

ПОДДЕРЖАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ НАРУШЕНИИ СТАБИЛЬНОСТИ ЗРИТЕЛЬНО ВОСПРИНИМАЕМОГО ОКРУЖЕНИЯ: ВЛИЯНИЕ ИНСТРУКЦИИ, НАПРАВЛЕННОЙ НА КОНТРОЛЬ КОЛЕБАНИЙ ТЕЛА

Поступила 15.03.13

Исследовали поддержание вертикальной позы в условиях погружения человека в виртуальную трехмерную зрительную среду (ВЗС). ВЗС состояла из двух планов: передний представлял собой окно комнаты, а задний – фрагмент городского пейзажа за окном. Компьютерная программа позволяла связывать колебания тела в сагиттальной плоскости со смещениями переднего плана ВЗС, делая последний подвижным. В ходе тестирования такая связь могла быть как противофазной (ПФ-), так и синфазной (СФ-); задний план всегда оставался неподвижным. Каждый эксперимент включал в себя две части. В первой из них испытуемым не сообщали о том, что в отдельных пробах колебания тела будут связаны со смещениями зрительной среды, и предлагали смотреть на какой-либо объект неподвижного заднего плана. Во второй части испытуемым заранее сообщали, что такая связь будет присутствовать, и предлагали минимизировать колебания тела в сагиттальной плоскости, отслеживая смещения переднего плана относительно какого-либо заранее выбранного объекта на ее заднем плане. Пробы со связью колебаний тела и ВЗС перемежались пробами со стоянием при полностью неподвижном зрительном окружении (НЗО) и пробами со стоянием при закрытых глазах (ЗГ). Вклад зрительного контроля в поддержание позы оценивали по изменениям амплитудно-частотных характеристик двух переменных – смещений вертикальной проекции центра тяжести тела (ЦТ) и разности между положением центра давления стоп (ЦДС) и проекцией ЦТ. Изменения проекции ЦТ рассматривали как основную контролируемую переменную при поддержании позы, а ЦДС–ЦТ – как переменную, которая содержит в себе информацию об изменениях результирующей мышечно-суставной жесткости в голеностопных суставах, связанной с активностью мышц голени. Анализ осцилляций ЦТ и ЦДС–ЦТ выявил четкую зависимость их спектров от направления связи между смещениями тела и колебаниями переднего плана и от инструкции, полученной испытуемыми. В первой группе тестов при СФ-связи среднеквадратические значения (RMS) спектров колебаний обеих переменных находились в том же диапазоне, что и при стоянии с ЗГ, а при ПФ-связи были ближе к зоне значений, характерных для условий НЗО. Во второй группе тестов RMS спектров, вычисленные для обеих переменных, были количественно иными: в случае ПФ-связи колебаний тела и переднего плана они были меньше значений, выявленных в условиях стояния с НЗО, а в случае СФ-связи – меньше значений, характерных для стояния с ЗГ. Введение инструкции во второй группе тестов отражалось и в изменениях параметров переменной ЦДС–ЦТ. В частности, при ПФ-связи RMS спектров колебаний этой переменной несколько уменьшались, а их медианная частота существенно увеличивалась. Полученные данные позволяют полагать, что улучшение стабильности стояния после введения инструкции, уточняющей зрительный контроль и акцентирующей его на одном направлении колебаний тела, является результатом более активного использования зрительной обратной связи в условиях восприятия нестабильного переднего плана ВЗС. Это следует рассматривать как одно из доказательств эффективного участия зрения в позном контроле при нарушении стабильности внешнего окружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вертикальная поза человека, виртуальная зрительная среда (ВЗС), стабилография, зрительное слежение за колебаниями тела.

¹Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва (РФ).

Эл. почта: boris_smetanin@hotmail.com; bnsmet@iitp.ru (Б. Н. Сметанин).

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о том, как зрительные сигналы влияют на поддержание вертикальной позы человека, по-прежнему является одним из наиболее интенсивно исследуемых аспектов проблемы сенсо-моторной интеграции. Большой вклад зрения в процесс контроля положения спокойного стояния хорошо известен. Данный вклад, например, легко определить, сравнив колебания тела при открытых и закрытых глазах (ОГ и ЗГ соответственно). Во многих исследованиях было показано, что, влияя тем или иным способом на стационарность видимого зрительного окружения, можно нарушить спокойное стояние и вызвать связанные с этим позные реакции [1–5]. В соответствующих тестах кратковременно манипулировали такими параметрами, как частота, скорость и амплитуда зрительных стимулов. Это давало возможность определить, как зрительные сигналы взаимодействуют с сигналами от других сенсорных систем – вестибулярной и проприоцептивной. И в повседневной жизни существуют ряд ситуаций, когда внешнее окружение перестает восприниматься как неподвижное. Это приводит к большим затруднениям в интерпретации сигналов от органов зрения и в их использовании в ходе как стояния, так и движений человека. В частности, при целом ряде неврологических заболеваний (прежде всего, в случаях вестибулярных расстройств), а иногда и у здоровых людей может возникать зрительно вызванное головокружение, сопровождаемое пространственной дезориентацией, тревожностью и постуральной неустойчивостью [6–9]. Известно, что синдром укачивания, возникающий из-за рассогласования зрительных и вестибулярных афферентных сигналов в процессе плавания на судне или езды в автотранспорте, обычно сопровождается упомянутыми симптомами [10, 11]. Показано также, что примерно треть людей подвержены зрительно обусловленной боязни высоты (visual height intolerance), при которой не только больные, но и здоровые субъекты могут испытывать головокружение и нарушения равновесия [12–14]. Причины таких явлений, по-видимому, отчасти кроются в том, что в ходе обработки зрительной информации в нашем мозгу возникает конфликт между зрительными сигналами, несущими информацию о текущем состоянии окружающей среды, и внутренним представлением человека о том, какой данная среда должна быть в тех или иных условиях. В результате такого конфликта использование зритель-

