

## ВЛИЯНИЕ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ ВОСПРИЯТИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ НА ПОДДЕРЖАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКОМ НА РАЗЛИЧНЫХ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Поступила 28.07.14

Сравнивали характеристики поддержания вертикальной позы человеком в условиях неподвижного зрительного окружения (ЗО) и погружения в виртуальную зрительную среду (ВЗС). Передний план последней представлял собой вид на окна комнаты, а задний – вид на акведук с прилегающей местностью. Дестабилизация видимого ЗО создавалась путем “привязки” положения переднего плана к колебаниям тела испытуемого в сагиттальной плоскости. Измеряли элементарные переменные, вычисляемые согласно траектории центра давления стоп (ЦДС), – смещение вертикальной проекции центра тяжести (переменная ЦТв) и разность между положениями ЦДС и ЦТв (переменная ЦДС–ЦТв). При стоянии на жесткой опорной поверхности среднеквадратические значения (RMS) спектров колебаний обеих переменных уменьшались в случаях противофазной связи смещений переднего плана ЗО с колебаниями тела и увеличивались в случаях их синфазной связи по сравнению с RMS во время поддержания позы в условиях неподвижного ЗО (НЗО). В условиях действия синфазной связи, однако, драматических нарушений вертикальной позы не происходило; максимальные колебания тела в данном случае не превышали значений, характерных для стояния с закрытыми глазами (ЗГ). При поддержании же вертикальной позы на податливой опоре колебания тела значительно увеличивались во всех зрительных условиях, причем разница между RMS спектров переменной ЦТв, полученных для условий синфазной связи и ЗГ, становилась статистически значимой. В случае стояния на податливой опоре RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв при противофазной связи переднего плана ВЗС были больше, чем при синфазной связи, в то время как RMS спектров колебаний ЦТв, наоборот, были больше при синфазной связи. Таким образом, с варьированием условий поддержания вертикальной позы амплитудные характеристики элементарных переменных (ЦТв и ЦДС–ЦТв), формирующие ЦДС на опору, могут изменяться как параллельно, так и независимо друг от друга. Упомянутые переменные могут обслуживаться не только связанными друг с другом, но и независимыми механизмами контроля их амплитудно-частотных характеристик.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вертикальная поза, стабилософия, постральные реакции, виртуальная зрительная среда (ВЗС), зрительная обратная связь.

### ВВЕДЕНИЕ

Основная задача для системы поддержания вертикальной позы человека сводится к тому, чтобы горизонтальные смещения проекции центра тяжести (ЦТ) тела не выходили за пределы полигона опоры стоп на поверхности стояния. Эта задача весьма

сложна, поскольку тело человека представляет собой обратный маятник, колебания которого трудно прогнозировать из-за непрерывно меняющегося момента инерции. Опорные реакции, т. е. смещения центра давления стоп (ЦДС), не способны точно следовать за изменениями положения проекции ЦТ. Тем не менее ЦНС человека успешно решает эту задачу, координируя активность мышц ног и туловища на базе информации, поступающей от вестибулярной, проприоцептивной и зрительной

<sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва (РФ).

Эл. почта: boris\_smetanin@hotmail.com (Б. Н. Сметанин).

сенсорных систем. В результате достигается устойчивое положение тела, при котором горизонтальные смещения проекции ЦТ значительно меньше, чем размеры опорного контура.

Наличие зрительной информации не является обязательным условием для поддержания вертикальной позы, но в отсутствие визуальных сигналов качество такого поддержания может существенно ухудшаться [1–3]. Это становится особенно заметным при некоторых неврологических заболеваниях [2, 4–7]. Зрительная система участвует в решении задачи стабилизации вертикальной позы, используя различные механизмы. С одной стороны, зрение непосредственно участвует в оценке величины, скорости и направления колебаний тела [8–13], с другой – оно может влиять на систему регуляции позы неспецифически. На это, в частности, указывает тот факт, что закрытие глаз в темноте, субъективно обуславливающее утрату возможности использовать зрение для стабилизации позы, может сопровождаться дальнейшим ухудшением качества стояния [14]. И наоборот, на свету с открытыми глазами (ОГ), но в очках с матовыми стеклами, не позволяющими зрительно ориентироваться в пространстве, человек “стоит лучше”, чем в темноте с закрытыми глазами (ЗГ) [3].

Полагают [15, 16], что неспецифические зрительные влияния реализуются в основном через регуляцию суставной жесткости (прежде всего, в суставах нижних конечностей) и опосредуются либо простым ослаблением/усилением тонических сокращений соответствующих мышц, либо снижением коэффициентов усиления в вестибулярной и (или) проприоцептивной подсистемах постуральной регуляции. Имеются данные, которые косвенно подтверждают указанные предположения [16, 17]. Так, Фитцпатрик и соавт. [17], сравнивая позные реакции на вестибулярную стимуляцию при стоянии с ОГ и ЗГ, обнаружили, что в случае ЗГ параллельно возрастают и амплитуды фоновых колебаний тела, и величина реакций на стимуляцию. Это позволило предположить, что различия величины колебаний тела в разных зрительных условиях могут быть связаны с изменениями суставной жесткости, автоматически настраиваемой на основе поступающих от зрительного входа неспецифических влияний.

Чтобы убедиться в справедливости такого предположения, мы сравнивали влияние различных зрительных условий на поддержание вертикальной позы при стоянии испытуемых на различных поверхностях опоры – твердой и податливой. В ходе анализа полученных результатов оценивали изме-

нения двух элементарных переменных, определяющих колебания ЦДС. Первая переменная описывает смещения вертикальной проекции центра тяжести тела (ЦТв) и по существу является контролируемой величиной [18, 19], а вторая представляет собой разность между ЦДС и ЦТв (переменная ЦДС–ЦТв) и позволяет судить об изменениях результирующей суставной жесткости в голеностопных суставах и о мышечных усилиях, корректирующих колебания тела [20, 21].

Использование податливой опоры было привлечено с учетом результатов ранее выполненной работы [23]. Было показано, что при стоянии на такой опоре в условиях неподвижного зрительного окружения (НЗО) относительный вклад элементарных переменных в поддержание позы был более заметным и несколько иным, чем на жесткой опоре.

В этом исследовании в качестве зрительных условий мы использовали отсутствие зрительной информации (ЗГ) и три условия “погружения” испытуемых в виртуальную зрительную среду (ВЗС), когда виртуальное зрительное окружение (ЗО) было либо неподвижным, либо колебалось, причем данные колебания находились в синфазной или противофазной связи (СС и ПС соответственно) с колебаниями тела испытуемого.

