

УДК 612.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ СТОЯНИИ С РАЗНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ СТОПЫ ОДНОЙ ИЛИ ОБЕИХ НОГ

© 2020 г. О. В. Казенников¹, *, Т. Б. Киреева¹, В. Ю. Шлыков¹

¹ФГБУН Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

*E-mail: kazen@iitp.ru

Поступила в редакцию 27.01.2020 г.

После доработки 20.03.2020 г.

Принята к публикации 19.04.2020 г.

Поддержание вертикальной позы было исследовано у стоящего человека с разной ориентацией стопы одной или обеих ног. Симметричный поворот обеих стоп у стоящего человека приводил к увеличению движения общего центра давления (ОЦД) и центров давления (ЦД) каждой ноги. Можно предположить, что при симметричном положении стоп поддержание вертикального положения тела осуществлялось одновременным управлением положением ЦД каждой ноги. При повороте стопы только одной ноги увеличение движения ЦД наблюдалось у ноги, сохранявшей ориентацию стопы в сагиттальном направлении. У ноги с повернутой стопой движение ЦД не изменялось. Таким образом, поворот стопы одной ноги изменял вовлечение ноги в поддержание вертикального положения. Сохранение равновесия происходило в основном из-за управления положением ЦД ноги с ориентацией стопы в сагиттальном направлении. Кроме изменения движения ЦД ноги, наблюдалось изменение преимущественного направления движения ЦД относительно ориентации стопы. При стопе, ориентированной в сагиттальном направлении, направление преимущественного движения ЦД было повернуто наружу. При стопе, повернутой наружу, направление преимущественного движения ЦД было повернуто внутрь. Такое изменение направления движения ЦД наблюдалось как при одновременном повороте обеих стоп, так и при повороте стопы только одной ноги. Можно предположить, что при стоянии система поддержания равновесия управляет положением ЦД каждой ноги и учитывает скручивающее напряжение в ноге, возникающее при повороте стопы.

Ключевые слова: стояние, ориентация стопы, асимметричная поза.

DOI: 10.31857/S0131164620050057

Во время стояния человека система позного контроля управляет положением проекции общего центра тяжести тела, удерживая его внутри опорного контура. Размер опорного контура определяется расстоянием между стопами, взаимным расположением стоп и их ориентацией [1]. При этом управление положением проекции общего центра тяжести в переднезаднем направлении осуществляется преимущественно модуляцией активности мышц, управляющими углом в голеностопном суставе. Положение проекции центра тяжести в боковом направлении регулируется в основном приводящими и отводящими мышцами тазобедренного сустава [2].

Подвижность стоящего человека в переднезаднем направлении гораздо больше, чем во фронтальном, и основное усилие в голеностопном суставе создается в направлении сагиттальной ориентации стопы. Эти усилия создают момент силы, уравновешивающий момент веса тела, возникающий из-за отклонения от положения равновесия. Вместе с тем, известно, что напряже-

ние мышц голеностопного сустава создает момент силы не только в сагиттальном направлении, но и во фронтальном [3, 4].

Создание момента силы как в сагиттальном, так и во фронтальном направлении позволяет приспосабливаться к поворотам верхней части тела. В частности, было показано, что при повороте туловища относительно вертикальной оси траектория движения центра давления (ЦД) ноги смещалась в сторону поворота [5]. Можно предположить, что помимо амплитуды движения ЦД система позного контроля управляет направлением движения ЦД. Вместе с тем, поворот туловища создает скручивающий момент, который по механическим причинам также может влиять на направление траектории движения ЦД ноги. В настоящей работе предполагалось изучить влияние изменения ориентации стопы одной или обеих ног на амплитуду позных колебаний и направление траектории движения ЦД ног. В этом случае скручивающие усилия возникают в ноге с повернутой стопой. Изменение ориентации сто-

пы одной ноги может повлиять на распределение нагрузки между ногами и на восприятие положения общего центра давления тела (ОЦД) из-за несимметричного движения ЦД каждой ноги.

Таким образом, асимметричные условия при стоянии с повернутой стопой одной ноги влияют на восприятие положения ОЦД и изменяют сенсорную интеграцию при поддержании вертикальной позы. Можно ожидать, что исследование стояния при одновременном повороте стоп и при повороте стопы одной ноги позволит прояснить, в какой мере изменение направления движения ЦД ноги отражает работу системы позного контроля, а в какой является следствием скручивающего усилия в ноге.

МЕТОДИКА

В экспериментах принимали участие 8 практически здоровых испытуемых. Для определения ведущей ноги использовали стандартные тесты по функциональной асимметрии. У всех испытуемых правая нога являлась ведущей. Стопы симметрично располагали на расстоянии 10 см от внутреннего края каждого из двух рядом стоящих стабилграфов “Стабилан 01-13” (ОКБ РИТМ, Россия), что позволяло отдельно регистрировать изменения положения ЦД для левой и правой ноги. Регистрировали положение ОЦД, а также ЦД левой и правой ноги с частотой оцифровки 50 Гц. У всех испытуемых поддержание вертикальной позы исследовали при спокойном состоянии с опущенными вдоль тела руками и при закрытых глазах. Стабилограммы регистрировали в условиях стояния с различной ориентацией стоп одной или обеих ног.

