

УДК 612.821

## ВЛИЯНИЕ НЕПОДВИЖНЫХ ТОЧЕЧНЫХ МЕТОК НА ПОДДЕРЖАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ВИРТУАЛЬНЫМ ТРЕХМЕРНЫМ ОБЪЕКТОМ, ПРИВЯЗАННЫМ К КОЛЕБАНИЯМ ТЕЛА

© 2022 г. Г. В. Кожина<sup>1</sup>, Ю. С. Левик<sup>1</sup>, А. К. Попов<sup>1</sup>, Б. Н. Сметанин<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

\*E-mail: boris\_smetanin@hotmail.com

Поступила в редакцию 07.05.2022 г.

После доработки 16.06.2022 г.

Принята к публикации 24.06.2022 г.

Исследовали влияние дополнительной зрительной информации на процесс поддержания вертикальной позы на податливой опоре. Испытуемые стояли в стерео очках и маске, ограничивающей поле зрения, в затемненной комнате перед экраном, на который проецировалось трехмерное изображение темно-серого шара. Виртуальный шар покрывал поле зрения примерно в 36 град. Предъявление шара сочеталось с введением дополнительных неподвижных объектов (точек площадью 1 см<sup>2</sup>). Последние в количестве одной или четырех могли присутствовать в разных местах, но в пределах площади, покрываемой шаром. В контрольных пробах шар был неподвижен. В тестовых пробах положение шара зависело от колебаний тела в переднезаднем и боковом направлениях таким образом, что смещения тела вызывали движение шара в том же самом (синфазная связь, СФ) или противоположном направлениях (противофазная связь, ПФ). Вклад зрительного контроля в поддержание позы оценивали по изменениям амплитудно-частотных характеристик элементарных переменных, вычислившихся из траектории центра давления стоп (ЦД). Этими переменными были вертикальная проекция центра тяжести тела (ЦТ) и разность между ЦД и вертикальной проекцией центра тяжести (ЦД–ЦТ). Анализ переменных ЦТ и ЦД–ЦТ выявил четкую зависимость их спектров от направления связи между смещениями тела и шара, а также влияние на эту зависимость наличия неподвижных точек. Так, в тестовых пробах при стоянии с открытыми глазами и в отсутствии дополнительных неподвижных точек колебания в сагиттальной плоскости значительно увеличивались по сравнению с контролем. В частности, в условиях СФ увеличение среднеквадратического значения амплитудных спектров (*RMS*) было примерно в 2.5 раза, а при ПФ – в 2 раза, при этом значения *RMS* спектров были также существенно больше, чем при стоянии с закрытыми глазами. При добавлении одной неподвижной точки в центре экрана в качестве неподвижного ориентира колебания практически не менялись. При добавлении четырех точек, симметрично расположенных на удалении в 8.75 см от центра экрана *RMS* спектров обеих переменных уменьшались на 20–25%. При увеличении расстояния между точками до 35 см наблюдалось дальнейшее уменьшение колебаний тела: на 30–35%. При расстоянии 70 см между точками (равном диаметру шара) *RMS* спектров уменьшались на 45–50%. В этих условиях величина колебаний тела становилась примерно такой же, как при закрытых глазах. Таким образом, показано, что в условиях нестабильности зрительного окружения присутствие стационарных объектов малой величины существенно влияет на поддержание позы, но качество стояния все равно остается ниже, чем при неподвижном зрительном окружении.

**Ключевые слова:** вертикальная поза, зрительная дестабилизация, виртуальная зрительная среда, сенсомоторный конфликт, стабилография.

**DOI:** 10.31857/S0131164622700151

Центральная нервная система (ЦНС) учитывает действие гравитации при планировании целенаправленных движений и управлении ими. Гравитационное воздействие на тело зависит от ориентации тела относительно вектора силы тяжести, поэтому для точного планирования и выполнения движений ЦНС должна оценивать оба направления [1–5]. Гравитационная вертикаль и ориентация тела в пространстве оцениваются

мозгом путем интеграции сенсорных входов, прежде всего, от вестибулярной и соматосенсорной систем. Эти сигналы изменяются в зависимости от ориентации тела относительно вектора силы тяжести, что в итоге требует непрерывной оценки направления гравитации и ориентации тела [6–8]. С другой стороны, зрительная система также вносит свой вклад в восприятие тела и его вертикальности. Показано, например, что при

наблюдении за виртуальным объектом во фронтальной плоскости его наклон смещает воспринимаемую зрительную вертикаль в направлении этого наклона [9]. Это явление известно, как “эффект стержня и рамки” (“*rod-and-frame effect*”) [10], показывает, что наклон видимого виртуального объекта влияет на восприятие вертикальности. Более того, зрительно воспринимаемое движение, такое как вращение виртуальной сцены, во фронтальной плоскости может наклонять субъективную зрительную вертикаль и поструральную вертикаль [11] в сторону направления вращения, хотя эффективность динамических визуальных стимулов подвержена индивидуальным различиям [12]. Интересно, что быстрые и точные настройки для восприятия вертикальности были продемонстрированы лишь для положений всего тела, близких к вертикальному, тогда как для положений тела с заметным наклоном в ту или иную сторону была выявлена систематическая пере- или недооценка для задач, зависящих от зрения, таких как определение субъективной визуальной вертикали [13, 14], но не для задач, независимых от зрения, таких как определение субъективной тактильной вертикали [15] или субъективной тактильной горизонтали [16]. В совокупности все эти данные свидетельствуют о том, что дополнительные зрительные сигналы могут существенно влиять на оценку вертикальности внешнего окружения и, следовательно, на эффективность поддержания вертикальной позы.

Настоящее исследование является продолжением выполненных нами ранее работ, [17, 18], в которых выяснялось, как величина видимого виртуального объекта (шара), обеспечивающего зрительную обратную связь, влияет на поддержание вертикальной позы при стоянии на обычной и податливой опорах. Было показано, что и на податливой, и на твердой опоре увеличение размеров неподвижного шара приводило к уменьшению амплитуды колебаний тела, а увеличение размеров подвижного шара к их увеличению. Ухудшение качества стояния в условиях податливой опоры отражалось в изменении как амплитудных, так и частотных характеристик колебаний двух переменных: центра тяжести тела (ЦТ) и разницы между центром давления тела и центром тяжести (ЦД–ЦТ). Так, если на твердой опоре частота колебаний ЦТ при неподвижном шаре имела тенденцию к росту с увеличением размера шара, а при подвижном – к уменьшению, то на податливой опоре частотные характеристики колебаний тела менялись по-другому: частота колебаний ЦТ при неподвижном шаре уменьшалась с увеличением его размера, а при подвижном – практически не изменялась. Частота колебаний переменной ЦД–ЦТ во время стояния на податливой опоре при неподвижном окружении отчетливо возрастала с увеличением размеров шара, а

при подвижном окружении – уменьшалась. При поддержании позы на твердой опоре частота колебаний переменной ЦД–ЦТ практически не менялась. Таким образом, зависимость амплитудных и частотных характеристик колебаний тела при стоянии от зрительных условий на твердой и податливой опоре была различной. Можно предположить, что эти различия связаны с изменением относительных вкладов зрительных и проприоцептивных источников информации в поддержание равновесия на податливой опоре. На твердой опоре присутствие более надежной тактильной информации от опорной поверхности улучшает стояние в условиях нестационарной зрительной среды. В связи с этим можно предположить, что в таких условиях появление даже небольших стационарных зрительных ориентиров может существенно повлиять на поддержание позы.

