

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПРИ СТОЯНИИ НА ТВЕРДОЙ И ПОДАТЛИВОЙ ОПОРАХ В РАЗНЫХ ЗРИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2016 г. Б. Н. Сметанин*, Г. В. Кожина, А. К. Попов, Ю. С. Левик

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

**E-mail: boris_smetanin@hotmail.com*

Поступила в редакцию 10.02.2016 г.

Сравнивали влияние разных зрительных условий на поддержание вертикальной позы при стоянии на твердой и податливой поверхности. Зрительными условиями были: неподвижное зрительное окружение (НЗО), закрытые глаза (ЗГ) и виртуальная зрительная среда (ВЗС). Последняя состояла из двух планов. Передний план представлял собой окно комнаты с прилегающими к нему стенами, а второй – задний – акведук с прилегающей местностью. Путем установления синфазной или противофазной связи между положением переднего плана зрительной сцены и колебаниями тела вызывали дестабилизацию виртуального зрительного окружения. Оценивали изменения амплитудных спектров двух элементарных переменных, вычислявшихся из траекторий смещения центра давления стоп (ЦДС) в переднезаднем и боковом направлениях, а именно, траектории проекции центра тяжести на опору (переменная центра тяжести – ЦТ) и разницы между траекториями ЦДС и ЦТ (переменная ЦДС–ЦТ). Траекторию ЦТ рассматривали как контролируруемую переменную, а разность траекторий ЦДС и ЦТ – как переменную, связанную с ускорением тела и отражающую изменения результирующей жесткости в голеностопных суставах. При стоянии на твердой опоре *RMS*-спектров обеих переменных, вычисленные из колебаний тела в переднезаднем направлении, пропорционально уменьшались в условиях противофазной связи переднего плана с колебаниями тела и увеличивались при их синфазной связи по сравнению с *RMS*, вычисленных для условий НЗО. В условиях синфазной связи *RMS*-спектров переменной ЦТ были примерно такими же, как и при стоянии с ЗГ, а *RMS*-спектров переменной ЦДС–ЦТ – существенно меньше, чем при ЗГ. При стоянии на податливой опоре колебания тела и в переднезаднем, и в боковом направлении значительно увеличивались при всех зрительных условиях. Причем, *RMS*-спектров обеих переменных при ЗГ увеличились существенно больше, чем при синфазной связи. Кроме того, на податливой опоре *RMS*-спектров переменной ЦТ, вычисленные из колебаний тела в боковом направлении, были существенно больше при противофазной связи, чем при синфазной, в то время как *RMS*-спектров переменной ЦДС–ЦТ в обоих условиях имели близкие значения. Результаты анализа колебаний тела показали, что в некоторых зрительных условиях при переходе от стояния на твердой опоре к стоянию на податливой опоре амплитудные характеристики переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ не всегда изменялись пропорционально. Предполагается, что выявленная непропорциональность изменений этих двух переменных связана с вкладом в процесс регуляции позы еще одной переменной величины: пассивного эластического компонента мышечно-суставной жесткости, формируемого фасциально-сухожильными тканями.

Ключевые слова: вертикальная поза, зрительные влияния, спектральные характеристики колебаний тела, виртуальная трехмерная среда.

DOI: 10.7868/S0131164616050155

Вертикальная поза человека нестабильна от природы в силу высокого положения центра тяжести относительно опоры и многозвенности тела. Небольшие отклонения от удобного вертикального положения тела приводят к возникновению вызванного силой тяжести вращающего момента. Последний, действуя на тело, заставляет его отклоняться еще дальше от вертикального положения, возврат к которому обеспечивается мышечными коррекционными ответами. На се-

годняшний день процесс запуска мышечных реакций, противостоящих естественной позной нестабильности и создающих корректирующие позу моменты сил, не понят полностью, не до конца выяснен и механизм взаимодействия сенсорных и моторных систем в этом процессе [1, 2]. Тем не менее, ЦНС человека в большинстве жизненных ситуаций успешно решает задачу поддержания позы, координируя активность мышц ног и туловища на базе информации, поступающей от ве-

стибулярной, проприоцептивной и зрительной сенсорных систем [1–4].

Что касается зрительной информации, то ее наличие не обязательно для поддержания вертикальной позы, хотя выключение зрения значительно ухудшает качество стояния [5–9]. Зрительная система участвует в решении задачи стабилизации позы, используя различные механизмы. С одной стороны, зрение непосредственно участвует в оценке величины, скорости и направления колебаний тела [10–13], используя для этого механизмы обратной связи и упреждающего контроля [14]. С другой, оно может неспецифически влиять на систему регуляции позы. На это, в частности, указывает тот факт, что закрывание глаз в темноте, когда зрение уже невозможно использовать для стабилизации позы, может сопровождаться дальнейшим ухудшением качества стояния [15]. Напротив, открывание глаз в полной темноте приводит к улучшению поддержания позы по сравнению со стоянием при закрытых глазах [16]. Эти и другие наблюдения позволили некоторым авторам предположить [17–20], что зрительные влияния, в том числе и неспецифические, реализуются в основном через регуляцию мышечно-суставной жесткости (прежде всего, в суставах нижних конечностей) и опосредуются изменением либо уровня тонического сокращения соответствующих позных мышц, либо коэффициентов усиления в вестибулярной и (или) проприоцептивной подсистемах позной регуляции. В этих работах приводятся результаты, которые лишь косвенно подтверждают указанное предположение. Так, Фитцпатрик и соавт. [19], оценивая позные реакции на вестибулярную стимуляцию при стоянии с открытыми и закрытыми глазами (ОГ и ЗГ соответственно), обнаружили, что в условиях ЗГ пропорционально возрастали и размах фоновых колебаний тела, и величина ответов на стимуляцию, что рассматривалось как результат неспецифического влияния ЗГ на мышечную жесткость.

