

УДК 612.062

## ПОДДЕРЖАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ПОВТОРЕНИИ ПРОБ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО ЗРИТЕЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

© 2019 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 им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 11.02.2019 г.

После доработки 05.03.2019 г.

Принята к публикации 04.04.2019 г.

Выясняли возможность адаптации здоровых испытуемых к условиям стояния в трехмерной виртуальной зрительной среде, дестабилизация которой осуществляется за счет введения постоянной по величине и направлению, например, только синфазной связи между колебаниями тела испытуемого и положением видимой им виртуальной зрительной сцены. В течение примерно полутора часов испытуемые выполняли 35 проб длительностью 40 с каждая, во время которых они должны были спокойно стоять на стабилографе, регистрировавшем перемещения центра давления тела. Интервал для отдыха между пробами составлял 20–25 с, после каждых 5 проб испытуемые отдыхали сидя в течение 4–5 мин. Анализ поддержания позы базировался на оценке амплитудно-частотных характеристик двух элементарных переменных, вычислявшихся из траекторий центра давления (ЦД) в переднезаднем и боковом направлениях: траектории проекции центра тяжести на опору (переменная ЦТ) и разности между траекториями ЦД и ЦТ (переменная ЦД–ЦТ). Полученные результаты показали, что процесс стояния в условиях однотипной дестабилизации видимого зрительного окружения к концу проб существенно изменялся, приближаясь по амплитудным и частотным характеристикам переменных ЦТ и ЦД–ЦТ к стоянию при неподвижном зрительном окружении. Уменьшение дестабилизирующих позу влияний, вызывавшихся введением синфазной связи между колебаниями тела испытуемого и положением видимой им виртуальной зрительной сцены, достигалось за счет изменений как амплитудных, так и частотных характеристик переменных ЦТ и ЦД–ЦТ. Таким образом, было показано, что многократное повторение проб в условиях виртуальной зрительной среды (ВЗС), создававшей неустойчивость видимого зрительного окружения и соответственно дестабилизацию вертикальной позы, позволяло испытуемым эффективно адаптироваться и улучшать характеристики равновесия тела.

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

DOI: 10.1134/S0131164619050059

Способность человека сохранять равновесие при стоянии базируется на “умении” центральной нервной системы управлять позиционными колебаниями центра массы тела так, чтобы его проекция оставалась в границах опорного контура. Реально же такое “умение” строится на контроле за хорошо ощущаемыми смещениями центра давления (ЦД) на опору. Колебания ЦД в низкочастотном диапазоне (в пределах 0–0.5 Гц) отражают колебания центра тяжести (ЦТ) [1–3]. Такое понимание сути процесса стабилизации положения ЦТ позволяет рассматривать тело стоящего человека как однозвенную структуру и моделировать его как перевернутый маятник [1, 2]. В связи с представлениями о роли информации о положении ЦДС в поддержании вертикальной

позы появилась целая серия исследований, в которых авторы использовали предъявление испытуемым визуальной картины, отображавшей колебания ЦД и/или ЦТ, а также ЦД–ЦТ в качестве обратной связи [4–12]. Полученные результаты оказались довольно противоречивыми. Так, при попытке выяснить, может ли помочь восстановлению позной активности после инсульта у больных-гемиплегиков тренировка с использованием системы контроля равновесия при стоянии “*NeuroCom Balance Master*”, во время которой они наблюдали на экране монитора двумерную картину колебаний ЦД, не удалось выявить какого-либо влияния такой зрительной обратной связи на позные колебания [7]. В исследованиях [9, 10] было показано, что зрительная обратная связь в виде

предъявления на экране двумерной траектории ЦД или ЦТ также не приводила к существенным изменениям устойчивости вертикальной позы у молодых здоровых испытуемых. Вместе с тем в других исследованиях [4, 6, 8, 12] было выявлено положительное влияние таких видов обратной связи на поддержание позы в экспериментах, как на молодых, так и на пожилых испытуемых.

Противоречивость приведенных данных разных авторов о влиянии визуальной картины, отображавшей колебания переменных ЦД и/или ЦТ или их разности, на колебания вертикальной позы может иметь разные причины. Одной из них, могли быть разные и, обычно, небольшие размеры, предъявлявшейся зрительной картины колебаний ЦД и/или ЦТ. Другой причиной, возможно, была разная форма предъявления переменных на экране: двумерная траектория, траектория в одной плоскости, колеблющийся шар и другие. Эти зрительные картины, хотя и позволяли оценивать относительную величину отклонений тела, но могли по-разному влиять на механизмы адаптивных изменений в позном контроле. Еще одной причиной могло быть разное в разных работах и небольшое (как правило не более 10) количество проб, выполнявшихся испытуемыми в одном эксперименте, что, как показал наш опыт [13], может быть недостаточным для появления устойчивой адаптации при повторении проб.

