

ЛОКОМОТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВОГО БАЛАНСА ТЕЛА В ТРЕХКООРДИНАТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ



© Т.И. Долганова*, Л.Ю. Чехлова, Д.В. Долганов, И.Д. Черепанов

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. академика Г.А. Илизарова» Минздрава России, Курган, Россия

Обоснование. Возрастные изменения сопровождаются структурными нарушениями не только в костях скелета, но и проявляются в ослаблении сенсомоторных систем, регулирующих биомеханические функции всей опорно-двигательной системы, в частности позвоночника. И хотя визуально наблюдаемые балансирующие нарушения особенно заметно обнаруживаются в постуральных функциях равновесия и осевого скелета, их количественная инструментальная оценка и диагностика до настоящего времени не отработаны. На сегодняшний день 3D-видеоанализ походки является признанным объективным методом исследования, позволяющим в ортостатике и при ходьбе регистрировать и количественно оценивать основные балансирующие величины осевого скелета.

Цель. Изучить балансирующее поведение осевого скелета в локомоторной активности и установить в трехкоординатном пространстве нормативные статистические ориентиры его балансирующих характеристик.

Материалы и методы. В исследовании участвовали мужчины (n=10) и женщины (n=9) 18–40 лет, средний возраст $31,1 \pm 1,4$ года. Кинематические параметры походки регистрировались оптическими камерами Qualisys 7+ (8 камер) с технологией видеозахвата пассивных маркеров. Специально созданной программой определялись значения динамического осевого баланса по амплитуде колебания проекции расчетных точек от центра С7 и S2 позвонков на опорную плоскость в сагиттальной (GA-SVA) и фронтальной (GA-CVA) плоскостях и диапазон угла проекции линий плеча и таза в горизонтальной (GA-APA) плоскости.

Результаты. Проанализированная в исследовании стохастика осевого баланса тела приближалась к функции нормального распределения с наименьшим уровнем вариации в горизонтальной плоскости. Диапазоны коэффициентов вариации осевого баланса тела при обычной ходьбе и ходьбе на носках составили: в горизонтальной плоскости (APA) — 7,5–10,0%; в сагиттальной плоскости SVA — 12,4–18,6%; во фронтальной плоскости CVA — 12,6–16,9%.

Заключение. Представлена статистика реперных значений динамического осевого баланса тела в возрастной группе 18–40 лет при обычной ходьбе и при функциональной пробе «ходьба на носках». В локомоторной стохастической иерархии биомеханических функций осевого скелета ведущим диагностическим ориентиром в оценках двигательной патологии следует рассматривать нормированные величины трехкоординатного параметра осевого баланса (ПОБ), поскольку распределение его величин отличается постоянством и может соответствовать правилу сигмальных отклонений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: видеоанализ походки; локомоторная активность; баланс осевого скелета.

CALCULATED INDICATOR OF DYNAMIC AXIAL BALANCE OF THE BODY — ITS REPRODUCIBILITY AND REPEATABILITY BY VARIATION COEFFICIENT

© Tamara I. Dolganova*, Lada Y. Chehlova, Dmitrii V. Dolganov, Ivan D. Cherepanov

National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia

Background: Justification. Age-related changes are accompanied by structural disorders not only in the bones of the skeleton, but also in the weakening of sensorimotor systems that regulate the biomechanical functions of the entire musculoskeletal system and in particular the spine. Although visually, the observed balancing disorders are particularly noticeable in the postural functions of balance and the axial skeleton, their quantitative instrumental assessment and diagnosis have not yet been worked out. To date, 3D video gait analysis is a recognized objective research method that allows orthostatics and walking to record and quantify the basic balancing values of the axial skeleton.

Aim: To study the balancing behavior of the axial skeleton in locomotor activity and establish normative statistical guidelines for its balancing characteristics in a three-coordinate space.

Materials and methods: The study involved men (n=10) and women (n=9) aged 18–40, with an average age of 31.1 ± 1.4 years. Qualisys 7+ optical cameras (8 cameras) with passive marker video capture technology recorded kinematic gait parameters. A specially created program determined the values of dynamic axial balance by the amplitude of the projection of the calculated points from the center of the C7 and S2 vertebrae to the reference plane in the sagittal (GA-SVA) and frontal (GA-CVA) planes and the angle range of the projection of the shoulder and pelvis lines in the horizontal (GA-APA) plane.

