Kinet. 2023. V. 87. P. 51.
28. *Andreeva I.G., Gvozdeva A.P., Bobrova E.V.* [Postural responses on moving sound images depending on the dominant sensory modality in case of spatial orientation] // Ross. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenov. 2019. V. 105. № 2. P. 178.
29. *Kozhina G.V., Levik Yu.S., Popov A.K., Smetanin B.N.* Maintaining an upright posture with different sizes of the object providing visual feedback on rigid and compliant supports // Human Physiology. 2022. V. 48. № 1. P. 1.
30. *Mergner T., Schweigart G., Maurer C., Blumle A.* Human postural responses to motion of real and virtual visual environments under different support base conditions // Exp. Brain Res. 2005. V. 167. № 4. P. 535.
31. *Reed-Jones R.J., Vallis L.A., Reed-Jones J.G., Trick L.M.* The relationship between postural stability and virtual environment adaptation // Neurosci. Lett. 2008. V. 435. № 3. P. 204.
32. *Nishiike S., Okazaki S., Watanabe H. et al.* The effect of visual-vestibulosomatosensory conflict induced by virtual reality on postural stability in humans // J. Med. Invest. 2013. V. 60. № 3–4. P. 236.
33. *Michnik R., Jurkojć J., Wodarski P. et al.* The influence of the scenery and the amplitude of visual disturbances in the virtual reality on the maintaining the balance // Arch. Budo. 2014. V. 10. P. 133.
34. *Robert M.T., Ballaz L., Lemay M.* The effect of viewing a virtual environment through a head-mounted display on balance // Gait Posture. 2016. V. 48. P. 261.
35. *Chiarovano E., de Waele C., MacDougall H.G. et al.* Maintaining balance when looking at a virtual reality three-dimensional display of a field of moving dots or at a virtual reality scene // Front. Neurol. 2015. V. 6. P. 164.
36. *Xu W., Liang H.N., Yu. Y. et al.* Assessing the effects of a full-body motion-based exergame in virtual reality / Proceedings of the Seventh International Symposium of Chinese CHI. Association for Computing Machinery, Xiamen, China, June 2019. Doi: 10.1145/3332169.3333574
37. *Urabe Y., Kazuki F., Keita H. et al.* The application of balance exercise using virtual reality for rehabilitation // Healthcare. 2002. V. 10. № 4. P. 680.
38. *da Silva Marinho A., Terton U., Jones C.* Cybersickness and postural stability of first time VR users playing VR videogames // Appl. Ergon. V. 101. P. 103698.
39. *Cieślik B., Szczepańska-Gieracha J., Serweta-Pawlik A., Klajs K.* Virtual therapeutic garden: A promising method supporting the treatment of depressive symptoms in late-life: A randomized pilot study // J. Clin. Med. 2021. V. 10. № 9. P. 1942.
40. *Raymakers J.A., Samson M.M., Verhaar H.J.* The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s) // Gait Posture. 2005. V. 21. № 1. P. 48.
41. *Piirtola M., Era P.* Force platform measurements as predictors of falls among older people – a review // Gerontology. 2006. V. 52. № 1. P. 1.
42. *Quijoux F., Nicolaï A., Chairi I. et al.* A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code // Physiol. Rep. 2021. V. 9. P. 22. P. e15067.
43. *Warnica M.J., Weaver T.B., Prentice S.D., Laing A.C.* The influence of ankle muscle activation on postural sway during quiet stance // Gait Posture. 2014. V. 39. № 4. P. 1115.
44. *Zhang Y., Kiemel T., Jeka J.* The influence of sensory information on two-component coordination during quiet stance // Gait Posture. 2007. V. 26. № 2. P. 263.
45. *Chagdes J.R., Rietdyk S., Haddad J.M. et al.* Multiple timescales in postural dynamics associated with vision and a secondary task are revealed by wavelet analysis // Exp. Brain Res. 2009. V. 197. № 3. P. 297.
46. *Hwang S., Agada P., Kiemel T., Jeka J.J.* Dynamic reweighting of three modalities for sensor fusion // PLoS One. 2014. V. 31. № 9. P. e88132.

To Evaluate the Impact of Watching a Video Sequence in a Virtual Reality Helmet and on a TV Screen on a Person's Postural Stability

L. M. Bikchentaeva[a], A. A. Shulman[a, *], M. E. Baltin[a, b], S. O. Bikeeva[a], A. F. Zheltukhina[a], T. V. Baltina[a]

[a] *Institute of Fundamental Biology and Medicine of KFU, Kazan, Russia*

[b] *Volga Region State University of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, Russia*

**E-mail: ani_07@mail.ru*

The paper presents an analysis of changes in postural stability when a person is presented with a video sequence in a virtual reality helmet and from a TV screen. Postural stability was assessed using a computer stabilometer complex. Changes in the stabilometric indicators compared with control tests (before viewing) were shown for both cases (watching videos on the screen and in a virtual reality helmet). Besides, viewing a video sequence in a virtual reality helmet had a greater impact on the instability. While watching a video from a TV screen and in a virtual reality helmet, the contribution of visual information to maintaining balance in the sagittal plane decreased. However, while watching from the TV screen, the contribution of vestibular information for posture control increased. When viewed with virtual reality helmet, the contribution of somatosensory information and the cerebellum increased. The results may suggest that virtual reality requires more conscious corrective mechanisms to stabilize posture.

Keywords: postural stability, stabilography, pressure center, virtual reality.