В настоящем исследовании мы, используя похожую схему эксперимента с применением видимого виртуального объекта (шара) диаметром 70 см, попытались выяснить, что происходит с амплитудными и частотными параметрами колебаний тела при поддержании вертикальной позы на податливой опоре в условиях проецирования на экран в разных местах неподвижных точек небольшой площади (1 см<sup>2</sup>) дополнительно к шару.

## МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 13 здоровых испытуемых – семь мужчин (средний возраст  $52.3 \pm 4.8$  года) и шесть женщин ( $55.0 \pm 4.4$  года). Участвовавшие в экспериментальном исследовании испытуемые были практически здоровы и, согласно данным опроса, ранее не переносили неврологических заболеваний и заболеваний вестибулярной и мышечной систем. В процессе проведения исследования испытуемые стояли в удобной обуви на квадратной платформе стабиллографа (Стабилан-01-2 – ЗАО ОКБ “РИТМ”, Россия). С помощью последнего регистрировали изменения положения центра давления стоп (ЦД) на опору. Стопы испытуемых находились в удобном положении, при этом пятки были расставлены на расстояние 6–10, а носки – на 18–22 см.

При поддержании вертикальной позы испытуемые смотрели на экран (высота 1.5 м и ширина 2 м), изготовленный из ткани, которая в минимальной степени деполяризует падающий на нее свет (*silver screen*). На экране с помощью, так называемого, пассивного способа [19] формировали трехмерное стереоизображение шара диаметром 70 см. Для этого на экран с двух проекторов (*Sharp XR-10X*), снабженных поляризационными фильтрами, ориентированными ортогонально относительно друг друга, одновременно проецировали два изображения одного и того же шара. Испытуемые и проекторы находились по одну

сторону от экрана. На испытуемых надевали очки с поляризационными фильтрами (3DS-GS (Панорама), "Stel – Computer Systems Ltd.", Россия; частота чередований 120 Гц), ориентированными параллельно соответствующим фильтрам проекторов, что обеспечивало трехмерное восприятие виртуальной зрительной среды (ВЗС). Поле зрения испытуемых было ограничено очками, составляя примерно  $60^\circ$  по вертикали и  $80^\circ$  по горизонтали, и не выходило за пределы экрана. Испытуемые стояли в затемненной комнате и видели только виртуальное трехмерное изображение шара, окрашенного в темно-серый цвет.

Шар диаметром 70 см (площадью  $3848.45 \text{ см}^2$ ) располагался в центре экрана и покрывал поле зрения в  $36 \text{ град}$ . В контроле видимый шар был неподвижен (неподвижное зрительное окружение, НЗО), а в тестовых условиях непрерывно смещался, поскольку был связан синфазно или противофазно (ПФ и СФ) с колебаниями ЦТ тела в переднезаднем и боковом направлениях. Амплитуда колебаний шара в 2 раза превышала амплитуду колебаний ЦТ тела.

В ходе обследования испытуемые поддерживали спокойную вертикальную позу стоя на податливой опоре (ПО). Податливую опору создавали с помощью квадратной пластины поролона толщиной 10 см, который помещали на платформу стабилотографа и накрывали сверху пластиной жесткой фанеры толщиной 10 мм; размер пластины совпадал с размером платформы. Податливость поролона составляла около 3 см при давлении  $0.5 \text{ Н/см}^2$ . Сама платформа стабилотографа оставалась неподвижной.

Всего во время эксперимента каждый испытуемый выполнял 48 проб: по 4 пробы при открытых и закрытых глазах (ОГ и ЗГ), по 4 пробы при ПФ и СФ связях наблюдаемого шара с колебаниями ЦТ, по 4 пробы при ПФ- и СФ-связях шара при наличии неподвижной точки, исходно (в покое) выставленной в центре шара, по 4 пробы при ПФ- и СФ-связях шара при наличии 4-х неподвижных точек, исходно (в покое) спроецированных на экран на расстоянии 8.75 см от центра шара, по 4 пробы при ПФ- и СФ-связях шара при наличии 4-х неподвижных точек, исходно (в покое) спроецированных на экран на расстоянии 35 см от центра шара, по 4 пробы при ПФ- и СФ-связях шара при наличии 4-х неподвижных точек, исходно (в покое) спроецированных на экран на расстоянии 70 см от центра шара. Длительность каждой пробы составляла 40 с. Во время проб испытуемые смотрели на шар и старались спокойно стоять на стабилотографе. И при обычном стоянии на податливой опоре, и при стоянии с дополнительно вводимыми неподвижными точками все пробы разбивались на блоки, каждый из которых включал в себя четыре кон-

трольные пробы с неподвижным шаром и восемь проб, в которых движение шара было привязано противофазно либо синфазно к колебаниям ЦТ тела. Пробы производили с интервалом в 30–40 с. После каждого блока испытуемый отдыхал сидя в течение 2–3 мин. Оценивали амплитудно-частотные характеристики двух элементарных переменных, вычислявшихся из траекторий центра давления стоп (ЦД) в переднезаднем и боковом направлениях: траектории проекции ЦТ тела на опору (переменная ЦТ) и разности между траекториями ЦД и ЦТ (переменная ЦД–ЦТ).