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Results: The stochastic dynamics of the axial balance of the body analyzed in the study approached the normal distribution function with the lowest level of variation in the horizontal plane. The ranges of coefficients of variation of the axial balance of the body during normal walking "on tiptoes" were: in the horizontal plane (APA) — 7.5%–10.0%; in the sagittal plane SVA — 12.4%–18.6%; in the frontal plane CVA — 12.6%–16.9%.

Conclusion: The statistics of reference values of the dynamic axial balance of the body in the age group of 18–40 years with normal walking and with the functional test "walking on toes" are presented. In the locomotor stochastic hierarchy of biomechanical functions of the axial skeleton, the normalized values of the three-coordinate parameter of axial balance (PAB), should be considered the leading diagnostic guideline in assessing motor pathology, since the distribution of its values is constant and may correspond to the rule of sigma deviations.

KEYWORDS: gait analysis; locomotor activity; axial skeleton balance.

ОБОСНОВАНИЕ

Возрастные изменения постральной неустойчивости часто встречаются у людей с заболеваниями позвоночника и могут стать причиной падения. Старение, вестибулярный дефицит, заболевания позвоночника, которые вызывают изменения осанки, а также слабая мускулатура туловища и ног — могут изменить их осевой баланс, что оказывает влияние на качество жизни и повседневную деятельность [1]. В настоящее время определено, что поддержание баланса тела в сагитальной, фронтальной и горизонтальной плоскостях является одной из ключевых адаптаций в прямохождении человека и определяется как способность удерживать центр давления (ЦД) в пределах опоры «конуса устойчивости», чтобы избежать падения. Количественной оценкой размеров «конуса устойчивости» (КУ) и энергозатрат, связанных с поддержанием равновесия, является диапазон смещения туловища в трех плоскостях [1].

Вместе с тем в большинстве случаев основой для анализа предоперационного и послеоперационного хирургического статуса пациентов и основным источником постральной информации относительно пространственной ориентации позвоночника являются только статические рентгенограммы [2]. Однако поскольку повседневная деятельность человека больше связана с динамическим статусом позвоночно-тазового сегмента, а статические и динамические показатели баланса регулируются различными сенсомоторными системами и механизмами нервно-мышечного контроля [3], то и оценку пострального статуса осевого скелета желательнее осуществлять в трехмерном измерении [4, 5]. В этом аспекте 3D-видеоанализ в статике и при ходьбе является признанным исследованием, которое в динамике регистрирует и объективно отражает основные величины осевого баланса. Предложенные подходы в оценке динамического осевого баланса туловища рассматривают: движение проекции точки от маркера С7 позвонка относительно проекции точки от S1 позвонка на опорной плоскости; расчет диапазона движения проекции точки от маркера С7 позвонка относительно точки проекции СОГ (общего центра массы), расположенного в проекции плоскости таза; расчет амплитуды динамического сагитального (GA-SVA) и фронтального (GA-CVA) баланса как проекции на опорную плоскость середины отрезка маркеров с позвонка С7 и яремной выемки грудины SJH (прибли-

женно к телу позвонка С7) и середины оснований трапеции таза по маркерам в точках бугра верхней задней (RIPS, LIPS) и передней (RIAS, LIAS) подвздошной оси справа и слева (приблизительно к телу позвонка S1), расчет баланса в горизонтальной плоскости по углу между линиями плеча и таза (angle acromion-pelvis, APA) [6]. Обозначенные в методе оценочные величины максимально приближены к рентгенологически установленным точкам расчета.

Вводимый расчетный показатель для обеспечения надежных результатов для диагностического использования в клинической практике оценивается по критериям повторяемости и воспроизводимости получаемых результатов. Повторяемость характеризует степень согласованности повторных измерений, полученных при одинаковых условиях, с тем же исследователем и с тем же оборудованием. Воспроизводимость — степень соответствия между повторными измерениями, полученными с применением одного и того же метода разными операторами [7]. Чтобы сделать выводы о стабильности получаемых результатов, используют коэффициент вариации [8]. Анализ коэффициента вариации временных параметров походки учитывает ходьбу с разной скоростью как функциональную пробу для оценки координационных процессов [9], влияние мышечной усталости после упражнений, таких как ходьба в гору, езда на велосипеде или бег [10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучить локомоторные характеристики осевого баланса тела и установить в трехкоординатном пространстве нормативные статистические ориентиры его балансовых характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Место и время проведения исследования

Место проведения. ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. академика Г.А. Илизарова» (Курган), научная лаборатория Клиники нейроортопедии и системных заболеваний.