В данной работе, учитывая результаты этих исследований, была поставлена задача исследовать возможные адаптивные проявления при поддержании вертикальной позы у здоровых людей при многократном повторении проб в условиях виртуальной зрительной среды (ВЗС). Последняя состояла из двух планов: переднего и заднего, воспроизводящих близкую к реальной зрительную ситуацию. При этом передний план был синфазно связан с колебаниями ЦТ тела, что с одной стороны приводило к дестабилизации позы, а с другой позволяло испытуемым отслеживать колебания тела в переднезаднем и боковом направлениях.

## МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 14 здоровых испытуемых — восемь мужчин (средний возраст  $64.3 \pm 7.6$  г.) и шесть женщин ( $66.0 \pm 4.4$  г.). 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 экспериментального исследования испытуемые стояли в удобной обуви на квадратной платформе стабилографа (Стабилан-01-2 — ЗАО ОКБ “РИТМ”, г. Таганрог). С его помощью

регистрировали изменения положения 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 стоянии испытуемые смотрели на экран (высота 1.5 м и ширина 2 м), изготовленный из ткани, которая в минимальной степени деполяризует падающий на нее свет (*silverscreen*). На экране с помощью, так называемого, пассивного способа, базирующегося на эффекте поляризации света, [14] формировали трехмерное стереоизображение. На экран с двух проекторов (*Sharp XR-10X*), снабженных поляризационными фильтрами, ориентированными ортогонально относительно друг друга, одновременно проецировали два изображения одной и той же сцены: вид из окна на акведук. Испытуемые и проекторы находились по одну сторону от экрана. При тестировании на испытуемых надевали очки с поляризационными фильтрами (*3DS-GS* (Панорама), “*Stel — Computer Systems Ltd.*” (г. Москва); частота чередований 120 Гц), ориентированными параллельно соответствующим фильтрам проекторов, что обеспечивало трехмерное восприятие ВЗС. Поле зрения испытуемых было ограничено очками, составляя примерно  $60^\circ$  по вертикали и  $80^\circ$  по горизонтали, и не выходило за пределы экрана. В этих условиях они видели только виртуальную трехмерную картину, включавшую в себя два плана: передний и задний. Передний представлял собой окно комнаты с прилегающими к нему стенами, а задний — акведук с прилегающей местностью. Удаление изображения переднего плана от испытуемого составляло 1.2 м, а заднего — соответствовало расстоянию порядка 20 м. Таким образом, испытуемые могли ориентироваться только в пределах представленной им ВЗС. В процессе тестирования их просили смотреть на неподвижный задний план приблизительно в его центр.

В течение, примерно, полутора часов испытуемые выполняли 35 проб длительностью 40 с каждая, во время которых они должны были спокойно стоять на стабилографе, регистрировавшем колебания их тела (ЦД). Интервал для отдыха между пробами составлял 20–25 с, после каждых 5 проб испытуемые отдыхали сидя в течение 4–5 мин. Первые и последние 5 проб, которые рассматривали в качестве контрольных, проводили при неподвижном зрительном окружении (НЗО), при этом испытуемые стояли в тех же стерео очках, и поле зрения было ограничено теми же пределами, что и в условиях связи между колебаниями тела и передним планом ВЗС. Они видели перед собой экран с изображением той же виртуальной трехмерной сцены, однако оба ее плана не были связаны с колебаниями тела. Остальные 25 проб (тестовые) разбивали на блоки по 5 проб в каждом. При выполнении тестовых проб вводили синфазную связь (СС) между колебаниями те-

ла и передним планом видимой сцены на экране. С этой целью положение переднего плана ВЗС в боковом и переднезаднем направлениях делали зависимым от низкочастотных (менее 1 Гц) колебаний тела в соответствующих плоскостях. Такая привязка приводила к тому, что смещения переднего плана ВЗС происходили практически одновременно (задержка около 50 мс) с колебаниями тела. Синфазную связь включали с коэффициентом 2. При этом коэффициенте величина смещений переднего плана видимой зрительной среды и в переднезаднем, и в боковом направлениях в два раза превышала величину колебаний тела в этих же направлениях.

Ранее мы показали, что в таких условиях испытуемые, корректируя позу, невольно используют в качестве основы для построения системы отсчета подвижный передний план ВЗС, и тем самым дестабилизируют позу по сравнению с нормальными зрительными условиями [15, 16].