## МЕТОДИКА

*Испытуемые.* В исследовании приняли участие 14 практически здоровых испытуемых – восемь мужчин (средний возраст  $42.6 \pm 5.6$  года) и шесть женщин ( $44.0 \pm 6.2$  года), не имевших зрительной патологии и не переносивших ранее каких-либо неврологических заболеваний. В ходе тестирования испытуемые поддерживали удобную вертикальную позу, стоя на платформе стабилोगрафа (размер платформы  $40 \times 40$  см; Стабилоплатформа-2, КБ НИИИ в г. Балашиха, РФ), что позволяло регистрировать изменения положения ЦДС на опоре. Стопы испытуемых находились в удобном положении (они были развернуты на угол 20–30 град, а пятки удалены друг от друга на расстояние 6–8 см).

*Зрительные условия.* При поддержании вертикальной позы испытуемые смотрели на экран высотой 1.5 м и шириной 2 м, изготовленный из ткани, которая обладает минимальной степенью деполяризации (silver screen). На нем с помощью так называемого пассивного способа [22, 24] формировали трехмерное стереоизображение, базирующееся на

эффекте поляризации света. Посредством двух проекторов (“Sharp XR-10X”), снабженных поляризационными фильтрами и ориентированных ортогонально относительно друг друга, на экран одновременно проецировали два изображения одной и той же сцены (вид из окна комнаты на акведук). Испытуемые и проекторы находились по одну сторону от экрана. В ходе тестирования испытуемые были в очках с поляризационными фильтрами “3DS-GS Панорама” (“Stel – Computer Systems Ltd.”, РФ; частота чередований  $120\text{ с}^{-1}$ ), ориентированными параллельно соответствующим фильтрам проекторов; это обеспечивало трехмерное восприятие ВЗС. Поле зрения испытуемых было ограничено очками и не выходило за пределы экрана, составляя примерно 60 град по вертикали и 80 град по горизонтали. В этих условиях воспринималась только виртуальная трехмерная картина, включавшая в себя два плана. Первый представлял собой вид на окно комнаты с прилегающими к нему стенами, а второй – вид на акведук с прилегающей местностью. Удаление изображения первого (переднего) плана от испытуемого составляло 1.2, а второго (заднего) – порядка 20 м. Таким образом, испытуемые могли ориентироваться только в пределах представленной им ВЗС; в процессе тестирования им предлагали смотреть на задний план приблизительно в центр экрана.

Чтобы исследовать поддержание вертикальной позы в условиях связанных с колебаниями тела смещений видимого ЗО, использовали способ более полного погружения испытуемых в ВЗС. С этой целью положение переднего плана такой среды делали зависимым от колебаний тела в одном из направлений (в настоящем исследовании – передне-заднем). Такая привязка приводила к тому, что колебания тела в этом направлении вызывали практически одновременные (задержка 25 мс) смещения переднего плана ВЗС – либо СС, либо ПС.

О колебаниях тела в передне-заднем направлении судили, регистрируя сигналы от тензометрического датчика, связанного эластичной нитью с телом испытуемых на уровне тазобедренных суставов. Жесткость нити была небольшой (1.4 Н/м) и не влияла на положение тела [25]. Связь переднего плана ВЗС с колебаниями тела в сагиттальной плоскости осуществлялась с помощью компьютерной программы, использовавшей показания тензометрического датчика. Эти сигналы затем встраивались в структуру реализации смещений ВЗС таким образом, что экспериментатор мог легко задавать направление (ПС или СС) смещений переднего пла-

на видимого ЗО перед каждой пробой. В данном исследовании коэффициент связи между смещениями переднего плана ВЗС и тела испытуемого в сагиттальной плоскости составлял 2.0, т. е. при отклонении тела в передне-заднем направлении, например, на 1 см передний план ВЗС смещался на 2 см. Ранее нами было показано, что в таких условиях испытуемые, корректируя позу, в качестве референса невольно используют подвижный передний план ВЗС и, соответственно, поза дестабилизируется по сравнению с таковой в нормальных зрительных условиях [26]. Манипулирование направлением связи колебаний тела с ВЗС приводило к тому, что испытуемые, согласно их словесным отчетам, воспринимали ЗО в целом как нестационарное, несмотря на наличие неподвижного заднего плана.

*Анализ колебаний тела.* Траекторию ЦДС, полученную соответственно сигналам датчиков давления платформы стабилोगрафа, конвертировали из аналоговой в цифровую форму с частотой оцифровки  $100\text{ с}^{-1}$  и затем регистрировали на персональном компьютере. При последующем анализе ее раскладывали как сумму двух составляющих – колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях. Оценку поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения амплитудно-частотных характеристик двух элементарных переменных, вычисляемых из перемещений ЦДС на площади опоры. Одной из них была траектория ЦТв (переменная ЦТв), а второй – разность между траекториями ЦДС и ЦТв (переменная ЦДС–ЦТв). Для их вычисления мы использовали подход, предложенный Бренъере [27, 28]. Такой подход был подробно описан и многократно применен в целом ряде работ Руже и соавт. [19, 29, 30], а также других исследователей. В связи с этим ниже будут приведены только основные его положения.

Метод вычисления указанных элементарных переменных базируется на наличии четкой зависимости изменений амплитуды колебаний ЦТв и ЦДС от частоты колебаний. В частности, показано [19, 20, 28, 30], что отношение амплитуд данных переменных (ЦТв/ЦДС) является наибольшим, приближаясь к единице, при минимальных частотах колебаний (малые доли герца) и становится наименьшим, приближаясь к нулю, при высоких частотах (больше 3 Гц). Из этого легко заключить, что относительно высокочастотные колебания ЦДС не влияют на величину колебаний ЦТв. Действительно, в цитируемых работах экспериментально было показано, что фактически колебания ЦДС с часто-

тами выше 0.5 Гц практически не отражаются на величине колебаний ЦТв. Исходя из такого понимания, для получения упомянутых выше элементарных переменных мы использовали фильтр низких частот [19, 20]. Перед применением этого фильтра с использованием быстрого преобразования Фурье оцифрованную траекторию ЦДС подвергали амплитудно-частотному разложению для того, чтобы получить амплитудное распределение перемещений ЦДС как функцию частоты. После того, как спектр ЦДС был получен, с учетом применения указанного фильтра получали уже спектр ЦТв и восстанавливали траекторию ЦТв во временной развертке с помощью обратного преобразования Фурье. Затем с помощью вычитания траекторий ЦДС и ЦТв во временной развертке получали сигнал переменной ЦДС–ЦТв и, соответственно, ее спектр. Следует отметить, что, как и в других работах [19, 21, 29], выбранная характеристика фильтра не зависела от антропометрических параметров испытуемых.

В дальнейшем в ходе анализа результатов тестирования перемещения ЦТв рассматривали как контролируемую переменную, а разность ЦДС–ЦТв – как переменную, отражающую изменения результирующей жесткости в голеностопных суставах и мышечные усилия, которые корректируют колебания ЦТ тела [18, 19]. Оценку влияния зрительных условий на процесс поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения медианной частоты (Mdf) и среднеквадратического значения (RMS) спектров колебаний в диапазонах 0–1.0 Гц для переменной ЦТв и 0–3.0 Гц для переменной ЦДС–ЦТв.