Время исследования: февраль 2023 — август 2024 гг.

Исследуемые популяции (одна или несколько)

Популяция: 19 здоровых человек (10 мужчин, 9 женщин); средний возраст 31,1±1,4 года.

Критерии включения: возраст 18–40 лет, отсутствие неврологического и ортопедического диагноза в анамнезе и на момент обследования.

Критерии исключения: другой возраст, наличие неврологической или ортопедической патологии в анамнезе или на момент обследования.

Способ формирования выборки из изучаемой популяции (или нескольких выборок из нескольких изучаемых популяций)

Простая случайная выборка.

Дизайн исследования

Одноцентровое, наблюдательное, динамическое (обследование проводилось 10 раз), проспективное (с интервалом 1–7 дней), нерандомизированное исследование.

Описание медицинского вмешательства (для интервенционных исследований)

В исследовании участвовали мужчины и женщины 18–40 лет, ведущие активный образ жизни с эпизодическим участием в спортивных мероприятиях. Обследуемые ходили самостоятельно с опорой на всю стопу, босиком на 7-метровой дорожке с привычной для них скоростью передвижения. В качестве функциональной пробы использована ходьба с опорой на передний отдел стопы — «на носках», которая является скрининговым тестированием пациентов с неврологическими двигательными нарушениями.

Методы

Кинематические параметры походки регистрировались оптическими камерами Qualisys 7+ (8 камер компании Qualisys) с технологией видеозахвата пассивных маркеров. За основу установки светоотражающих маркеров на туловище принята IOR модель (рис. 1). Специально разработанными программами [6, 11] определялись и вносились в выходные формы табличные значения динамического осевого баланса по амплитудам колебания проекций реперных точек от центра C7 и S2 позвонков на опорную плоскость в сагиттальной (GA-SVA), фронтальной (GA-CVA) плоскостях и диапазон углов проекции линий плеча и таза в горизонтальной (GA-APA) плоскости (рис. 2, 3).

Расчет показателя повторяемости проводился у каждого обследованного при исследовании одним оператором с интервалом в 1–3 дня, общее количество исследований — 10. Установка маркеров для проведения исследования выполнялась одним исследователем в одних и тех же условиях. Расчет показателя воспроизводимости проводился у одного обследуемого в разные дни (с интервалом 2–7 дней), установка маркеров для проведения исследования выполнялась разными операторами.

Статистический анализ

Учитывая количество наблюдений в выборочной совокупности, функция распределения используемых в исследовании показателей на нормальность оценивалась по одномерным критериям: Андерсона-Дарлинга и Шапиро-Уилка, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

И поскольку в отношении показателей динамического осевого баланса в горизонтальной, сагиттальной и фронтальной плоскостях в условиях обычной ходьбы и при функциональной пробе «ходьба на носках» с порогом принятия решения 0.1 гипотеза на нормальность не отклонялась, то использовалась параметрическая статистика.

Рассчитывались математически ожидаемые (среднеарифметические) значения (M), стандартные (среднеквадратические) отклонения (σ) и коэффициенты вариации, представляемые в процентах (Cv).

Принятые по Г.Н. Зайцеву (1973) уровни вариации соответствуют: $Cv > 20\%$ — высокому, Cv от 11% до 20% — среднему, $Cv \leq 10\%$ — низкому [13].

