

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ПОСТУРАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ У СПОРТСМЕНОК
ХУДОЖЕСТВЕННОЙ И СПОРТИВНОЙ ГИМНАСТИКИ:
РОЛЬ ВИЗУАЛЬНЫХ И СОМАТОСЕНСОРНЫХ СИГНАЛОВ

© 2025 г. Е. С. Ниязи^{1,*}, Б. Р. Самигуллин^{1,2}, М. Э. Балтин^{1,3}, А. О. Федянин¹,
Т. В. Балтина², Л. Н. Ботова¹, А. А. Зверев¹

¹Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма,
Казань, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Научно-технологический университет "Сириус", Федеральная территория Сириус, Россия

*E-mail: katerina58_98@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 09.12.2024 г.

Принята к публикации 10.12.2024 г.

Исследование посвящено оценке поструральной устойчивости у спортсменок, занимающихся художественной ($n = 17$), спортивной ($n = 20$) гимнастикой и неспортсменок ($n = 19$). Основной целью было выявить особенности колебания центра давления (CoP) спортсменок и неспортсменок в различных условиях активации визуального и соматосенсорного входов. Использовали метод компьютерной стабилотрии на автоматизированном комплексе "Стабилан-01-5". Для оценки поструральной устойчивости анализировали параметры стабилографического теста: линейную скорость перемещения CoP (ALV, мм/с), угловую скорость перемещения CoP (AAV, град/с) и площадь эллипса (EIS, кв. мм), рассчитывался коэффициент Ромберга. Проводили спектральный анализ стабилографических сигналов. Участницы выполняли пробы в обычной стойке на твердой и мягкой поверхности с закрытыми и открытыми глазами.

Результаты показали, что колебания CoP у гимнасток и негимнасток в спокойной стойке были сопоставимы, однако на мягкой поверхности наблюдались различия. Спортсменки художественной и спортивной гимнастики продемонстрировали лучшие показатели поструральной устойчивости, что объясняется их способностью интегрировать проприоцептивные и визуальные сигналы. Спектральный анализ показал меньшие колебания в высокочастотном диапазоне у спортсменок как художественной, так и спортивной гимнастики, что указывает на формирование у них специфических двигательных и нейромышечных стратегий. Также выявлено, что спортсменки художественной гимнастики больше зависели от зрительного контроля для поддержания поструральной устойчивости, что, вероятно, обусловлено необходимостью точной оценки дистанции и положения тела при выполнении специфических для этого вида спорта элементов. Полученные результаты могут служить основой для разработки индивидуальных тренировочных программ с учетом сенсорной интеграции и контроля движений у разных групп спортсменов.

Ключевые слова: поструральная устойчивость, центр давления, поструральный контроль, художественная гимнастика, спортивная гимнастика, стабилография

ВВЕДЕНИЕ

Показано, что занятия гимнастикой способствуют развитию контроля баланса [1–3]. Система постурального контроля является результатом интеграции зрительной, проприоцептивной и вестибулярной информации для выработки соответствующих двигательных реакций, которые необходимы для сохранения положения тела [4–6]. В хорошо освещенной среде на твердой опоре у здоровых людей вклад соматосенсорной системы в поддержание баланса составляет 70%, зрительной – 10%, а вестибулярной – 20% [7].

Стабилография является одним из методов, используемых для оценки контроля баланса в вертикальном положении. Этот метод позволяет анализировать колебания центра давления (CoP), которые связаны с постуральными колебаниями. Оценка постуральных колебаний проводится в положении стоя в спокойных условиях и в условиях визуальной депривации. У здоровых людей меньшие колебания CoP обычно интерпретируются как лучшая стабильность. Стояние без визуальных сигналов может нарушить систему контроля баланса и привести к усилению колебаний CoP [8–11]. Однако организм спортсменов может адаптироваться к изменяющимся условиям уникальными способами [12–14].

Профессиональные спортсмены, основываясь на опыте, отличаются от непрофессионалов специфическими способностями поддержания равновесия, характерными для их сферы деятельности [15, 16]. Предполагается, что эти способности относительно стабильны, определяются в значительной степени эффективностью координации со стороны центральной нервной системы (ЦНС) и связаны с производительностью спортсмена при выполнении различных задач [17, 18]. Хотя споры о природе человеческих способностей продолжаются, существует общее мнение о том, что индивидуальные различия влияют на процесс обучения в спорте [19], как и опыт, который также необходим для успешной спортивной карьеры [20–23].

Гимнастика является одним из видов спорта, где для успешного выполнения сложных упражнений требуются высокая точность движений, сила, гибкость, координация, пространственное восприятие и сформированный постуральный баланс [24, 25]. Показано, что развитие постурального контроля и опыт тренировок у детей и подростков-гимнастов, а также у их сверстников, которые не занимаются спортом или занимаются другим видом спорта, приводит к улучшению контроля стояния на нестабильной поверхности без визуальной информации и к лучшим проприоцептивным реакциям [12, 26, 27]. Адекватная оценка контроля равновесия играет важную роль в предупреждении травм, повышении эффективности тренировок, а также способствует общему физиологическому развитию спортсменов и улучшению координационных способностей.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке постуральной устойчивости и анализа особенностей постурального контроля у спортсменов, занимающихся спортивной и художественной гимнастикой, для выявления различий в механизмах поддержания равновесия по сравнению с неспортсменами. Предполагалось, что (1) спортсмены, занимающиеся спортивной и художественной гимнастикой, обладают более эффективными механизмами поддержания равновесия, чем соответствующая группа неспортсменов, и (2) спортсмены, занимающиеся художественной и спортивной гимнастикой, продемонстрируют специфичность в сенсомоторной регуляции постуральной устойчивости.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на базе Научно-исследовательского института Поволжского государственного университета физической культуры, спорта и туризма. В эксперименте приняли участие девушки-спортсменки, занимающиеся художественной

гимнастикой ($n = 17$), спортивной гимнастикой ($n = 21$) и группа девушек-неспортсменок ($n = 19$). Возраст участниц составил от 15 до 21 года, рост от 155 до 175 см, масса тела от 46 до 67 кг.

Оценивалась постуральная устойчивость участниц с использованием автоматизированного комплекса “Стабилан-01-5” (Таганрог, Россия) с частотой дискретизации 50 Гц, включающего в себя стабиллоплатформу и регистрирующую часть (компьютер и программное обеспечение StabMed 2).

Проводилась функциональная проба Ромберга: стабิโลграфический тест с открытыми глазами в течение 20 с, с закрытыми глазами в течение 20 с на твердой и мягкой поверхности. Мягкая неустойчивая поверхность обеспечивалась поролоновой подушкой размером 49 см (Д) × 49 см (Ш) × 18 см (В). На подушку были нанесены разметки положения стоп. Считается, что мягкая поверхность усложняет процесс удержания равновесия, поскольку стояние на мягкой поверхности, когда изменяется соотношение поверхности стоп и основания опоры, требует координации всех сегментов тела, направленных на удержание равновесия путем соответствующей мышечной активности [28].

Для оценки постуральной устойчивости использовали параметры стабิโลграфического теста: линейную скорость перемещения центра давления (ALV, мм/с), угловую скорость перемещения CoP (AAV, град/с) и площадь эллипса (EIS, кв. мм) в различных пробах. В программе StabMed 2 рассчитывался коэффициент Ромберга (RR) как отношение EIS в пробе с закрытыми глазами к EIS в пробе с открытыми глазами на твердой поверхности, умноженное на 100%. В норме RR составляет 110–150%. Если RR меньше 100%, то это свидетельствует о недостаточном вкладе зрения в функцию равновесия [29, 30].