*Анализ колебаний тела.* Сигнал стабилотографа конвертировали из аналоговой в цифровую форму с частотой оцифровки в 50 Гц и регистрировали на персональном компьютере. При последующем анализе траекторию ЦД представляли как сумму двух функций времени вдоль каждой (боковой и переднезадней) из осей. Оценку устойчивости вертикальной позы производили, анализируя изменения амплитудно-частотных характеристик двух элементарных переменных, вычисляемых из перемещений ЦД на опоре. Одной из них была траектория проекции центра тяжести (переменная ЦТ), а второй разность между траекториями ЦД и ЦТ (переменная ЦД–ЦТ). Для их вычисления мы использовали подход, предложенный в работе [17] и подробно описанный и использованный в целом ряде работ [18–20], а также другими исследователями. В связи с этим далее приведены только основные его положения.

Метод вычисления указанных элементарных переменных базируется на том, что имеется четкая зависимость изменений амплитуды колебаний ЦТ и ЦД от частоты колебаний. В частности, показано [2, 17, 18], что отношение амплитуд этих переменных (ЦТ/ЦД) наибольшее, приближающееся к 1.0, при минимальных частотах колебаний (близких к 0.0 Гц) и наименьшее, приближающееся к 0.0, при максимальных частотах (больше 3 Гц). Из этого можно заключить, что относительно высокочастотные колебания ЦД не влияют на величину колебаний ЦТ. Действительно, в цитируемых работах экспериментально показали, что фактически колебания ЦД с частотами больше 0.5 Гц практически не отражаются на величине колебаний ЦТ. Исходя из такого понимания, для получения элементарных переменных мы использовали метод фильтрации низких частот, выражающий отношение амплитуды коле-

баний ЦТ и ЦД и отражающий связь частоты колебаний ЦД с перемещениями тела [17–19]. В дальнейшем в ходе анализа результатов тестирования перемещения ЦТ рассматривали как контролируемую переменную, а разность ЦД–ЦТ – как переменную, связанную с ускорением тела и отражающую изменения результирующей мышечной жесткости в голеностопных суставах [18, 19, 21].

Программу частотной фильтрации колебаний ЦД с целью выделения из нее переменных ЦТ и ЦД–ЦТ и последующего вычисления на их основе *MF* и *RMS* спектров колебаний написали в среде *Matlab*.

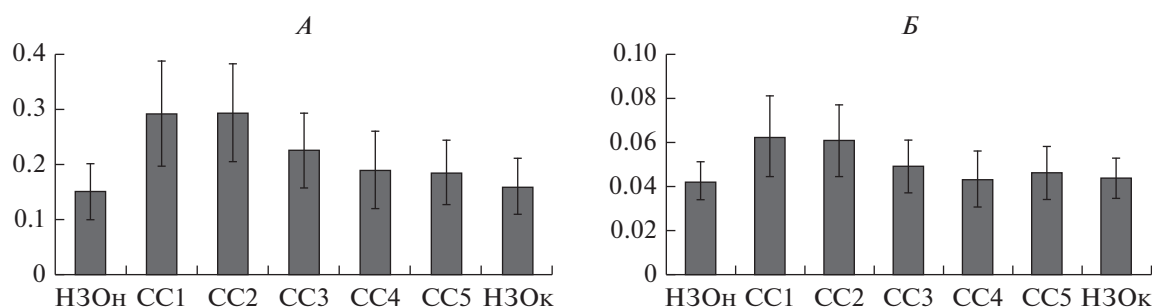
Оценку влияния повторения проб на возможные адаптивные изменения в поддержании вертикальной позы производили, анализируя изменения медианной частоты (*MF*) и среднеквадратического значения (*RMS*) амплитудных спектров исследуемых переменных в диапазонах 0–0.5 Гц для переменной ЦТ и 0–3.0 Гц для переменной ЦД–ЦТ. С этой целью сравнивали средние величины *MF* и *RMS* спектров, полученные в контрольных блоках и в пяти тестовых блоках проб.

В ходе статистического анализа достоверность различий *RMS* и *MF* спектров при сравнении контрольных и тестовых условий оценивали с применением “парного двухвыборочного *t*-теста для средних”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