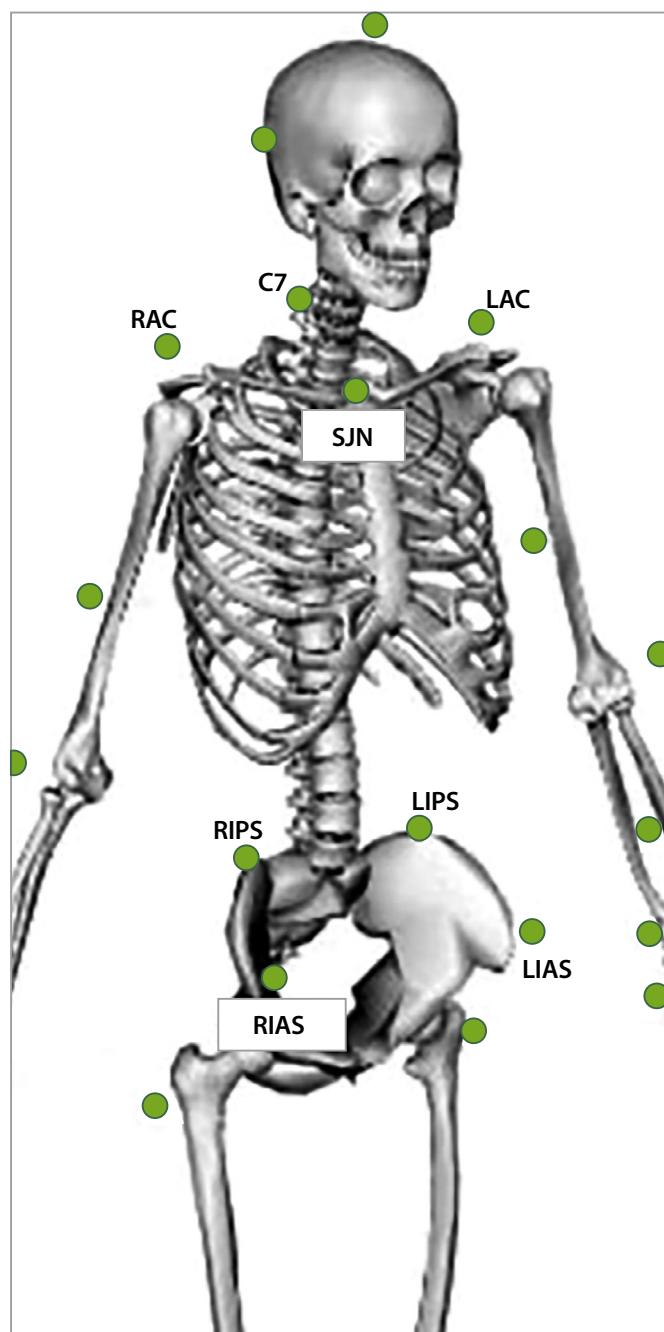
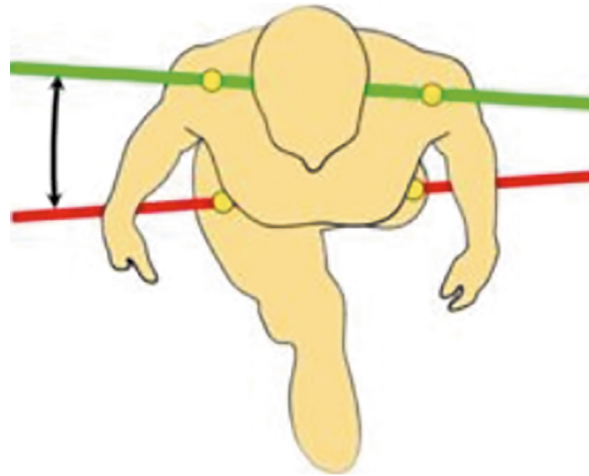


Рисунок 1. Точки расстановки маркеров для определения сегментов и расчетных параметров динамического осевого баланса тела при проведении исследования 3D-видеоанализом.

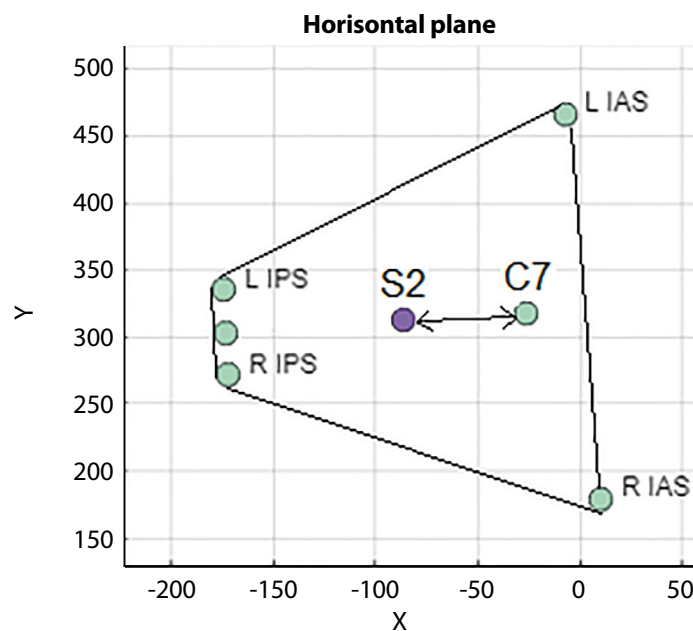
Dynamic Data				
	Min	Max	Displacement	Static
The dynamic shoulder line rotation	-7.8	1.3	9.1	-2.8
The dynamic pelvis rotation	-7	12.9	19.9	5.3
The dynamic acromion pelvis angle	-7.4	20.5	27.9	8.1