В настоящей работе мы попытались выяснить, сохранится ли принцип пропорциональности между изменениями мышечно-суставной жесткости и колебаниями тела при более сложных по своей природе зрительных влияниях на вертикальную позу и при более сложных условиях стояния.

В качестве зрительных условий мы использовали закрытые глаза и три условия “погружения” в виртуальную зрительную среду, когда зрительное окружение было либо неподвижным, либо нестационарным из-за включения синфазной (СС) или противофазной связи (ПС) между ним и колебаниями тела. Податливая опора была выбрана, исходя из результатов ранее выполненной нами работы [21], в которой было показано, что при

поддержании позы на такой опоре в условиях НЗО относительный вклад элементарных переменных был несколько иным, чем на твердой опоре.

Мы оценивали изменения спектров двух элементарных переменных, вычислявшихся из колебаний центра давления стоп. Первая переменная описывала смещения вертикальной проекции центра тяжести тела (переменная ЦТ) и была контролируемой величиной [22, 23], а вторая представляла собой разность между ЦДС и ЦТ (переменная ЦДС-ЦТ) и позволяла судить об изменениях результирующей мышечно-суставной жесткости в голеностопных суставах [22–25].

МЕТОДИКА

В исследовании приняли участие 14 практически здоровых испытуемых — восемь мужчин (средний возраст 42.6 ± 5.6 года) и шесть женщин (44.0 ± 6.2 года), не имевших зрительной патологии и не переносивших ранее каких-либо неврологических заболеваний. Все они были предвременно информированы о содержании и процедуре экспериментов и дали письменное согласие на участие в них. В ходе тестирования испытуемые поддерживали удобную вертикальную позу, стоя на квадратной платформе стабилोगрафа (40×40 см, Стабилоплатформа-2, КБ НИИИ, г. Балашиха, Россия), с помощью которого регистрировали изменения положения центра давления стоп (ЦДС) на опоре. Стопы испытуемых находились в удобном положении, при этом они были развернуты по отношению друг к другу на угол 20–30 градусов, а пятки удалены на расстояние 6–8 см друг от друга.

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 (*silverscreen*). На экране с помощью, так называемого, пассивного способа [26] формировали трехмерное стереоизображение, базирующееся на эффекте поляризации света. В частности, 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. В ходе тестирования испытуемые носили очки с поляризационными фильтрами (*3DS-GS* (Панорама), “*Stel — ComputerSystemsLtd.*”, Москва; частота чередований 120 Гц), ориентированными параллельно соответствующим фильтрам проекторов, что обеспечивало трехмерное восприятие ВЗС. Поле зрения испытуемых было ограничено очками, составляя примерно 60° по вертикали и 80° по горизонтали, и не выходило за пределы

экрана. В этих условиях они видели только виртуальную трехмерную картину, включавшую в себя два плана. Первый представлял собой окно комнаты с прилегающими к нему стенами, а второй — акведук с прилегающей местностью. Удаление изображения первого (переднего) плана от испытуемого составляло 1.2 м, а второго (заднего) — соответствовало расстоянию порядка 20 м. Таким образом, испытуемые могли ориентироваться только в пределах представленной им ВЗС. В процессе тестирования поддержания позы их просили смотреть на неподвижный задний план приблизительно в центр экрана и использовать его в качестве элемента системы отсчета.

Чтобы исследовать поддержание вертикальной позы при синфазно и противофазно связанных с колебаниями тела смещениях видимого зрительного окружения, использовали способ более полного погружения испытуемых в виртуальную реальность. С этой целью положение переднего плана ВЗС в боковом и переднезаднем направлениях делали зависимым от низкочастотных (менее 1 Гц) колебаний ЦДС в соответствующих плоскостях. Такая привязка (связь) приводила к тому, что смещения переднего плана ВЗС происходили практически одновременно (задержка 25 мс) с колебаниями тела.

Связь переднего плана ВЗС с колебаниями тела позволяла экспериментатору задавать направление (противофазное или синфазное) смещений переднего плана ВЗС перед каждой пробой. В данном исследовании коэффициент связи между смещениями переднего плана ВЗС и колебаниями тела был равен двум, т.е. при отклонении тела в переднезаднем направлении, например, на 1 см передний план ВЗС смещался на 2 см. Ранее нами было показано, 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 [8]. Манипулирование направлением связи колебаний тела с ВЗС приводило к тому, что испытуемые, согласно их словесным отчетам, воспринимали зрительное окружение в целом как нестационарное, несмотря на наличие неподвижного заднего плана.