Дополнительно проводился спектральный анализ стабิโลграфических сигналов. В процессе удержания человеком равновесия и поддержания вертикального положения возникают микроколебательные движения, которые фактически незаметны визуально. Эти колебательные движения отражены на стабิโลграмме и имеют характерные физические свойства. Считается, что спектральный анализ позволяет оценить вклад различных анализаторных систем в механизм сохранения постуральной устойчивости. Так, очень низкочастотные колебания могут опосредоваться участием зрительной и вестибулярной информации в регуляции позы. Низкочастотные колебания характеризуют вклад церебральных процессов, а высокочастотные колебания отражают участие мышечного тонуса и проприоцептивной информации от мышц в регуляции позы [31]. Метод Гильберта–Хуанга показал схожесть спектров, полученных методом Фурье, что объясняется стационарностью записей исследуемых процессов [32]. Поэтому в статье обсуждаются результаты, полученные методом Фурье. Спектральный анализ стабิโลграфических сигналов проводился методом Фурье с периодическим окном Хэмминга, которое генерируется по следующей формуле:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right), 0 \leq n \leq N, \text{ где ширина окна } L = N + 1. \quad (1)$$

Анализ данных проводился с помощью специально созданной программы (MATLAB R2019a), которая на основе данных о входном сигнале строила амплитудный спектр, а затем и спектр мощности. Спектр мощности строился как для всего диапазона частот, так и для отдельных диапазонов частот. Рассчитывалось соотношение спектра мощности как отношение спектра мощности на диапазоне (низкие, средние и высокие частоты) к спектру мощности по всем частотам. Определялось соотношение мощности спектра в сагиттальной (S) и фронтальной (F) плоскостях трех частотных диапазонов: низкочастотного Pw1, до 0.2 Гц, среднечастотного Pw2, от 0.2 до 2 Гц и высокочастотного Pw3, 2–5 Гц [33].

Участницы исследования принимали “европейскую” стойку (стопы развернуты на 30°), руки располагались вдоль туловища. Каждая участница проходила четыре

пробы: открытые глаза, твердая поверхность (EOHS); закрытые глаза, твердая поверхность (ECHS); открытые глаза, мягкая поверхность (EOSS); закрытые глаза, мягкая поверхность (ECSS). Участницы отдыхали не менее 5 мин между пробами, чтобы избежать усталости.

Статистический анализ данных проводили с помощью пакетов программ Statistica 13. Для проверки данных на нормальность был использован тест Жарка–Бера, и так как размер выборки небольшой, то использовалась таблица критических значений, вычисленных с помощью моделирования методом Монте-Карло. Тест показал, что для некоторых данных гипотеза о нормальности была отклонена на уровне значимости 5%. Поэтому были найдены и удалены выбросы в этих выборках, при этом выбросом считались те значения, которые более чем на три среднеквадратических отклонения отличались от медианы. После исключения выбросов повторный тест Жарка–Бера показал, что полученные выборки соответствуют нормальному распределению. Результаты стабилметрических показателей представлены в виде среднего и стандартного отклонения ($M \pm SD$). Для сравнения групп (спортсменки, занимающиеся спортивной и художественной гимнастикой, и неспортсменки) и условий (EOHS; ECHS; EOSS и ECSS) использовался двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями (ANOVA), для коэффициента Ромберга использовался однофакторный ANOVA, для попарных сравнений был использован апостериорный тест Тьюки. Эффект считался значимым при статистической значимости различий $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постуральная устойчивость

Взаимодействие групп и условий было незначимым для всех параметров колебаний СоР гимнасток и неспортсменок.

Эффект группы. Наши результаты показали влияние группы (спортсменки, занимающиеся спортивной и художественной гимнастикой, и неспортсменки) на площадь доверительного эллипса (ELLS, $F_{3,04} = 2.67, p < 0.05$), среднюю линейную скорость колебания СоР (ALV, $F_{3,04} = 7.97, p < 0.001$), среднюю угловую скорость смещения СоР (AAV, $F_{3,04} = 4.62, p = 0.01$), коэффициент Ромберга ($F_{3,17} = 3.77, p < 0.05$).

Дальнейший анализ показал, что ALV была ниже при стойке на твердой поверхности у спортсменок спортивной и художественной гимнастики, но статистически незначимо (рис. 1а). При стоянии на мягкой поверхности ALV была значительно меньше у спортивных (23.37 ± 6.27 мм/с, $p < 0.05$) и художественных гимнасток (25.44 ± 6.13 мм/с, $p > 0.05$) по сравнению с неспортсменками (26.67 ± 5.29 мм/с, рис. 1б). Мы не обнаружили существенной разницы между группами по AAV (рис. 1с, д).

При стойке на твердой поверхности ELLS была ниже у спортсменок спортивной гимнастики и неспортсменок, но статистически незначимо (рис. 2а). При стойке на мягкой поверхности ELLS была меньше в группе спортсменок, занимающихся спортивной (553.05 ± 170.65 мм², $p < 0.05$) и художественной (542.57 ± 194.11 мм², $p > 0.05$) гимнастикой по сравнению с неспортсменками (591.37 ± 237.05 мм², рис. 2б).

Коэффициент Ромберга был значительно выше в группе спортсменок, занимающихся художественной гимнастикой ($172.43 \pm 78.92\%$, $p < 0.05$) (рис. 3).

Эффект условий теста (открытые глаза, закрытые глаза, твердая поверхность, мягкая поверхность) был значимым для всех параметров колебаний СоР гимнасток и неспортсменок (ALV: $F_{2,64} = 175.58, p < 0.001$; ELLS: $F_{2,64} = 125.87, p < 0.001$; AAV: $F_{2,64} = 96.136, p < 0.001$).

Тест Тьюки продемонстрировал увеличение ALV у всех участниц при стоянии с закрытыми глазами ($p < 0.05$) как на твердой, так и на мягкой поверхности ($p < 0.05$) (рис. 1а, б). У всех участниц мы обнаружили снижение AAV. Статистически значи-