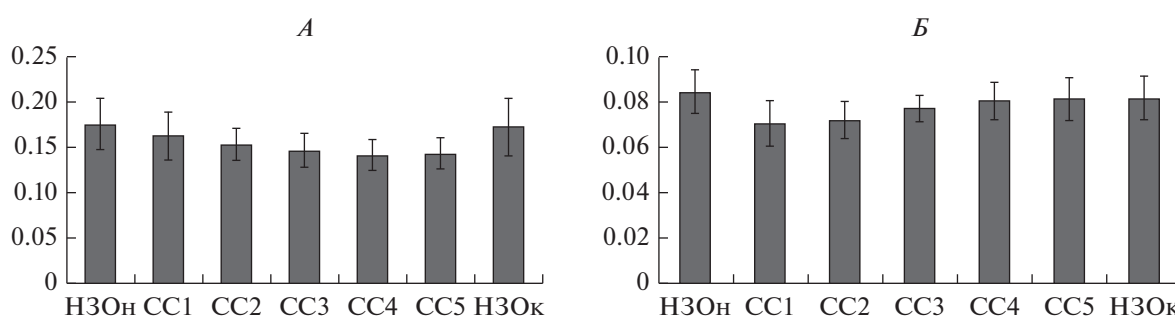
*Анализ RMS и MF спектров колебаний исследуемых переменных, вычисленных из колебаний ЦД в переднезаднем направлении.* На рис. 1 представлены усредненные по всем испытуемым *RMS* амплитудных спектров для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, вычисленных по результатам анализа влияния повторения проб в пяти блоках на поддержание вертикальной позы. Из рис. 1 видно, что *RMS* спектров обеих переменных, в условии НЗО были примерно одинаковыми в начальных и в конечных пробах и статистически не различались между собой ( $t_{13} = -1.334, p > 0.103, t_{13} = -0.725, p > 0.214$ ; соответственно для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ).

В условиях СС *RMS* спектров обеих переменных по сравнению с их величиной в контрольных пробах (условие НЗО) существенно увеличивались в первых двух блоках проб. При тестировании в последующих трех блоках они постепенно уменьшались по мере повторения проб, приближаясь к контрольным значениям, свойственным условию НЗО. Оценка достоверности различий *RMS* спектров между тестовыми пробами в разных блоках и контрольными пробами выявила несколько более быстрое уменьшение значений для переменной ЦД–ЦТ. В частности, *RMS* спек-



**Рис. 1.** *RMS* (мм) спектров переменных ЦТ (А) и ЦД–ЦТ (Б) для переднезаднего направления и их стандартные ошибки при неподвижном зрительном окружении (НЗО) и при синфазной связи (СС) колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела в разных блоках проб.

Результаты обработки в пяти начальных и пяти конечных пробах условия НЗО обозначены буквами “н” и “к”.



**Рис. 2.** *MF* (Гц) спектров переменных ЦТ (А) и ЦД–ЦТ (Б) для переднезаднего направления и их стандартные ошибки при НЗО и при СС колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела в разных блоках проб. Обозначения см. рис. 1.

тров переменной ЦД–ЦТ, полученные в 4 и 5 блоках проб статистически не отличались от значений этой переменной в контрольных пробах, в то время как *RMS* спектров переменной ЦТ в этих блоках проб были несколько (статистически достоверно) больше, чем в контрольном блоке проб (табл. 1).

Следует указать, что при проведении статистического анализа в качестве контрольных значений *RMS* и *MF* спектров переменных использовали те, которые были получены в начальных контрольных блоках проб.

На рис. 2 показаны усредненные по всем испытуемым *MF* амплитудных спектров для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, вычисленных по результатам анализа влияния повторения проб в пяти блоках на поддержание вертикальной позы.

Медианные частоты спектров обеих переменных, вычисленные для начальных и конечных проб в условии НЗО были близкими и статистически не различались собой ( $t_{13} = 0.328, p > 0.374$ ;  $t_{13} = 0.627, p > 0.271$ ; соответственно для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ).

*MF* спектров переменной ЦТ в условиях СС в первом блоке проб, существенно не отличались

**Таблица 1.** Результаты оценки достоверности различий *RMS* спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ для переднезаднего направления, полученные при сравнении условия НЗО в начальном блоке проб и условия СС в пяти блоках проб

Блок	НЗО	ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( <i>t</i> ≤)	Блок	ЗО	ЦД–ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( <i>t</i> ≤)
СС1	0.151	0.292	−5.035	0.00015	СС1	0.042	0.063	−3.639	0.0017
СС2	0.151	0.294	−5.097	0.00013	СС2	0.042	0.061	−3.559	0.0020
СС3	0.151	0.225	−5.258	0.00010	СС3	0.042	0.049	−2.076	0.0300
СС4	0.151	0.190	−3.752	0.00138	СС4	0.042	0.043	−0.333	0.3723
СС5	0.151	0.186	−2.785	0.00824	СС5	0.042	0.046	−1.1657	0.1332

**Таблица 2.** Результаты оценки достоверности различий *MF* спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, полученные при анализе колебаний переднезаднего направления в пяти блоках проб