ной обратной связи в контроле вертикальной позы усложняется, поскольку видимое внешнее окружение перестает быть надежным референсом. Можно предполагать, что именно это и приводит в итоге к формированию нарушений поддержания вертикальной позы и, в целом, двигательного поведения.

В настоящей работе мы попытались выяснить, используют ли здоровые люди при поддержании позы зрительную обратную связь в условиях нарушения стабильности видимого внешнего окружения или же они в данных случаях полагаются на сигналы от других сенсорных систем.

МЕТОДИКА

Испытуемые. В тестах приняли участие 14 здоровых испытуемых – восемь мужчин (средний возраст 42.6 ± 5.6 года) и шесть женщин (44.0 ± 6.2 года). Все испытуемые были практически здоровы и, согласно данным опроса, ранее не переносили неврологических заболеваний, а также заболеваний вестибулярной и мышечной систем. При проведении экспериментального исследования они стояли в обуви на платформе стабилोगрафа (40×40 см) в привычной вертикальной позе. Регистрировали изменения положения центра давления стоп (ЦДС) на поверхности опоры. Стопы испытуемых находились в удобном положении; при этом пятки были расставлены на расстояние 10–12, а носки – на 16–20 см.

Анализ колебаний тела. Траекторию перемещений ЦДС, полученную с помощью датчиков давления стабилोगрафа, конвертировали из аналоговой в цифровую форму и затем регистрировали на персональном компьютере с частотой оцифровки 100 с^{-1} . При последующем анализе ее представляли как сумму двух функций времени (осцилляций) вдоль каждой из осей (фронтальной и сагитальной). Оценку поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения амплитудно-частотных характеристик двух элементарных перемещений ЦДС по опоре. Одной из них была траектория вертикальной проекции центра тяжести – ЦТ (переменная ЦТ), а второй – разность между траекториями ЦДС и ЦТ (переменная ЦДС–ЦТ). Для их вычисления мы использовали подход, предложенный и подробно описанный в ряде работ Роуже и соавт. [15–18]. В связи с этим ниже излагаются лишь его основные положения.

Чтобы получить указанные элементарные переменные из колебаний ЦДС в каждом из двух направлений (боковом и передне-заднем), использовали фильтр низких частот. Это позволяло вычислять отношение между амплитудами колебаний проекций ЦТ и ЦДС, отражающее связь частоты колебаний ЦДС с частотой перемещений тела [15, 19]. В упомянутых работах, в частности, было установлено, что колебания ЦДС с частотами, превышающими 0.5 Гц, практически не влияют на траекторию проекции ЦТ. Перед подобной фильтрацией оцифрованную траекторию ЦДС подвергали амплитудно-частотному разложению с использованием быстрого преобразования Фурье для того, чтобы получить распределение амплитуд как функцию частоты. После получения спектра осцилляций ЦДС его умножали на результат вышеупомянутой фильтрации и получали уже спектр смещений проекций ЦТ и восстанавливали временную развертку траектории ЦТ с помощью обратного преобразования Фурье. Затем с помощью вычитания временных разверток траекторий ЦДС и ЦТ получали переменную ЦДС–ЦТ и ее соответствующий спектр. Следует отметить, что, как и в цитируемых работах [15–18], выбранная характеристика фильтра не зависела от антропометрических параметров испытуемых. Такой подход позволяет рассматривать перемещение проекции ЦТ как контролируруемую переменную, а разность ЦДС–ЦТ – как переменную, отражающую изменения результирующей жесткости в голеностопных суставах и мышечные усилия, которые корректируют колебания ЦТ тела [16–18].

Оценку влияния зрительных условий на процесс поддержания вертикальной позы производили, анализируя изменения медианной частоты (MF) и среднеквадратического значения (RMS) спектров колебаний в диапазонах 0–1.0 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».

Зрительные условия. Для создания визуальной зрительной среды (ВЗС) был применен так называемый пассивный способ формирования трехмерного стереоизображения, базирующийся на эффекте поляризации света [20, 21]. С помощью двух проекторов, снабженных поляризационными фильтрами, которые были ориентированы ортогонально относительно друг друга, два изображения

одной и той же сцены одновременно проецировались на экран из специального материала, обладающего минимальной степенью деполяризации (silver screen, 150 × 200 см). Испытуемые и проекторы находились по одну сторону от экрана. В условиях ВЗС в нашем случае испытуемые видели сцену, включавшую в себя два плана. Первый представлял собой окно комнаты с прилегающими к нему стенами, а второй – часть городского пейзажа (соседние здания за окном). Удаление изображения первого (переднего) плана от испытуемого соответствовало 1.2, а второго – порядка 20 м. Испытуемые использовали очки с поляризационными фильтрами, ориентированными параллельно соответствующим фильтрам проекторов, что обеспечивало трехмерное восприятие ВЗС. Поле зрения испытуемых было ограничено, составляя примерно 80° по вертикали и 90° по горизонтали. В силу этого испытуемые могли ориентироваться только в пределах представленной им виртуальной зрительной картины.