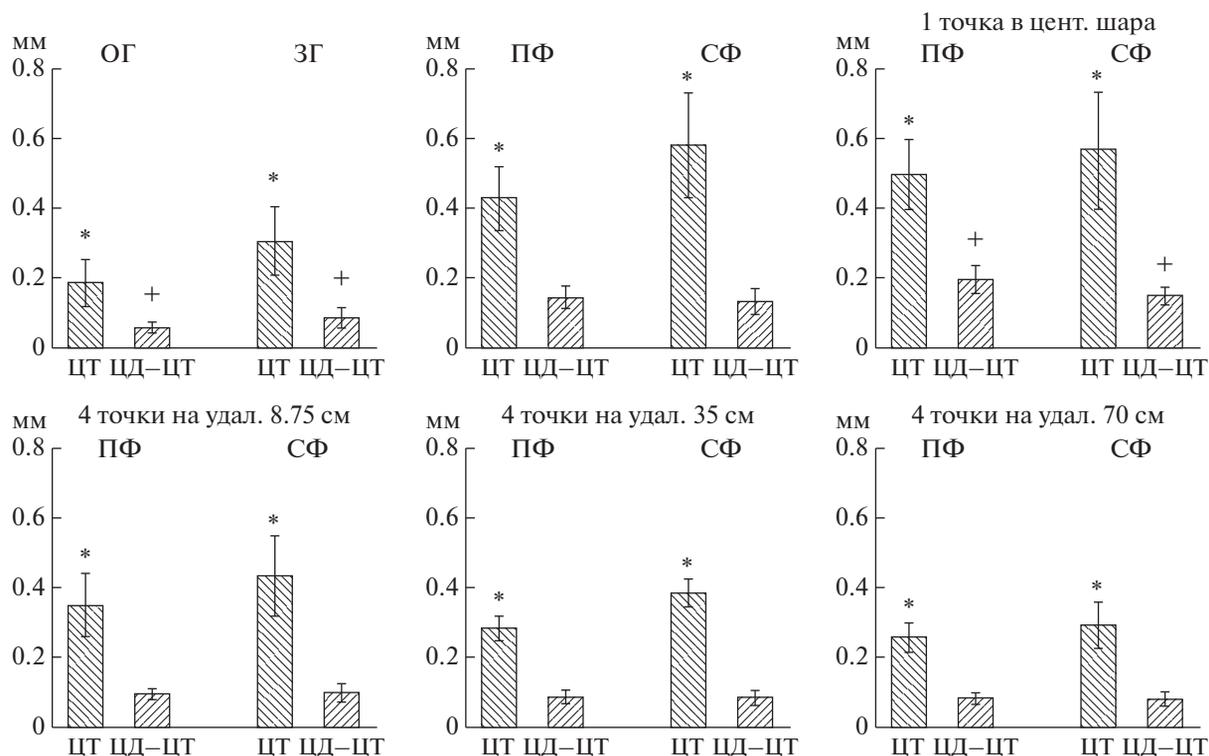
Оценку влияния разных условий на поддержание вертикальной позы производили, анализируя изменения медианной частоты ( $MF$ ) и среднеквадратического значения ( $RMS$ ) амплитудных спектров исследуемых переменных в диапазонах 0–0.5 Гц для переменной ЦТ и 0–3.0 Гц для переменной ЦД–ЦТ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Анализ  $RMS$  и  $MF$  спектров колебаний исследуемых переменных, вычисленных из колебаний ЦД в переднезаднем направлении.* На рис. 1 представлены усредненные по всем испытуемым значения  $RMS$  амплитудных спектров для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ в условиях, когда видимое трехмерное изображение шара было неподвижным при ОГ и ЗГ, и когда оно смещалось из-за присутствия ПФ- и СФ-связи между положением шара и колебаниями тела, в том числе при дополнительном введении на экран в разных местах неподвижных точек.

Из рис. 1 видно, что значения  $RMS$  спектров исследуемых переменных в условии ОГ были наименьшими. При стоянии с ЗГ они увеличивались примерно в полтора раза. Попарное сравнение значений  $RMS$  спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ для условий ОГ и ЗГ выявило статистически достоверную разницу между ними: для переменной ЦТ ( $(t \text{ Stat} = -8.378 \text{ при } p(T \leq t) 2.173E-11)$ ) и для переменной ЦД–ЦТ ( $(t \text{ Stat} = -8.403 \text{ при } p(T \leq t) 1.992E-11)$ ).

В двух других зрительных условиях, при ПФ- и СФ-связи в отсутствие неподвижных точек, наблюдалось еще большее увеличение  $RMS$  спектров обеих переменных по сравнению с условием ОГ, что, соответственно, отразилось на результатах попарного сравнения между ними. В частности, для переменной ЦТ статистическое исследование различий между ОГ и ПФ дало ( $(t \text{ Stat} = -8.716 \text{ при } p(T \leq t) 6.612E-12)$ ), а при попарном сравнении этой переменной между условиями ОГ и СФ было получено ( $(t \text{ Stat} = -1, 676 \text{ при } p(T \leq t) 3.419E-19)$ ). Попарное статистическое сравнение спектров переменной ЦД–ЦТ при зрительных условиях ОГ и ПФ и ОГ и СФ, показало также очень высо-



**Рис. 1.** *RMS* (мм) спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ и их стандартные ошибки, полученные в контрольных пробах при открытых глазах (ОГ) и закрытых глазах (ЗГ) и при тестовых пробах во время противофазной (ПФ) и синфазной (СФ) между положением шара и колебаниями тела в отсутствии и при наличии неподвижных точек на экране. ЦТ – центр тяжести тела. ЦД – центр давления стопы. Сагиттальное направление. Звездочками отмечены достоверные различия между переменными ЦТ, крестиками – достоверные различия между переменными ЦД–ЦТ.

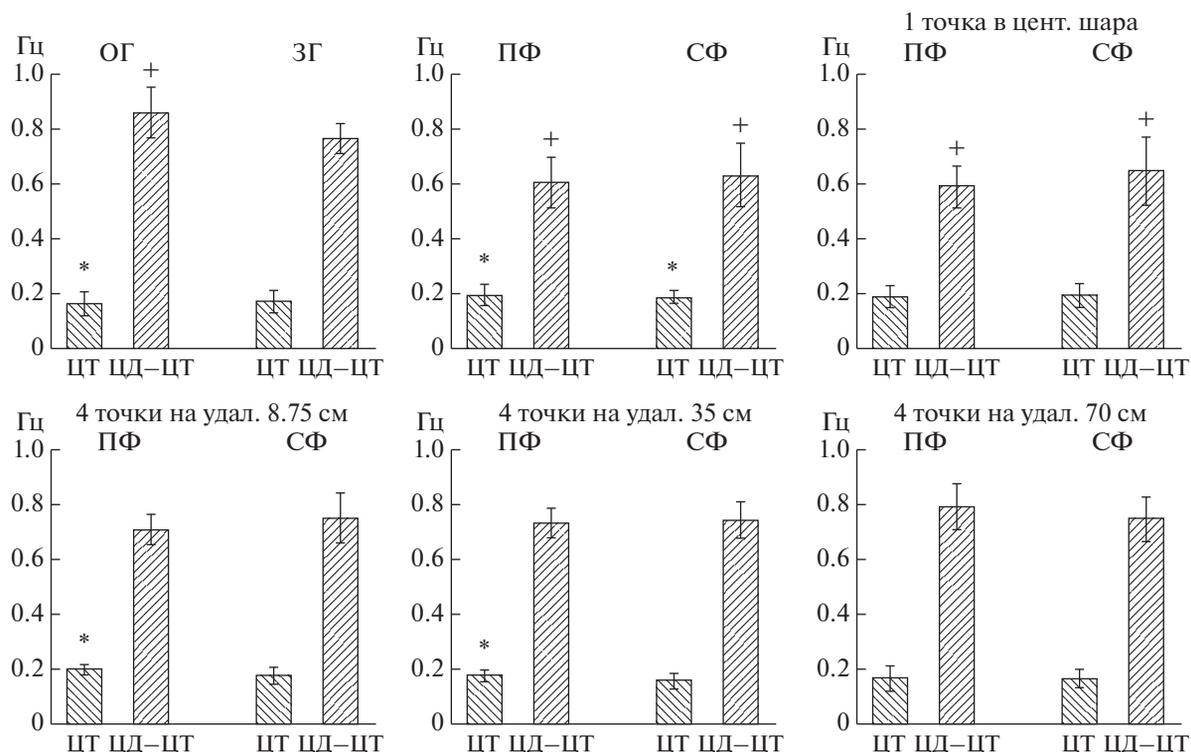
кую степень различий между ними ( $(t \text{ Stat} = -1.676$  при  $p(T \leq t) 3.43E-18$ ) и  $(t \text{ Stat} = -1.675$  при  $p(T \leq t) 3.139E-22$ ) соответственно.