Программа частотной фильтрации колебаний ЦДС с целью выделения из нее переменных ЦТв и ЦДС–ЦТв и последующего вычисления на их основе Mdf и RMS спектров колебаний была написана в среде “MatLab”.

*Процедура тестирования.* В ходе тестирования испытуемому предлагали смотреть на какой-либо объект неподвижного заднего плана и минимизировать колебания тела. В случайном порядке в отдельных пробах устанавливали СС и ПС смещений зрительной среды с колебаниями тела субъекта в сагиттальной плоскости. Пробы с привязкой переднего плана ВЗС к колебаниям тела перемежались пробами со стоянием в НЗО и пробами в условиях полного устранения зрительного контроля (ЗГ). В условиях НЗО испытуемые стояли в тех же самых стереочках, и поле зрения было ограничено теми

же пределами, что и в условиях связи колебаний тела и переднего плана. Тестируемые видели перед собой экран с изображением той же виртуальной трехмерной картины, однако оба ее плана не были связаны с колебаниями тела.

Тестирование проводили при стоянии испытуемых сначала на жесткой, а затем на податливой опоре. Последнее условие обеспечивали с помощью помещения квадратной пластины поролона толщиной 10 см, накрытой пластиной фанеры толщиной 10 мм, на платформу стабилотографа. Размеры пластины соответствовали размеру платформы стабилотографа. Податливость прокладки составляла около 3.5 см при давлении 0.6 Н/см<sup>2</sup>.

Таким образом, исследуемые переменные (ЦТв и ЦДС–ЦТв) оценивались в условиях НЗО и ЗГ, а также наличия ПС или СС колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела в сагиттальной плоскости. Во время тестирования испытуемые выполняли 28 проб – по 14 на жесткой и на податливой опоре. При этом каждые 14 проб включали в себя четыре пробы в условиях ПС колебаний переднего плана ВЗС и колебаний тела, четыре – в условиях СС и по три пробы в условиях НЗО и ЗГ. Длительность регистрации стабилотограмм в каждой пробе составляла 40 с. Интервал времени между пробами составлял около 1 мин; после каждых четырех-пяти проб испытуемые отдыхали в течение 3–4 мин в положении сидя. Зрительные условия в каждой половине тест-серии чередовали в случайном порядке.

Следует отметить, что условия с введением связи колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела в сагиттальной плоскости не оказывали существенного влияния на поддержание вертикальной позы во фронтальной плоскости. Поэтому результаты анализа колебаний тела во фронтальной плоскости не описываются.

*Статистическая обработка.* Полученные данные усредняли по всем пробам для каждого зрительного условия сначала у отдельных испытуемых, а затем вычисляли средние по группе. В ходе статистического анализа оценивали глобальное влияние факторов “условия зрительного контроля” и “вид опоры” на исследуемые переменные с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Достоверность различий RMS и Mdf при парном сравнении данных, полученных в отдельных зрительных условиях, оценивали с помощью *post-hoc*-анализа с применением *t*-теста для выборок с неравными дисперсиями.



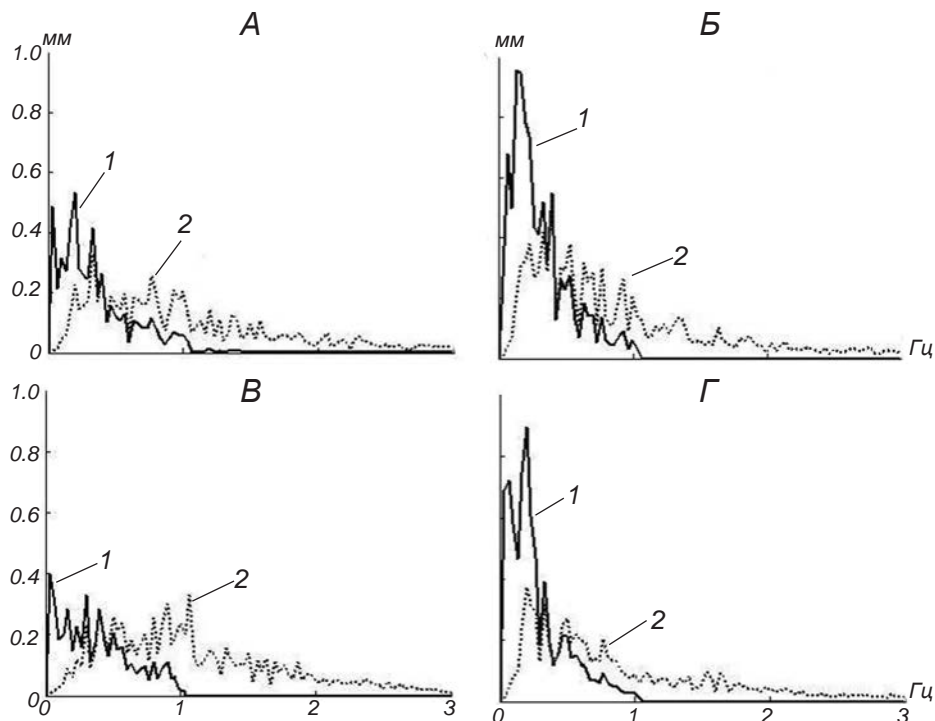
## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены амплитудные спектры, которые были вычислены согласно траекториям перемещений ЦТв и ЦДС–ЦТв в передне-заднем направлении по результатам тестирования типичного испытуемого, стоявшего на твердой опоре. Видно, что различные зрительные условия по-разному влияли на амплитудные спектры исследуемых переменных. Если сравнить спектры колебаний переменной ЦТв, легко заметить, что в условиях НЗО и ПС величины колебаний были заметно меньше, чем при ЗГ и СС. Иными словами, в первых двух зрительных условиях испытуемый стоял более устойчиво. Сопоставление же спектров переменной ЦДС–ЦТв показало, что в условиях НЗО, СС и ПС величины колебаний были близкими друг к другу и существенно меньшими, чем в случае ЗГ.

При стоянии на податливой опоре у всех ис-

пытуемых, в том числе у того, чьи данные показаны на рис. 2, колебания тела были явно большими. Вместе с тем паттерн зрительнозависимых изменений спектров исследуемых переменных, вычисленных соответственно колебаниям тела в процессе поддержания вертикальной позы на податливой опоре, в целом оставался почти таким же, как и в условиях наличия жесткой опоры. Это хорошо видно не только из рис. 2, но и из последующих рисунков (рис. 3; 4), суммирующих результаты оценки RMS спектров обеих переменных по всей группе испытуемых.