Чтобы адекватнее выяснить вклад зрительной обратной связи в поддержание равновесия в условиях нарушения стационарности видимого зрительного окружения, мы применяли более полное погружение испытуемых в виртуальную реальность. С этой целью положение переднего плана ВЗС делали зависимым от колебаний тела в передне-заднем направлении таким образом, что смещения тела практически одновременно вызывали смещение переднего плана ВЗС в том же самом направлении. О колебаниях тела судили, регистрируя сигналы от тензометрического датчика, который был связан эластичной нитью с телом испытуемых на уровне тазобедренных суставов. Жесткость нити была небольшой (1.4 Н/м) и не влияла на положение тела [22]. Связь переднего плана ВЗС с колебаниями тела осуществлялась с помощью компьютерной программы, встроенной в систему формирования ВЗС таким образом, что можно было легко выбирать направление подобной связи (противофазное или синфазное – ПФ и СФ соответственно) перед каждой пробой. В данном исследовании коэффициент связи между смещениями ВЗС и тела в сагитальной плоскости был равен двум, т. е., например, при отклонении проекции ЦТ в передне-заднем направлении 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 референса подвижный передний план ВЗС и тем самым дестабилизируют

ют вертикальную позу по сравнению с характеристиками ее поддержания в нормальных зрительных условиях [23]. Манипулирование направлением связи колебаний тела с ВЗС приводило к тому, что в целом видимое зрительное окружение воспринималось испытуемыми (согласно их словесным отчетам) как нестационарное, несмотря на наличие неподвижного заднего плана.

Процедура тестов. Вся совокупность тестов условно делилась на две равные части, во время которых испытуемые стояли в удобной вертикальной позе. В первой части испытуемых просили смотреть на задний план ВЗС приблизительно в центр экрана. В ходе тестирования в отдельных пробах в случайном порядке вводилась связь смещений зрительной среды с колебаниями тела в сагиттальной плоскости. Во второй половине проб до начала тестирования испытуемых информировали, что такая связь будет существовать только в сагиттальной плоскости, причем им об этом сообщали перед каждой пробой с включением связи. Кроме того, им также предлагали стараться минимизировать колебания тела в указанной плоскости, отслеживая смещения переднего плана относительно какого-либо заранее выбранного объекта на заднем плане. И в первой, и во второй группе тестов пробы с привязкой смещений переднего плана ВЗС к колебаниям тела перемежались пробами со стоянием при неподвижном зрительном окружении (НЗО) и пробами в условиях полного устранения зрительного контроля (ЗГ). В условиях НЗО испытуемые стояли в тех же самых стереоочках; поле зрения было ограничено теми же пределами, что и в условиях связи колебаний тела и переднего плана. Испытуемые видели перед собой экран с изображением той же виртуальной трехмерной сцены, однако сдвиги обоих ее планов не были связаны с колебаниями тела.

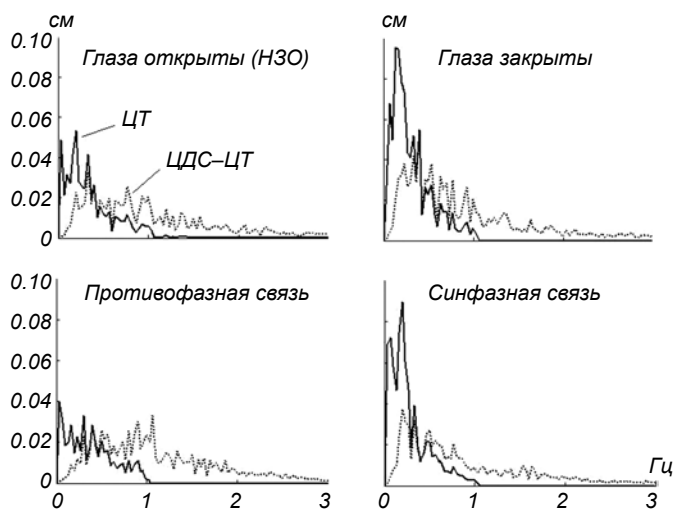
Таким образом, исследуемые переменные (ЦТ и ЦДС–ЦТ) оценивались при НЗО и ЗГ, а также при наличии ПФ- или СФ-связи колебаний переднего плана ВЗС с колебаниями тела. Во время эксперимента в каждой из его частей испытуемые выполняли 14 проб (восемь проб в условиях привязки смещений переднего плана ВЗС к колебаниям тела и по три пробы в условиях НЗО и ЗГ). Длительность регистрации стабิโลграмм в каждой из проб составляла 40 с. Интервал времени между пробами составлял около 1 мин; после каждых четырех-пяти проб испытуемые отдыхали в положении сидя в течение 3–4 мин. Зрительные условия в каждой поло-

вине тестов чередовали в случайном порядке.