Добавление одной неподвижной точки в центре экрана, которая могла служить дополнительным ориентиром и точкой отсчета при поддержании позы в условиях СФ и ПФ, незначительно повлияло на зависимость *RMS* спектров обеих переменных от направления связи между колебаниями тела и смещениями шара. Тем не менее, статистический анализ при парном сравнении выявил небольшие различия между ПФ-колебаниями в этих условиях и ПФ-колебаниями при отсутствии дополнительной точки на экране. Так для переменной ЦТ статистическая оценка различий между *RMS* спектрами в условиях ПФ и ПФ + 1 точка показала ( $(t \text{ Stat} = -4.156$  при  $p(T \leq t) 0.007$ ), а для переменной ЦД–ЦТ дало ( $(t \text{ Stat} = -2.132$  при  $p(T \leq t) 0.01418$ ). Различий между *RMS* спектрами СФ-колебаний, полученными для обычных условий и для условий с дополнительной точкой на экране, выявлено не было.

Добавление четырех неподвижных точек на экран значительно повлияло на *RMS* спектров

ЦТ и ЦД–ЦТ, полученных в условиях ПФ и СФ. Из рис. 1 видно, что с увеличением расстояния 4-х неподвижных точек от центра экрана *RMS* спектров обеих переменных уменьшались. Однако дисперсионный анализ выявил достоверное влияние фактора “удаление 4 точек от центра экрана” для ЦТ (при ПФ –  $F_{2, 36} = 4.368$ ,  $p < 0.021$  и при СФ –  $F_{2, 36} = 4.328$ ,  $p < 0.0207$ ). Из рис. 1 также видно, что *RMS* спектров ЦД–ЦТ и в условиях с предъявлением четырех неподвижных точек также были меньше, чем в условии с предъявлением одной точки, что и подтвердила статистика попарного сравнения. В частности, для переменной ЦД–ЦТ статистическое исследование различий между условиями при ПФ-связи с предъявлением одной точки и четырех точек с удалением 8.75 см дало ( $(t \text{ Stat} = 5.353$  при  $p(T \leq t) 0.0015$ ), а при СФ – ( $(t \text{ Stat} = 2.41$  при  $p(T \leq t) 0.03$ ). При предъявлении для сравнения ситуаций с четырьмя точками на удалении от центра на 35 и 70 см эти различия были более выраженными.

На рис. 2 представлены усредненные по всем испытуемым значения *MF* спектров для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, вычисленные по результатам



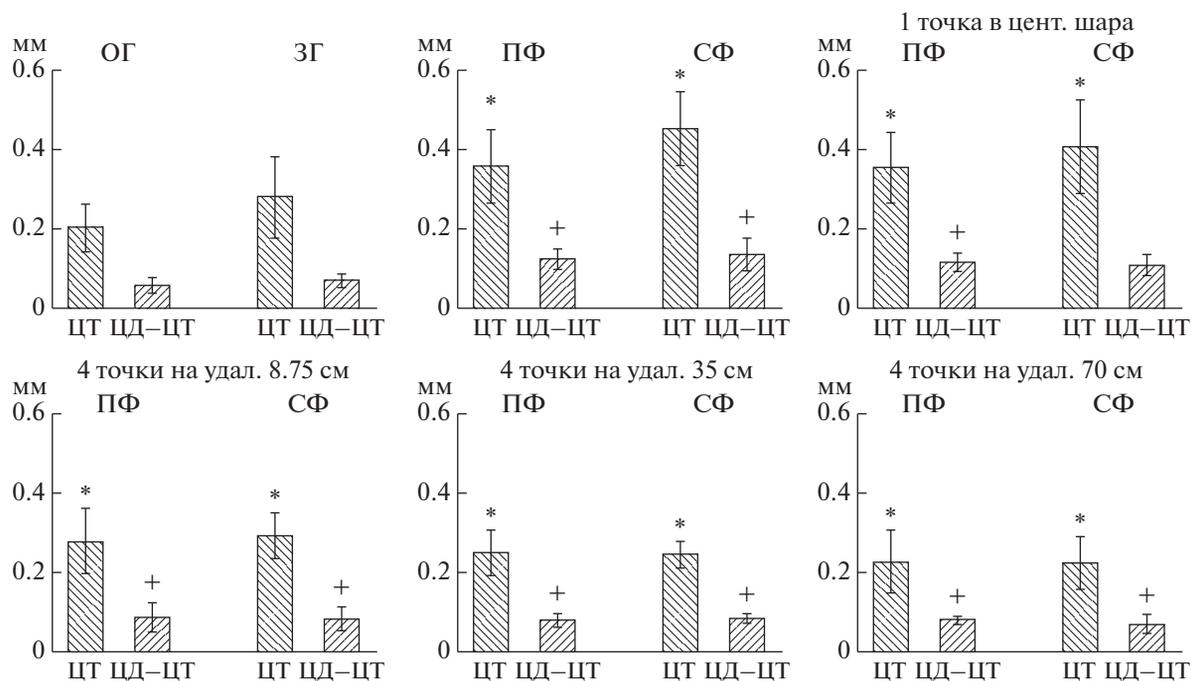
**Рис. 2.** *MF* ( $\Gamma_C$ ) спектров переменных ЦТ и ЦД-ЦТ и их стандартные ошибки, вычисленные из стабильграмм, полученных в контрольных пробах (неподвижное зрительное окружение, ОГ и закрытые глаза, ЗГ) и в тестовых пробах во время противофазной (ПФ) и синфазной связей (СФ) положения шара с колебаниями тела в отсутствии и при наличии неподвижных точек на экране. Обозначения см. рис. 1.

анализа поддержания вертикальной позы на податливой опоре, когда видимое трехмерное изображение шара было неподвижным при ОГ и ЗГ и когда оно смещалось из-за присутствия ПФ- или СФ-связи между положением шара и колебаниями тела, в том числе, при дополнительном введении на экран в разных местах неподвижных точек.