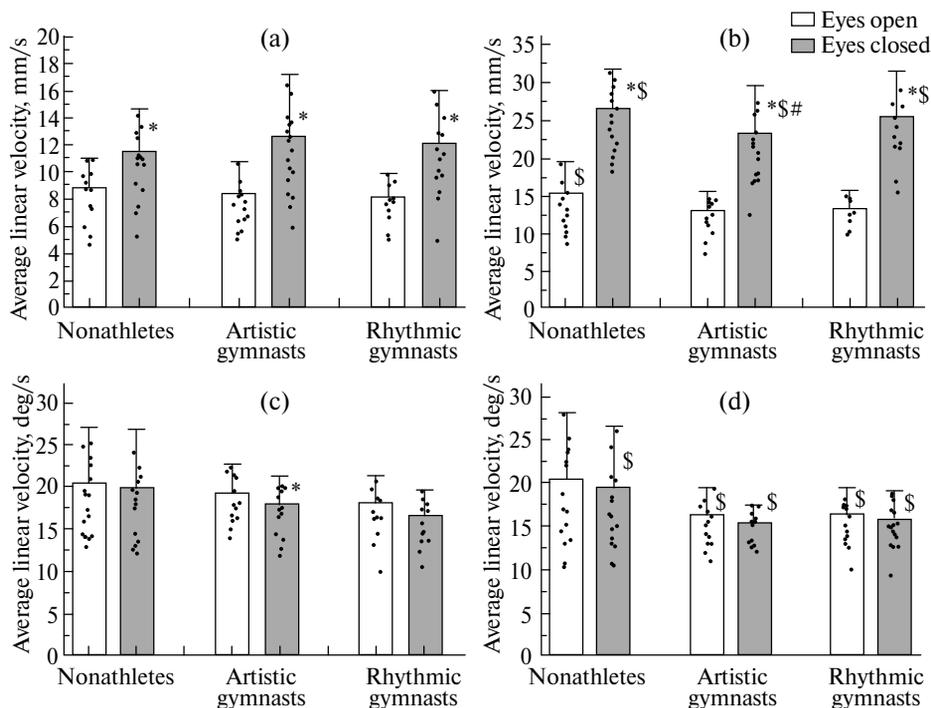


Рис. 1. Различия параметров колебания центра давления в тестах с открытыми (белые столбики) и закрытыми (серые столбики) глазами в трех группах: неспортсменок (Nonathletes, $n = 16$), спортсменок, занимающихся спортивной гимнастикой (Artistic gymnasts, $n = 16$) и художественной гимнастикой (Rhythmic gymnasts, $n = 16$); средней линейной скорости (Average linear velocity, мм/с) на твердой (а) и мягкой (б) поверхностях и средней угловой скорости (Average angular velocity, градусы/с) на твердой (с) и мягкой (д) поверхностях. Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения; * $p < 0.05$ – значимость различий по сравнению с пробой с открытыми глазами; \$ – $p < 0.05$, статистически значимые различия по сравнению с пробой на твердой поверхности; # – $p < 0.05$, значимые различия по сравнению с группой неспортсменок.

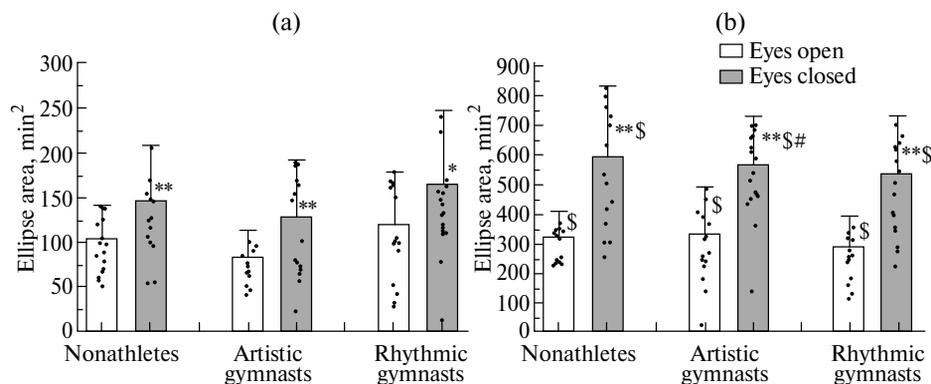


Рис. 2. Площадь доверительного эллипса (Ellipse area, мм²) в тестах с открытыми (белые столбики) и закрытыми (серые столбики) глазами в трех группах: неспортсменок (Nonathletes, $n = 16$), спортсменок, занимающихся спортивной гимнастикой (Artistic gymnasts, $n = 16$) и художественной гимнастикой (Rhythmic gymnasts, $n = 16$) на твердой (а) и мягкой (б) поверхностях. Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения; * – $p < 0.05$; ** – $p < 0.01$ – значимость различий по сравнению с пробой с открытыми глазами; \$ – $p < 0.05$, статистически значимые различия по сравнению с пробой на твердой поверхности; # – $p < 0.05$ значимые различия по сравнению с группой неспортсменок.

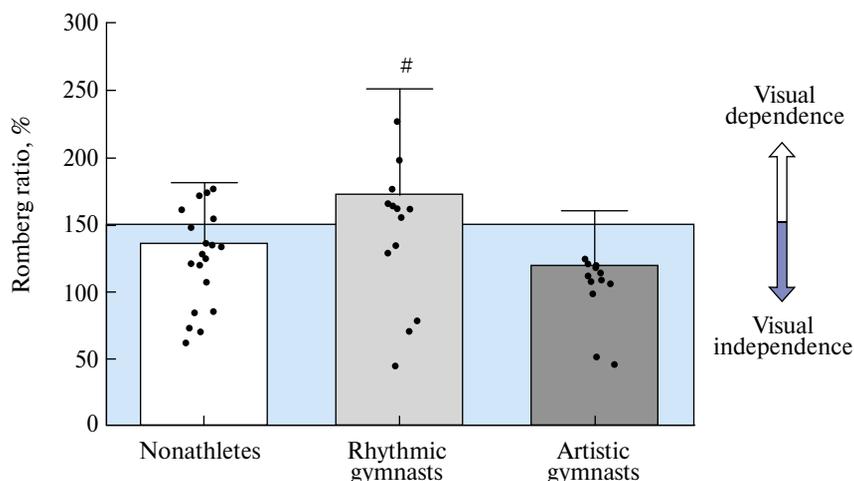


Рис. 3. Коэффициент Ромберга (Romberg ratio) в трех группах: неспортсменов (Nonathletes, $n = 16$), спортсменов, занимающихся спортивной гимнастикой (Artistic gymnasts, $n = 16$) и художественной гимнастикой (Rhythmic gymnasts, $n = 16$); голубой зоной показана граница нормы, выше 150% указывает на преобладание зрительного контроля в сохранении постральной устойчивости. Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения; # – $p < 0.05$, значимые различия по сравнению с группой неспортсменов.

мое снижение AAV было обнаружено только у спортсменок, занимающихся спортивной гимнастикой при стоянии с закрытыми глазами на твердой поверхности ($p < 0.05$, рис. 1с), а при стоянии на мягкой поверхности, по сравнению со всеми другими условиями, статистически значимое снижение AAV было обнаружено у спортсменок, занимающихся художественной и спортивной гимнастикой ($p < 0.05$, рис. 1d). Проведенный апостериорный тест Тьюки выявил для всех участниц большие параметры ELLS при стоянии с закрытыми глазами как на твердой ($p < 0.01$), так и на мягкой поверхности ($p < 0.01$, рис. 2).

Спектральный анализ

Анализ данных показал значимый эффект группы (неспортсменки, спортсменки, занимающиеся художественной и спортивной гимнастикой) на распределение частот спектра в различных частотных диапазонах: в сагиттальной плоскости для низкочастотного (Pw1 (S), $F_{3,05} = 9.03$, $p < 0.01$), для высокочастотного (Pw3 (S), $F_{3,05} = 11.41$, $p < 0.001$); во фронтальной плоскости для среднечастотного (Pw2 (F), $F_{3,05} = 7.16$, $p < 0.01$), для высокочастотного (Pw3 (F), $F_{3,05} = 11.11$, $p < 0.001$). Также выявили эффект условий (открытые и закрытые глаза, мягкая и твердая поверхность) для всех частотных диапазонов: Pw1 (S) ($F_{2,65} = 20.58$, $p < 0.001$); Pw2 (S) ($F_{2,65} = 10.83$, $p < 0.001$); Pw3 (S) ($F_{2,65} = 6.61$, $p < 0.01$); Pw1 (F) ($F_{2,65} = 5.38$, $p < 0.01$); Pw2 (F) ($F_{2,65} = 7.32$, $p < 0.001$); Pw3 (F) ($F_{2,65} = 5.59$, $p < 0.01$). Мы не наблюдали взаимодействия между фактором группы и условиями стабильного теста для зоны низких частот Pw1 как в сагиттальной, так и во фронтальной плоскостях. Эффект взаимодействия выявили для Pw2 (S) ($F_{2,15} = 3.86$, $p < 0.01$); Pw3 (S) ($F_{2,15} = 2.93$, $p < 0.01$); Pw2 (F) ($F_{2,15} = 2.86$, $p < 0.05$); Pw3 (F) ($F_{2,15} = 5.96$, $p < 0.001$).