В первой серии эксперимента регистрацию стабилграмм производили при стоянии со стопами, расположенными параллельно друг другу, и с разворотом стоп обеих ног на 22.5 и 45 град. Угол определяли между направлением вперед и внутренней границей стопы и устанавливали по шаблону. Во второй серии эксперимента стопа одной ноги испытуемого была направлена в сагиттальном направлении, а стопа другой была повернута на 0, 30 и 60 град. Длительность каждой пробы составляла 40 с. При смене условий стояния делали паузу для отдыха на 1 мин.

Для вычисления параметров стабилграммы из нее вычитали медленную составляющую с частотой среза 0.1 Гц. Оценка преимущественного направления движения ОЦД и ЦД каждой ноги производили путем выделения главной компоненты движения ЦД [5]. Первая компонента отражала более 90% движения ЦД и ее рассматривали как преимущественное выделенное направление движения ЦД. Угол поворота определяли по отношению к направлению вперед. Угол считали

положительным при повороте по часовой стрелки. При анализе изменений направления выделенного направления при повороте стопы использовали разность между углом выделенного направления движения ЦД каждой ноги и углом поворота стопы. Продольное движение ЦД отражало изменение момента силы, создаваемого мышцами голеностопного сустава. Составляющие стабилграммы анализировали во всех условиях стояния. Для оценки перемещения ЦД определяли скорость его движения в направлении продольной и поперечной компоненты стабилграммы. У каждого испытуемого эти значения в пробах с одинаковыми условиями эксперимента использовали для статистического анализа. Для выявления различий использовали одно- или двухфакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями и парные сравнения с поправкой Бонферони. Достоверность отклонения от ориентации стопы (от нулевого значения) проверяли с помощью *t*-теста. Уровень для принятия различий был принят 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

У испытуемых не было проблем поддерживать вертикальную позу при разной ориентации положения стоп. Выделение направления движения ОЦД и ЦД каждой ноги с помощью метода главных компонент показало, что с преимущественным направлением связано около 80% (диапазон 70–85%) движения ОЦД. Для каждой ноги почти все движение ЦД (98–100%) происходило вдоль преимущественного направления.

На рис. 1, А–В представлен пример движения ОЦД и ЦД левой и правой ног при симметричном повороте стоп обеих ног. Видно, что движение ОЦД покрывало некоторую область, в то время, как движение ЦД левой и правой ног происходило преимущественно по прямой линии. При этом основное движение ОЦД при разных углах поворота стоп происходило в переднезаднем направлении. Направление движения ЦД каждой ноги изменялось пропорционально углу поворота стоп. С увеличением угла поворота стоп амплитуда движения ОЦД и ЦД каждой ноги существенно увеличивалась.

На рис. 1, Г–Е представлен пример движения ОЦД и ЦД левой и правой ног при стоянии с асимметричной ориентацией стоп ног. Во всех вариантах эксперимента стопа левой ноги была ориентирована в сагиттальном направлении и траектория движения ее ЦД не менялась. Направление движения ЦД правой ноги изменялось вместе с поворотом стопы правой ноги. Также видно, что движение ЦД левой ноги, не менявшей положение, увеличивалось при увеличении угла поворота стопы правой ноги. В то время, как