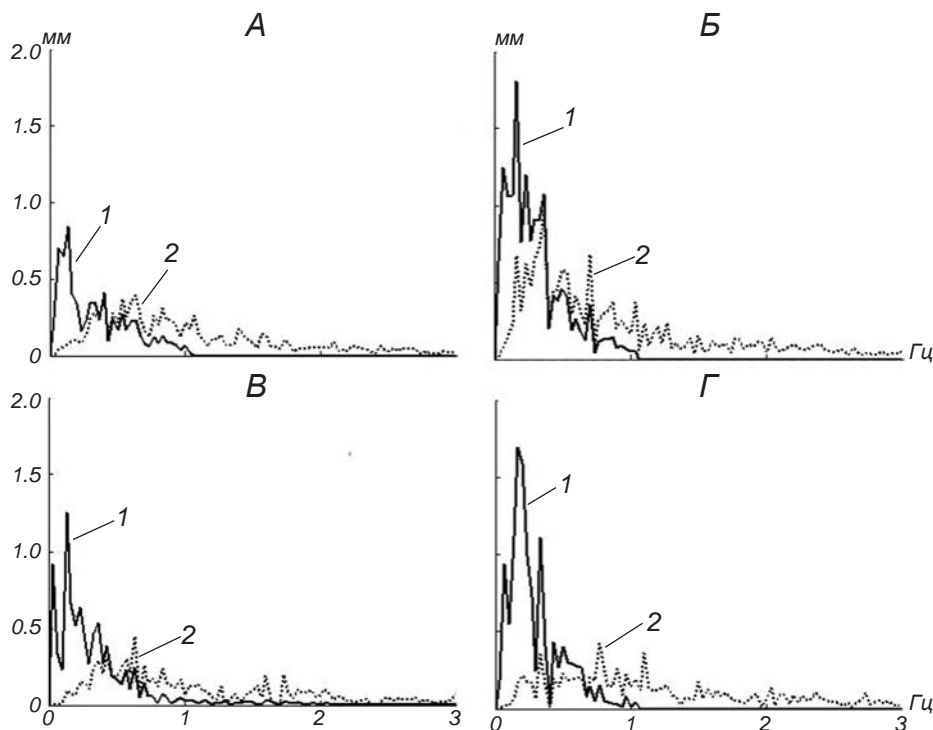
Усредненные по группе значения RMS спектров колебаний анализированных переменных. На рис. 3 представлены усредненные по всем испытуемым RMS амплитудных спектров для переменных ЦТв и ЦДС–ЦТв, вычисленных по результатам анализа характеристик поддержания вертикальной позы на твердой и податливой опорах.



**Р и с. 1.** Пример спектров переменных вертикальная проекция центра тяжести (ЦТв) и разность между положениями центра давления стоп (ЦДС) и ЦТв (1 и 2 соответственно), полученных в ходе анализа колебаний тела во время стояния одного из типичных испытуемых на твердой опоре при разных зрительных условиях.

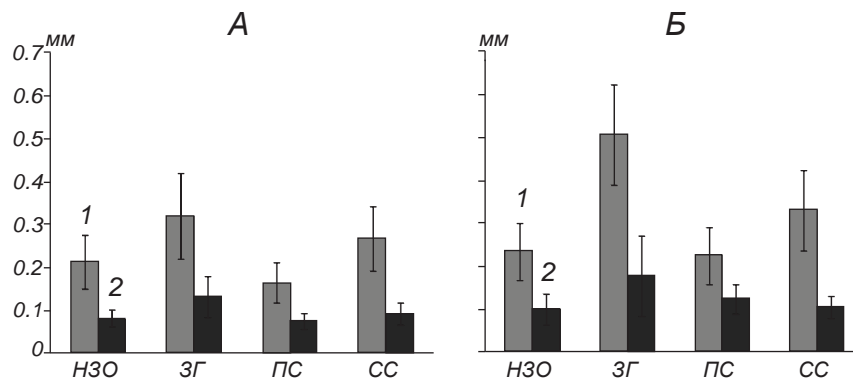
По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат – амплитуда колебаний, мм. На А – глаза открыты, неподвижное зрительное окружение; на Б – глаза закрыты; на В и Г – колебания переднего плана виртуальной зрительной среды связаны противофазно и синфазно с колебаниями тела испытуемого соответственно.

**Р и с. 1.** Приклад спектів для змінних вертикальна проекція центра ваги (ЦВв) і різниця між положеннями центра тиснення стоп (ЦТС) і ЦВв (1 і 2 відповідно), отриманих у перебігу аналізу коливань тіла під час стояння одного з пересічних випробуваних на твердій опорі при різних зорових умовах.



**Р и с. 2.** Пример спектров, полученных при стоянии испытуемого на податливой опоре. Обозначения те же, что и на рис. 1.

**Р и с. 2.** Приклад спектрів, отриманих при стоянні випробуваного на піддатливій опорі.



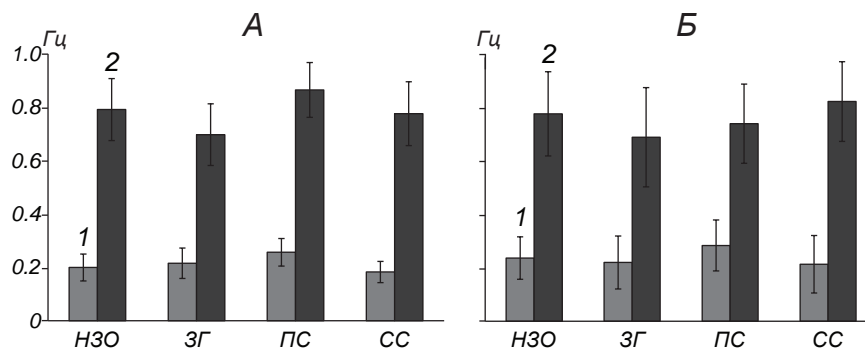
**Р и с. 3.** Средние величины среднеквадратического значения (мм) спектров переменных вертикальная проекция центра тяжести (ЦТв) и разность между положениями центра давления стоп (ЦДС) и ЦТв (А, 1 и 2 соответственно) и ошибки среднего (Б), вычисленные соответственно колебаниям тела в передне-заднем направлении, при неподвижном зрительном окружении (НЗО), закрытых глазах (ЗГ) в темной комнате, а также при противофазной (ПС) и синфазной (СС) связях колебаний переднего плана виртуальной зрительной среды с колебаниями тела.

По вертикали – амплитуда колебаний, мм.

**Р и с. 3.** Середні величини середньоквадратичного значення (мм) спектрів змінних вертикальна проекція центра ваги (ЦВв) і різниця між положеннями центра тиснення стоп (ЦТС) і ЦВв (А, 1 і 2 відповідно) та похибки середнього (Б), вираховані відповідно до коливань тіла в передньо-задньому напрямку, при нерухомому зоровому оточенні (НЗО), заплещених очах (ЗГ) у темній кімнаті, а також протифазному (ПС) і синфазному (СС) зв'язках коливань переднього плану віртуального зорового середовища з коливаннями тіла.