Проведенный дальнейший анализ выявил, что зона низких частот в сагиттальной плоскости (Pw1 (S)) при открытых глазах на твердой поверхности у спортсменок, занимающихся художественной гимнастикой, составила в среднем $32.75 \pm 6.61\%$, что выше, чем у спортсменок спортивной гимнастики – $29.62 \pm 7.09\%$, но статистически

незначимо ($p = 0.136$). У гимнасток в целом мощность Pw1 достоверно выше, чем у неспортсменок – $25.26 \pm 4.77\%$ ($p < 0.01$ и $p < 0.05$ соответственно). Во фронтальной плоскости статистически значимых отличий между участницами исследования не обнаружили, однако в целом доля Pw1 (F) была меньше, чем Pw1 (S). При закрытых глазах на твердой и мягкой поверхностях у всех участниц вклад низкочастотных колебаний в сагиттальной и во фронтальной плоскостях снижался (рис. 4). У неспортсменок на мягкой поверхности изменения Pw1 (S) не имели статистической значимости. У всех участниц снижение Pw1 (F) статистически незначимо.

Колебания CoP в зоне средних частот в сагиттальной плоскости (Pw2 (S)) при открытых глазах на твердой поверхности у спортсменок, занимающихся спортивной гимнастикой, были меньше – $56.75 \pm 8.21\%$ ($p = 0.92$), чем у неспортсменок, – $58.43 \pm 5.15\%$. У спортсменок, занимающихся художественной гимнастикой, Pw2 (S) составил $53.81 \pm 5.63\%$, что ниже, чем у спортсменок, занимающихся спортивной гимнастикой ($p = 0.11$), и у неспортсменок ($p < 0.05$). Во фронтальной плоскости статистически значимых отличий между участницами исследования не обнаружили, однако у всех доля Pw2 (F) была больше на 4–10% ($p < 0.05$).

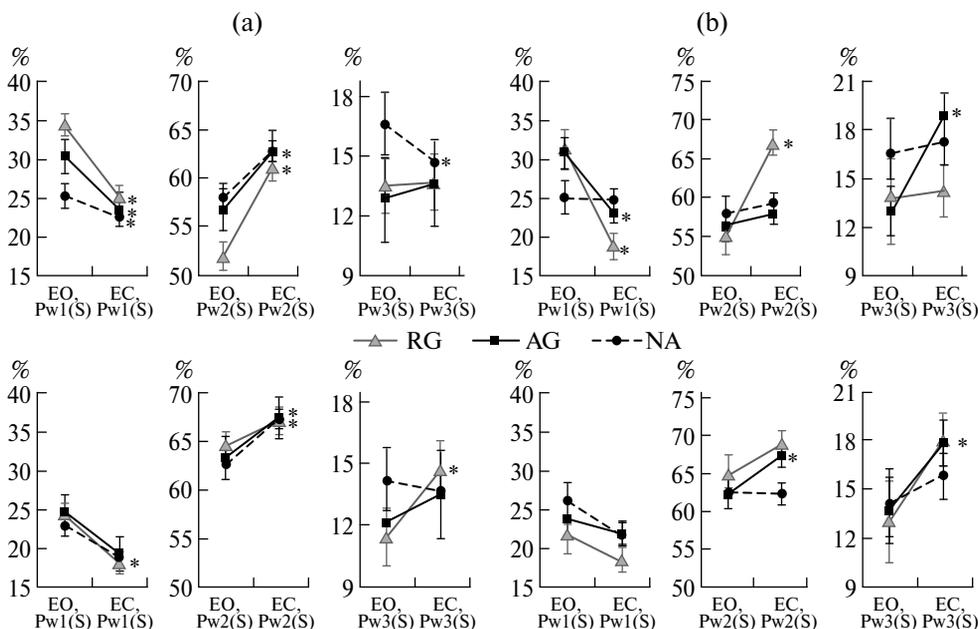


Рис. 4. Соотношение зон спектра стабиллограммы: низкочастотный диапазон (Pw1), среднечастотный диапазон (Pw2) и высокочастотный диапазон (Pw3) в сагиттальной (S) и фронтальной (F) плоскостях в тестах с открытыми (EO) и закрытыми (EC) глазами на твердой (а) и мягкой (б) поверхностях в группах спортивной гимнастики (Artistic gymnasts, AG, $n = 16$), художественной гимнастики (Rhythmic gymnasts, RG, $n = 16$) и неспортсменов (Nonathletes, NA, $n = 16$). Данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения; * – $p < 0.05$ – значимое статистическое различие по отношению к пробе с открытыми глазами.

При закрытых глазах на твердой и мягкой поверхностях у всех участниц вклад среднечастотных колебаний CoP в сагиттальной и во фронтальной плоскостях увеличился (рис. 4). Максимальный эффект отмечали в сагиттальной плоскости при закрытых глазах у спортсменок, занимающихся художественной гимнастикой, когда доля Pw2 (S) увеличилась на 8% на твердой поверхности ($p < 0.01$), на мягкой поверхности на 12%

($p < 0.01$). У спортсменов, занимающихся спортивной гимнастикой, и неспортсменов при стойке на мягкой поверхности изменения Pw2 (S) не имели статистической значимости. У гимнасток во фронтальной плоскости доля Pw2 (F) увеличилась в среднем на 4% ($p < 0.05$), у неспортсменов не изменилась (рис. 4).

Доля колебаний CoP в зоне высоких частот в сагиттальной плоскости (Pw3 (S)) при открытых глазах на твердой поверхности у спортсменов, занимающихся спортивной гимнастикой, была меньше – $12.87 \pm 3.63\%$ ($p < 0.01$), чем у неспортсменов. У спортсменов, занимающихся художественной гимнастикой, доля Pw3 (S) составила в среднем $13.31 \pm 3.01\%$, что больше, чем у спортсменов, занимающихся спортивной гимнастикой ($p = 0.82$), но ниже, чем у неспортсменов ($p < 0.01$). Во фронтальной плоскости статистически значимых отличий между спортсменками, занимающимися художественной и спортивной гимнастикой, не обнаружили ($p = 0.38$), однако у неспортсменов доля Pw3 (F) была больше по сравнению с девушками, занимающимися художественной гимнастикой, на 4% ($p < 0.05$) и спортивной гимнастикой на 2% ($p = 0.091$). В целом у всех участниц доля Pw3 (F) была меньше на 1–2% ($p > 0.05$). При закрытых глазах на твердой поверхности у гимнасток вклад высокочастотных колебаний CoP в сагиттальной плоскости не изменился, у неспортсменов уменьшился на 2% ($p < 0.05$). Во фронтальной плоскости Pw3 (F) увеличился у гимнасток, значимые изменения отмечали для спортсменов, занимающихся художественной гимнастикой (на 3%, $p < 0.05$) (рис. 4а). На мягкой поверхности вклад высокочастотных колебаний CoP в сагиттальной плоскости у всех участниц исследования увеличился. Максимальный эффект отмечали в сагиттальной плоскости при закрытых глазах у спортсменов, занимающихся спортивной гимнастикой, когда доля Pw3 (S) увеличилась на 6% ($p < 0.01$). У спортсменов, занимающихся художественной гимнастикой, и неспортсменов при стойке на мягкой поверхности изменения Pw3 (S) не имели статистической значимости. У спортсменов, занимающихся художественной гимнастикой, во фронтальной плоскости Pw3 (F) увеличилась на 4% ($p < 0.05$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зрительная, вестибулярная и соматосенсорная системы предоставляют информацию для сенсомоторной системы, отвечающей за поддержание равновесия при стоянии. Эффективный постуральный контроль зависит от взаимодействия этих систем, позволяя выполнять различные задачи при стабильной позе [34]. Исследования подтверждают, что тренировки, проводимые в специфичных для определенного вида спорта условиях и включающие упражнения на равновесие, способны существенно улучшать постуральную устойчивость [35] и способствовать постуральной адаптации [36], особенно в контексте гимнастики [3]. Гимнастика как вид спорта развивает ловкость и поддерживает координацию и контроль позы [37]. Основной целью данного исследования было оценить постуральную устойчивость у спортсменов, занимающихся художественной и спортивной гимнастикой, и неспортсменок по изменению колебания CoP, используя классические стадиографические тесты и анализ частотного спектра колебания CoP в различных пробах. Группа спортивных и художественных гимнасток и группа неспортсменок стояли в бипедальной позе на силовой платформе в условиях с открытыми и закрытыми глазами на мягкой и твердой поверхностях.