Из рис. 2 видно, что *MF* спектров ЦТ при ОГ менялись в исследуемых условиях не так, как *RMS*: по сравнению с контролем они увеличивались при наличии ПФ- и СФ-связей положения шара с колебаниями тела в отсутствие дополнительных точек на экране и в условии ПФ при проецировании четырех точек с удалением 8.75 см от центра экрана. Во всех остальных условиях с присутствием точек на экране наблюдался возврат их значений к уровню в условии ОГ. В частности, применение парного *t*-теста при сравнении спектров частот, полученных в контроле при ОГ со спектрами для условий ПФ и СФ показало достоверное увеличение *MF* спектров ЦТ в отсутствие точек на экране ( $t \text{ Stat} = -3.887$  при  $p(T \leq t) 0.0023$  и  $t \text{ Stat} = -2.103$  при  $p(T \leq t) 0.034$  (соответственно для ПФ и СФ)) и для условия ПФ в присутствии

четырёх точек с удалением 8.75 см ( $t \text{ Stat} = -2.293$  при  $p(T \leq t) 0.031$ ). В остальных же условиях с присутствием точек на экране в условиях ПФ и СФ наблюдался возврат *MF* спектров ЦТ к их уровню в условии ОГ.

Изменения *MF* спектров ЦД-ЦТ были несколько иным: в контрольных условиях (при ОГ) частоты были наибольшими, а в условиях ПФ и СФ без дополнительных точек на экране и с одной точкой в центре экрана – наименьшими. Применение парного *t*-теста показало достоверность различий для условия без точек ( $t \text{ Stat} = 6.978$  при  $p(T \leq t) 5.75E-05$  и  $t \text{ Stat} = 4.721$  при  $p(T \leq t) 0.034$  – соответственно для ПФ и СФ), и для условия с одной точкой ( $t \text{ Stat} = 6.075$  при  $p(T \leq t) 0.0001$  и  $t \text{ Stat} = 4.424$  при  $p(T \leq t) 0.001$  – соответственно для ПФ и СФ)). В условиях с использованием четырех неподвижных точек на экране значения *MF* спектров ЦД-ЦТ приблизились к уровню результатов их оценки при ОГ, существенно превысив уровень *MF*, полученный в условиях ПФ и СФ без дополнительных точек. В частности, попарное сравнение *MF* спектров ЦД-ЦТ, полученных в условиях с точками при их удалении на 70 см, и *MF* спектров для условий



**Рис. 3.** *RMS* (мм) спектров переменных ЦТ и ЦД-ЦТ и их стандартные ошибки, полученные в контрольных пробах при открытых глазах (ОГ) и закрытых глазах (ЗГ) и при тестовых пробах во время противофазной (ПФ) и синфазной связях (СФ) между положением шара и колебаниями тела в отсутствии и при наличии неподвижных точек на экране. Фронтальное направление. Обозначения см. рис. 1.

ПФ и СФ без точек показало статистически достоверные отличия между ними ( $t Stat = 4.239$  при  $p(T \leq t) 0.0014$  и  $t Stat = 3.268$  при  $p(T \leq t) 0.006$  – соответственно для ПФ и СФ)).

*Анализ RMS и MF спектров колебаний исследуемых переменных, вычисленных из колебаний ЦД в боковом направлении.* На рис. 3 представлены значения *RMS* амплитудных спектров для переменных ЦТ и ЦД-ЦТ, вычисленные по результатам анализа колебаний тела в боковом направлении при ОГ в условиях, когда изображение шара на экране было неподвижным, при ЗГ и при ОГ, когда изображение шара смещалось из-за присутствия ПФ- или СФ-связи между положением шара и колебаниями тела, и, в том числе, в условиях с дополнительным введением на экран неподвижных точек.

Из рис. 3 видно, что значения *RMS* спектров исследуемых переменных в условии ОГ были наименьшими. При стоянии с ЗГ они увеличивались примерно на 40%. Однако попарное сравнение значений *RMS* спектров переменных ЦТ и ЦД-ЦТ для условий ОГ и ЗГ выявило статистически достоверную разницу только для переменной ЦТ: ( $t Stat = -1.972$  при  $p(T \leq t) 0.042$ )).

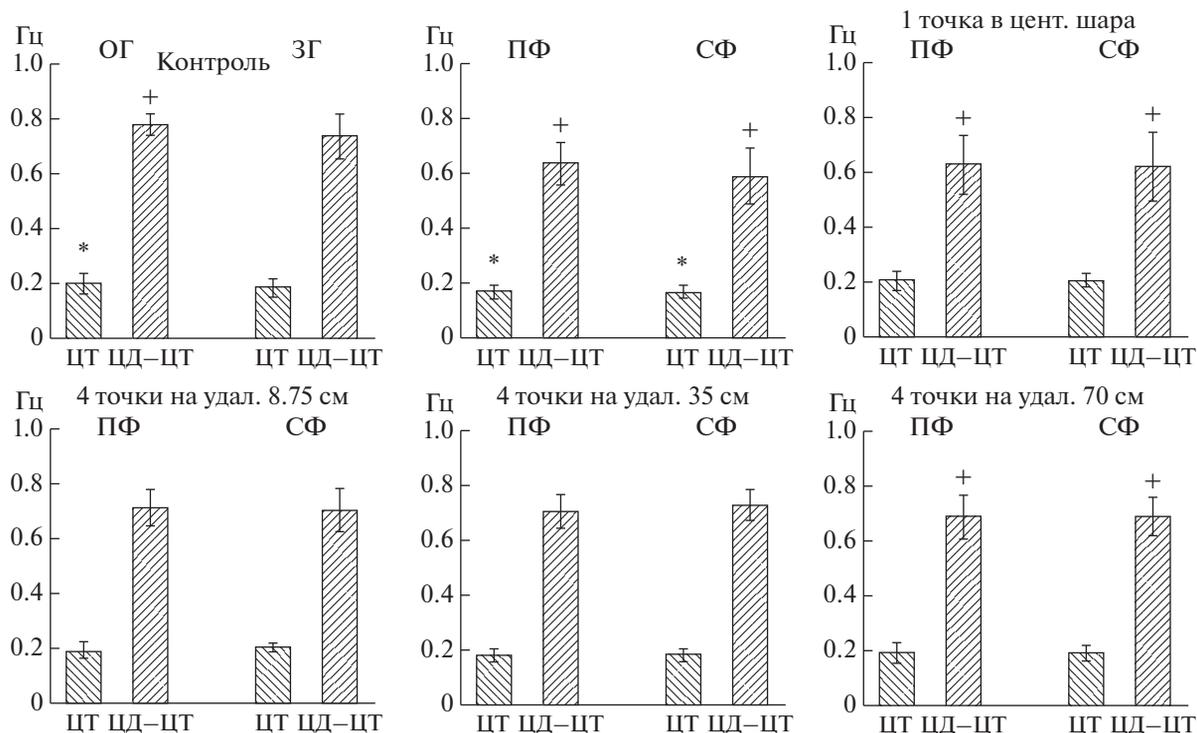
При ПФ- или СФ-связи в отсутствие неподвижных точек, увеличение *RMS* спектров обеих переменных по сравнению с условием ОГ было

еще больше. Попарное сравнение между условиями поддержания позы ОГ и ПФ-связи показало статистически значимые различия и для переменной ЦТ ( $t Stat = -5.572$  при  $p(T \leq t) 0.000264$ ), и для переменной ЦД-ЦТ ( $t Stat = -6.546$  при  $p(T \leq t) 8.959E-05$ )). Сравнение же *RMS* спектров, полученных в условиях ОГ и СФ-связи, также выявило существенные различия: для переменной ЦТ ( $t Stat = -5.298$  при  $p(T \leq t) 0.00036$ ) и для переменной ЦД-ЦТ ( $t Stat = -6.65$  при  $p(T \leq t) 8.04E-05$ )).