Статистическая обработка. Полученные данные усредняли по всем пробам для каждого зрительного условия сначала у отдельных испытуемых, а затем вычисляли средние по всей группе. В ходе статистического анализа глобальное влияние фактора «условия зрительного контроля» на исследуемые переменные оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Достоверность различий значений RMS и MF при парном сравнении отдельных зрительных условий оценивали с использованием post-hoc-анализа с применением *t*-теста для выборок с неравными дисперсиями.

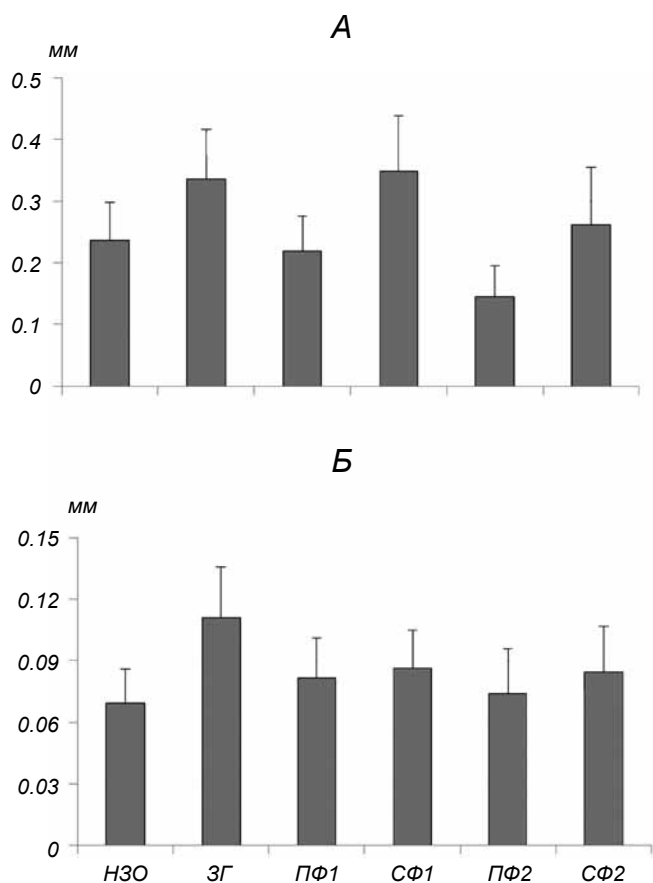
РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 показаны усредненные по четырем пробам амплитудные спектры, вычисленные соответственно траекториям ЦТ и ЦДС–ЦТ в передне-заднем направлении по результатам тестирования одного испытуемого. Видно, что различные зритель-



Р и с. 1. Пример частотной декомпозиции спектров для переменных центр тяжести (ЦТ) и центр давления стоп (ЦДС) – центр тяжести (ЦДС–ЦТ); обработка траекторий этих переменных в передне-заднем направлении у одного из испытуемых. По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат – амплитуда колебаний, см.

Р и с. 1. Приклад частотної декомпозиції спектрів для змінних центр ваги (ЦВ) і центр тиснення стоп (ЦТС) – центр ваги (ЦТС–ЦВ); обробка траєкторій цих змінних у передньо-задньому напрямку в одного з випробуваних.



Р и с. 2. Средние величины среднеквадратических значений (RMS) спектров переменных ЦТ (А) и центр давления стоп (ЦТС)–ЦТ (Б) и ошибки средних, вычисленные согласно колебаниям тела испытуемых в передне-заднем направлении при различных условиях зрительного контроля.

НЗО – открытые глаза при неподвижном зрительном окружении; ЗГ – закрытые глаза в темноте; ПФ1 и СФ1 – условия в первой части тестов, противофазная и синфазная связи колебаний переднего плана виртуальной зрительной среды с колебаниями тела; ПФ2 и СФ2 – то же в условиях второй части тестов.

Р и с. 2. Середні величини середньоквадратичних значень (RMS) спектрів змінних ЦВ (А) та центр тиснення стоп (ЦТС)–ЦВ (Б) і похибки середніх, обчислені згідно з коливаннями тіла випробуваних у передньо-задньому напрямку при різних умовах зорового контролю.

ные условия по-разному влияли на амплитудные спектры исследуемых переменных. Если сравнить спектры колебаний переменной ЦТ, легко заметить, что в условиях НЗО (ОГ, ВЗС неподвижна) и ПФ-связи величины выявленных колебаний были меньше, чем при ЗГ и СФ-связи. Иными словами, в первых двух зрительных условиях испытуемый стоял более устойчиво. Как показало сопоставле-

ние спектров переменной ЦДС–ЦТ, которая связана с результирующей суставной жесткостью, во всех условиях, когда испытуемый стоял при НЗО, величины спектральных колебаний были близкими и существенно меньшими, чем при устранении визуальных влияний (ЗГ). Такие зрительнозависимые изменения амплитудных спектров были характерны для большинства испытуемых. Это подтверждают последующие рисунки (рис. 2 и 3), на которых представлены суммированные результаты анализа обеих переменных для всех испытуемых.