Траекторию центра давления стоп, полученную с помощью датчиков давления стабилोगрафа, конвертировали из аналоговой в цифровую форму с частотой оцифровки в 100 Гц и затем регистрировали на персональном компьютере. При последующем анализе ее раскладывали как сумму двух функций времени вдоль каждой (боковой и переднезадней) из осей. Оценку поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения амплитудно-частотных характеристик

двух элементарных переменных, вычисляемых из перемещений ЦДС на опоре. Одной из них была траектория вертикальной проекции центра тяжести (переменная ЦТ), а второй — разность между траекториями ЦДС и ЦТ (переменная ЦДС—ЦТ). Для их вычисления мы использовали подход, предложенный в работе [27] и подробно описанный и использованный в целом ряде исследований [23, 25, 28]. В связи с этим ниже будут приведены только основные его положения.

Метод вычисления указанных элементарных переменных базируется на том, что имеется четкая зависимость изменений амплитуды колебаний ЦТ и ЦДС от частоты колебаний. В частности, показано [23, 24, 27], что отношение амплитуд этих переменных (ЦТ/ЦДС) 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 легко заключить, что относительно высокочастотные колебания ЦДС не влияют на величину колебаний ЦТ. Действительно, в цитируемых работах экспериментально было показано, что фактически колебания ЦДС 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 колебаний ЦТ и ЦДС и отражающий связь частоты колебаний ЦДС с перемещениями тела [23, 25, 27]. В дальнейшем в ходе анализа результатов тестирования перемещения ЦТ рассматривали как контролируемую переменную, а разность ЦДС—ЦТ — как переменную, связанную с ускорением тела и отражающую изменения результирующей мышечно-суставной жесткости в голеностопных суставах [22, 23, 25]. Оценку влияния зрительных условий на процесс поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения медианной частоты (MF) и среднеквадратического значения (RMS) амплитудных спектров в диапазонах 0—0.5 Гц для переменной ЦТ и 0—3.0 Гц для переменной ЦДС—ЦТ.

Программа частотной фильтрации колебаний ЦДС с целью выделения из нее переменных ЦТ и ЦДС—ЦТ и последующего вычисления на их основе MF и RMS спектров колебаний была написана в среде *Matlab*.

В ходе тестирования процесса поддержания позы испытуемым давали инструкцию **“Выбери на заднем плане на уровне глаз небольшой фрагмент акведука и смотри на него в процессе выполнения проб”**, по возможности минимизируя колебания тела. В случайном порядке в отдельных пробах устанавливали синфазную или противофазную связь зрительной среды с колебаниями тела. Пробы с привязкой переднего плана ВЗС к колебани-

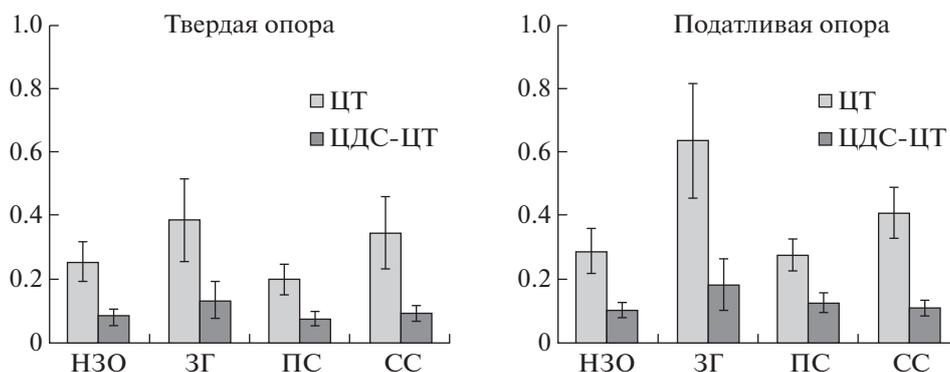


Рис. 1. Средние величины *RMS*-спектров переменных ЦТ и ЦДС-ЦТ и их стандартные ошибки, вычисленные из колебаний тела при неподвижном зрительном окружении (НЗО), закрытых глазах в темной комнате (ЗГ), противофазной связи (ПС) и синфазной связи (СС) колебаний ВЗС с колебаниями тела. По оси ординат – амплитуда колебаний в мм.

ям тела перемежались пробами со стоянием при неподвижном зрительном окружении (НЗО) и пробами в условиях полного устранения зрительного контроля (закрытые глаза – ЗГ). В условиях НЗО испытуемые стояли в тех же самых стереочках, поле зрения было ограничено теми же пределами, что и в условиях связи колебаний тела и переднего плана. Они видели перед собой экран с изображением той же виртуальной трехмерной сцены, однако оба ее плана не были связаны с колебаниями тела.

Тестирование проводили при стоянии испытуемых сначала на твердой опоре, а затем на податливой опоре. Податливую опору создавали с помощью квадратной пластины поролона толщиной 10 см, который помещали на платформу стабилोगрафа и накрывали сверху пластиной фанеры толщиной 10 мм; размеры пластин были идентичны размеру платформы стабилोगрафа. Податливость поролона составляла около 3 см при давлении 0.5 Н/см².

Во время эксперимента испытуемые выполняли 28 проб: 14 проб на твердой опоре и 14 проб на податливой опоре. Выполнялись 4 пробы в условиях ПС и 4 пробы в условиях СС связи переднего плана ВЗС с колебаниями тела, а также по 3 пробы при НЗО и ЗГ. Длительность регистрации стабилотраграммы в пробеге составляла 40 с. Интервал времени между пробами составлял около 1 мин, после каждых 4–5 проб испытуемые отдыхали в течение 3–4 мин в положении сидя не меняя положение стоп. Зрительные условия в каждой половине эксперимента чередовали в случайном порядке.