Как видно из рис. 3 помещение на экран одной неподвижной точки практически не сказалось на *RMS* (мм) спектров обеих переменных.

В пробах с введением на экран четырех неподвижных точек наблюдалось постепенное уменьшение *RMS* (мм) спектров переменных ЦТ и ЦД-ЦТ с увеличением расстояния между четырьмя точками. Попарное сравнение *RMS* спектров переменной ЦТ между условиями ПФ и ПФ + 4 точки с расстоянием 8.75 см дало ( $t Stat = 2.015$  при  $p(T \leq t) 0.0421$ )), с расстоянием 35 см ( $t Stat = 5.89$  при  $p(T \leq t) 0.0009$ )), а с расстоянием 70 см ( $t Stat = 3.46$  при  $p(T \leq t) 0.008$ )).

*RMS* спектры переменной ЦД-ЦТ тоже уменьшались с увеличением расстояния между четырьмя точками, но не так выражено. Попарное сравнение *RMS* спектров переменной ЦД-ЦТ



**Рис. 4.** *MF* (Гц) спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ и их стандартные ошибки, вычисленные из стабильграмм, полученных в контрольных пробах при открытых и закрытых глазах (ОГ и ЗГ) и в тестовых пробах во время противофазной (ПФ) и синфазной связей (СФ) положения шара с колебаниями тела как в отсутствии, так и при наличии неподвижных точек на экране.

Фронтальное направление. Обозначения см. рис. 1.

между условиями ПФ и ПФ + 1 точки и условиями СФ и СФ + 1 точки с расстоянием не выявило существенных различий в сравниваемых группах данных. Однако уже при сравнении условий ПФ и ПФ + 4 точки с расстоянием 8.75 см и условий СФ и СФ + 4 точки статистическое исследование показало существенные различия ( $t \text{ Stat} = 1.973$  при  $p(T \leq t) 0.047$ ) и ( $t \text{ Stat} = 2.866$  при  $p(T \leq t) 0.017$ ) соответственно. При сравнении же *RMS* спектров переменной ЦД–ЦТ между условиями ПФ и ПФ + 4 точки с расстоянием 70 см и *RMS* между условиями СФ и СФ + 4 точки с расстоянием 70 см были выявлены более существенные различия: ( $t \text{ Stat} = 3.43$  при  $p(T \leq t) 0.0093$ ) и ( $t \text{ Stat} = 3.517$  при  $p(T \leq t) 0.0084$ ) соответственно.

На рис. 4 представлены усредненные по всем испытуемым значения *MF* спектров для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, вычисленные из колебаний тела в боковом направлении, когда видимое трехмерное изображение шара было неподвижным при ОГ и ЗГ и когда оно смещалось из-за отсутствия ПФ- или СФ-связи между положением шара и колебаниями тела, в том числе, при дополнительном введении на экран в разных местах неподвижных точек.

В боковой плоскости *MF* спектров ЦТ претерпевали примерно те же изменения, что и в переднезадней плоскости, но менее выраженные: в отсутствие точек на экране они были также наименьшими в условиях ПФ- и СФ-связей. В частности, попарное сравнение *MF* спектров ЦТ в этих условиях с *MF*, полученными в контроле при ОГ, выявило ( $t \text{ Stat} = 1.921$  при  $p(T \leq t) 0.044$ ) и ( $t \text{ Stat} = 1.939$  при  $p(T \leq t) 0.045$ ) соответственно. При наличии же точек на экране *MF* спектров ЦТ как бы восстанавливали свою величину, приближаясь к контрольным значениям, полученным в условии ОГ.

*MF* спектров ЦД–ЦТ были также наибольшими в контрольных условиях (при ОГ), а в условиях ПФ и СФ без дополнительных точек на экране и с одной точкой в центре экрана – наименьшими. Применение парного *t*-теста для сравнения *MF* полученных просто при ОГ и в условиях ПФ и СФ, выявило достоверность различий между ними с ( $t \text{ Stat} = 4.959$ , при  $p(T \leq t) 0.0005$  и  $t \text{ Stat} = 4.893$  при  $p(T \leq t) 0.0006$  – соответственно для ПФ и СФ), а при сравнении частот при ОГ в контроле и при ОГ с присутствием одной точки ( $t \text{ Stat} = 4.168$  при  $p(T \leq t) 0.00021$  и  $t \text{ Stat} = 4.058$

при  $p(T \leq t)$  0.0024 – соответственно также между условиями ПФ и СФ)). Статистическая оценка по парному  $t$ -тесту выявила также различия между ОГ и условиями ПФ и СФ с присутствием точек на расстоянии 70 см ( $t$  Stat = 2.538 при  $p(T \leq t)$  0.017 и  $t$  Stat = 3.102 при  $p(T \leq t)$  0.007)).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель исследования состояла в том, чтобы выяснить, может ли в условиях повышенной, по сравнению с нормой, неустойчивости вертикальной позы, вызванной необычными колебаниями зрительного окружения, введение в зрительную среду очень маленьких стационарных объектов приводить к существенному улучшению равновесия тела. В частности, мы попытались понять, что происходит с поддержанием вертикальной позы на податливой опоре в условиях проецирования на экран в разных местах дополнительно к непредсказуемо двигающемуся шару (площадью 3848.45 см<sup>2</sup>) неподвижных точек небольшой величины (площадью 1 см<sup>2</sup>).

Оказалось, что колебания тела в сагиттальной плоскости в тестовых пробах при стоянии с ОГ и отсутствии дополнительных неподвижных точек значительно увеличивались по сравнению с контрольными условиями. В частности, в условиях СФ-связи увеличение *RMS* спектров было примерно в 2.5 раза, а при ПФ-связи в 2 раза, при этом выявленные значения *RMS* спектров были также существенно больше, чем при стоянии с ЗГ. В тестовых пробах с добавлением одной неподвижной точки в качестве дополнительного неподвижного ориентира в центре экрана зависимость *RMS* спектров обеих переменных от направления связи (СФ и ПФ) между смещениями тела и наблюдаемого шара практически не менялась. При добавлении четырех точек, симметрично расположенных на удалении в 8.75 см от центра экрана *RMS* спектров обеих переменных уменьшались у разных испытуемых на 20–25%. При увеличении расстояния между точками до 35 см наблюдалось дальнейшее уменьшение колебаний тела: на 30–35%. При расстоянии 70 см между точками (равному диаметру шара) зависимость *RMS* спектров обеих переменных от направления связи в условиях СФ и ПФ уменьшалась на 45–50%. В этих условиях величина колебаний тела становилась примерно такой же, как при ЗГ.