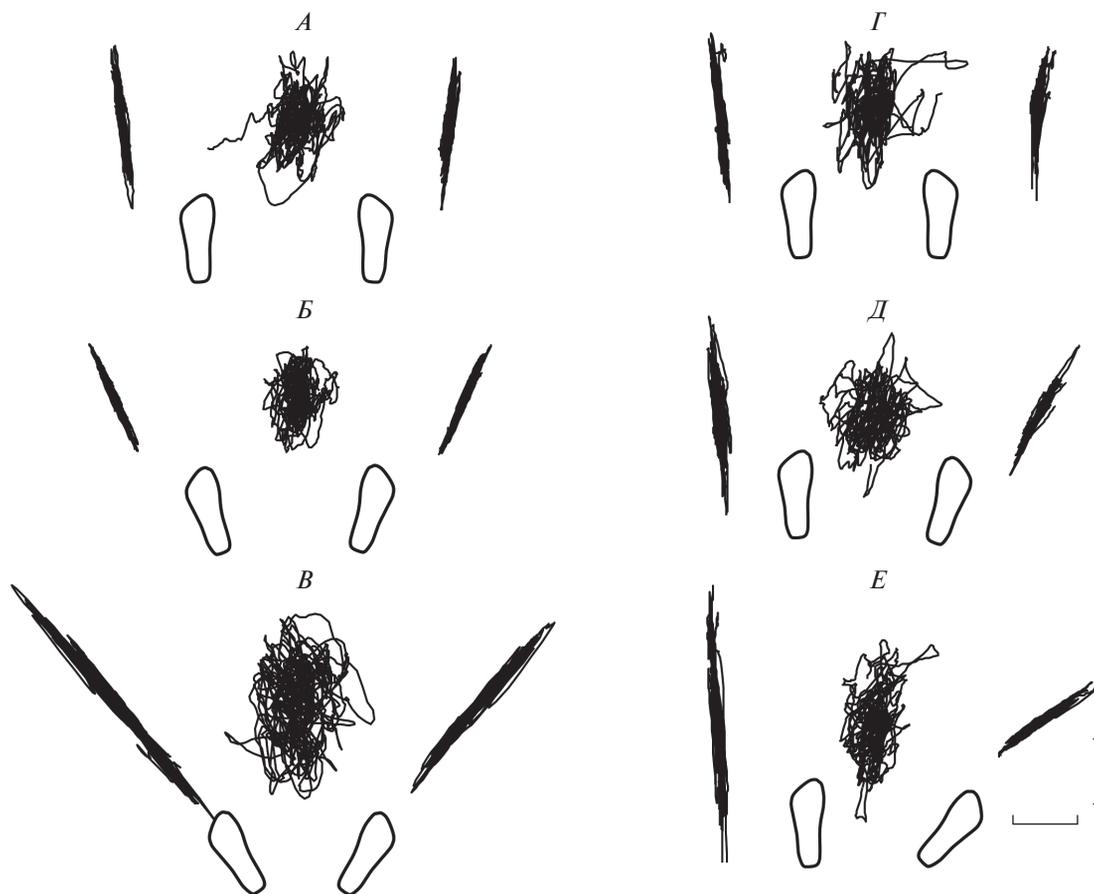


Рис. 1. Пример движения ОЦД (в центре) и ЦД левой (слева) и правой (справа) ног при стоянии с симметричным (А–В) и асимметричным (Г–Е) расположением стоп.

При симметричном положении стопы обеих ног ориентированы в сагиттальном направлении (А), повернуты на 22.5 (Б) и 45 град (В). При асимметричном положении – стопа левой ноги во всех вариантах эксперимента ориентирована в сагиттальном направлении. Стопа правой ноги ориентирована в сагиттальном направлении (Г), повернута на 30 (Д) и 60 (Е) град. Для наглядности, расстояния между стабิโลграммами во фронтальном направлении, установлены произвольно и представлена схема ориентации стоп. Направление движения вперед–вверх, калибровка – 5 мм.

амплитуда движения ЦД правой ноги изменялась мало, несмотря на увеличение угла поворота стопы.

Во время стояния с симметричным поворотом обеих стоп направление выделенного движения ОЦД не отличалось от направления вперед ($F(2, 14) = 0.45, p > 0.64$, рис. 2, А). При повороте только правой стопы были обнаружены достоверные различия ($F(2, 14) = 4.30, p < 0.04$, рис. 2, Б). Достоверные различия выделенного направления движения от направления вперед-назад отмечались только при повороте правой стопы на 60 град ($p < 0.05$). При других углах поворота отклонения от направления вперед не были достоверными. Повороты левой стопы не приводили к достоверным отличиям направления движения ЦД от направления вперед ($F(2, 14) = 1.39, p > 0.28$, рис. 2, В).

Для выяснения вопроса насколько выделенное направление движения ЦД каждой ноги соответствовало ориентации стопы, из угла выделенного направления убирался угол поворота стопы.

На рис. 3, А представлены усредненные по группе значения угла между выделенным направлением движения ЦД и углом поворота стопы при повороте обеих стоп. При стоянии со стопами, расположенными параллельно, движение ЦД происходило по линии, повернутой вправо, для правой ноги и линии, повернутой влево, для левой ноги. Отклонения от нулевого значения были достоверны как для правой, так и для левой ноги ($p < 0.03, p < 0.01$ соответственно, t -тест). При стопах, повернутых на угол 22.5 град, направление движения ЦД не отличалось от ориентации стоп ($p > 0.09, t$ -тест). При стопах, повернутых на 45 град, направление движения ЦД ноги относительно ориентации стопы было смещено влево для правой ноги, и вправо – для левой ноги. Достоверные различия между ориентацией стоп и направлением движения ЦД достигались только для левой ноги ($p < 0.02, t$ -тест).