Блок	НЗО	ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( <i>t</i> ≤)	Блок	ЗО	ЦД–ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( <i>t</i> ≤)
СС1	0.175	0.164	1.031	0.161	СС1	0.836	0.681	2.975	0.006
СС2	0.175	0.156	1.919	0.040	СС2	0.836	0.689	2.974	0.006
СС3	0.175	0.149	2.769	0.008	СС3	0.836	0.758	2.109	0.028
СС4	0.175	0.147	2.623	0.011	СС4	0.836	0.791	1.236	0.120
СС5	0.175	0.141	3.873	0.001	СС5	0.836	0.807	0.746	0.235

**Таблица 3.** Результаты оценки достоверности различий *RMS* спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ для бокового направления, полученные при сравнении условия НЗО в начальном блоке проб и условия СС в пяти блоках проб

Блок	НЗО	ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( <i>t</i> ≤)	Блок	ЗО	ЦД–ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( <i>t</i> ≤)
СС1	0.167	0.308	−4.525	0.0003	СС1	0.044	0.065	−3.509	0.0022
СС2	0.167	0.302	−4.462	0.0004	СС2	0.044	0.060	−2.508	0.0137
СС3	0.167	0.231	−3.585	0.0003	СС3	0.044	0.048	−1.203	0.1262
СС4	0.167	0.191	−2.669	0.0102	СС4	0.044	0.044	−0.150	0.4417
СС5	0.167	0.172	−0.357	0.3635	СС5	0.044	0.042	0.442	0.333

по величине от *MF* в контрольных пробах при НЗО. В остальных же блоках проб их значения были достоверно меньше, чем при НЗО (табл. 2), причем уменьшение величины *MF* прогрессировало по мере выполнения проб от первого блока к пятому.

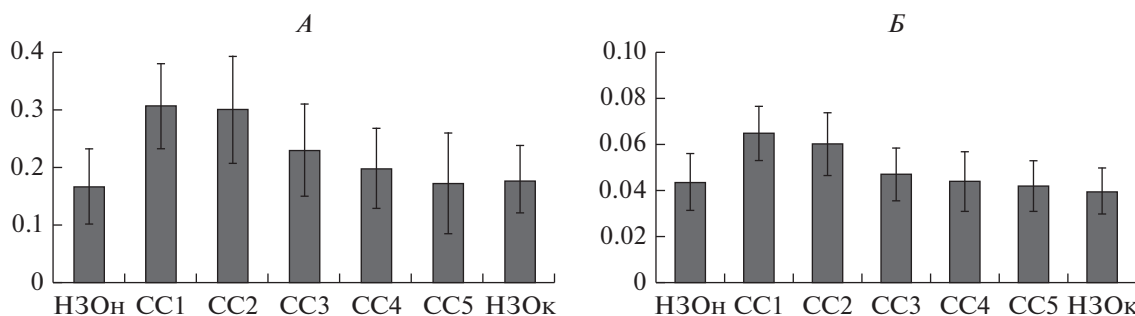
Из табл. 2 видно, что *MF* спектров переменной ЦД–ЦТ были, наоборот, наименьшими в первых двух блоках проб и постепенно возрастали при повторении проб в последующих блоках, приближаясь к значениям, полученным в контрольных условиях (НЗО).

Анализ *RMS* и *MF* спектров колебаний исследуемых переменных, вычисленных из колебаний ЦД в боковом направлении. Повторение проб оказывало примерно такое же влияние на *RMS* спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, вычисленных из колебаний в этом направлении (рис. 3), какое было вы-

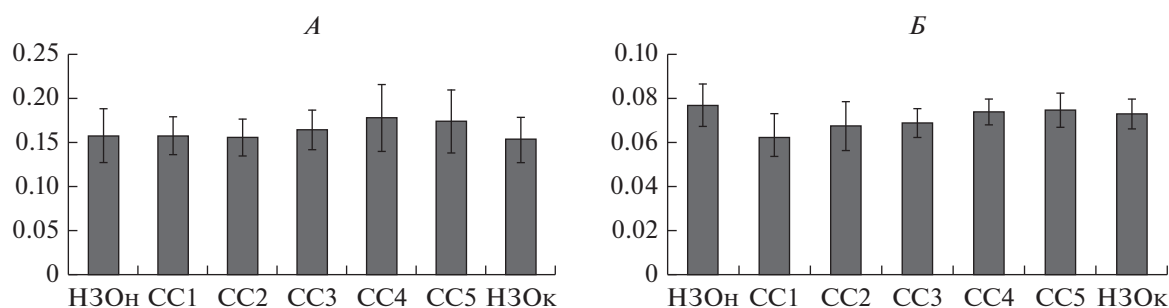
явлено на спектры колебаний переднезаднего направления. Из рис. 3 видно, что существенное увеличение значений *RMS* спектров обеих переменных, наблюдавшееся в первых двух блоках проб постепенно убывало в последующих блоках проб, а сами значения приближались к выявленным величинам в контрольных пробах условия НЗО (табл. 3).