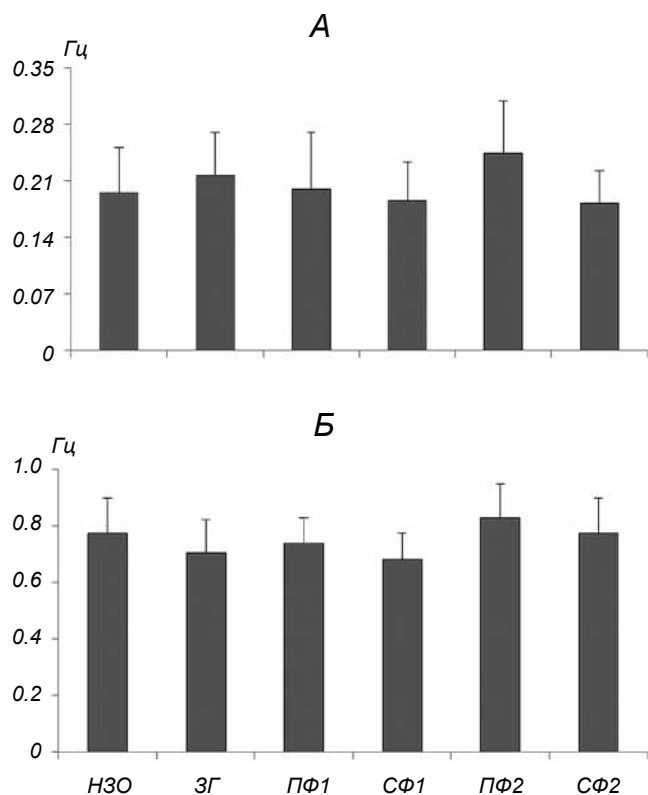
Анализ RMS спектров колебаний исследуемых переменных. На рис. 2 приведены усредненные для всех испытуемых результаты оценки RMS амплитудных спектров переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ. Из рисунка видно, что наибольшие величины RMS обнаруживались в условиях поддержания вертикальной позы с ЗГ и СФ-связью между колебаниями тела и переднего плана ВЗС. В целом дисперсионный анализ показал наличие статистически достоверного влияния фактора «условие зрительного контроля» на RMS спектров исследуемых переменных (ANOVA: $F(1, 71) = 14.03, P < 0.000001$ и $F(1, 71) = 7.62, P < 0.00001$ соответственно для переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ).

Post-hoc-анализ данных, полученных в первой части тестов в условиях ПФ1 и СФ1, выявил достоверные различия RMS для спектров ЦТ ($t = -3.97, P < 0.0001$) и отсутствие различий для RMS спектров ЦДС–ЦТ ($P > 0.05$). Еще большее влияние ПФ- и СФ-связей на RMS спектров наблюдалось во второй половине тестов, т. е. в условиях ПФ2 и СФ2 ($t = -6.69, P < 0.000001$ и $t = -1.77, P < 0.05$ соответственно для переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ).

Достоверные различия между RMS спектров ЦТ были обнаружены также при парном сравнении условий НЗО и ПФ2 ($t = -4.26, P < 0.0001$), при сравнении условий СФ1 и НЗО ($t = 3.46, P < 0.001$), ПФ1 и ЗГ ($t = -3.69, P < 0.0002$), ПФ2 и ЗГ ($t = -7.22, P < 0.00001$), а также условий СФ2 и ЗГ ($t = -2.52, P < 0.01$).

RMS спектров переменной ЦДС–ЦТ статистически достоверно различались для условий СФ2 и ПФ2 ($t = -1.77, P < 0.05$), ЗГ и НЗО ($t = 5.06, P < 0.00001$), ЗГ и ПФ1 ($t = 3.16, P < 0.005$), ЗГ и СФ1 ($t = 2.71, P < 0.005$), ЗГ и ПФ2 ($t = 4.92, P < 0.0005$), ЗГ и СФ2 ($t = 3.25, P < 0.005$), а также для условий НЗО и СФ1 ($t = 2.14, P < 0.03$) и НЗО и СФ2 ($t = 2.24, P < 0.02$).

Анализ MF спектров переменных. На рис. 3 показаны усредненные для всех испытуемых результа-



Р и с. 3. Средние величины медианной частоты спектров переменных ЦТ (А) и ЦДС–ЦТ (Б).
Остальные обозначения те же, что и на рис. 2.

Р и с. 3. Середні величини медіанної частоти спектрів змінних ЦВ (А) та ЦТС–ЦВ (Б).

ты оценки значений MF спектров переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ. Статистический анализ обнаружил достоверное влияние фактора «условие зрительного контроля» на MF спектров обеих переменных (ANOVA: $F(1, 71) = 7.44, P < 0.00001$ и $F(1, 71) = 7.79, P < 0.00001$ соответственно для переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ).

Сравнение выборок данных, полученных при разных зрительных условиях, не выявило достоверных различий спектров переменной ЦТ для условий ПФ1 и СФ1 ($P > 0.05$). Вместе с тем они были весьма отчетливыми для условий ПФ2 и СФ2 ($t = 5.15, P < 0.00001$). Кроме того, MF в условиях ПФ2 также была существенно больше, чем в условиях НЗО ($t = 3.34, P < 0.001$), ПФ1 ($t = 3.12, P < 0.005$), СФ1 ($t = 4.67, P < 0.0001$) и ЗГ ($t = 1.94, P < 0.05$).