Acromion-Pelvis Angle

Рисунок 2. Табличные значения динамического осевого баланса и схема определения амплитуды динамики угла ротации плеч (dynamic shoulder line rotation), таза (dynamic pelvis rotation) и угла плечо-таз (APA -acromion-pelvis angle) при ходьбе.

В таблице: min и max значения баланса, их диапазон при ходьбе (displacement), значения баланса в позе «стоя» (static).
Графическое представление угловых характеристик тазового и плечевого пояса в горизонтальной проекции [12].



SVA				
Current value	Min	Max	Displacement	Static
-59	-60.6	-40.2	20.4	-13.4
CVA				
-4.4	-4.9	21.2	26	13.3

Рисунок 3. Схема определения амплитуды колебания (мм) проекции расчетных точек от центра C7 и S2 позвонков на опорную плоскость в сагиттальной (GA-SVA) и фронтальной (GA-CVA) плоскостях. На примере SVA=20,4 мм, CVA=26,0 мм.

Физические показатели балансов представлялись в величинах сигмальных отклонений (SDS) соответственно в сагиттальной ($SDS_{(SVA)}$), фронтальной ($SDS_{(CVA)}$) и горизонтальной ($SDS_{(APA)}$) плоскостях по формулам (1, 2, 3):

$$SDS_{(SVA)} = (x_{SVA} - M_{SVA}) / \sigma_{SVA} \quad (1)$$

$$SDS_{(CVA)} = (x_{CVA} - M_{CVA}) / \sigma_{CVA} \quad (2)$$

$$SDS_{(APA)} = (x_{APA} - M_{APA}) / \sigma_{APA} \quad (3)$$

где SDS — сигмальные отклонения физической величины баланса в горизонтальной, сагиттальной и фронтальной плоскостях; x — значение физической величины баланса конкретного пациента; M — математически ожидаемое значение физической величины баланса по представленной выборочной совокупности; σ — среднеквадратическое отклонение физической величины баланса.

Нормированная величина трехкоординатного параметра осевого баланса (ПОБ) рассчитывалась как среднее значение суммы балансов (сагиттального (SVA), фронтального (CVA) и горизонтального (APA)) выраженных в единицах сигмального отклонения по представленным выборочным совокупностям (4).

$$ПОБ = (SDS_{(SVA)} + SDS_{(CVA)} + SDS_{(APA)}) / 3 \quad (4)$$

Статистическая обработка данных производилась с помощью пакета анализа данных Microsoft Excel-2013 и AtteStat 12.5. Количественные характеристики показателей в выборочных совокупностях представлялись в таблицах в виде ($M \pm \sigma$), а статистическая значимость различий определялась с использованием параметрического критерия Стьюдента. Уровень статистической значимости указывался по критерию « p » при $p < 0,05$.

Этическая экспертиза

Все исследования проведены в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками. На проведение исследований было получено разрешение комитета по этике при ФГБУ «НМИЦ ТО им. акад. Г.А. Илизарова». № 2(72) от 07.10.2022 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные показатели осевого баланса тела в положении стоя с опорой на всю стопу и на передний отдел стопы («на носках») представлены в таблице 1.

В ортостатике у здоровых обследованных не выявлено статистически значимых различий параметров в условиях основной стойки и «на носках».

Показатели динамического осевого баланса при обычной ходьбе и при функциональной пробе ходьба «на носках» представлены в таблицах 2, 3.

При отсутствии значимых различий в скоростях ходьбы обобщенные параметры балансов в трехкоординатном пространстве у мужчин и женщин также значимо не отличались. И хотя отсутствовали половые различия в отношении показателя APA в горизонтальной плоскости, у женщин по сравнению с мужчинами величины баланса SVA в сагиттальной проекции были больше ($p=0,0043$), а значения CVA — во фронтальной плоскости были меньше ($p=0,0011$).