Анализ колебаний тела во фронтальной плоскости в тестовых пробах при стоянии с ОГ в условиях СФ- и ПФ-связей, в отсутствии и в присутствии дополнительных неподвижных точек исследуемых переменных, выявил примерно те же закономерности изменений *RMS* спектров обеих переменных, но менее выраженные.

Динамика изменений амплитудных характеристик колебаний тела при поддержании позы в условиях введения неподвижных точек сопровождалась не столь существенными, но все же заметными, особенно в сагиттальной плоскости, трансформациями частоты позных колебаний. Как правило, в тех случаях, когда при СФ- или ПФ-связях введение точек на экран приводило к снижению величины колебаний тела, относительно высокочастотные характеристики колебаний (переменная ЦД–ЦТ) возрастали, приближаясь к значениям, наблюдавшимся в контрольных условиях, тем самым увеличивая жесткость занятых в поддержании равновесия мышц ног.

В наших исследованиях [17, 18] было показано, ухудшение показателей устойчивости тела в условиях нестационарной ВЗС. Мы предположили, что это ухудшение может быть связано с неспособностью ЦНС согласовать необычные сигналы зрительной системы с информацией от проприоцепторов мышц ног и тактильных рецепторов стоп. Значительное влияние зрения на динамику поддержания вертикальной позы показано для молодых и пожилых здоровых испытуемых [20–25]. Эти данные доказывают, что зрение является сенсорной модальностью, способной служить надежным источником информации для контроля вертикальной позы. Входы от зрительной системы постоянно поступают в ЦНС и участвуют в построении внутреннего представления о положении человека в окружающем экстраперсональном пространстве. Затем эта информация используется для выработки двигательных команд к постуральным мышцам, ответственным за стабилизацию основных суставов осевого скелета (например, голеностопных, коленных, тазобедренных и межпозвонковых суставов). Если зрение нарушено, качество экстероцептивной информации снижается, и управление осуществляется при недостаточном уровне уверенности в отношении текущего состояния динамики тела. В результате вертикальное положение становится менее стабильным, что отражается в увеличении амплитуды и частоты колебаний тела. Эти представления подтверждаются данными, свидетельствующими о том, что кратковременные нарушения зрительного входа действительно модифицируют активность мышц, участвующих в поддержании вертикальной позы [26], а также с наличием колебаний тела, синхронизированных по фазе к движению поля зрения [27–30].

Полученные в этом исследовании результаты подтверждают высказанные выше соображения. Действительно внедрение ничтожных по размеру неподвижных точек (одной или четырех) на экран на фоне необычных колебаний проекции трехмерного шара приводило к частичной, но существенной, стабилизации вертикальной позы. При этом степень стабилизации позы зависела

как от количества вводимых стационарных точек, так и от их удаления от центра экрана (шара). Этот эффект может быть обусловлен тем, что одна метка может использоваться только в качестве точки фиксации, в то время как четыре точки, расположенные в углах квадрата, уже могут использоваться для построения зрительной вертикали и горизонтали в ретинопических координатах. Тем не менее, даже в этих условиях, наличие нестационарного фонового объекта, движущегося необычным образом, видимо, создавало трудности для мультимодальной системы отсчета, объединяющей зрительную, проприоцептивную и вестибулярную информацию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что в условиях неустойчивости зрительного окружения присутствие в поле зрения небольшого количества стационарных объектов малой величины может существенно улучшать амплитудно-частотные характеристики поддержания вертикальной позы. Однако даже в этих условиях качество стояния, тем не менее, остается хуже, чем при стоянии с ОГ в условиях полностью неподвижного зрительного окружения.

**Этические нормы.** Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (Москва).

**Информированное согласие.** Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

**Финансирование работы.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0061-2019-0012).

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perennou D., Mazibrada G., Chauvineau V. et al.* Lateropulsion, pushing and verticality perception in hemisphere stroke: a causal relationship? // *Brain*. 2008. V. 131. P. 2401.
2. *Barra J., Oujamaa L., Chauvineau V. et al.* Asymmetric standing posture after stroke is related to a biased egocentric coordinate system // *Neurology*. 2009. V. 72. № 18. P. 1582.
3. *Bonan I.V., Hubeaux K., Gellez-Leman M.C. et al.* Influence of subjective visual vertical misperception on balance recovery after stroke // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 2007. V. 78. № 1. P. 49.
4. *Keisuke T., Sho I., Shinji Y. et al.* Effect of dynamic visual motion on perception of postural vertical through the modulation of prior knowledge of gravity // *Neurosci. Lett*. 2020. V. 716. P. 134687.
5. *Balestrucci P., Daprati E., Lacquaniti F., Maffei V.* Effects of visual motion consistent or inconsistent with gravity on postural sway // *Exp. Brain Res*. 2017. V. 235. № 7. P. 1999.
6. *Angelaki D.E., Gu Y., DeAngelis G.C.* Multisensory integration: psychophysics, neurophysiology, and computation // *Curr. Opin. Neurobiol.* 2009. V. 19. № 4. P. 452.
7. *Trousselard M., Cian C., Nougier V. et al.* Contribution of somesthetic cues to the perception of body orientation and subjective visual vertical // *Percept. Psychophys.* 2003. V. 65. № 8. P. 1179.
8. *Carriot J., Barraud P.A., Nougier V., Cian C.* Difference in the perception of the horizon during true and simulated tilt in the absence of semicircular canal cues // *Exp. Brain Res*. 2006. V. 174. № 1. P. 158.
9. *Carriot J., Dizio P., Nougier V.* Vertical frames of reference and control of body orientation // *Neurophysiol. Clin.* 2008. V. 38. № 6. P. 423.
10. *Cian C., Esquivie D., Barraud P.A., Raphel C.* Respective contribution of orientation contrast and illusion of self-tilt to the rod-and-frame effect // *Perception*. 1995. V. 24. № 6. P. 623.
11. *Dichgans J., Held R., Young L.R., Brandt T.* Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity // *Science*. 1972. V. 178. № 4066. P. 1217.
12. *Roberts R.E., Da Silva Melo M., Siddiqui A.A. et al.* Vestibular and oculomotor influences on visual dependency // *J. Neurophysiol.* 2016. V. 116. № 3. P. 1480.
13. *De Vrijer M., Medendorp W.P., Van Gisbergen J.A.* Shared computational mechanism for tilt compensation accounts for biased verticality percepts in motion and pattern vision // *J. Neurophysiol.* 2008. V. 99. № 2. P. 915.
14. *Tarnutzer A.A., Bockisch C., Straumann D., Olasagasti I.* Gravity dependence of subjective visual vertical variability // *J. Neurophysiol.* 2009. V. 102. № 3. P. 1657.
15. *Schuler J.R., Bockisch C.J., Straumann D., Tarnutzer A.A.* Precision and accuracy of the subjective haptic vertical in the roll plane // *BMC Neurosci.* 2010. V. 11. P. 83.
16. *Wade S.W., Curthoys I.S.* The effect of ocular torsional position on perception of the roll-tilt of visual stimuli // *Neurosci. Lett*. 2020. V. 716. P. 134687.
17. *Кожина Г.В., Левик Ю.С., Попов А.К., Сметанин Б.Н.* Зрительно-моторная адаптация у здоровых людей при стоянии в условиях дестабилизации виртуального зрительного окружения // *Физиология человека*. 2018. Т. 44. № 5. С. 30.
18. *Кожина Г.В., Левик Ю.С., Попов А.К., Сметанин Б.Н.* Visuomotor adaptation in healthy humans in standing position under the conditions of destabilization of virtual