MF спектров ЦДС–ЦТ в условиях ПФ2 также была больше, чем в остальных зрительных усло-

виях. Post-hoc-анализ выявил достоверные отличия соответствующего среднего значения от MF, характерных для условий НЗО ($t = 1.78, P < 0.05$), ПФ1 ($t = 3.89, P < 0.001$), СФ1 ($t = 3.67, P < 0.002$) и ЗГ ($t = 4.25, P < 0.0001$). Кроме того, достоверные различия были обнаружены у данного показателя в условиях НЗО и ЗГ ($t = 2.20, P < 0.02$), а также НЗО и СФ1 ($t = 3.04, P < 0.002$).

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе мы постарались выяснить, могут ли здоровые люди использовать зрительную обратную связь при поддержании позы в условиях нарушения стабильности видимого внешнего окружения или же они полагаются на сигналы от других сенсорных систем. Чтобы решить поставленную задачу, испытуемых «погружали» в ВЗС, в которой имелись два плана – передний и задний. В процессе тестирования поддержания позы задний план всегда оставался неподвижным, а передний был подвижным, поскольку воспроизводил синфазно или противофазно колебания тела в передне-заднем направлении. Необходимо отметить, что испытуемые воспринимали (согласно их отчетам) ПФ-паттерн связи между колебаниями тела и переднего плана ВЗС как менее дестабилизирующий позу и более удобный для осуществления позных коррекций, чем СФ.

Как показали результаты данной и ранее выполненной нами [23] работ, испытуемые практически не использовали в качестве референса неподвижный задний план для коррекции позы. Это наблюдалось даже тогда, когда давалась специальная инструкция «отслеживать колебания тела относительно заднего плана ВЗС». Об этом, прежде всего, свидетельствуют качественные (рис. 1) и количественные (рис. 2; 3) различия характеристик поддержания позы в условиях СФ- и ПФ-связи колебаний тела и ВЗС. В частности, из рис. 1, на котором приведены репрезентативные спектры колебаний исследовавшихся переменных, видно, что при ПФ-связи обе исследованные переменные, характеризующие колебания тела, имели меньшую величину и одновременно более высокую частоту. Это наблюдение подтверждено статистическим анализом изменений значений RMS и FM спектров колебаний обеих переменных (ЦТ и ЦДС–ЦТ), выполненным по результатам тестирования всех испытуемых. Можно предположить, что, если бы испытуемые

использовали неподвижный задний план ВЗС в качестве референса, такие значительные различия не имели бы места.

Тестирование поддержания позы в *первой половине* тестов со случайными предъявлениями связи колебаний тела и переднего плана виртуальной картины показало, что RMS спектров переменной ЦТ были наибольшими в условиях СФ-связи (СФ1), причем их значения существенно превышали величины, полученные в других условиях стояния с ОГ (НЗО, ПФ1). RMS спектров переменной ЦТ в условиях СФ1 были сопоставимы только с RMS, полученными при устранении зрительного контроля (ЗГ). Однако поддержание вертикальной позы в последнем случае реализовывалось при более значительной результирующей суставной жесткости, о чем свидетельствует существенная разница значений RMS спектров переменной ЦДС–ЦТ для условий ЗГ и СФ1 (рис. 2). Близкие значения RMS спектров переменной ЦТ в условиях ЗГ и СФ1, с одной стороны, и меньшие значения RMS спектров переменной ЦДС–ЦТ в условиях СФ1 – с другой, являются свидетельством того, что в случае СФ-связи одинаковый с наблюдаемым в условиях ЗГ уровень колебаний тела достигался за счет меньших по величине мышечных коррекций при непосредственном участии зрительной обратной связи.

В случае ПФ-связи (условие ПФ1) влияние зрительной обратной связи на позу было еще большим. RMS спектра колебаний тела (ЦТ) оказались примерно на 30 % меньшими, чем в условиях СФ1, и не отличались от величин RMS спектров, характерных для стояния в условиях НЗО. Об усилении влияния зрительной обратной связи при поддержании позы в условиях ПФ1 свидетельствуют также более высокие, чем в условиях СФ1, значения MF спектров переменных ЦТ и ЦДС–ЦТ.

Условия поддержания позы в *второй группе* тестов отличались тем, что перед каждой пробой испытуемым сообщали о включении связи между колебаниями тела и смещениями переднего плана ВЗС и инструктировали пытаться «минимизировать колебания тела путем отслеживания смещений переднего плана относительно какого-либо заранее выбранного объекта на заднем плане ВЗС». Введение такой инструкции приводило к уменьшению амплитуды колебаний тела в условиях как ПФ-, так и СФ-связи (ПФ2 и СФ2 соответственно). В последнем случае качество поддержания вертикальной стойки становилось достоверно лучше, чем при ЗГ. Величина RMS спектров переменной

ЦТ в условии ПФ2 была примерно на 35 % меньше, чем в условии ПФ1, а в условии СФ2 – примерно на 25 % ниже, чем в условии СФ1. Следует особо отметить, что RMS переменной ЦТ в условиях ПФ2 были существенно (почти на 40 %) меньше, чем в условиях НЗО. Эффект введения специальной инструкции в условиях ПФ2 реализовывался и через изменение параметров переменной ЦДС–ЦТ. Значения RMS спектров несколько уменьшались, а MF колебаний заметно возрастала. Все эти факты свидетельствуют о влиянии инструкции, даваемой испытуемым, на эффективность использования ими зрительной обратной связи при стоянии. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в условиях нарушения стабильности внешнего окружения зрение все же сравнительно эффективно используется в позном контроле.