При функциональной пробе «ходьба на носках» статистически значимых различий в балансировочной активности между полами не обнаружено, но относительно привычной ходьбы балансировочная амплитуда увеличивается у мужчин в сагиттальной плоскости ($p=0,00013$), а у женщин во фронтальной плоскости ($p=0,0045$). В горизонтальной проекции балансировочная активность увеличивается несущественно и статистически не значимо.

Окончательная картина половых различий в балансировочной активности обнаружилась при использовании функциональной пробы «ходьба на носках». В нормированных величинах трехкоординатного параметра осевого баланса (ПОБ) при ходьбе на носках вариационные характеристики баланса у женщин уменьшились на 3,5%, у мужчин существенно возросли: по сравнению с привычной ходьбой на 33,9%, по сравнению с женщинами — на 41,1%.

Значения коэффициентов вариации при оценке повторяемости и воспроизводимости показателей динамического баланса в условиях обычной ходьбы и при функциональной пробе «ходьба на носках» представлены в таблице 4.

Математически ожидаемые значения коэффициентов вариации по результатам десятикратной повторяемости и восьмикратной воспроизводимости конкретного

Таблица 1. Показатели осевого баланса тела в положении стоя ($M \pm \sigma$)

	Основная стойка	Функциональная проба на носках
Угол ротации плеч, град.	0,11±2,94	0,79±2,70
Угол ротации таза, град.	1,89±2,35	2,23±2,14
Угол acromion-pelvis (APA), град	1,88±2,55	1,75±2,53
Сагиттальный наклон (SVA), мм	6,21±16,0	2,50±15,6
Фронтальный наклон (CVA), мм	0,48±6,48	-1,01±5,17

Примечание: угол ротации плеча, таза, APA — отрицательные значения — ротация влево, положительные — ротация вправо; SVA — отрицательные значения — наклон вперед, положительные — наклон назад; CVA — отрицательные значения — наклон влево, положительные — наклон вправо.

Таблица 2. Показатели динамического осевого баланса тела при привычной ходьбе (M±σ)

Диапазон	Мужчин (n=10)	Женщин (n=9)
Скорость ходьбы, м/сек	1,30±0,14	1,19±0,12
ротации плеч, град.	11,8±3,23	10,6±2,96
ротации таза, град.	9,1±2,31	11,8±2,82
В горизонтальной плоскости (APA), град	16,2±2,78	15,8±3,96
В сагиттальной плоскости (SVA), мм	26,9±3,45	37,0±7,04 P¹=0,0043
Во фронтальной плоскости (CVA), мм	34,0±7,89	21,1±2,71 P¹=0,0011
Трёхкоординатный параметр осевого баланса, ПОБ (σ)	0,00±0,59	0,00±0,58

Примечание: «p¹» — значимость различий относительно «мужчин».

Таблица 3. Показатели динамического осевого баланса тела при ходьбе «на носках» (M±σ)

Диапазон	Мужчин (n=10)	Женщин (n=9)
Скорость	1,31±0,13	1,19±0,11
Ротации плеч, град.	12,1±3,21	11,9±3,32
Ротации таза, град.	12,2±2,19	13,7±2,47
В горизонтальной плоскости (APA), град	17,0±3,99	18,3±3,71
В сагиттальной плоскости (SVA), мм	39,9±4,58 P²=0,00013	39,2±4,27
Во фронтальной плоскости (CVA), мм	38,1±11,47	28,2±3,04 P²=0,0045
Трёхкоординатный параметр осевого баланса, ПОБ (σ)	0,00±0,79	0,00±0,56

Примечание: «p²» — значимость различий относительно «привычной ходьбы».

Таблица 4. Обобщенные значения коэффициентов вариации (Cv, %) по повторяемости и воспроизводимости показателей динамического баланса в трех проекциях (M±σ)

Диапазон	Повторяемость n=19		Воспроизводимость n=8	
	привычная ходьба	на носках	привычная ходьба	на носках
Угла ротации плеч	12,3±2,89	12,5±2,84	14,2±3,73	16,5±4,88
Угла ротации таза	15,8±4,2	12,8±4,1	18,2±3,63	12,9±5,35
В горизонтальной плоскости (APA)	9,3±3,97	10,0±3,5	10,0±1,99	7,5±2,48
В сагиттальной плоскости (SVA)	18,6±7,72	12,4±2,43	16,5±2,88	14,2±3,2
Во фронтальной плоскости (CVA)	12,6±3,67	14,8±5,45	13,2±2,19	16,9±4,86

обследуемого в соответствии с его расчетными показателями осевого баланса тела при обычной ходьбе и ходьбе «на носках» соответствовали следующим уровням вариации:

- в горизонтальной плоскости (APA) «низкий» (7,5–10,0%);
- во фронтальной плоскости (CVA) «средний» (12,6–16,9%);
- в сагиттальной плоскости (SVA) «средний» (12,4–18,6%);
- амплитуда угла ротации плеч и таза «средний» (12,3–18,2%).