В ходе исследования было установлено, что при обычной стойке колебания и скорость, характеризующие движение CoP у гимнасток и негимнасток, в целом были сопоставимы, за исключением поддержания постуральной устойчивости в стойке на мягкой поверхности. Наши данные показали, что с открытыми и закрытыми глазами на твердой поверхности при спокойном стоянии все наши участники имели отклонение CoP в пределах нормы, что демонстрировало здоровый постуральный контроль [38]. Сравнимые значения параметров колебания CoP могут указывать на схожий уровень контроля рав-

новесия у гимнастов и негимнастов. Показано, что двуногая спокойная стойка не является репрезентативной для условий, в которых умение сохранять равновесие важно [39], поэтому выявить существенные различия в сохранении равновесия сложно. Стояние на мягкой поверхности приводит к большему колебанию тела и очевидной нестабильности по мере увеличения сложности задачи и вовлечения мышц конечностей в поддержание равновесия [28]. При стоянии на мягкой поверхности надежность подошвенной кожной информации снижается [40], а закрытие глаз сводит на нет вклад зрительной системы в контроль равновесия. Следовательно, при стоянии на мягкой поверхности с закрытыми глазами участницы могли стать более зависимыми от своих вестибулярных и соматосенсорных входов, что позволяет выявить специфичные для спортсменок постуральные стратегии. Согласно имеющимся данным, опытные гимнасты демонстрируют исключительную способность интегрировать проприоцептивный вход с другими сенсорными модальностями, что приводит к восприятию ориентации тела в пространстве и отличает их от негимнастов и неспортсменов [1]. Это может способствовать улучшенной постуральной устойчивости на мягкой поверхности. Поскольку гимнастика требует стабильности тела в пространстве сразу после выполнения акробатических элементов, есть мнение, что опытные гимнасты могут формировать более точную внутреннюю модель своего положения в пространстве [41]. Это обеспечивает гимнастам, независимо от специализации, за счет быстрой реорганизации иерархии сенсорных входов поддерживать адекватный постуральный контроль [1]. Постуральная устойчивость также требует постоянной нейромышечной коррекции, связанной с восприятием [42]. Вероятно, что годы практики и тренировок способствуют автоматизации постуральных реакций у опытных гимнастов, это позволяет им оставлять часть когнитивных ресурсов доступными для обработки других аспектов их выступления [43]. При стоянии на мягкой поверхности гимнасты используют сформированные автоматические нервно-мышечные стратегии для выполнения сложных корректировок [44]. О наличии нервно-мышечных постуральных стратегий у гимнастов также свидетельствуют увеличение линейной скорости смещения CoP и снижение угловой скорости [45]. Средняя скорость смещения CoP, как полагают, характеризует нервно-мышечную активность (или эффективность), необходимую для поддержания вертикального положения [46]. Результаты указывают на то, что более высокая жесткость и тонус мышц у спортсменов могут обеспечить более быструю мышечную реакцию и коррекцию постуральных колебаний, а также привести к более эффективному контролю осанки во время спокойного стояния на мягкой поверхности [47]. Наше исследование также продемонстрировало, что спортивные гимнастки обладают лучшей постуральной устойчивостью и по отношению к спортсменкам, занимающимся художественной гимнастикой. Возможно, это связано с интенсивностью тренировок, которая для спортивных гимнастов самая высокая среди гимнастических дисциплин [48]. Одной из целей тренировок по спортивной гимнастике является достижение идеально устойчивой позы на двух ногах (“застывшее приземление”) в заключительной фазе упражнений. Подошвенные и тыльные сгибатели стопы – наиболее важные группы мышц, задействованные в “застывшем приземлении” [49]. Поскольку эти мышцы также играют наибольшую роль в спокойном контроле позы стоя, возможно, что более длительная практика и совершенствование “застывшего приземления” также привели к улучшению постуральной устойчивости [27].

Спектральный анализ колебаний тела во время стойки неоднократно использовался для понимания процессов, лежащих в основе контроля равновесия при отсутствии внешних возмущений [44, 50, 51]. Спектральный анализ стабิโลграфического сигнала позволяет дать некоторую информацию о преобладающем сенсорном вкладе в регуляцию позы и о предпочтительных нейронных механизмах в регуляции позы. При этом необходимо указать на относительную ценность такой интерпретации спектральных показателей [36, 52]. При наличии визуальных входов все участницы показали схожую постуральную стратегию, что может объяснять отсутствие отличий по классическим

стабилографическим показателям между группами. Однако изменение поструральной стратегии было очевидно в группе гимнасток, но не у участниц, не занимающихся гимнастикой, при отсутствии визуального сигнала и изменения качества поверхности. Группа гимнасток показала значительное снижение доли низкочастотного компонента при закрытых глазах как на твердой, так и на мягкой поверхности. В то же время они демонстрировали более низкие колебания в спектральном окне выше 2 Гц (включение мышечного сокращения), а также выраженные колебания в среднечастотном диапазоне от 0.2 до 2 Гц (соматосенсорный анализатор, мозжечок) [52]. Теперь гимнастки больше полагаются на вестибулярную/соматосенсорную и проприоцептивную системы, что подтверждает формирование специфических двигательных стереотипов в системе пострурального контроля у этих спортсменок. При этом в группе неспортсменок не наблюдали значительного изменения соотношения частотных диапазонов, что свидетельствует об отсутствии поструральной стратегии. При стойке на мягкой поверхности изменение частотного спектра позволило выявить и особенности поструральных стратегий у спортивных и художественных гимнасток. Так, у спортсменок, занимающихся художественной гимнастикой, в пробе “закрытые глаза, мягкая поверхность” происходило значимое увеличение доли частот диапазона Pw2. Уменьшение вклада зрительной системы с одновременным увеличением вклада мозжечка и вестибулярной системы связывают с переходом от контролируемого к автоматическому поструральному поведению, мозжечок играет важную роль в переходе выполнения движения из состояния, требующего внимания, в более автоматический режим [53, 54]. У спортивных гимнасток мы отмечали значимое увеличение доли высокочастотного диапазона спектра при закрытых глазах на мягкой поверхности, что связано с сильной и ритмичной активностью мышц. Это демонстрирует повышенный уровень возбудимости проприоцептивных цепей, работающих в этих условиях, для быстрой поструральной коррекции, когда нарушается равновесие у спортсменок. Непрерывные коррекции смещений сегментов тела на мягкой поверхности, вероятно, зависят от проприоцептивных залпов, которые посылают непрерывный входной сигнал в различные области мозга и вызывают соответствующие коротко- и длиннолатентные рефлексы [55]. Было показано, что сенсорная обратная связь может влиять на низко- и высокочастотные компоненты колебаний по-разному. Низкочастотные колебания, отражающие дрейф инертной массы тела [56], более восприимчивы к резким изменениям сенсорной обратной связи [57], в то время как высокочастотные колебания, отражающие небольшие корректировки центра масс, используемые для поддержания устойчивости, восприимчивы к жесткости суставов и активации мышц [7]. Различия в стратегиях пострурального контроля определяются, как было нами уже отмечено, спецификой спорта и тренировочными задачами. Статическое и динамическое равновесие, а также координация всего тела и рук для работы с предметами являются критически важными для тренировки поструральной устойчивости для художественных гимнасток [58]. Более того, стратегии во фронтальной плоскости при спокойной стойке лучше у художественных гимнасток, чем у спортивных, это указывает на то, что их тренировки оказывают прямое влияние на медиолатеральный баланс [59]. У спортивных гимнасток тренировки сосредоточены на силовых и акробатических элементах, которые непосредственно влияют на способность поддерживать устойчивость на снарядах. Тренировки улучшают поструральную устойчивость, чувство положения голеностопного сустава и повышают мышечный тонус [35].