Из рис. 3 видно, что наибольшие величины RMS спектров переменной ЦТв были выявлены в случаях поддержания позы в отсутствие зрительного

контроля и при условии СС, а наименьшие – при условиях НЗО и ПС. Эти различия подтверждались результатами статистического анализа. В частно-



**Р и с. 4.** Усредненные по всем испытуемым величины медианной частоты спектров переменных вертикальная проекция центра тяжести (ЦТв) и разность между положениями центра давления стоп (ЦДС) и ЦТв (А, 1 и 2 соответственно) и ошибки среднего (Б), вычисленные соответственно колебаниям тела в передне-заднем направлении при неподвижном зрительном окружении (НЗО), закрытых глазах (ЗГ) в темной комнате, а также противофазной (ПС) и синфазной (СС) связях колебаний переднего плана виртуальной зрительной среды с колебаниями тела. По вертикали – частота колебаний, Гц.

**Р и с. 4.** Усреднені по всіх випробуваних величини медіанної частоти спектрів змінних вертикальна проекція центра ваги (ЦТв) і різниця між положеннями центра тиснення стоп (ЦДС) і ЦТв (А, 1 і 2 відповідно) та похибки середнього (Б), вираховані відповідно до коливань тіла в передньо-задньому напрямку при нерухомому зоровому оточенні (НЗО), заплюснених очах (ЗГ) у темній кімнаті, а також протифазному (ПС) і синфазному (СС) зв'язках коливань переднього плану віртуального зорового середовища з коливаннями тіла.

сти, дисперсионный анализ показал наличие статистически высокодостоверного влияния фактора “условие зрительного контроля” на RMS спектра переменной ЦТв. Для твердой опоры значение критерия Фишера  $F_{1,159}$  равнялось 30.03,  $P < 0.0000001$ , а для податливой –  $F_{1,159} = 42.3$ ,  $P < 0.00000001$ .

**Твердая опора.** Вычисленные RMS спектра переменной ЦТв были наименьшими в условиях ПС, достоверно отличаясь от значений для условия поддержания вертикального положения при НЗО ( $t = -4.75$ ,  $P < 0.000001$ ), для условия СС ( $t = -7.57$ ,  $P < 0.00000001$ ) и для условия ЗГ ( $t = -8.74$ ,  $P < 0.00000001$ ). RMS спектров переменной ЦТв, полученные для условия НЗО, достоверно отличались от RMS спектров и для условия ЗГ ( $t = -4.79$ ,  $P < 0.000001$ ), и для условия СС ( $t = -2.92$ ,  $P < 0.001$ ). Статистический анализ не выявил достоверных различий RMS спектров переменной ЦТв в ходе сравнения этого параметра при зрительных условиях ЗГ и СС.

RMS амплитудных спектров переменной ЦДС–ЦТв также демонстрировали зависимость от зрительных условий, хотя выраженность данной зависимости была существенно меньшей. С использованием ANOVA выявлялось влияние этого фактора на переменную ЦДС–ЦТв для тестов и на твердой ( $F_{1,159} = 10.3$ ,  $P < 0.000001$ ), и на податливой ( $F_{1,159} = 16.8$ ,  $P < 0.000001$ ) опоре.

В отличие от переменной ЦТв, RMS перемен-

ной ЦДС–ЦТв были наименьшими сразу при трех зрительных условиях (НЗО, ПС и СС), не различаясь достоверно между собой ( $P > 0.05$ ). С другой стороны, RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв, полученные для условий НЗО, ПС и СС, достоверно отличались от RMS спектров для условия ЗГ. При сравнении RMS в условиях НЗО и ЗГ  $t = -3.63$ ,  $P < 0.001$ , в условиях ПС и ЗГ  $t = -3.51$ ,  $P < 0.001$ , а в условиях СС и ЗГ  $t = -3.27$ ,  $P < 0.002$ .

**Тесты на податливой опоре.** RMS спектров переменных ЦТв и ЦДС–ЦТв, вычисленные соответственно колебаниям тела в условиях стояния на нежесткой опоре, продемонстрировали в общем сходную с описанной выше для твердой опоры картину их изменений в случаях манипуляций зрительными условиями; различия были незначительными.

Вычисленные RMS спектра переменной ЦТв были наименьшими в условиях ПС, достоверно отличаясь от значений, полученных для условий СС ( $t = 5.88$ ,  $P < 0.0000001$ ) и ЗГ ( $t = -7.41$ ,  $P < 0.0000001$ ). Однако в отличие от того, что наблюдалось в тестах на твердой опоре, существенных различий RMS спектров переменной ЦТв, полученных в условиях поддержания позы при ПС и НЗО, не было выявлено ( $P > 0.05$ ). RMS спектров переменной ЦТв, полученные для условия НЗО, достоверно отличались от RMS спектров для условий ЗГ ( $t = -7.04$ ,  $P < 0.0000001$ ) и СС ( $t = -4.92$ ,  $P < 0.000001$ ). В отличие от тестов на твердой опоре

ре, в условиях податливости опоры была обнаружена статистически достоверная разница RMS спектров переменной ЦТв в условиях ЗГ и СС ( $t = 4.54$ ,  $P < 0.00005$ ).

RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв имели наименьшие (причем близкие) значения в условиях НЗО и СС, достоверно отличавшиеся от явно больших значений, которые были получены для условий ПС ( $t = -3.06$ ,  $P < 0.005$  и  $t = -2.94$ ,  $P < 0.005$  соответственно) и ЗГ ( $t = -4.46$ ,  $P < 0.0005$  и  $t = 4.29$ ,  $P < 0.0005$  соответственно). RMS спектров этой переменной были наибольшими в условиях ЗГ и достоверно превышали значения, полученные в условиях ПС ( $t = 3.14$ ,  $P < 0.002$ ).

Фактор “вид опоры” также существенно влиял на RMS спектров переменных ЦТв и ЦДС–ЦТв. При поддержании вертикальной позы на податливой опоре колебания тела были существенно больше. Дисперсионный анализ выявил глобальное влияние этого фактора на RMS обеих рассматриваемых переменных. Для переменной ЦТв критерий Фишера  $F_{1,319}$  равнялся 32.3,  $P < 0.0000001$ , а для переменной ЦДС–ЦТв  $F_{1,319} = 30.4$ ,  $P < 0.000001$ .

Попарное сравнение RMS переменных, полученных при одном и том же зрительном условии, дало следующие результаты. Статистически достоверных влияний фактора “вид опоры” на RMS спектров переменной ЦТв во время стояния в условиях НЗО не выявлялось ( $P > 0.05$ ). При остальных зрительных условиях RMS этой переменной становились значительно большими после перехода к поддержанию позы на податливой опоре (для условия ЗГ  $t = -4.56$ ,  $P < 0.0005$ , для ПС  $t = -6.91$ ,  $P < 0.00001$ , для СС  $t = -3.64$ ,  $P < 0.005$ ).