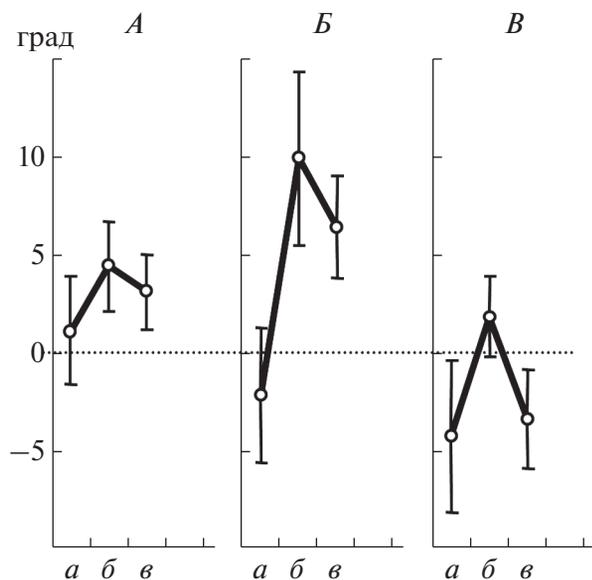


Рис. 2. Угол между сагиттальным направлением и выделенным направлением общего центра давления при стоянии с поворотом обеих стоп (*A*), при повороте стоп только правой (*B*) и только левой (*B*) ног. По оси абсцисс *A* – условия эксперимента: стопы обеих ног параллельны (*a*), повернуты наружу на 22.5 (*б*) и 45 (*в*) град. *B* – стопа правой ноги параллельна сагиттальной оси (*a*), повернута на 30 (*б*) и 60 (*в*) град наружу. *B* – то же, что на *B*, но для левой ноги.

В серии с поворотом только правой ступни направление выделенного движения ЦД левой ноги было повернуто на 3–5 град против часовой стрелки относительно ориентации стопы (рис. 3, *B*) и это отличие от ориентации стопы ноги было достоверным при всех положениях правой ($p < 0.04$, *t*-тест). Преимущественное движение ЦД правой ноги было смещено относительно стопы вправо на 5.29 ± 1.31 град при параллельном положении стоп ($p < 0.004$, *t*-тест) и на 2.58 ± 0.97 град при повороте правой стопы на 30 град ($p < 0.03$, *t*-тест). При повороте правой стопы на 60 град направление движения ЦД правой ноги было смещено относительно стопы влево на -4.79 ± 1.12 град ($p < 0.003$, *t*-тест).

В серии с поворотом только левой ступни направление выделенного движения ЦД правой ноги было повернуто на 4–5 град против часовой стрелки (рис. 3, *B*) и это различие при всех положениях правой ноги было достоверным ($p < 0.003$, *t*-тест). Преимущественное движение ЦД левой ноги было смещено относительно стопы влево на -4.12 ± 1.15 град при параллельном положении стоп ($p < 0.008$, *t*-тест). При повороте левой стопы на 30 град различия в ориентации стопы и преимущественного направления движения ЦД левой ноги были незначимыми ($p > 0.87$, *t*-тест). При повороте левой стопы на 60 град направление движения ЦД левой ноги было смещено от-

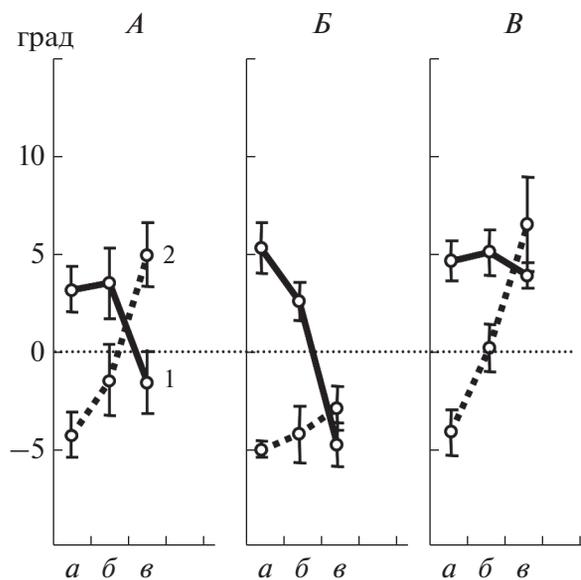


Рис. 3. Угол между сагиттальным направлением и выделенным направлением ЦД правой (1) и левой (2) ног при стоянии с поворотом обеих стоп (*A*), при повороте стоп только правой (*B*) и только левой (*B*) ног. Ось абсцисс – см. рис. 2.

носительно стопы вправо на -6.50 ± 2.43 град ($p < 0.03$, *t*-тест).