Следует отметить, что в условии НЗО *RMS* спектров обеих переменных имели близкие величины в начальных и в конечных пробах и статистически не различались между собой ( $t_{13} = -0.535$ ,  $p > 0.301$ ,  $t_{13} = 1.001$ ,  $p > 0.168$ ; соответственно для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ).

На рис. 4 показаны усредненные по всем испытуемым *MF* амплитудных спектров для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, вычисленные по результатам анализа влияния повторения проб в пяти бло-



**Рис. 3.** *RMS* (мм) спектров переменных ЦТ (А) и ЦД–ЦТ (Б) (боковое направление) и их стандартные ошибки при НЗО и при СС колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела в разных блоках проб. Обозначения см. рис. 1.



**Рис. 4.** *MF* (Гц) спектров переменных ЦТ (А) и ЦД–ЦТ (Б) для бокового направления и их стандартные ошибки при НЗО и при СС колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела в разных блоках проб. Обозначения см. рис. 1.

ках на поддержание вертикальной позы в боковом направлении.

Медианные частоты спектров обеих переменных, вычисленные для начальных и конечных проб в условии НЗО были близкими и статистически не различались ( $t_{13} = 0.691$ ,  $p > 0.252$ ;  $t_{13} = 1.412$ ,  $p > 0.094$ ; соответственно для переменных ЦТ и ЦД–ЦТ).

В отличие от изменений *MF* спектров колебаний тела переднезаднего направления, *MF* спектров переменной ЦТ, вычисленные из колебаний бокового направления, по мере повторения проб не уменьшались, а увеличивались. В частности, в четвертом и пятом блоках *MF* были достоверно больше, чем в НЗО (табл. 2). С другой стороны тенденция изменений *MF* спектров колебаний переменной ЦД–ЦТ была примерно такой же, как и выявленная при анализе колебаний тела переднезаднего направления (табл. 3 и 4).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данная работа явилась продолжением ранее выполненного нами исследования [13], цель которого также состояла в том, чтобы выяснить, в

какой мере у здоровых испытуемых может происходить адаптация к условиям стояния в нестабильной зрительной среде. В этом предыдущем исследовании испытуемые выполняли аналогичные по длительности пробы – по 40 с каждая. Общее количество тестовых проб было 30. Они также разбивались на блоки по 5 проб, однако синфазная связь включалась с разными коэффициентами усиления: 1, 2, и 4. При коэффициенте 1 смещения видимой зрительной среды в переднезаднем и боковом направлениях были равны по величине смещениям тела испытуемого в этих же направлениях. При коэффициентах 2 и 4 смещения зрительной среды были больше, чем смещения тела соответственно в 2 и 4 раза. Полученные результаты показали, что в условиях дестабилизации зрительного окружения колебания тела в обеих плоскостях были существенно больше, чем при НЗО, однако по мере повторения проб независимо от коэффициента связи, они заметно уменьшались. В конечных пяти пробах это уменьшение колебаний тела становилось статистически достоверным, но не превышало при разных коэффициентах 20–22%.

**Таблица 4.** Результаты оценки достоверности различий *MF* спектров переменных ЦТ и ЦД–ЦТ, полученные при анализе колебаний тела в боковом направлении в пяти блоках проб

Блок	НЗО	ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( $t \leq$ )	Блок	ЗО	ЦД–ЦТ	<i>t</i> -статист.	<i>p</i> ( $t \leq$ )
СС1	0.159	0.159	−0.011	0.442	СС1	0.785	0.643	3.334	0.004
СС2	0.159	0.302	−0.011	0.457	СС2	0.785	0.690	2.031	0.035
СС3	0.159	0.231	−1.413	0.091	СС3	0.785	0.702	2.417	0.018
СС4	0.159	0.191	−2.062	0.031	СС4	0.785	0.752	1.637	0.066
СС5	0.159	0.172	−2.226	0.023	СС5	0.785	0.760	1.074	0.154

Данное исследование показало, что многократное повторение проб при одном и том же постоянном коэффициенте (был выбран коэффициент 2 для связи колебаний тела с видимой зрительной средой) приводит к более существенному уменьшению величины колебаний тела в обеих (переднезадней и боковой) плоскостях. В частности, если в первых двух блоках проб величина колебаний ЦТ превышала контрольные величины примерно в два раза, то в последнем пятом блоке *RMS*-спектров этой переменной имели значения, которые были близки к полученным в контрольных НЗО-условиях. Уменьшение при этом составляло около 70–80%.