Одним из особенных эффектов пострурального контроля у спортсменок, занимающихся художественной гимнастикой, в нашем исследовании связан со зрением – это высокое значение коэффициента Ромберга и высокая доля частот в диапазоне 0.02–0.1 Гц (Pw1, которую связывают со вкладом в контроль позы зрительного анализатора) [60]. Спортсменки, занимающиеся художественной гимнастикой, продемонстрировали большую зависимость от зрения, чем другие спортсмены ($p < 0.05$) и неспортсмены ($p < 0.01$). Множество элементов в художественной гимнастике требует сложного сочетания движений, которые

необходимо контролировать визуально. Зрительный контроль помогает гимнасткам точно оценивать расстояние и положение своего тела относительно предметов (например, ленты или мяча) и окружающего пространства. Эффективный зрительный контроль способствует улучшению баланса и координации движений [61]. Более того, отмечается, что тренировки спортсменов, занимающихся художественной гимнастикой, всегда осуществляются с открытыми глазами, поэтому стояние в определенной позе с закрытыми глазами, возможно, становится нетренированной и новой ситуацией, поэтому эти спортсменки демонстрируют неустойчивость в этих условиях [62]. Анализ настоящих данных подтверждает гипотезу о том, что спортсменки, занимающиеся художественной гимнастикой, имеют постральную стратегию, очень похожую на стратегию балетных танцоров [63].

Ограничения. Мы не рассматривали электрическую активность мышц, потенциально способствующих колебаниям CoP, что не позволяет нам напрямую сопоставить изменения спектральных частот с модуляцией мышечной активности. Мы надеемся сделать это в будущих публикациях. В нашем исследовании не учитывалось влияние фаз менструального цикла на контроль позы, что может ограничить интерпретацию полученных результатов. Доказательства того, что менструальный цикл влияет на постральный контроль, являются неоднозначными. Тем не менее тенденция к снижению пострального контроля от ранней фолликулярной фазы к фазе овуляции наблюдалась в задачах на равновесие, в которых исключали или изменяли сенсорный вход [64]. Следовательно, компенсаторные стратегии могут быть менее эффективными во время фазы овуляции. Однако используемые в нашем исследовании задачи на контроль позы не были достаточно сложными для различения фаз менструального цикла. Учитывая важную роль контроля позы в профилактике и предотвращении травм у спортсменок, будущие исследования должны учитывать влияния менструального цикла на постральную устойчивость во время выполнения сложных балансовых задач.

Таким образом, наши результаты продемонстрировали различия в постральной устойчивости и стратегиях контроля равновесия между спортсменками, занимающимися художественной и спортивной гимнастикой, и неспортсменками. Гимнастки, благодаря их специфическим тренировкам, обладают улучшенной способностью интегрировать сенсорные входы, что позволяет им поддерживать постральную устойчивость в сложных условиях, таких как стояние на мягкой поверхности с закрытыми глазами. Спортивные гимнастки показали большую способность к быстрой постральной коррекции за счет интенсивной мышечной активности, тогда как художественные гимнастки продемонстрировали большую зависимость от зрительного контроля и специфические автоматические постральные стратегии. Это различие, как мы предполагаем, обусловлено особенностями тренировочного процесса и требованиями каждого вида спорта. Полученные результаты могут помочь в определении навыков и разработке тренировочных программ, учитывающих индивидуальные особенности спортсменок и необходимых для успешных выступлений.

ВКЛАДЫ АВТОРОВ

Е. С. Н. – проведение экспериментов, первичная обработка результатов экспериментов, статистический анализ данных, подготовка иллюстраций. Б. Р. С. – проведение экспериментов. М. Э. Б. – анализ и интерпретация данных, статистический анализ данных, написание рукописи, подготовка иллюстраций. А. О. Ф. – проведение экспериментов и редактирование рукописи. Т. В. Б. – редактирование рукописи. Л. Н. Б. – идея работы, редактирование рукописи. А. А. З. – редактирование рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма» № 777-00022-24-01 (НИОКТР 1022060600108-6).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Комитетом по этике Поволжского государственного университета физической культуры, спорта и туризма (Казань), протокол № 1 от 16.12.2022 г. Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vuillerme N, Teasdale N, Nougier V* (2001) The effect of expertise in gymnastics on proprioceptive sensory integration in human subjects. *Neurosci Let* 311: 73–76.
[https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(01\)02147-4](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(01)02147-4)
2. *Busquets A, Aranda-Garcia S, Ferrer-Uris B, Marina M, Angulo-Barroso R* (2018) Age and gymnastic experience effects on sensory reweighting processes during quiet stand. *Gait Posture* 63: 177–183.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.05.009>
3. *Busquets A, Ferrer-Uris B, Angulo-Barroso R, Federolf P* (2021) Gymnastics Experience Enhances the Development of Bipedal-Stance Multi-Segmental Coordination and Control During Proprioceptive Reweighting. *Front Psychol* 12: 661312.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.661312>
4. *Sozzi S, Ghai S* (2022) Incongruity of Geometric and Spectral Markers in the Assessment of Body Sway. *Front Neurol* 13: 929132.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2022.929132>
5. *Vuillerme N, Sporbert C, Pinsault N* (2009) Postural adaptation to unilateral hip muscle fatigue during human bipedal standing. *Gait Posture* 30: 122–125.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.03.004>
6. *Shanbhag J, Wolf A, Wechsler I, Fleischmann S, Winkler J, Leyendecker S, Eskofier BM, Koelwijn AD, Wartzack S, Miehling J* (2023). Methods for integrating postural control into biomechanical human simulations: A systematic review. *J Neuroengin Rehabil* 20: 111.
<https://doi.org/10.1186/s12984-023-01235-3>
7. *Peterka RJ* (2002) Sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol* 88: 1097–1018.
<https://doi.org/10.1152/jn.2002.88.3.1097>
8. *Sotoudeh GR, Mohammadi R, Mosallanezhad Z, Viitasara E, Soares JJF* (2023) A population study on factors associated with unintentional falls among Iranian older adults. *BMC Geriatr* 23: 860.
<https://doi.org/10.1186/s12877-023-04571-04>
9. *Baloh RW, Fife TD, Zwerling L, Socotch T, Jacobson K, Bell T, Beykirch K* (1994) Comparison of static and dynamic posturography in young and older normal people. *J Am Geriatr Soc* 42: 405–412.
<https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1994.tb07489.x>
10. *Furman JM* (1994) Posturography: Uses and limitations. *Bailliere's Clin Neurol* 3: 501–513.
11. *Goel R, De Dios YE, Gadd NE, Caldwell EE, Peters BT, Reschke MF, Bloomberg JJ, Oddsson LIE, Mulavara AP* (2017) Assessing Somatosensory Utilization during Unipedal Postural Control. *Front Systems Neurosci* 11: 21.
<https://doi.org/10.3389/fnsys.2017.00021>
12. *Baltin ME, Fedyanin AO, Mavliev FA, Baltina TV* (2023) Characteristics of postural balance in badminton players after functional exercise. *Human Sport Med* 23: 54–58.
<https://doi.org/10.14529/hsm23s108>
13. *Yiou E, Hamaoui A, Allali G* (2018) Editorial: The Contribution of Postural Adjustments to Body Balance and Motor Performance. *Front Human Neurosci* 12: 487.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00487>