Полученные данные усредняли по всем пробам для каждого зрительного условия сначала у отдельных испытуемых, а затем вычисляли среднее по всей 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 *MF* при парном сравнении отдельных зрительных условий оценивали с помощью *post-hoc* анализа с применением “парного двухвыборочного *t*-теста для средних”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ RMS-спектров исследуемых переменных, вычисленных из колебаний ЦДС в переднезаднем направлении. На рис. 1 представлены усредненные по всем испытуемым *RMS* амплитудных спектров для переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ, вычисленных по результатам анализа поддержания позы на твердой и податливой опорах. Видно, что *RMS*-спектров обеих переменных менялись при изменении зрительных условий поддержания позы. Дисперсионный анализ показал статистически достоверное влияние фактора “условие зрительного контроля” на *RMS*-спектра переменной ЦТ: для твердой опоры критерий Фишера $F_{3, 52} = 10.26$, $P < 2.04E-05$; для податливой опоры – $F_{3, 52} = 33.07$, $P < 4.21E-12$. *RMS* амплитудных спектров переменной ЦДС–ЦТ также были зрительно зависимыми, хотя выраженность этой зависимости была несколько меньшей: *ANOVA* выявила влияние этого фактора на *RMS*-спектров переменной ЦДС–ЦТ и для твердой опоры ($F_{3, 52} = 7.33$, $P < 0.00034$), и для податливой опоры ($F_{3, 52} = 9.95$, $P < 2.73E-05$).

Posthoc-анализ выявил следующие результаты оценки различий между зрительными влияниями на поддержание позы.

Твердая опора. *RMS*-спектров переменной ЦТ были наименьшими в условии ПС, достоверно отличаясь от значений, полученных для условия поддержания позы при НЗО ($t_{13} = -3.63$, $P < 0.002$),

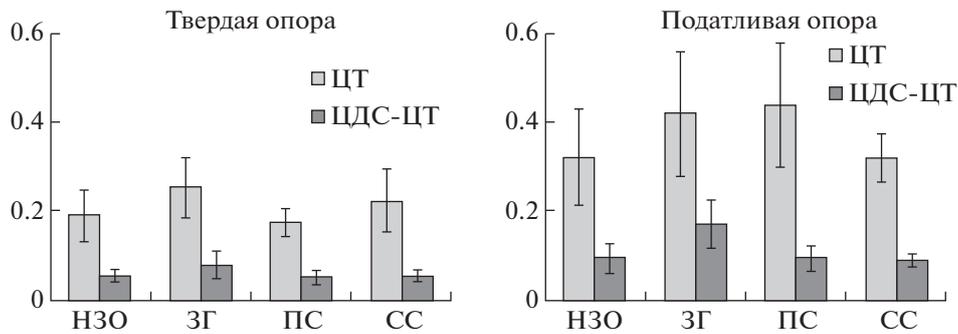


Рис. 2. Средние величины RMS -спектров переменных ЦТ и ЦДС-ЦТ и их стандартные ошибки, вычисленные из колебаний тела в боковом направлении. Обозначения см. на рис. 1.

а также для условия СС ($t_{13} = -4.56, P < 0.0002$) и для условия ЗГ ($t_{13} = -5.56, P < 0.00038$). RMS -спектров переменной ЦТ, полученные для условия НЗО достоверно отличались от RMS -спектров для условий ЗГ ($t_{13} = -4.42, P < 0.0003$) и СС ($t_{13} = -3.49, P < 0.002$). Статистический анализ не выявил достоверных отличий RMS -спектров переменной ЦТ при сравнении зрительных условий ЗГ и СС.

RMS переменной ЦДС-ЦТ при разных зрительных условиях менялись не столь значительно. Они также были наименьшими при условии ПС, достоверно отличаясь от значений при условиях СС ($t_{13} = -2.67, P < 0.01$) и ЗГ ($t_{13} = -3.79, P < 0.0012$), и не отличались от значений при условии НЗО ($P > 0.05$). RMS -спектров переменной ЦДС-ЦТ, полученные для условий НЗО и СС достоверно отличались от RMS -спектров для условия ЗГ: при сравнении условий НЗО и ЗГ $t_{13} = -4.13, P < 0.001$; при сравнении условий СС и ЗГ $t_{13} = -2.87, P < 0.007$. Не было выявлено достоверных различий RMS -спектров этой переменной, полученных для условий НЗО и СС ($P > 0.05$).

Податливая опора. Результаты оценки различий между зрительными влияниями на поддержание позы при этой опоре оказались несколько другими.

В отличие от твердой опоры была обнаружена статистически достоверная разница RMS -спектров переменной ЦТ между условиями ЗГ и СС ($t_{13} = 4.35, P < 0.0004$). Кроме того, не было выявлено различий RMS -спектров переменной ЦТ между условиями ПС и НЗО ($P > 0.05$). Вычисленные RMS -спектра переменной ЦТ в условиях ПС достоверно отличались от значений, полученных для условия СС ($t_{13} = -6.10, P < 0.00002$) и для условия ЗГ ($t_{13} = -6.93, P < 0.000005$). RMS -спектров переменной ЦТ, полученные для условия НЗО достоверно отличались от RMS -спектров для условий ЗГ ($t_{13} = -6.40, P < 0.00001$) и для условий СС ($t_{13} = -7.02, P < 0.000005$).