- visual environment // *Human Physiology*. 2018. V. 44. № 5. P. 517.
18. *Сметанин Б.Н., Левик Ю.С., Кожина Г.В., Попов А.К.* Влияние размера объекта, обеспечивающего зрительную обратную связь, на поддержание вертикальной позы человека // *Физиология человека*. 2020. Т. 46. № 6. С. 108.
  - Smetanin B.N., Levik Y.S., Kozhina G.V., Popov A.K.* The Influence of the Size of the Object, Providing the Visual Feedback on the Maintenance of the Vertical Posture in Humans // *Human Physiology*. 2020. V. 46. № 6. P. 677.
  19. *Burdea G., Coiffet P.* *Virtual Reality Technology*. N.Y.: John Wiley & Sons, Wiley-IEEE Press, 2003. 446 p.
  20. *Benjuya N., Melzer I., Kaplanski J.* Aging-induced shifts from a reliance on sensory input to muscle cocontraction during balanced standing // *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 2004. V. 59. № 2. P. 166.
  21. *Wiesmeier I.K., Dalin D., Maurer C.* Elderly Use Proprioception Rather than Visual and Vestibular Cues for Postural Motor Control // *Front. Aging Neurosci.* 2015. V. 7. P. 97.
  22. *Vieira T.M., de Oliveira L.F., Nadal J.* An overview of age-related changes in postural control during quiet standing tasks using classical and modern stabilometric descriptors // *J. Electromyogr. Kinesiol.* 2009. V. 19. № 6. P. 513.
  23. *Seigle B., Ramdani S., Bernard P.L.* Dynamical structure of center of pressure fluctuations in elderly people // *Gait Posture*. 2009. V. 30. № 2. P. 223.
  24. *Prieto T.E., Myklebust J.B., Hoffmann R.G. et al.* Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1996. V. 43. № 9. P. 956.
  25. *Fino P.C., Mojdehi A.R., Adjerid K. et al.* Comparing Postural Stability Entropy Analyses to Differentiate Fallers and Non-fallers // *Ann. Biomed. Eng.* 2016. V. 44. № 5. P. 1636.
  26. *Danna-Dos-Santos A., Degani A.M., Boonstra T.W. et al.* The influence of visual information on multi-muscle control during quiet stance: a spectral analysis approach // *Exp. Brain Res.* 2015. V. 233. № 2. P. 657.
  27. *Oie K.S., Kiemel T., Jeka J.J.* Multisensory fusion: simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture // *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 2002. V. 14. № 1. P. 164.
  28. *Polastri P.F., Barela J.A.* Adaptive visual re-weighting in children's postural control // *PLoS One*. 2013. V. 8. № 12. P. e82215.
  29. *Mahboobin A., Loughlin P.J., Redfern M.S., Sparto P.J.* Sensory re-weighting in human postural control during moving-scene perturbations // *Exp. Brain Res.* 2005. V. 167. № 2. P. 260.
  30. *Borger L.L., Whitney S.L., Redfern M.S., Furman J.M.* The influence of dynamic visual environments on postural sway in the elderly // *J. Vestib. Res.* 1999. V. 9. № 3. P. 197.

## Influence of Fixed Point Marks on Maintaining a Vertical Pose when Observing a Virtual Three-Dimensional Object Linked to Body Oscillations

G. V. Kozhina<sup>a</sup>, Yu. S. Levik<sup>a</sup>, A. K. Popov<sup>a</sup>, B. N. Smetanin<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup>*Institute for Information Transmission Problems (A.A. Kharkevich Institute) of RAS, Moscow, Russia*

\*E-mail: boris\_smetanin@hotmail.com

The influence of additional visual information on the process of maintaining a vertical posture on a compliant support was studied. The subjects stood in stereo glasses and a mask that limited the field of view in a darkened room in front of a screen on which a three-dimensional image of a dark gray ball was projected. The virtual ball covered a field of view of approximately 36 degrees. The presentation of the ball was combined with the introduction of additional fixed objects (dots with an area of 1 cm<sup>2</sup>). The latter, in the amount of one or four, could be present in different places, but within the area covered by the ball. In the control samples, the ball was motionless. In test samples, the position of the ball depended on body oscillations in the anteroposterior and lateral directions in such a way that body displacements caused the ball to move in the same (in-phase connection, IPh) or opposite directions (anti-phase connection, CPh). The contribution of visual control to maintaining the posture was assessed by changes in the amplitude-frequency characteristics of elementary variables calculated from the trajectory of the center of pressure of the feet (CP). These variables were the vertical projection of the body's center of gravity (CG) and the difference between the CP and the vertical projection of the center of gravity (CP–CG). An analysis of the CG and CP–CG variables revealed a clear dependence of their spectra on the direction of the connection between the displacements of the body and the ball, as well as the influence of the presence of fixed points on this dependence. Thus, in test trials, when standing with open eyes and in the absence of additional fixed points, the oscillations in the sagittal plane increased significantly compared to the control. In particular, under IPh conditions, the increase in the root-mean-square value of the amplitude spectra (RMS) of the spectra was approximately 2.5 times, and under CPh conditions, it was 2-fold, while the RMS values of the spectra were also significantly higher than when standing with eyes closed. When adding one fixed point in the center of the screen as a fixed reference point, the oscillations practically did not change. When adding four points symmetrically located at a distance of 8.75 cm from the center of the screen, the RMS spectra of both variables decreased by 20–25%. With an in-

crease in the distance between the points up to 35 cm, a further decrease in body vibrations was observed: by 30–35%. At a distance of 70 cm between the points (equal to the ball diameter), the RMS of the spectra decreased by 45–50%. Under these conditions, the magnitude of body oscillations became approximately the same as with closed eyes. Thus, it is shown that under conditions of instability of the visual environment, the presence of stationary objects of small size significantly affects the maintenance of the posture, but the quality of standing still remains lower than in a stationary visual environment.

*Keywords:* vertical posture, visual destabilization, virtual visual environment, sensorimotor conflict, stabilography.