Скорость движения ОЦД вдоль преимущественного направления достоверно увеличивалась во время стояния с разворотом обеих стоп на разные углы (рис. 4, *A*, $F(2, 14) = 16.33$, $p < 0.0003$). Достоверное увеличение скорости ОЦД было при стоянии с разворотом стоп на 45 град по сравнению со стоянием с меньшим поворотом стоп ($p < 0.05$). Скорость движения ОЦД в поперечном направлении также достоверно увеличивалась ($F(2, 14) = 30.61$, $p < 0.00001$). Скорость движения ОЦД также увеличивалась во время стояния с поворотом стопы только правой ноги (рис. 4, *B*, $F(2, 14) = 12.99$, $p > 0.001$). Парное сравнение показало, что достоверное увеличение наблюдалось при повороте правой стопы на 60 град. При повороте стопы только левой ноги изменения скорости движения ОЦД не были достоверными (рис. 4, *B*, $F(2, 14) = 2.93$, $p > 0.08$). Таким образом, скорость движения ОЦД увеличивалась только при повороте стопы на большой угол.

При стоянии с поворотом обеих стоп скорость движения ЦД правой и левой ноги вдоль преимущественного направления увеличивалась с увеличением угла (рис. 1, *B*, *B*). Дисперсионный анализ показал, что увеличение скорости движения ЦД достоверно как для правой (рис. 5, *A*, $F(2, 14) = 35.11$, $p < 0.0001$), так и для левой ноги ($F(2, 14) = 16.38$, $p < 0.001$). *Post-hoc*-тест показал, что значимое увеличение скорости наблюдалось при повороте стоп на 45 град ($p < 0.05$). Во время стояния

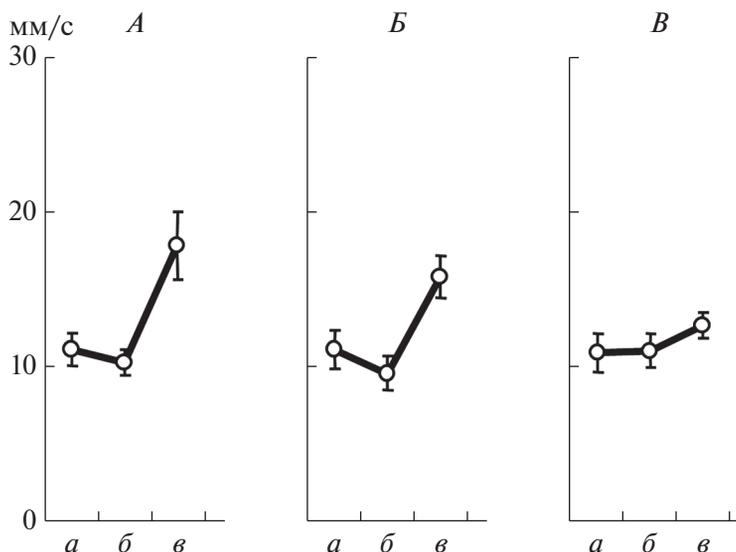


Рис. 4. Скорость движения ОЦД при стоянии с поворотом обеих стоп (А), при повороте стоп только правой (Б) и только левой (В) ног.

Ось абсцисс – см. рис. 2.

с поворотом только правой стопы скорость движения ЦД правой ноги изменялась недостоверно (рис. 1, Г–Е, рис. 5, Б, $F(2, 14) = 2.50, p > 0.11$), а скорость движения ЦД левой ноги увеличивалась ($F(2, 14) = 15.53, p > 0.001$). Достоверное увеличение скорости ЦД левой стопы было, когда правая стопа была повернута на 60 град ($p < 0.05$). Во время стояния с поворотом только левой стопы скорость движения ЦД правой ноги увеличивалась (рис. 5, В, $F(2, 14) = 17.21, p < 0.001$), а скорость ЦД левой ноги уменьшалась ($F(2, 14) = 7.53, p < 0.01$). Уровня достоверности увеличение скорости ЦД правой ноги достигало при повороте левой стопы на 60 град ($p < 0.05$). Скорость ЦД левой ноги уменьшалась, и это уменьшение было достоверным при повороте левой стопы на 60 град ($p < 0.05$). Таким образом, при повороте стопы одной ноги скорость движения ее ЦД не изменялась или уменьшалась, а скорость движения ЦД контралатеральной ноги увеличивалась.

Изменения нагрузки на ногу при повороте обеих стоп не были значимыми ($F(2, 14) = 0.67, p > 0.52$). При повороте стопы правой ноги нагрузка на правую ногу уменьшалась с $50 \pm 1\%$ до $44 \pm 3\%$ при увеличении угла поворота ($F(2, 14) = 5.95, p < 0.02$). Достоверное уменьшение нагрузки на правую ногу было при ее повороте на 60 град по сравнению с начальным положением стоп ($p < 0.05$). Похожее уменьшение наблюдалось при повороте стопы левой ноги. Дисперсионный анализ показал, что нагрузка на левую ногу изменялась недостоверно ($F(2, 14) = 3.05, p > 0.07$). Таким образом, изменение нагрузки не могло быть причиной увеличения скорости движения ЦД.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При стоянии с разворотом обеих ног движение ЦД каждой ноги увеличивалось. С биомеханической точки зрения такой результат кажется естественным потому, что из-за поворота стопы изменяется направление движения ЦД ноги и уменьшается плечо силы в сагитальном направлении и, соответственно, момент, тормозящий движение тела в этом направлении. Для сохранения момента силы такого же, как при параллельном положении стоп, необходимо увеличение плеча силы, т.е. амплитуда движения ЦД должна быть увеличена. Это увеличение не было достоверным при повороте обеих стоп на 22.5 град, но было хорошо выражено при повороте на 45 град. При этом амплитуда движения обеих ног увеличивалась одновременно. Таким образом, при симметричном изменении ориентации стоп влияние поворота стопы на силовой момент, поддерживающий вертикальную позу, было скомпенсировано увеличением амплитуды движения ЦД каждой ноги. Можно предположить, что система позного контроля управляет активностью мышц обеих ног как единого целого.