Улучшение поддержания вертикальной позы в условия дестабилизации видимого зрительного окружения достигалось за счет изменений как амплитудных, так, отчасти, и частотных характеристик переменных ЦТ и ЦД–ЦТ. Здесь следует отметить существенное уменьшение частоты колебаний переменной ЦД–ЦТ в первых двух блоках проб и последующее ее восстановление до контрольных значений в последующих блоках. Каковы могут быть механизмы адаптации системы поддержания равновесия к сенсорному конфликту? В ряде работ [22, 23] было показано, что система поддержания равновесия может игнорировать сигналы, несущие недостоверную или неоднозначную информацию. Поэтому возникает вопрос о том, не происходит ли то же самое при стоянии в условиях ВЗС, т.е. не происходит ли адаптация к измененным условиям просто за счет игнорирования зрительной информации. В этом случае стояние в условиях ВЗС было бы эквивалентно стоянию с закрытыми глазами, и качество поддержания равновесия не зависело бы от коэффициента связи между смещением ВЗС и центра давления. Тем не менее, в предыдущих исследованиях [13] нами было показано, что, по крайней мере, в первых пробах при коэффициенте связи, равном единице *RMS* спектров переменной, ЦТ в переднезаднем направлении возрастали примерно на 55% по сравнению с *RMS* в контроле, а при связи с коэффициентом 4 это увеличение доходило до 85%. Лишь по мере повторения проб стабильность переставала зависеть от коэффициента связи. При многократном повторении проб с постоянным коэффициентом связи показатели стабильности должны были бы приближаться к показателям при закрытых глазах, тогда как они приближались к показателям при обычном стоянии с открытыми глазами. Поэтому логичнее предположить, что повышение качества стояния при последовательном повторении однотипных проб явилось результатом более эффективного использования зрительной обратной связи с нестабильным передним планом ВЗС. Возможность эффективного использования такой необычной обратной связи может быть результатом выработ-

ки специфического навыка, базирующегося на формировании новых моделей межсенсорных связей в системе внутреннего представления собственного тела и окружающего пространства. Интересно также отметить, что возврат к условиям НЗО не вызывал ухудшения стояния по сравнению с начальным уровнем, т.е. после стояния в условиях дестабилизирующей ВЗС не возникало последствий. Это также может говорить о том, что адаптация к неустойчивости зрительного окружения базируется не на простой подстройке обратных связей в системе поддержания позы, а носит характер выработки нового двигательного навыка. Выработка этого дополнительного навыка не ведет к ухудшению стояния в обычных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящем исследовании было показано, что многократное повторение проб в условиях ВЗС, создававшей неустойчивость видимого зрительного окружения и соответственно дестабилизацию вертикальной позы, позволяло испытуемым эффективно адаптироваться и улучшать характеристики равновесия тела. При этом улучшение характеристик стояния в условиях дестабилизирующего зрительного окружения, скорее всего, базируется на формировании новой внутренней модели взаимосвязи движения тела и изменения зрительной картины, что позволяет довольно быстро выработать новый двигательный навык.

**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.** Исследование поддержано РФФИ (грант 18-015-00222).

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Winter D.A., Patla A.E., Prince F. et al. Stiffness control of balance in quiet standing // J. Neurophysiol. 1998. V. 80. № 3. P. 1211.