RMS -спектров переменной ЦДС-ЦТ имели наименьшие и близкие значения в условиях НЗО и СС, достоверно при этом отличаясь от значений, полученных для условия ПС ($t_{13} = -2.82, P < 0.007$ и $t_{13} = -3.16, P < 0.004$, соответственно) и условия ЗГ ($t_{13} = -3.92, P < 0.0009$ и $t_{13} = -3.61, P < 0.002$, соответственно). RMS -спектров этой переменной были наибольшими для условия ЗГ и достоверно превышали значения для условия ПС ($t_{13} = 3.09, P < 0.004$).

Фактор "вид опоры" также существенно влиял на спектры переменных ЦТ и ЦДС-ЦТ. При поддержании вертикальной позы на податливой опоре колебания тела были существенно больше. Дисперсионный анализ выявил глобальное влияние этого фактора на RMS обеих переменных: для переменной ЦТ критерий Фишера $F_{1,110} = 13.4, P < 0.0004$, а для переменной ЦДС-ЦТ $F_{1,110} = 16.1, P < 0.0001$.

Попарное сравнение RMS переменных, полученных при одном и том же зрительном условии, дало следующие результаты. Не выявлено статистически достоверных влияний фактора "вид опоры" на RMS -спектров переменной ЦТ при стоянии в условиях НЗО ($P > 0.05$). При остальных зрительных условиях RMS этой переменной значительно увеличивались после перехода к поддержанию позы на податливой опоре: для условия ЗГ $t_{13} = -3.57, P < 0.002$, для ПС $t_{13} = -5.02, P < 0.0001$, для СС $t_{13} = -2.12, P < 0.03$.

RMS -спектров переменной ЦДС-ЦТ, вычисленные для всех зрительных условий, в том числе и для НЗО, были существенно меньше, если испытуемые стояли на твердой опоре. Для условия НЗО показатель достоверности различий $t_{13} = -2.54, P < 0.01$; для условия ЗГ $t_{13} = -2.22, P < 0.02$; для ПС $t_{13} = -6.55, P < 0.00005$; и для условия СС $t_{13} = -2.25, P < 0.02$.

Анализ RMS -спектров исследуемых переменных, вычисленных из колебаний ЦДС в боковом направлении. На рис. 2 приведены результаты анализа под-

держания позы у испытуемых при стоянии на твердой и податливой опорах. Из рисунка видно, что RMS спектров обеих переменных имели меньшую величину, чем вычисленные из колебаний переднезаднего направления.

Твердая опора. При стоянии на твердой опоре RMS-спектров обеих переменных бокового направления зависели от зрительных условий примерно также, как RMS-спектров этой переменной переднезаднего направления. Они были наибольшими в условиях ЗГ, наименьшими при ПС и НЗО и приближались к условиям ЗГ в условии СС. Дисперсионный анализ показал статистически достоверное влияние фактора “условие зрительного контроля” на колебания опорных реакций в этом направлении: для переменной ЦТ критерий Фишера $F_{3, 52} = 3.37, P < 0.025$; для переменной ЦДС-ЦТ — $F_{3, 52} = 4.82, P < 0.005$.

Оценка достоверности различий между зрительными влияниями на поддержание позы выявила следующие факты. RMS-спектров переменной ЦТ в условии ЗГ достоверно отличались от значений, полученных для условия НЗО ($t_{13} = 2.59, P < 0.012$), а также для условия ПС ($t_{13} = 4.12, P < 0.0005$). RMS, полученные для условия ПС, были достоверно меньше значений RMS для СС ($t_{13} = -2.081, P < 0.03$).

В отличие от переменной ЦТ, RMS спектров переменной ЦДС-ЦТ, полученные для условий ПС и СС, не различались между собой. В то же время RMS-спектров этой переменной в условии ЗГ были также существенно больше значений RMS в условиях НЗО, ПС и СС ($t_{13} = 4.05, P < 0.001$; $t_{13} = 3.01, P < 0.005$; $t_{13} = 2.19, P < 0.03$, соответственно).

Податливая опора. При анализе колебаний тела во время стояния на податливой опоре ANOVA показала статистически достоверное влияние фактора “условие зрительного контроля” на RMS-спектров как переменной ЦТ ($F_{3, 52} = 4.05, P < 0.012$), так и переменной ЦДС-ЦТ ($F_{3, 52} = 7.56, P < 0.0003$).

RMS-спектров обеих переменных бокового направления при поддержании позы на податливой опоре менялись под влиянием зрительных условий несколько иначе, чем при стоянии на твердой опоре. В частности, RMS-спектров ЦТ были наибольшими сразу в двух условиях: ЗГ и ПС, а RMS переменной ЦДС-ЦТ, полученные для условий ПС и СС, не различались между собой.

Posthoc-анализ дал следующие результаты оценки различий эффектов, вызванных зрительными влияниями на исследуемые переменные. RMS-спектров переменной ЦТ, полученные для условий ПС и ЗГ, не различались между собой ($P > 0.05$). В то же время RMS-спектров этой переменной в условии ПС были существенно больше RMS-спектров этой переменной в условиях НЗО

и СС ($t_{13} = 6.03, P < 0.00005$ и $t_{13} = 3.58, P < 0.002$, соответственно). RMS-спектров переменной ЦТ в условии ЗГ также были достоверно больше RMS-спектров в условиях НЗО и СС ($t_{13} = 3.28, P < 0.003$ и $t_{13} = 2.38, P < 0.017$, соответственно).