Сравнение изменения амплитуды движения ЦД ног при несимметричном повороте стоп не поддерживает, однако, такое предположение. Движение ЦД ноги с повернутой стопой не изменялось с увеличением угла поворота стопы. При этом наблюдалось увеличение амплитуды движения ЦД ноги со стопой, ориентированной в сагитальном направлении. Таким образом, изменение движения ЦД указывает скорее на то, что вертикальная поза поддерживалась в основном

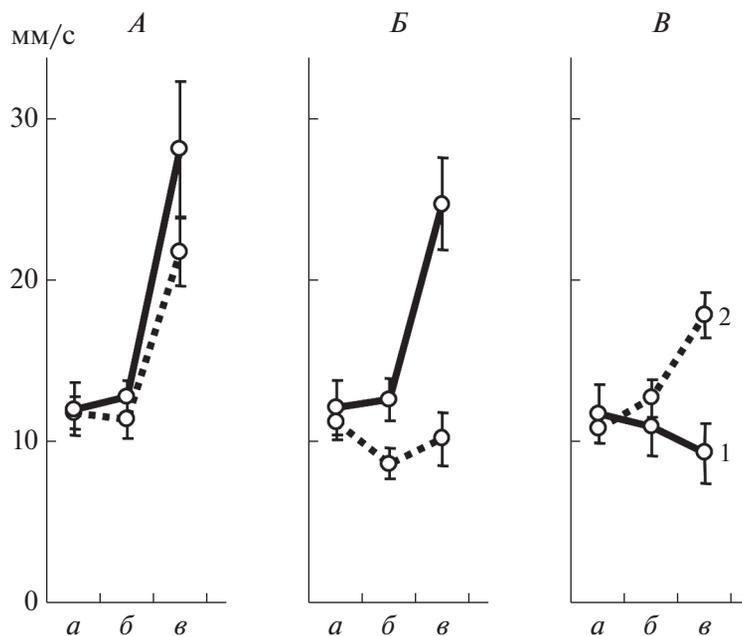


Рис. 5. Скорость движения ЦД правой (1) и левой (2) ног при стоянии с поворотом обеих стоп (А), при повороте стоп только правой (Б) и только левой (В) ног. Ось абсцисс – см. рис. 2.

усилиями ноги со стопой, ориентированной в сагиттальном направлении. Это, вероятно, связано с тем, что создание момента силы, компенсирующего отклонение тела от вертикального положения, более эффективно для ноги с ориентацией стопы в сагиттальном направлении. Кроме этого, в наших экспериментах при повороте стопы наблюдался частичный перенос веса тела на другую ногу, а такой перенос позволяет создавать дополнительный момент силы при одинаковом смещении ЦД [6–8]. С большой вероятностью можно предположить, что, асимметричная ориентация стоп привела к изменению вовлеченности ног в поддержание вертикального положения в сагиттальном направлении. Что касается фронтального направления, то для ноги с ориентацией в сагиттальном направлении наблюдались лишь небольшие смещения ЦД во фронтальном направлении, что указывает на небольшой момент силы, создаваемый этой ногой во фронтальном направлении, и слабую вовлеченность в поддержание равновесия во фронтальном направлении. В то же время, для ноги с повернутой стопой, перемещение ЦД вдоль стопы означало, что наблюдалось управление моментом силы, создаваемой этой ногой, как в сагиттальном, так и во фронтальном направлении [9]. Вовлеченность ноги с повернутой стопой в поддержание равновесия во фронтальном направлении приводит к тому, что при асимметричном положении стоп не наблюдалось

увеличения движения ЦД этой ноги, поскольку плечо момента, поддерживающего равновесие во фронтальном направлении, не уменьшается, а скорее увеличивается. Таким образом, система позного контроля по-разному влияет на положение ЦД ног с разной ориентацией стопы.