14. *Viseu JP, Yiou E, Morin PO, Olivier A* (2023) Sport dependent effects on the sensory control of balance during upright posture: A comparison between professional horseback riders, judokas and non-athletes. *Front Human Neurosci* 17: 1213385.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1213385>
15. *Andreeva A, Melnikov A, Skvortsov D, Akhmerova K, Vavaev A, Golov A, Draugelite V, Nikolaev R, Chechelnickaia S, Zhuk D, Bayerbakh A, Nikulin V, Zemková E* (2021) Postural stability in athletes: The role of sport direction. *Gait Posture* 89: 120–125.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.07.005>
16. *Vater C, Strasburger H* (2021) Topical Review: The Top Five Peripheral Vision Tools in Sport. *Optom Vis Sci* 98: 704–722.
<https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001732>
17. *Mallek M, Benguigui N, Dicks M, Thouvarecq R* (2017) Sport expertise in perception-action coupling revealed in a visuomotor tracking task. *Eur J Sport Sci* 17: 1270–1278.
<https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1375014>
18. *Hrysomallis C* (2011) Balance ability and athletic performance. *Sports Med* 41: 221–232.
<https://doi.org/10.2165/11538560-000000000-00000>
19. *Roy MM, Redlich D, Lamison E, Memmert D* (2024) The naturalness bias in sport. *Psychol Sport Exerc* 70: 102537.
<https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2023.102537>
20. *Taube W, Gruber M, Gollhofer A* (2008) Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training and their functional relevance. *Acta Physiol (Oxf)* 193: 101–116.
<https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2008.01850.x>
21. *Paillard T* (2017) Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience. *Neurosci Biobehav Rev* 72: 129–152.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.11.015>
22. *Paillard T* (2019) Relationship Between Sport Expertise and Postural Skills. *Front Psychol* 10: 1428.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01428>
23. *Seidel O, Carius D, Kenville R, Ragert P* (2017) Motor learning in a complex balance task and associated neuroplasticity: A comparison between endurance athletes and nonathletes. *J Neurophysiol* 118: 1849–1860.
<https://doi.org/10.1152/jn.00419.2017>
24. *Bradshaw EJ, Le Rossignol P* (2004) Anthropometric and biomechanical field measures of floor and vault ability in 8- to 14-year-old talent-selected gymnasts. *Sports Biomech* 3: 249–262.
<https://doi.org/10.1080/14763140408522844>
25. *Nassib SH, Mkaouer B, Riahi SH, Wali SM, Nassib S* (2020) Prediction of Gymnastics Physical Profile Through an International Program Evaluation in Women Artistic Gymnastics. *J Strength Cond Res* 34: 577–586.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001902>
26. *Opala-Berdzik A, Glowacka M, Slomka KJ* (2021) Characteristics of Functional Stability in Young Adolescent Female Artistic Gymnasts. *J Hum Kinet* 77: 51–59.
<https://doi.org/10.2478/hukin-2021-0051>
27. *Opala-Berdzik A, Glowacka M, Juras G* (2021). Postural sway in young female artistic and acrobatic gymnasts according to training experience and anthropometric characteristics. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 13: 11.
<https://doi.org/10.1186/s13102-021-00236-w>
28. *Sozzi S, Do MC, Schieppati M* (2022) Vertical ground reaction force oscillation during standing on hard and compliant surfaces: The “postural rhythm”. *Front Neurol* 13: 975752.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2022.975752>
29. *Gallamini M, Piastra G, Lucarini S, Porzio D, Ronchi M, Pirino A, Scoppa F, Masiero S, Tognolo L* (2021) Revisiting the Instrumented Romberg Test: Can Today's Technology Offer a Risk-of-Fall Screening Device for Senior Citizens? An Experience-Based Approach. *Life (Basel)* 11: 161.
<https://doi.org/10.3390/life11020161>
30. *Mezenchuk AI, Kubryak OV* (2022) The Romberg's sign: From walking in the dark to tests on the force plate. *Alman Clin Med* 50: 335–347.
<https://doi.org/10.18786/2072-0505-2022-50-040>
31. *Wodarski P* (2023) Trend Change Analysis as a New Tool to Complement the Evaluation of Human Body Balance in the Time and Frequency Domains. *J Hum Kinet* 87: 51–62.
<https://doi.org/10.5114/jhk/163058>
32. *Dakinova MV, Bikhentaeva LM, Tagirova IS, Baltina TV, Yafarova GG, Sachenkov OA* (2022) Spectral analysis of stabilographic signals by Fourier and Hilbert – Huang methods. 2022 VIII Int Confer Informat Technol Nanotechnol (ITNT): 1–4.
<https://doi.org/10.1109/ITNT5410.2022>

33. *Lin IS, Lai DM, Ding JJ, Chien A, Cheng CH, Wang SF, Wang JL, Kuo CL, Hsu WL* (2019) Reweighting of the sensory inputs for postural control in patients with cervical spondylotic myelopathy after surgery. *J Neuroeng Rehabil* 16: 96.
<https://doi.org/10.1186/s12984-019-0564-2>
34. *Di Corrado D, Francavilla VC, La Paglia R, Parisi MC, Buscemi A, Coco M* (2023) Short-Term Effects of Specific Sensorimotor Training on Postural Assessment in Healthy Individuals: A Pilot Study with a Randomized Placebo-Controlled Trial. *J Funct Morphol Kinesiol* 8: 46.
<https://doi.org/10.3390/jfmk8020046>
35. *Zemková E, Kováčiková Z* (2023) Sport-specific training induced adaptations in postural control and their relationship with athletic performance. *Front Hum Neurosci* 16: 1007804.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1007804>
36. *Paillard T, Bizid R, Dupui P* (2007) Do sensorial manipulations affect subjects differently depending on their postural abilities? *Br J Sports Med* 41: 435–438.
<https://doi.org/10.1136/bjism.2006.032904>
37. *Garcia C, Barela JA, Viana AR, Barela AM* (2011) Influence of gymnastics training on the development of postural control. *Neurosci Lett* 492: 29–32.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2011.01.047>
38. *Ivanenko Y, Gurfinkel VS* (2018) Human Postural Control. *Front Neurosci* 12: 171.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00171>
39. *Giboin LS, Gruber M, Kramer A* (2015) Task-specificity of balance training. *Hum Mov Sci* 44: 22–31.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.012>
40. *Patel M, Fransson PA, Johansson R, Magnusson M* (2011) Foam posturography: Standing on foam is not equivalent to standing with decreased rapidly adapting mechanoreceptive sensation. *Exp Brain Res* 208: 519–527.
<https://doi.org/10.1007/s00221-010-2498-6>
41. *Bringoux L, Marin L, Nougier V, Barraud PA, Raphel C* (2000) Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. *J Vestib Res* 10: 251–258.
42. *O'Reilly D, Federolf P* (2021) Identifying differences in gait adaptability across various speeds using movement synergy analysis. *PLoS One* 16: e0244582.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244582>
43. *Vuillerme N, Nougier V* (2004) Attentional demand for regulating postural sway: The effect of expertise in gymnastics. *Brain Res Bull* 63: 161–165.
<https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2004.02.006>
44. *Sozzi S, Nardone A, Schieppati M* (2021) Specific Posture-Stabilising Effects of Vision and Touch Are Revealed by Distinct Changes of Body Oscillation Frequencies. *Front Neurol* 12: 756984.
<https://doi.org/10.3389/fneur.2021.756984>
45. *Jeka J, Kiemel T, Creath R, Horak F, Peterka R* (2004) Controlling human upright posture: Velocity information is more accurate than position or acceleration. *J Neurophysiol* 92: 2368–2379.
<https://doi.org/10.1152/jn.00983.2003>
46. *Caron O, Gelat T, Rougier P, Blanche JP* (2000) A comparative analysis of the center of gravity and center of pressure trajectory path lengths in standing posture: An estimation of active stiffness. *J Appl Biomech* 16: 234–247.
<https://doi.org/10.1123/jab.16.3.234>
47. *Hill MW, Wdowski MM, Rosicka K, Kay AD, Muehlbauer T* (2023) Exploring the relationship of static and dynamic balance with muscle mechanical properties of the lower limbs in healthy young adults. *Front Physiol* 14: 1168314.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1168314>
48. *Theodoropoulou A, Markou KB, Vagenakis GA, Benardot D, Leglise M, Kourounis G, Vagenakis AG, Georgopoulos NA* (2005) Delayed but normally progressed puberty is more pronounced in artistic compared with rhythmic elite gymnasts due to the intensity of training. *J Clin Endocrinol Metab* 90: 6022–6027.
<https://doi.org/10.1210/jc.2005-1762>
49. *Cuk I, Marinšek M* (2013) Landing quality in artistic gymnastics is related to landing symmetry. *Biol Sport* 30: 29–33.
<https://doi.org/10.5604/20831862.1029818>
50. *Singh NB, Taylor WR, Madigan ML, Nussbaum MA* (2012) The spectral content of postural sway during quiet stance: Influences of age, vision and somatosensory inputs. *J Electromyogr Kinesiol* 22: 131–136.
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.10.007>
51. *Bikhentaeva L, Nikulina M, Shulman A, Baltin M, Zheltukhina A, Semenova E, Smirnova V, Klepikova S, Baltina T* (2024) Different Factors Influencing Postural Stability during Transcutaneous Electrical Stimulation of the Cervical Spinal Cord. *J Funct Morphol Kinesiol* 9: 142.
<https://doi.org/10.3390/jfmk90301422012>