Попарное сравнение значений RMS переменной ЦДС-ЦТ, вычисленных для условий НЗО, ПС и СС, не выявило статистически значимых различий между ними. Вместе с тем RMS этой переменной в условиях ЗГ достоверно отличалась от значений, полученных в остальных условиях. При сравнении с условием НЗО критерий $t_{13} = 3.39, P < 0.003$, с условием ПС $t_{13} = 3.42, P < 0.002$, а с условием СС $t_{13} = 3.63, P < 0.0015$.

Фактор “вид опоры” существенно влиял на RMS-спектров переменных ЦТ и ЦДС-ЦТ. При поддержании вертикальной позы на податливой опоре колебания тела были значительно больше. Дисперсионный анализ выявил глобальное влияние этого фактора на RMS обеих переменных: для переменной ЦТ критерий Фишера $F_{1, 110} = 73.9, P < 6.21E-14$, а для переменной ЦДС-ЦТ $F_{1, 110} = 37.5, P < 1.41E-08$.

Попарное сравнение спектров, полученных при одних и тех же зрительных условиях, но при разных (твердой и податливой) опорах дало следующие результаты. При сравнении RMS-спектров переменной ЦТ для зрительного условия НЗО критерий $t = -4.37, P < 0.0004$, для условия ЗГ $t = -4.14, P < 0.0006$, для условия ПС $t = -8.09, P < 9.77E-07$, для СС $t = -3.44, P < 0.0022$.

RMS-спектров переменной ЦДС-ЦТ, вычисленные для всех сравниваемых пар также были существенно меньше, если испытуемые стояли на твердой опоре. Для условия НЗО показатель достоверности различий $t = -4.36, P < 0.0004$; для условия ЗГ $t = -3.60, P < 0.002$; для ПС $t = -4.77, P < 0.0002$; и для условия СС $t = -6.76, P < 6.68E-06$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В стабилизации вертикальной позы человека зрение может играть, по меньшей мере, двоякую роль. С одной стороны, оно информирует ЦНС о колебаниях тела относительно внешнего окружения, а с другой — оценивает степень стационарности самого окружения. В этой связи важно понимать, насколько эффективным может быть вклад зрительных сигналов, содержащих информацию о колебаниях тела относительно внешней среды, в регуляцию вертикальной позы в условиях, когда стационарность видимого зрительного окружения нарушена, или когда нарушено ее восприятие (например, при некоторых вестибулярных расстройствах и других неврологических заболеваниях [29–32]). Выполненное исследование содержит фактический материал, который, как нам кажется, приближает нас к пониманию этого вопроса.

В данном исследовании мы сравнивали поддержание вертикальной позы в условиях неподвижного зрительного окружения (НЗО) с условиями, когда испытуемого “погружали” в виртуальное нестационарное зрительное пространство. Нарушение стационарности видимого зрительного окружения создавалось путем привязки (синфазно или противофазно) положения переднего плана ВЗС к колебаниям тела.

При стоянии на твердой опоре *RMS*-спектров переменных ЦТ и ЦДС-ЦТ, вычисленных из колебаний ЦДС, изменялись схожим образом при изменении зрительных условий поддержания позы. Они уменьшались в условиях противофазной связи переднего плана с колебаниями тела и увеличивались при синфазной связи по сравнению с *RMS*, полученными при неподвижном зрительном окружении (НЗО). Этот результат можно интерпретировать следующим образом. Испытуемые в процессе поддержания позы, несмотря на инструкцию “использовать в качестве референса неподвижный задний план”, неосознанно реагировали на колебания переднего плана и корректировали позу в соответствии с направлением этих колебаний. В случае с противофазной связью это приводило к тому, что коррекционные усилия вызывали противофазные смещения переднего плана, соответствовавшие привычной для испытуемого структуре параллакса движения, когда объекты, расположенные ближе, чем точка фиксации, движутся в направлении, противоположном направлению движения наблюдателя. Это в итоге приводило даже к небольшому уменьшению позных колебаний. При синфазной связи, наоборот, коррекционные усилия сопровождалось появлением непривычной инвертированной формы параллакса движения, в результате чего передний план воспринимался как движущийся в одном направлении с движениями испытуемого. Это, по-видимому, и являлось причиной дополнительной дестабилизации позы. В тоже время следует отметить, что в условиях действия СС максимальные колебания тела не превышали значений, характерных для стояния с ЗГ. Данное обстоятельство указывает на то, что испытуемым удавалось в значительной мере преодолевать влияние дестабилизирующих позу зрительных сигналов, связанных с колебаниями переднего плана.

В условиях поддержания вертикальной позы на податливой опоре значительно увеличивались колебания ЦТ тела при всех зрительных условиях. Однако в отличие от того, что наблюдалось на твердой опоре, при синфазной связи они были существенно меньшими, чем при поддержании позы с ЗГ (рис. 1 и 2). Исходно предполагалось, что при податливой опоре синфазная связь вызовет наибольшее увеличение колебаний тела, но этого не произошло. Можно предположить, что некоторая стабилизация позы в этих условиях была

связана с частичным игнорированием сигналов от органов зрения и с увеличением вклада в ее поддержание информации о положении тела от незрительных сенсорных источников (мышечных, суставных и вестибулярных).