Выполненное нами исследование не единично по своей направленности. Оно находится «в русле» работ по изучению двигательного контроля и, в частности, процесса поддержания вертикальной позы у человека. Данные наших и аналогичных тестов указывают на то, что инструкции, направляющие внимание испытуемого на результаты движений тела, более действенны при выполнении двигательных задач, чем инструкции, акцентирующие внимание на самих движениях как таковых [24–29]. В соответствующих сообщениях приводятся также доказательства того, что акцентирование внимания испытуемых на движении своего тела часто даже ухудшает выполнение автоматизированных навыков по сравнению с наблюдаемым в случаях отсутствия каких-либо инструкций [25]. Результаты нашего исследования вполне согласуются с выводами, к которым пришли авторы отмеченных работ.

В соответствии с положениями комитета ИППИ по этике, а также с принципами, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г., все испытуемые были предварительно информированы о содержании и процедуре экспериментов и дали согласие на участие в них.

Авторы статьи – Б. Н. Сметанин, Г. В. Кожина и А. К. Попов – подтверждают, что у них нет конфликта интересов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-04-01068-а).

Б. Н. Сметанин¹, Г. В. Кожина¹, А. К. Попов¹

ПІДТРИМУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПОЗИ ЛЮДИНИ ПРИ ПОРУШЕННІ СТАБІЛЬНОСТІ ЗОРОВО СПРІЙМАНОВОГО ОТОЧЕННЯ: ВПЛИВ ІНСТРУКЦІЇ, СПРЯМОВАНОЇ НА КОНТРОЛЬ КОЛИВАНЬ ТІЛА

Інститут проблем передачі інформації ім. А. А. Харкевича РАН, Москва (РФ).

Резюме

Досліджували підтримування вертикальної пози в умовах занурення людини у віртуальне тривимірне зорове середовище (ВЗС). ВЗС складалось із двох планів: передній являв собою вікно кімнати, а задній – фрагмент пейзажу за вікном. Комп'ютерна програма дозволяла пов'язувати коливання тіла в сагітальній площині з переднім планом ВЗС, що робило його рухливим. У перебігу тестування такий зв'язок міг бути як протифазним (ПФ-), так і синфазним (СФ-); задній план завжди залишався нерухомим. Кожний експеримент включав в себе дві частини. У першій з них при проведенні проб випробуваних не сповіщали про те, що в окремих пробах коливання тіла будуть пов'язані зі зрушеннями зорового середовища, і пропонували їм дивитися на будь-який об'єкт нерухомого заднього плану. У другій частині випробуваних заздалегідь повідомляли про наявність такого зв'язку і пропонували їм мінімізувати коливання тіла в сагітальній площині, відслідковуючи зміщення переднього плану щодо будь-якого заздалегідь обраного об'єкта на її задньому плані. Проби із зв'язком коливань тіла та ВЗС чергували з пробами зі стоянням при цілком нерухомому зоровому оточенні (НЗО) та пробами зі стоянням при заплушених очах (ЗО). Внесок зорового контролю в підтримування пози оцінювали за змінами амплітудно-частотних характеристик елементарних змінних, які обчислювали згідно з траєкторією переміщення центра тиснення стоп (ЦТС). Цими змінними була вертикальна проекція центра ваги тіла (ЦВ) і різниця між ЦТС і вертикальною проекцією ЦВ. Зміни проекції ЦВ розглядали як основну контрольовану змінну, котра вміщувала інформацію про зміни результуючої м'язово-суглобової жорсткості в гомілковостопних суглобах, пов'язаної з активністю м'язів гомілок. Аналогічним чином аналізували проби, отримані в разі стояння в умовах НЗО та ЗО. Аналіз змінних ЦВ і ЦТС–ЦВ виявив чітку залежність їх спектрів коливань від напрямку зв'язку між зміщеннями тіла та коливаннями переднього плану і від інструкції, отриманої випробуваними. У першій групі тестів при СФ-зв'язку середньоквадратичні значення (RMS) спектрів коливань обох змінних знаходились у тому ж самому діапазоні, що й при стоянні із ЗО, а при ПФ-зв'язку були ближчими до зони значень, характерних для умов НЗО. У другій групі тестів RMS спектрів, обчислені для обох змінних, були кількісно іншими: у разі ПФ-зв'язку коливань тіла та переднього плану вони були менше значень, виявлених в умовах стояння з НЗО, а в разі СФ-зв'язку – менше значень, характерних для стояння із ЗО. Уведення інструкції в другій групі тестів відображувалось і в змінах параметрів змінної ЦТС–ЦВ. Зокрема, при ПФ-зв'язку RMS спектрів коливань цієї змінної дещо змінювались, а їх медіанна частота істотно збільшувалася. Отримані дані дозволяють вважати, що покращення стабільності стояння після введення інструкції, уточнюючої зоровий контроль та акцентуючої його на одному напрямку коливань тіла, є результатом більш активного використання зорового зворотного зв'язку в умовах сприйняття нестабільного переднього плану ВЗС. Це, очевидно,