2. Winter D.A. Biomechanics and motor control of human movement. Fourth Edition. 4. Hoboken: Wiley, 2009. 370 p.
3. Shumway-Cook A., Wollacott M. Motor control: translating research into clinical practice. 4. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2011. 656 p.
4. Dault M.C., de Haart M., Geurts A.C.H. et al. Effects of visual center of pressure feedback on postural control in young and elderly healthy adults and in stroke patients // Hum Mov Sci. 2003. V. 22. № 3. P. 221.
5. Zijlstra A., Mancini M., Chiari L., Zijlstra W. Biofeedback for training balance and mobility tasks in older populations // J. Neuroeng Rehabil. 2010. V. 7. P. 58.
6. Halicka Z., Lovotkova J., Buckova K., Hlavacka F. Effectiveness of different visual biofeedback signals for human balance improvement // Gait Posture. 2014. V. 39. P. 410.
7. Geiger R.A., Allen J.B., O'Keefe J., Hicks R.R. Balance and mobility following stroke: effects of physical therapy interventions with and without biofeedback/forceplate training // Phys Ther. 2001. V. 81. P. 995.
8. Freitas S.M.S.F., Duarte M. Joint coordination in young and older adults during quiet stance: effect of visual feedback of the center of pressure // Gait Posture. 2012. V. 35. P. 83.
9. Kilby M.C., Slobounov S.M., Newell K.M. Augmented feedback of COM and COP modulates the regulation of quiet human standing relative to the stability boundary // Gait Posture. 2016. V. 47. P. 18.
10. Lakhani B., Mansfield A. Visual feedback of the centre of gravity to optimize standing balance // Gait Posture. 2015. V. 41. P. 499.
11. Kilby M.C., Slobounov S.M., Newell K.M. Postural Instability Detection: Aging and the Complexity of Spatial-Temporal Distributional Patterns for Virtually Contacting the Stability Boundary in Human Stance // PLoS One. 2014. V. 9. № 10: e108905.
12. Takeda K., Mani H., Hasegawa N. et al. Adaptation effects in static postural control by providing simultaneous visual feedback of center of pressure and center of gravity // J. Physiol. Anthropol. 2017. V. 36. № 1. P. 31.
13. 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.
14. Burdea G., Coiffet P. Virtual Reality Technology. N.Y.: John Wiley & Sons, Wiley-IEEE Press, 2003. 446 p.
15. Smetanin B.N., Kozhina G.V., Popov A.K. Maintenance of the Upright Posture in Humans upon Manipulating the Direction and Delay of Visual Feedback // Neurophysiology. 2012. V. 44. № 5. P. 401.
16. Сметанин Б.Н., Кожина Г.В., Попов А.К., Левик Ю.С. Спектральный анализ колебаний тела человека при стоянии на твердой и податливой опорах в разных зрительных условиях // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 6. С. 49.
17. Caron O., Faure B., Brenie're Y. Estimating the center of gravity of the body on the basis of the center of pressure in standing posture // J. Biomech. 1997. V. 30. № 11–12. P. 1169.
18. Rougier P. Compatibility of postural behavior induced by two aspects of visual feedback: time delay and scale display // Exp. Brain Res. 2005. V. 165. № 2. P. 193.
19. Nafati G., Vuillerme N. Decreasing internal focus of attention improves postural control during quiet standing in young healthy adults // Res. Q. Exerc. Sport. 2011. V. 82. № 4. P. 634.
20. Munoz F., Rougier P.R. Estimation of centre of gravity movements in sitting posture: application to trunk backward tilt // J. Biomech. 2011. V. 44. № 9. P. 1771.
21. Horstmann G.A., Dietz V. A basic posture control mechanism: the stabilization of the centre of gravity // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1990. V. 76. № 2. P. 165.
22. Казенников О.В., Куреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Влияние нагрузки на ноги и подвижности опоры под ногой на предупреждающие позы настройки // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 1. С. 57.
23. Солопова И.А., Казенников О.В., Денискина Н.В. и др. Сравнение ответов мышц ног на транскраниальную магнитную стимуляцию при стоянии на устойчивой и неустойчивой опоре // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 6. С. 80.

## Vertical Posture Maintenance with Multiple Repetition of Trials in the Conditions of Destabilizing Virtual Visual Environment

G. V. Kozhina<sup>a</sup>, Y. 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 (Kharkevich Institute) of RAS, Moscow, Russia

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

We studied whether adaptation can occur in healthy subjects in the conditions of standing in a three-dimensional virtual visual environment destabilized e.g. by introducing the in-phase relationship only between the subject's body oscillations and the position of visible virtual scene. For about one and a half hours, the subjects performed 35 trials with a duration of 40 seconds each standing quietly on a stabilograph, which recorded the oscillations of their body. The interval for rest between trials was 20–25 seconds; after every 5 samples, the subjects rested sitting for 4–5 minutes. The posture maintenance analysis was based on the assessment of the amplitude-frequency characteristics of two elementary variables: the trajectories of the projection of the center of gravity on the support surface (variable CG) and the difference between the trajectories of the CoP and CG in (the variable CoP – CG). The variables were calculated basing on the trajectories of the center of



pressure (CoP) in the anteroposterior and lateral directions. We found that the process of standing under the conditions of the same type of destabilization of the visible visual environment by the end of the samples was significantly improved. The amplitude and frequency characteristics of the variable CG and CoP-CG was close to those observed in a fixed visual environment. The maintenance of vertical posture was improved through changes in both the amplitude and frequency characteristics of the variable CG and CoP-CG. Thus, we found that repeated repetition of samples in a virtual visual environment (VVE) with unstable visible visual environment resulting in the destabilization of the vertical posture allowed subjects to effectively adapt and improve the equilibrium characteristics of the body.

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