В отличие от RMS переменной ЦТв, RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв, вычисленные для всех зрительных условий (в том числе для НЗО), были существенно меньшими, если испытуемые стояли на твердой опоре. Для условия НЗО показатель достоверности различий  $t$  равнялся  $-2.56$ ,  $P < 0.01$ , для условия ЗГ  $t = -2.54$ ,  $P < 0.01$ , для ПС  $t = -6.15$ ,  $P < 0.0001$ , а для условия СС  $t = -3.61$ ,  $P < 0.003$ .

*Частотные характеристики колебаний исследуемых переменных.* На рис. 4 приведены средние по группе значения MdF амплитудных спектров для переменных ЦТв и ЦДС–ЦТв, вычисленных по результатам анализа поддержания вертикальной позы испытуемыми на твердой и податливой опорах. Видно, что MdF спектров переменной ЦТв при обеих опорах были более высокими в условиях зрительной ПС и наиболее низкими в случаях СС. Дис-

персионный анализ показал наличие статистически достоверного влияния фактора “условие зрительного контроля” на MdF спектра переменной ЦТв. Для тестов на твердой опоре критерий Фишера  $F_{1,159}$  равнялся 14.37,  $P < 0.000005$ , а для податливой опоры  $F_{1,159} = 4.36$ ,  $P < 0.006$ .

*Твердая опора.* Рассчитанные MdF спектров переменной ЦТв были наибольшими в условиях ПС, достоверно отличаясь от значений для условий поддержания позы в случаях СС ( $t = 6.77$ ,  $P < 0.0000001$ ), а также для условия НЗО ( $t = 4.32$ ,  $P < 0.0002$ ) и ЗГ ( $t = 2.89$ ,  $P < 0.003$ ). Статистический анализ выявил достоверные различия MdF спектров переменной ЦТв при сравнении этих значений в зрительных условиях СС и ЗГ ( $t = 2.52$ ,  $P < 0.01$ ).

*Податливая опора.* Как и в тестах на твердой опоре, вычисленные MdF спектра переменной ЦТв, были наибольшими также в условиях ПС, достоверно отличаясь от значений, полученных в условиях поддержания позы при СС ( $t = -3.15$ ,  $P < 0.002$ ), а также от значений для условий НЗО ( $t = 2.37$ ,  $P < 0.02$ ) и ЗГ ( $t = 2.74$ ,  $P < 0.004$ ). Статистический анализ не выявил достоверных различий MdF спектров переменной ЦТв в ходе сравнения других пар зрительных условий.

MdF спектров переменной ЦДС–ЦТв имели наименьшие значения в условиях поддержания позы с ЗГ и наибольшие – в случаях ПС между колебаниями переднего плана и тела испытуемых ( $t = 6.11$ ,  $P < 0.000001$ ). В целом фактор “условие зрительного контроля” оказывал статистически достоверное влияние на MdF спектра переменной ЦДС–ЦТв. Для твердой опоры критерий Фишера  $F_{1,159}$  равнялся 11.75,  $P < 0.000001$ , а для податливой –  $F_{1,159} = 2.74$ ,  $P < 0.05$ .

*Твердая опора.* Попарное сравнение влияний зрительных условий на MdF спектров переменной ЦДС–ЦТв выявило достоверные различия значений этого параметра для следующих пар условий: ПС и СС ( $t = 3.42$ ,  $P < 0.001$ ), НЗО и ПС ( $t = 2.66$ ,  $P < 0.01$ ), НЗО и ЗГ ( $t = 3.04$ ,  $P < 0.005$ ) и ПС и ЗГ ( $t = 3.84$ ,  $P < 0.001$ ).

*Податливая опора.* Зрительная зависимость MdF спектров переменной ЦДС–ЦТв, вычисленных для условий такой опоры, была несколько более слабой, чем в тестах на твердой опоре. Однако попарное сравнение влияний зрительных условий на MdF все же выявило достоверные различия между соответствующими значениями при НЗО и ЗГ ( $t = 1.91$ ,  $P < 0.05$ ), ЗГ и СС ( $t = 2.71$ ,  $P < 0.005$ ) и ПС и СС



( $t = 2.02$ ,  $P < 0.05$ ).

Фактор “вид опоры” был также существенным в отношении MdF спектров переменных ЦТв и ЦДС–ЦТв. Дисперсионный анализ позволил обнаружить глобальное влияние этого фактора на MdF спектров переменной ЦТв (критерий Фишера  $F_{1, 319} = 7.96$ ,  $P < 0.006$ ), тогда как статистически значимого влияния смены опоры с жесткой на податливую для MdF спектров переменной ЦДС–ЦТв не наблюдалось.

Попарное сравнение спектров переменной ЦТв, полученных при одном и том же зрительном условии, выявило следующие соотношения. MdF статистически достоверно различались для условий НЗО ( $t = 2.27$ ,  $P < 0.02$ ), ПС ( $t = 1.75$ ,  $P < 0.05$ ) и СС ( $t = 2.01$ ,  $P < 0.03$ ).

Несмотря на отсутствие глобального влияния фактора “вид опоры” при переходе к стоянию на податливой опоре, обнаруживалось достоверно меньшее среднегрупповое значение MdF спектров переменной ЦДС–ЦТв в условии ПС ( $t = 3.00$ ,  $P < 0.002$ ) и большее – в случае стояния в условии СС ( $t = -1.72$ ,  $P < 0.05$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ

В стабилизации вертикальной позы человека зрение, видимо, играет по меньшей мере двоякую роль. С одной стороны, зрительные сигналы информируют ЦНС о колебаниях тела относительно внешнего окружения, с другой – зрительная система оценивает степень стационарности самого этого окружения. В данной связи важно понимать, насколько эффективным может быть вклад зрительных сигналов, содержащих в себе информацию о колебаниях тела, в регуляцию вертикальной позы в условиях нарушения стационарности видимого зрительного окружения (например, при некоторых неврологических заболеваниях [2, 4–7]) и затруднений с использованием такого окружения в качестве системы отсчета. Выполненное нами исследование выявило ряд фактов, которые, как нам кажется, приближают нас к такому пониманию.

Мы сравнивали поддержание вертикальной позы человеком в условиях НЗО с поддержанием в ситуациях, в которых испытуемого погружали в нестационарную зрительную среду. Нестационарность видимого ЗО создавалась путем привязки положений переднего плана этого окружения к колебаниям тела в сагиттальной плоскости. Полученные результаты показали следующее.