Наряду с увеличением амплитуды движения ЦД, наблюдалось изменение направления его движения. При обычном стоянии траектория движения ЦД ноги редко совпадает с осью стопы. По-видимому, при стоянии при выборе ориентации стоп выберется эффективная комфортная ориентация стоп, которая определяется индивидуальными особенностями каждого человека. В статистическом обследовании у 262 чел. по всей группе среднее расстояние между пятками составляло 17 см, а угол между стопами – 14 град [10]. Эти данные использовались для определения стандартного положения стоп при исследовании позы, чтобы уменьшить вариации между испытуемыми. Вместе с тем, такое стандартное положение стоп может не соответствовать эффективному положению для создания стабилизирующего момента силы. Выбранные самим испытуемым расстояние между стопами и их ориентация обычно приводят к уменьшению позных колебаний [11]. Также отклонения от стандартного положения могут быть связаны с возрастом или болезнью [12]. По-видимому, различия между испытуемыми связаны с особенностями влия-

ния сокращения мышц голени на момент силы в сагитальном и фронтальном направлении [3, 4]. В нашем исследовании при параллельном положении стоп направление движения ЦД было сдвинуто наружу относительно стопы. При повороте стоп на большой угол (45 град) относительное направление движения ЦД было сдвинуто внутрь относительно стопы. Таким образом, относительный сдвиг траектории движения ЦД был направлен к комфортной ориентации стоп. Можно предположить, что такие изменения относительного направления движения ЦД связаны с созданием оптимальных условий для необходимого момента силы, поддерживающего равновесие. Таким образом, при симметричном повороте стоп изменения как амплитуды, так и направления движения ЦД каждой ноги, были направлены на сохранение общего момента силы, препятствующего отклонению от вертикального положения.

Несколько иная ситуация наблюдалась при изменении ориентации стопы одной ноги. Относительный поворот преимущественного направления был направлен в сторону естественного положения стоп во время стояния как для ноги с ориентацией стопы в сагитальном направлении, так и для ноги с повернутой стопой. Изменение ориентации одной ноги не оказывало влияния на преимущественное направление движения ЦД ноги, не менявшей свою ориентацию. Направление движения ЦД ноги с повернутой стопой смещалось относительно стопы наружу при небольших углах поворота стопы и внутрь при большом угле поворота. Таким образом, смещение направления движения ЦД было похожем на такое смещение при повороте стоп обеих ног. Учитывая, что ЦД ноги с повернутой стопой не изменял амплитуду движения, можно предположить, что изменение направления движения ЦД отражает не столько стремление повлиять на силовой момент, поддерживающий вертикальную позу, сколько отражает возникающие при повороте стопы скручивающие усилия вдоль продольной оси ноги. Такое предположение поддерживается тем, что поворот преимущественного направления движения ЦД наблюдался как при одновременном повороте стоп обеих ног, так и при повороте стопы только одной ноги [9]. Таким образом, смещение направления движения ЦД относительно стопы отражает тоническое напряжение в ноге, а система позного контроля создает необходимый момент для поддержания вертикального положения с учетом скручивающего напряжения в ноге.

Изменение направления движения ЦД наблюдали как при переносе тяжести на одну ногу, так

и при повороте туловища [5]. Поскольку поворот туловища создавал скручивающий момент, влияющий на обе ноги, направление траектории движения ЦД могло быть связано как с работой системы позного контроля, так и с механическим аксиальным моментом. Во всем теле человека поструральный тонус может играть роль в создании аксиальной оси для работы многозвенного тела, как функциональной единицы во время поддержания вертикального положения [13]. Изучение позных колебаний при стоянии с поворотом стопы одной ноги указывает на то, что изменение направления движения ЦД ноги, скорее всего, связано со скручивающим моментом, возникающим при повороте стопы, поскольку изменения направления движения ноги с не повернутой стопой не наблюдалось. Другой возможностью является предположение, что система позного контроля оказывает индивидуальное влияние на ноги в зависимости от тонического напряжения в ноге и, таким образом, при поддержании вертикального положения учитывается аксиальное напряжение, возникающее при повороте частей тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поворот обеих стоп у стоящего человека приводит к увеличению движения ОЦД и ЦД каждой ноги. Можно предположить, что при симметричном положении стоп поддержание вертикального положения тела осуществляется одновременным управлением мышцами обеих ног. При повороте стопы только одной ноги увеличение движения ЦД наблюдалось у ноги с ориентацией стопы в сагитальном направлении. У ноги с повернутой стопой движение ЦД не изменялось. Следовательно, поворот стопы одной ноги изменял вовлечение ноги в поддержание вертикального положения. Сохранение равновесия происходило в основном из-за управления положением ЦД ноги с ориентацией стопы в сагитальном направлении. Кроме изменения движения ЦД ноги, наблюдалось изменение преимущественного направления движения ЦД относительно ориентации стопы. При стопе ориентированной в сагитальном направлении направление преимущественного движения ЦД было повернуто наружу. При стопе, повернутой наружу, направление преимущественного движения ЦД было повернуто внутрь. Такое изменение направления движения ЦД наблюдалось как при одновременном повороте обеих стоп, так и при повороте стопы только одной ноги. Можно предположить, что при управлении положением ЦД система поддержания равновесия учитывала скручивающее напряжение в ноге с повернутой стопой. Таким образом, при поддержании вертикального положе-

ния учитывается как ориентация стоп, так и скручивающие напряжения, возникающие в ногах.