ОБСУЖДЕНИЕ

Репрезентативность выборок

Показатели динамического осевого баланса в горизонтальной, сагиттальной и фронтальной плоскости в условиях привычной ходьбы и при функциональной пробе «ходьба на носках» по всем критериям приближались к функции нормального распределения. Следовательно, несмотря на неоднородность по полу, возрасту и ограниченному числу обследованных в представленных группах, рассмотренные выборочные совокупности не только репрезентативны, но и статистически однородны.

Сопоставление с другими публикациями

По данным литературы, оценка коэффициентов вариации по параметрам кинематики и кинетики из результатов 3D-видеоанализа ограничена. В основном в работах уделяется внимание временным параметрам цикла шага. Так, индивидуальная динамика уменьшения коэффициента вариации по длительности цикла шага является клиническим критерием положительной эффективности проводимого лечения у пациентов с идиопатической болезнью Паркинсона [14]. По коэффициенту вариации временных параметров цикла шага отмечена его значимость для прогнозирования мобильности и риска падения у пожилых людей [15], а также определения функциональной зрелости у типично развивающихся дошкольников по изменчивости длины шага ($Cv=18,02\%$) и ширины шага ($Cv=13,89\%$) [16]. Механизм поддержания вертикализации туловища был описан Жаном Феликсом Дюбуссе в 1975 г. как «конус экономии», в котором осевой скелет сбалансирован стопами, нижними конечностями, тазом, поясничным и шейным отделами позвоночника. Данные исследования с использованием системы визуализации, силовых платформ, поверхностной электроографии закрепили концепцию «конуса экономии» — как фундаментальной гипотетической теории локомоции человека [17]. Полученные нами результаты исследования аналогичны опубликованным данным: динамический осевой баланс тела в сагиттальной и фронтальной плоскостях так же соответствовал критерию «средний» [18]. Данных по горизонтальной плоскости в литературе нами не найдено.

3D-видеоанализ является самостоятельным исследованием, в динамике отражающим основные постуральные системообразующие составляющие в форме величин осевого баланса. При функциональной пробе «ходьба на носках» вариационные характеристики баланса у женщин уменьшались на 3,5%, у мужчин существенно возрастали: по сравнению с привычной ходьбой на 33,9%, по сравнению с женщинами — на 41,1% за счет усиления балансирующей активности в сагиттальной плоскости. Ротационные значения в горизонтальной плоскости (ротация плеч, таза, угол АРА) статистически значимо не меняются у мужчин и женщин. Механизм поддержания осевого баланса задействует фронтальную и сагиттальную плоскости с увеличением у мужчин значений в сагиттальной, а у женщин во фронтальной плоскости. По данным литературы отмечено, что стратегии компенсаторных механизмов поддержания баланса могут быть различными в разных ситуациях [3, 19].

В контексте «конуса экономии энергии» (COE — cone of economy) предложенного в 1975 г. J. Dubouset, при уменьшении площади опоры усиление балансирующей активности в сагиттальной плоскости является компенсаторным механизмом поддержания общего баланса тела [20]. При ходьбе на носках работа суставных мышц коленного и голеностопного суставов носит преимущественно статический характер; основную работу выполняют мышцы тазобедренного сустава, так как движения ноги происходят главным образом в этом суставе. У женщин сила мышц нижних конечностей меньше, чем у мужчин, и уменьшение площади опоры приводит к большему нарушению стабильности и увеличению боковых (фронтальных) колебаний.

Поскольку в обследованной выборочной совокупности пол и календарный возраст не обнаруживали значимого влияния на функцию распределения показателей осевого баланса, а гауссова стохастика исследуемых показателей по большинству критериев на нормальность не отвергалась, резонно предположить, что сенсорные системы, регулирующие и контролирующие динамический постуральный баланс осевого скелета как конечный приспособительный результат, имеют единую видовую генетически детерминированную морфофункциональную организацию [21].