RMS-спектров переменной ЦДС-ЦТ, после перехода к стоянию на податливой опоре при зрительных условиях ПС и СС, не менялись прямо пропорционально изменениям *RMS*-спектров переменной ЦТ. Так, например, *RMS*-спектров переменной ЦДС-ЦТ в условиях ПС (передне-заднее направление) были больше, чем в условиях СС, в то время как *RMS*-спектров переменной ЦТ, наоборот, в условиях ПС были существенно меньше, чем в условиях СС. Таким образом, амплитудные характеристики элементарных переменных (ЦТ и ЦДС-ЦТ), отражающие процесс поддержания вертикальной позы, при изменении зрительных условий могли меняться не только не пропорционально, но даже разнонаправленно. Поскольку переменная ЦДС-ЦТ является индикатором изменений результирующей мышечно-суставной жесткости можно предположить, что формирование последней происходило не так, как в условиях жесткой опоры. Этот результат был достаточно неожиданным и в силу этого не прост для интерпретации. Некоторую пищу для его понимания дают современные исследования, касающиеся двухкомпонентной природы мышечно-суставной жесткости [33–35]. Эти исследования выделяют в ней две составляющие: активный мышечный сократительный компонент и пассивный эластический фасциально-сухожильный компонент. В исследованиях, в частности, показано, что их относительный вклад в формирование результирующей жесткости в разных условиях и у разных групп людей может меняться. Так, например, в условиях быстрого растяжения мышц голени пассивный эластический компонент имел более существенный вклад в результирующую жесткость у мужчин, соответственно активный мышечный компонент – у женщин [35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применительно к нашим результатам, можно предположить, что выявленная непропорциональность изменений двух переменных в условиях податливой опоры могла отражать участие в формировании результирующей мышечно-суставной жесткости еще одной переменной величины: ее пассивного эластического компонента, формируемого фасциально-сухожильными тканями. Однако это предположение требует дополнительного экспериментального исследования.

Полученные в этом исследовании результаты в определенной степени противоречат гипотезе [17, 19] о том, что изменения величины колебаний тела в

разных зрительных условиях могут быть объяснены достаточно просто, исходя из изменений результирующей мышечно-суставной жесткости, автоматически настраиваемой на основе влияний от различных нейрональных структур позы регуляции.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Assländer L.I., Peterka R.J.* Sensory reweighting dynamics in human postural control // *J. Neurophysiol.* 2014. V. 111. № 9. P. 1852.
2. *Sousa A.S., Silva A., Tavares J.M.* Biomechanical and neurophysiological mechanisms related to postural control and efficiency of movement: a review // *Somatosens. Mot. Res.* 2012. V. 29. № 4. P. 131.
3. *Faraldo-García A.I., Santos-Pérez S., Crujeiras-Casais R. et al.* Influence of age and gender in the sensory analysis of balance control // *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.* 2012 V. 269. № 2. P. 673
4. *Polastri P.F., Barela J.A., Kiemel T. et al.* Dynamics of inter-modality re-weighting during human postural control // *Exp. Brain Res.* 2012. V. 223. № 1. P. 99.
5. *Chen E.W., Fu A.S., Chan K.M. et al.* Balance control in very old adults with and without visual impairment // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2012. V. 112. № 5. P. 1631.
6. *Giagazoglou P.I., Amiridis I.G., Zafeiridis A. et al.* Static balance control and lower limb strength in blind and sighted women // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2009. V. 107. № 5. P. 571.
7. *Magalhães F.H., Kohn A.F.* Vibration-enhanced posture stabilization achieved by tactile supplementation: may blind individuals get extra benefits? // *Med. Hypotheses.* 2011. V. 77. № 2. P. 301.
8. *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.
9. *Keshner E.A., Slaboda J.C., Day L.L., Darvish K.* Visual conflict and cognitive load modify postural responses to vibrotactile noise // *J. Neuroeng. Rehabil.* 2014. V. Jan 13. № 11. P. 6.
10. *Soechting J., Berthoz A.* Dynamic role of vision in the control of posture in man // *Exp. Brain Res.* 1979. V. 36. № 3. P. 551.
11. *Dokka K., Kenyon R.V., Keshner E.* Influence of visual scene velocity on segmental kinematics during stance // *Gait Posture.* 2009. V. 30. № 2. P. 211.
12. *Hanssens J.M., Allard R., Giraudet G.* Visually induced postural reactivity is velocity-dependent at low temporal frequencies and frequency-dependent at high temporal frequencies // *Exp. Brain Res.* 2013. V. 229. № 1. P. 75.
13. *Joseph J., Safavynia S.A., Ting L.H.* Contribution of vision to postural behaviors during continuous support-surface translations // *Exp. Brain Res.* 2014. V. 232. № 1. P. 169.
14. *Alexandrov A.V., Frolov A.A., Horak F.B. et al.* Feedback equilibrium control during human standing // *Biol. Cybern.* 2005. V. 93. № 5. P. 309.
15. *Smetanin B.N., Kozhina G.V., Popov A.K.* Dependence of joint stiffness on the conditions of visual control in upright undisturbed stance in humans // *Neurophysiology.* 2006. V. 38. № 2. P. 157.
16. *Rougier P.I., Zanders E., Borlet E.* Influence of visual cues on upright postural control: differentiated effects of eyelids closure // *Rev. Neurol. (Paris).* 2003. V. 159. № 2. P. 180.
17. *Collins J.J., De Luca C.J.* The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms // *Exp. Brain Res.* 1995. V. 103. № 1. P. 151.
18. *Сметанин Б.Н., Попов К.Е., Кожина Г.В.* Позные реакции человека на вибрационную стимуляцию мышц голени в условиях зрительной инверсии // *Физиология человека.* 2002. Т. 28. № 5. С. 53.
19. *Fitzpatrick R., Burke D., Gandevia S. C.* Task-dependent reflex responses and movement illusions evoked by galvanic vestibular stimulation in standing humans // *J. Physiol.* 1994. V. 478. № 2. P. 363.
20. *Kozhina G.V., Levik Yu.S., Smetanin B.N.* Influence of a Light Tactile Contact on Vertical Posture Maintenance under the Conditions of Destabilization of Visual Environment // *Human Physiology.* 2015. V. 41. № 5. P. 98.
21. *Сметанин Б.Н., Кожина Г.В., Попов А.К.* Поддержание вертикальной позы человека в условиях виртуального зрительного окружения // *Физиология человека.* 2009. Т. 35. № 2. С. 1.
22. *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.
23. *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.
24. *Winter D.A., Patla A.E., Prince F.M. et al.* Stiffness control of balance in quiet standing // *J. Neurophysiol.* 1998. V. 80. № 3. P. 1211.
25. *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.
26. *Burdea G., Coiffet P.* Virtual Reality Technology / John Wiley & Sons, Wiley-IEEE Press. New York. 2003. 446 p.
27. *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.
28. *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.
29. *Pavlou M., Quinn C., Murray K. et al.* The effect of repeated visual motion stimuli on visual dependence and postural control in normal subjects // *Gait Posture.* 2011. V. 33. № 1. P. 113.
30. *Cohen H.S., Mulavara A.P., Peters B.T. et al.* Laryngoscope. Standing balance tests for screening people with vestibular impairments // 2014. 124. № 2. P. 545.