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 частично поддержано РФФИ (грант № 18-015-00266).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirby R.L., Price N.A., MacLeod D.A. The influence of foot position on standing balance // J. Biomech. 1987. V. 20. № 4. P. 423.
2. Winter D.A., Prince F., Franck J.S. et al. Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet standing // J. Neurophysiol. 1996. V. 75. № 6. P. 2334.
3. Sozzi S., Honeine J.L., Do M.C., Schieppati M. Leg muscle activity during tandem stance and the control of body balance in the frontal plane // Clin. Neurophysiol. 2013. V. 124. № 6. P. 1175.
4. Vieira T.M., Minetto M.A., Hodson-Tole E.F., Botter A. How much does the human medial gastrocnemius muscle contribute to ankle torques outside the sagittal plane? // Hum. Mov. Sci. 2013. V. 32. № 4. P. 753.
5. Казенников О.В., Талис В.Л. Позные колебания человека при поворотах туловища в симметричной и асимметричной стойке // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 4. С. 46.
Kazennikov O.V., Talis V.L. Postural Sway during Body Turn in Symmetrical and Asymmetrical Standing in Humans // Human Physiology. 2019. V. 45. № 4. P. 383.
6. Genthon N., Rougier P. Influence of an asymmetrical body weight distribution on the control of undisturbed upright stance // J. Biomech. 2005. V. 38. № 10. P. 2037.
7. Kilby M.C., Newell K.M. Intra- and inter-foot coordination in quiet standing: footwear and posture effects // Gait Posture. 2012. V. 35. № 3. P. 511.
8. Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Особенности поддержания вертикальной позы при неравномерной нагрузке на ноги // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 2. С. 65.
Kazennikov O.V., Kireeva T.B., Shlykov V.Y. Characteristics of the maintenance of the vertical posture during standing with an asymmetrical load on the legs // Human Physiology. 2013. V. 39. № 4. P. 392.
9. Rougier P.R. How spreading the forefeet apart influences upright standing control // Motor Control. 2008. V. 12. № 4. P. 362.
10. McIlroy W.E., Maki B.E. Preferred placement of the feet during quiet stance: development of a standardized foot placement for balance testing // Clin. Biomech. (Bristol, Avon). 1997. V. 12. № 1. P. 66.
11. Gibbons C.T., Amazeen P.G., Likens A.D. Effects of Foot Placement on Postural Sway in the Anteroposterior and Mediolateral Directions // Motor Control. 2019. V. 23. № 12. P. 149.
12. Boumer T.C., Martello S.K., Devetak G.F. et al. Influence of feet position on COP measures in post-stroke patients in quiet standing // Gait Posture. 2018. V. 66. P. 58.
13. Gurfinkel V., Cacciatore T.W., Cordo P. et al. Postural muscle tone in the body axis of healthy humans // J. Neurophysiol. 2006. V. 96. № 5. P. 2678.

Estimation of Vertical Position Standing of Human with Different Foot Orientation of One or Both Legs

O. V. Kazennikov^{a,*}, T. B. Kireeva^a, V. Yu. Shlykov^a

^aInstitute for Information Transmission Problems RAS, Moscow, Russia

*E-mail: kazen@iitp.ru

Vertical posture of a standing subject with different the foot orientations of one or both legs was studied. The symmetrical turn of both feet in a standing person led to an increase in the movement of a common center of pressure (CCP) and center of pressure (CP) of each leg. It is likely that for the vertical position maintenance with symmetrical feet turn the movement of CP of both legs was controlled simultaneously. During standing with the rotated foot of one leg the CP movement increased for the leg retained orientation in the sagittal direction. For leg with rotated foot the CP movement did not change. Thus, the rotation of the foot of one leg changed the involvement of this leg in the upright position maintenance. Mainly due to the position control of CP of the leg with the foot orientation in the sagittal direction was maintained the vertical position. In addition, there had been a change in the predominant direction of the CP movement relative to the foot orientation. When the foot was oriented in the sagittal direction, the predominant movement direction of the CP was turned outward. With the foot rotated outward, the predominant movement direction of the CP was turned inward. Such a change in the CP movement direction both with simultaneous rotation of both feet and

with the foot rotation of one leg was observed. It can be assumed that, when standing, the balance-keeping system controls the CP position of each leg and takes into account the torsional stress in the leg that occurs when the foot is rotated.

Keywords: standing, foot orientation, asymmetric posture.