При стоянии на жесткой опоре RMS спектров обеих рассмотренных выше переменных изменялись более или менее параллельно, уменьшаясь в условиях ПС переднего плана с колебаниями тела и увеличиваясь в случаях СС по сравнению с RMS, вычисленными для условий поддержания позы в НЗО. Этот результат можно интерпретировать следующим образом. Испытуемые в процессе поддержания вертикальной позы, несмотря на инструкцию “стараться использовать в качестве референса неподвижный задний план”, достаточно заметно реагировали на колебания переднего плана и, скорее всего, непроизвольно корректировали позу именно в соответствии с направлением данных колебаний. В случае ПС такая реакция приводила к тому, что мышечные коррекционные усилия вызывали зрительно соответствовавшие им противофазные смещения переднего плана, а это в итоге обуславливало даже небольшое уменьшение поздних осцилляций. В случае же СС испытуемые во время коррекционных усилий не получали зрительной информации об ожидавшемся уменьшении смещений переднего плана ВЗС, а, наоборот, видели, что данные смещения еще больше увеличиваются. Таким образом, при СС зрительные сигналы от движения переднего плана существенно затрудняли использование сигналов от мышечно-суставных и вестибулярных рецепторов, а также зрительных сигналов в отношении неподвижного заднего плана, которые были бы адекватны текущей позе и могли бы быть использованы для построения необходимых мышечных коррекций. Это, по-видимому, и являлось причиной дополнительной дестабилизации вертикальной позы. В то же время следует отметить, что в условиях СС максимальные колебания тела субъекта не превышали значений, характерных для стояния с ЗГ. Данное обстоятельство позволяет предполагать, что испытуемым удавалось в определенной мере преодолевать влияние дестабилизирующих позу “некорректных” зрительных сигналов, связанных с колебаниями переднего плана.

В условиях поддержания вертикальной позы на податливой опоре колебания ЦТв тела при всех зрительных условиях значительно увеличивались. В данном случае в условиях СС они становились существенно меньшими, чем в условиях поддержания позы в отсутствие зрительной информации (ЗГ) (рис. 3). Этот результат свидетельствует о том, что в условиях податливости опоры сигналы от незрительных сенсорных источников, содержащие в себе адекватную оценку положения тела в пространстве,

усиливали свое влияние на процесс построения позных коррекций.

В отличие от спектров переменной ЦТв, RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв, вычисленных для стояния на жесткой опоре, были довольно близкими при трех зрительных условиях – НЗО, ПС и СС. В силу этого можно прийти к заключению, что в указанных условиях дестабилизирующее позу влияние зрительных сигналов о смещениях переднего плана не реализовывалось непосредственно через механизм, регулирующий интегральную суставную жесткость в голеностопных суставах. Однако при поддержании вертикальной позы на податливой опоре такой механизм активировался, поскольку RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв, полученных для условий ПС и СС, были различны. Следует отметить, что RMS спектров переменной ЦДС–ЦТв в условиях ПС были больше, чем в условиях СС. В то же время RMS спектров переменной ЦТв в условиях ПС были, наоборот, существенно меньше, чем в условиях СС. Этот факт прямо указывает на то, что амплитудные характеристики элементарных переменных (ЦТв и ЦДС–ЦТв) могут изменяться не только параллельно (как в случае жесткости опоры), но и разнонаправленно (при определенных изменениях условий поддержания вертикальной позы).

Изменения частотных характеристик спектров обеих переменных были не столь выраженными, как изменения их амплитуд. Вместе с тем MdF спектров, как это следует из полученных результатов, также проявляли зависимость и от условий зрительного контроля, и от вида опорной поверхности (рис. 4). Прежде всего следует отметить различия изменений MdF спектров ЦДС–ЦТв в случае перехода от условий ПС к условиям СС. При стоянии на твердой опоре такой переход приводил к уменьшению MdF спектров, в то время как в тестах на податливой опоре наблюдалось, наоборот, увеличение указанного параметра. В данном случае MdF спектров ЦТв изменялись одинаковым образом – независимо от характеристик опоры с переходом от условий ПС к условиям СС происходило их уменьшение.

В целом можно заключить, что полученные в нашем исследовании результаты в определенной мере противоречат высказанной ранее гипотезе [16, 17] о том, что различия величины колебаний тела в разных зрительных условиях могут быть связаны с изменениями суставной жесткости, автоматически настраиваемой на основе поступающих от зри-

тельного входа неспецифических влияний на нейронные структуры позной регуляции. Если бы это происходило, то в наших экспериментах следовало бы всегда ожидать параллельного возрастания или убывания амплитудных и частотных характеристик спектров обеих рассматриваемых переменных в ответ на изменение зрительных условий в случаях как твердой, так и податливой опоры. Мы же обнаружили, однако, что таким параллельно происходившим изменениям спектров обеих переменных (например, в случае перехода от условий стояния с ЗГ к условию НЗО) сопутствовали изменения, при которых паттерн параллельности заметно нарушался. Таким образом, результаты нашего исследования заставляют полагать, что обе переменные могут иметь как связанные друг с другом механизмы управления их амплитудно-частотными характеристиками, так и не связанные, т. е. взаимно независимые, механизмы управления.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-04-00950).

Все стадии работы соответствовали положениям Хельсинкской декларации (1975, редакции 1996–2013). Все испытуемые были предварительно информированы о содержании и процедуре экспериментов и дали письменное согласие на участие в них.

Авторы настоящей статьи – Б. Н. Сметанин, Г. В. Кожина и А. К. Попов – подтверждают отсутствие конфликтов любого рода, касающихся коммерческих или финансовых интересов, отношений с организациями или лицами, которые каким-либо образом могли быть связаны с исследованием, и взаимоотношений соавторов статьи.

*Б. Н. Сметанин<sup>1</sup>, Г. В. Кожина<sup>1</sup>, А. К. Попов<sup>1</sup>*

#### ВПЛИВ ДЕСТАБІЛІЗАЦІЇ СПРИЙНЯТТЯ ЗОРОВОГО ОТОЧЕННЯ НА ПІДТРИМУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПОЗИ ЛЮДИНОЮ НА РІЗНИХ ОПОРНИХ ПОВЕРХНЯХ

<sup>1</sup> Інститут проблем передачі інформації ім. А. А. Харкевича РАН, Москва (РФ).

#### Резюме

Порівнювали характеристики підтримування вертикальної пози людиною в умовах нерухомого зорового оточення (ЗО) та занурення у віртуальне зорове середовище (ВЗС). Передній план останнього являв собою вид на вікна кімнати, а задній – вид на акведук з прилеглою місцевістю. Дестабілізація видимого ЗО створювалася за допомогою “прив’язки” розташування переднього плану до коливань тіла випробуваного в сагітальній площині. Вимірювали елементарні