31. *Mulavara A.P., Cohen H.S., Peters B.T. et al.* New analyses of the sensory organization test compared to the clinical test of sensory integration and balance in patients with benign paroxysmal positional vertigo // *Laryngoscope*. 2013. V. 123. № 9. P. 2276.
32. *Brandt T., Kugler G., Schniepp R. et al.* Acrophobia impairs visual exploration and balance during standing and walking // *Ann. N Y Acad. Sci.* 2015. Apr. 1343. P. 37.
33. *Fouré A., Nordez A., McNair P., Cornu C.* Effects of plyometric training on both active and passive parts of the plantarflexors series elastic component stiffness of muscle-tendon complex // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. V. 111. № 3. P. 539.
34. *Kubo K.* Active muscle stiffness in the human medial gastrocnemius muscle in vivo // *J. Appl. Physiol.* 2014. V. 117. № 9. P. 1020.
35. *Fouré A., Cornu C., McNair P.J., Nordez A.* Gender differences in both active and passive parts of the plantar flexors series elastic component stiffness and geometrical parameters of the muscle-tendon complex // *J. Orthop Res.* 2012. V. 30. № 5. P. 707.

Spectral Analysis of Sway of Human Body When Standing on Firm and Compliant Surfaces under Different Visual Conditions

B. N. Smetanin, G. V. Kozhina, A. K. Popov, Y. S. Levik

E-mail: boris_smetanin@hotmail.com

The influence of different visual conditions on maintenance of vertical posture when standing on a firm and a compliant surface were compared. Motionless visual environment (MVE), closed eyes (CE) and virtual visual environment (VVE) were used as visual conditions. Displayed VVE included foreground and background. The foreground represented a room window with the walls adjoining to it, and the background – an aqueduct with the adjacent terrain. Destabilization of the VVE was produced by assignment in phase or anti-phase relationship between the position of the foreground of visual scene and the body sway. We estimated changes in the amplitude spectra of two elementary variables calculated from trajectories of displacement of the center of pressure (CoP) in the anteroposterior and lateral directions, namely, trajectories of the center of gravity (CG variable) and differences between trajectories of CoP and CG (CoP-CG variable). The trajectory of CG was considered as a controlled variable, and a difference between CoP and CG trajectories – as the variable connected with acceleration of body and related to changes of resultant stiffness in ankle joints. In the condition of inphase relation RMS of spectra of the CG variable were about the same, as when standing with CE, and RMS of spectra of the CoP-CG variable were significantly less, than at CE. When standing on a compliant surface, body sway was increased significantly both in anteroposterior and lateral directions under all visual conditions. Moreover, during standing with CE RMS of spectra of both variables were increased significantly more, than during standing with in phase relation between the foreground of visual scene and the body sway. Furthermore, when standing on a compliant support RMS of spectra of CG variable, calculated from the body sway in the lateral direction, under the condition of antiphase relation were significantly greater than under the condition of inphase relation, while RMS of spectra of CoP-CG variable had similar values under both conditions. The results of the analysis of body sway showed that under some visual conditions the transition from standing on a firm support to the standing on a compliant support have not caused a proportional change of amplitude characteristics of CG and CoP-CG variables. It is supposed that the revealed disproportion of changes of these two variables is probably connected with a contribution to postural control of one additional factor: the passive elastic component of muscular-articular stiffness generated by fascial-tendon tissue.

Keywords: vertical posture, visual influences, spectral characteristics of body sway, virtual 3D environment.