52. *Kirchner M, Schubert P, Schmidbleicher D, Haas CT* (2012) Evaluation of the temporal structure of postural sway fluctuations based on a comprehensive set of analysis tools. *Physica A Stat Mech* 391: 4692–4703.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2012.05.034>
53. *Lang CE, Bastian AJ* (2002) Cerebellar damage impairs automaticity of a recently practiced movement. *J Neurophysiol* 87: 1336–1347.
<https://doi.org/10.1152/jn.00368.2001>
54. *St-Amant G, Rahman T, Polskaia N, Fraser S, Lajoie Y* (2020) Unveiling the cerebral and sensory contributions to automatic postural control during dual-task standing. *Hum Mov Sci* 70: 102587.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102587>
55. *Knikou M, Rymer Z* (2002) Effects of changes in hip joint angle on H-reflex excitability in humans. *Exp Brain Res* 143: 149–159.
<https://doi.org/10.1007/s00221-001-0978-4>
56. *Winter DA, Patla AE, Prince F, Ishac M, Gielo-Perczak K* (1998) Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol* 80: 1211–1221.
<https://doi.org/10.1152/jn.1998.80.3.1211>
57. *Yeh TT, Cluff T, Balasubramaniam R* (2014) Visual reliance for balance control in older adults persists when visual information is disrupted by artificial feedback delays. *PLoS One* 9: e91554.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091554>
58. *Kioumourtzoglou E, Derri V, Mertzaniidou O, Tzetzis G* (1997) Experience with perceptual and motor skills in rhythmic gymnastics. *Percept Mot Skills* 84: 1363–1372.
<https://doi.org/10.2466/pms.1997.84.3c.1363>
59. *Calavalle AR, Sisti D, Rocchi MB, Panebianco R, Del Sal M, Stocchi V* (2008) Postural trials: Expertise in rhythmic gymnastics increases control in lateral directions. *Eur J Appl Physiol* 104: 643–649.
<https://doi.org/10.1007/s00421-008-0815-6>
60. *Friedrich M, Grein HJ, Wicher C, Schuetze J, Mueller A, Lauenroth A, Hottenrott K, Schwesig R* (2008) Influence of pathologic and simulated visual *dysfunctions* on the postural system. *Exp Brain Res* 186: 305–314.
<https://doi.org/10.1007/s00221-007-1233-4>
61. *Asseman FB, Caron O, Crémieux J* (2008) Are there specific conditions for which expertise in gymnastics could have an effect on postural control and performance? *Gait Posture* 27: 76–81.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.01.004>
62. *Asseman F, Caron O, Crémieux J* (2005) Effects of the removal of vision on body sway during different postures in elite gymnasts. *Int J Sports Med* 26: 116–119.
<https://doi.org/10.1055/s-2004-830529>
63. *Janura M, Procházková M, Svoboda Z, Bizovská L, Jandová S, Konečný P* (2019) Standing balance of professional ballet dancers and non-dancers under different conditions. *PLoS One* 14: e0224145.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224145>
64. *Pohle C, Becker L, Baumeister J* (2024) Alterations of postural control across the menstrual cycle – A systematic review. *Gait Posture* 107: 72–82.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2023.09.010>

**Postural Stability in Female Rhythmic and Artistic Gymnastics Athletes:
the Role of Visual and Somatosensory Signals**

**E. S. Niazi^{a, #}, B. R. Samigullin^{a, b}, M. E. Baltin^{a, c}, A. O. Fedyanin^a, T. V. Baltina^b,
L. N. Botova^a, and A. A. Zverev^a**

^aVolga Region State University of Physical Culture, Sport and Tourism, Kazan, Russia

^bKazan Federal University, Kazan, Russia

^cSirius University of Science and Technology, Sirius Federal territory, Russia

[#]e-mail: katerina58_98@mail.ru

The study was devoted to the assessment of postural stability in female athletes involved in rhythmic ($n = 17$), artistic ($n = 20$) gymnastics and non-athletes ($n = 19$). The main objective was to identify the features of the center of pressure (CoP) oscillations in female and non-athletes under various conditions of activation of visual and somatosensory inputs. The method of computer stabilometry was used on the automated complex "Stabilan-01-5". To assess postural stability, the parameters of the stabilographic test were analyzed: linear velocity of CoP movement (ALV, mm/sec), angular velocity of CoP movement (AAV, deg/sec) and ellipse area (EIAS, sq. mm), the Romberg coefficient was calculated. Spectral analysis of stabilographic signals was conducted. The participants performed tests in a normal stance on a hard and soft surface with their eyes closed and open.

The results showed that CoP oscillations in female and non-gymnasts in a calm stance were comparable, but differences were observed on a soft surface. Rhythmic and artistic gymnasts demonstrated better postural stability indicators, which is explained by their ability to integrate proprioceptive and visual signals. Spectral analysis showed smaller fluctuations in the high-frequency range in both rhythmic and artistic gymnasts, which indicates the formation of specific motor and neuromuscular strategies in them. It was also found that rhythmic gymnasts were more dependent on visual control to maintain postural stability, which is probably due to the need to accurately assess the distance and body position when performing elements specific to this sport. The results obtained can serve as a basis for developing individual training programs taking into account sensory integration and movement control in different groups of athletes.

Keywords: postural stability, postural stability, pressure center, postural control, rhythmic gymnastics, sports gymnastics, stabilography