слугує доказом ефективної участі зору в повному контролі при порушенні стабільності зовнішнього оточення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. D. N. Lee and E. Aronson, "Visual proprioceptive control of standing in human infants," *Percept. Psychophys.*, **15**, No. 3, 529-532 (1974).
2. J. F. Soechting and A. Berthoz, "Dynamic role of vision in the control of posture in man," *Exp. Brain Res.*, **36**, No. 3, 551-561 (1979).
3. W. N. van Asten, C. C. Gielen, and J. J. van der Gon, "Postural movements induced by rotations of visual scenes," *J. Opt. Soc. Am. Ser. A.*, **5**, No. 10, 1781-1789 (1988).
4. R. J. Peterka, "Sensorimotor integration in human postural control," *J. Neurophysiol.*, **88**, No. 3, 1097-2118 (2002).
5. T. Mergner, G. Schweigart, C. Maurer, and A. Blümle, "Human postural responses to motion of real and virtual visual environments under different support base conditions," *Exp. Brain Res.*, **167**, No. 4, 535-556 (2005).
6. A. M. Bronstein, "Visual vertigo syndrome: clinical and posturography findings," *J. Neurol., Neurosurg., Psychiat.*, **59**, No. 5, 472-476 (1995).
7. R. G. Jacob, S. O. Lilienfeld, J. M. R. Furman, et al., "Panic disorder with vestibular dysfunction: further clinical observations and description of space and motion phobic stimuli," *J. Anxiety Disord.*, **3**, No. 1, 117-130 (1989).
8. M. Guerraz, C. C. Gianna, P. M. Burchill, et al., "Effect of visual surrounding motion on body sway in a three-dimensional environment," *Percept. Psychophys.*, **63**, No. 1, 47-58 (2001).
9. M. Pavlou, C. Quinn, K. Murray, et al., "The effect of repeated visual motion stimuli on visual dependence and postural control in normal subjects," *Gait Posture*, **33**, No. 1, 113-118 (2011).
10. M. Turner and M. J. Griffin, "Motion sickness in public road transport: the effect of driver, route and vehicle," *Ergonomics*, **42**, No. 12, 1646-1664 (1999).
11. M. Turner and M. J. Griffin, "Motion sickness in public road transport: the relative importance of motion, vision and individual differences," *Br. J. Psychol.*, **90**, No. 4, 519-530 (1999).
12. P. I. Simeonov, H. Hsiao, B. W. Dotson, and D. E. Ammons, "Control and perception of balance at elevated and sloped surfaces," *Human Fact.*, **45**, No. 1, 136-147 (2003).
13. H. Hsiao and P. Simeonov, "Preventing falls from roofs: a critical review," *Ergonomics*, **44**, No. 5, 537-561 (2001).
14. D. Huppert, E. Grill, and T. Brandt, "Down on heights? One in three has visual height intolerance," *J. Neurol.*, **260**, No. 2, 597-604 (2013).
15. O. Caron, B. Faure, and Y. Breniere, "Estimating the centre of gravity of the body on the basis of the centre of pressure in standing posture," *J. Biomech.*, **30**, Nos. 11/12, 1169-1171 (1997).
16. P. Rougier and I. Farenc, "Adaptative effects of loss of vision on upright undisturbed stance," *Brain Res.*, **871**, No. 2, 165-174 (2000).
17. 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)

18. 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).
19. E. Gurfinkel, "Physical foundations of stabilography," *Agressologie*, **14**, No. 1, 9-13 (1973).
20. С. В. Клименко, И. Н. Никитин, Л. Д. Никитина, *Аванго: система разработки виртуальных окружений*, Ин-т физ.-техн. информ., Москва, Протвино (2006).
21. G. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*, John Wiley & Sons, New York (1994).
22. К. Е. Попов, Г. В. Кожина, В. Н. Сметанин, and V. Y. Shlikov, "Postural responses to combined vestibular and hip proprioceptive stimulation in man," *Eur. J. Neurosci.*, **11**, No. 6, 3307-3311 (1999).
23. Б. Н. Сметанин, Г. В. Кожина, А. К. Попов, "Поддержание вертикальной позы человека при манипулировании направлением и задержкой зрительной обратной связи", *Нейрофизиология/Neurophysiology*, **44**, № 5, 454-462 (2012).
24. G. Wulf and C. Weigelt, "Instructions in learning a complex motor skill: To tell or not to tell," *Res. Quart Exerc. Sport*, **68**, No. 4, 362-367 (1997).
25. G. Wulf, M. Hoß, and W. Prinz, "Instructions for motor learning: Differential effects of internal versus external focus of attention," *J. Mot. Behav.*, **30**, No. 2, 169-179 (1998).
27. G. Wulf, C. H. Shea, and J. Park, "Attention in motor learning: Preferences of and advantages of an external focus," *Res. Quart Exerc. Sport*, **72**, No. 4, 335-344 (2001).
28. G. Wulf, J. Mercer, N. H. McNevin, and M. A. Guadagnoli, "Reciprocal influences of attentional focus on postural and suprapostural task performance," *J. Mot. Behav.*, **36**, No. 2, 189-199 (2004).
29. 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).