змінні, котрі вираховували згідно з траєкторією центра тиснення стоп (ЦТС), – зміщення вертикальної проекції центра ваги (змінна ЦВв) і різницю між положеннями ЦТС і ЦВв (змінна ЦТС–ЦВв). При стоянні на жорсткій опорній поверхні середньоквадратичні значення (RMS) спектрів коливань обох змінних зменшувались у разі протифазного зв'язку зміщень переднього плану ЗО з коливаннями тіла та збільшувались у разі їх синфазного зв'язку порівняно з RMS під час підтримування пози в умовах нерухомого ЗО (НЗО). В умовах дії синфазного зв'язку, проте, драматичних порушень вертикальної пози не відбувалося; максимальні коливання тіла в даному випадку не перевищували значень, характерних для стояння із заплющеними очима. При підтримуванні ж вертикальної пози на піддатливій опорі коливання тіла значно збільшувалися в усіх зорових умовах, причому різниця між RMS спектрів змінної ЦВв, отриманих для умов синфазного зв'язку і заплющених очей, ставала статистично значущою. В разі стояння на піддатливій опорі RMS спектрів змінної ЦТС–ЦВв при протифазному зв'язку переднього плану були більшими, ніж при синфазному, в той час як RMS спектрів коливань ЦВв, навпаки, були більшими при синфазному зв'язку. Таким чином, з варіюванням умов підтримування вертикальної пози амплітудні характеристики елементарних змінних (ЦВв и ЦТС–ЦВв), які формують ЦТС на опорі, можуть змінюватись як паралельно, так і незалежно одна від одної. Згадані змінні можуть обслуговуватись не тільки зв'язаними один з одним, але й незалежними механізмами контролю їх амплітудно-частотних характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Edwards, "Body sway and vision," *J. Exp. Psychol.*, **36**, No. 4, 526-535 (1946).
2. A. Nardone, M. Galante, B. Lucas, and M. Schieppati, "Stance control is not affected by paresis and reflex hyperexcitability: the case of spastic patients," *J. Neurol., Neurosurg., Psychiat.*, **70**, No. 5, 635-643 (2001).
3. B. N. Smetanin, K. E. Popov, and G. V. Kozhina, "Dependence of joint stiffness on the conditions of visual control in upright undisturbed stance in humans," *Neurophysiology*, **38**, No. 2, 157-163 (2006).
4. A. Mirka and F. O. Black, "Clinical application of dynamic posturography for evaluating sensory integration and vestibular dysfunction," in: *Dizziness and Balance Disorders*, K. Arenberg (ed.), Kluwer Publ., Amsterdam, New York (1993), pp. 381-388.
5. M. Guerraz, L. Yardley, P. Bertholon, et al., "Visual vertigo: symptom assessment, spatial orientation and postural control," *Brain*, **124**, No. 8, 1646-1656 (2001).
6. U. Oppenheim, R. Kohen-Raz, D. Alex, et al., "Postural characteristics of diabetic neuropathy," *Diabetes Care*, **22**, No. 2, 328-332 (1999).
7. K. H. Mauritz, J. Dichgans, and A. Hufschmidt, "Quantitative analysis of stance in late cortical cerebellar atrophy of the anterior lobe and other forms of cerebellar ataxia," *Brain*, **102**, No. 3, 461-482 (1979).
8. D. N. Lee and J. R. Lishman, "Visual proprioceptive control of stance," *J. Human Mov. Studies*, **1**, No. 1, 87-95 (1974).
9. J. Soechting and A. Berthoz, "Dynamic role of vision in the control of posture in man," *Exp. Brain Res.*, **36**, No. 3, 551-561 (1979).
10. A. Berthoz, M. Lacour, J. F. Soechting, and P. P. Vidal, "The role of vision in the control of posture during linear motion," *Prog. Brain Res.*, **50**, No. 1, 197-209 (1979).
11. T. M. H. Dijkstra, G. Schöner, and C. C. A. M. Gielen, "Temporal stability of the action-perception cycle for postural control in a moving visual environment," *Exp. Brain Res.*, **97**, No. 6, 477-486 (1994).
12. T. M. H. Dijkstra, G. Schöner, M. A. Giese, and C. C. A. M. Gielen, "Frequency dependence of the action-perception cycle for postural control in a moving visual environment: relative phase dynamics," *Biol. Cybern.*, **71**, No. 6, 489-501 (1994).
13. K. Dokka, R. V. Kenyon, and E. A. Keshner, "Influence of visual scene velocity on segmental kinematics during stance," *Gait Posture*, **30**, No. 2, 211-221 (2009).
14. В. С. Гурфинкель, Я. М. Коц, М. Л. Шик, *Регуляция позы человека*, Наука, Москва (1965).
15. J. J. Collins and C. J. De Luca, "The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms," *Exp. Brain Res.*, **103**, No. 1, 151-163 (1995).
16. B. N. Smetanin, K. E. Popov, and G. V. Kozhina, "Postural reactions to vibratory stimulation of calf muscles under condition of visual inversion in human," *Fiziologia Cheloveka*, **28**, No. 5, 53-58 (2002).
17. R. Fitzpatrick, D. Burke, and S. C. Gandevia, "Task-dependent reflex responses and movement illusions evoked by galvanic vestibular stimulation in standing humans," *J. Physiol.*, **478**, No. 2, 363-372 (1994).
18. G. A. Horstmann and V. Dietz, "A basic posture control mechanism: the stabilization of the centre of gravity," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, **76**, No. 2, 165-176 (1990).
19. P. Rougier, "Compatibility of postural behavior induced by two aspects of visual feedback: time delay and scale display," *Exp. Brain Res.*, **165**, No. 2, 193-202 (2005).
20. D. A. Winter, A. E. Patla, F. Prince, et al., "Stiffness control of balance in quiet standing," *J. Neurophysiol.*, **80**, No. 3, 1211-1221 (1998).
21. N. Vuillerme and G. Nafati, "How attentional focus on body sway affects postural control during quiet standing," *Psychol. Res.*, **71**, No. 2, 192-200 (2007).
22. С. В. Клименко, И. Н. Никитин, Л. Д. Никитина, *Аванго: система разработки виртуальных окружений*, Ин-т физ.-техн. информ., Москва, Протвино (2006).
23. B. N. Smetanin, G. V. Kozhina, and A. K. Popov, "Human upright posture control in a virtual visual environment," *Fiziologia Cheloveka*, **35**, No. 2, 54-59 (2009).
24. G. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*, John Wiley & Sons, New York (1994).
25. K. E. Popov, G. V. Kozhina, B. N. Smetanin, and V. Y. Shlikov, "Postural responses to combined vestibular and hip proprioceptive stimulation in man," *Eur. J. Neurosci.*, **11**, No. 9, 3307-3311 (1999).
26. B. N. Smetanin, G. V. Kozhina, and A. K. Popov, "Maintenance of the upright posture in humans upon manipulating the direction and delay of visual feedback," *Neurophysiology*, **44**, No. 5, 401-408 (2012).
27. Y. Brenière, "Why we walk the way we do?" *J. Mot. Behav.*, **28**, No. 2, 291-298 (1996).
28. O. Caron, B. Faure, and Y. Brenière, "Estimating the center

- of gravity of the body on the basis of the center of pressure in standing posture," *J. Biomech.*, **30**, 1169-1171 (1997).
29. P. Rougier and I. Farenç, "Adaptative effects of loss of vision on upright undisturbed stance," *Brain Res.*, **871**, No. 2, 165-174 (2000).
30. P. Rougier and O. Caron, "Centre of gravity motions and ankle joint stiffness control in upright undisturbed stance modeled through fractional Brownian motion framework," *J. Mot. Behav.*, **32**, No. 4, 405-413 (2000).