Клиническая значимость результатов

Постуральный баланс тесно связан с функцией равновесия и является основным интегративным функциональным критерием сохранности ориентации тела в пространстве при прямохождении человека. В рамках профилактики вторичных нарушений и реабилитации пациентов полученные результаты позволяют оценивать степень влияния остеопороза и остеопатий на сохранность постурального баланса.

В литературе отмечено, что при патологии позвоночника более высокие балансирующие диапазоны колебаний в сагиттальной и фронтальной плоскостях коррелируют с ухудшением качества жизни [22]. Вместе с тем важность кинематической активности и ее вариационных составляющих в горизонтальной плоскости уже в 1965 г. была отмечена в работах братьев Discroquet [23].

Наряду с информативностью расчетных показателей в клинической практике в обязательном порядке рассматривается их надежность, которая в процессе использования всевозможных функциональных проб оценивается по критериям повторяемости и воспроизводимости получаемых результатов [24]. В проведенном исследовании коэффициенты вариации величин балансов, характеризующие повторяемость и воспроизводимость, были наименьшими для значений АРА (горизонтальная плоскость) и соответствовали критерию «незначительной степени» рассеивания данных. Математически ожидаемые значения коэффициентов вариации балансов в сагиттальной и фронтальной плоскостях соответствовали критерию «средней степени» рассеивания данных. Тем не менее, поскольку постуральная балансирующая регуляция осевого скелета осуществляется одновременно в трехплоскостном взаимодействии, то и динамический осевой баланс тела человека необходимо интегративно оценивать в трехкоординатном пространстве.

Ограничения исследования

Расширенное изучение балансирующих реакций в ответ на произвольные изменения темпа ходьбы могут стать информативными оценочными критериями и использоваться в качестве дополнительных функциональных проб.

Направления дальнейших исследований

Новизна исследования заключается в том, что впервые представлены нормативные значения динамического осевого баланса в трехмерном измерении для возрастной группы зрелого возраста (18–40 лет), что может стать ориентиром для дальнейших исследований у пациентов с нарушениями костного метаболизма, страдающих

остеопорозом, остеопатиями и у лиц в возрасте старше 60 лет. Учитывая, различия в физической модальности величин осевого баланса (мм и градусы) и их статистическое постоянство, приближающееся к функции нормального распределения целесообразно использовать нормированные значения баланса, а для количественной функциональной оценки сенсомоторных систем, регулирующих и контролируемых его постуральные величины применять правило сигмальных отклонений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены реперные нормативные значения динамического осевого баланса тела в возрастной группе 18–40 лет при обычной ходьбе и при функциональной пробе «ходьба на носках». В стохастической иерархии кинематических параметров осевого скелета баланс тела в горизонтальной плоскости — наиболее стабильная величина, которая в зрелом онтогенезе не только не обнаруживает статистически значимой зависимости от пола и календарного возраста, но также значимо не меняется при функциональной пробе «ходьба на носках». Угол АРА (диапазон осевого баланса в горизонтальной плоскости), полученный методом 3D-видеоанализа, имеет «незначительную степень» рассеивания данных, как в выбо-

рочной совокупности, так и при оценке повторяемости и воспроизводимости параметров. В оценке регуляторных механизмов постуральной балансировочной активности осевого скелета тела необходимо использовать интегративный трехкоординатный параметр осевого баланса в нормированных величинах.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источники финансирования. Результаты были получены с использованием ресурсов ФГБУ НМИЦ ТО им. академика Г.А. Илизарова в рамках НИР «Возрастная эволюция динамического баланса осевого скелета в локомоторных стереотипах по данным 3D-видеоанализа».

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи

Участие авторов. Долганова Т.И. — дизайн исследования, концепция статьи, подготовка статьи к печати; Чехлова Л.Ю. — сбор материала и обработка; Долганов Д.В. — анализ материала, обсуждение статьи, внесение в рукопись правки; Черепанов И.Д. — анализ литературы, подготовка данных.

Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией, выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью или добросовестностью любой части работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Haddas R, Kosztowski T, Mar D, et al. Balance effort, Cone of Economy, and dynamic compensatory mechanisms in common degenerative spinal pathologies. *Gait & Posture*. 2021;89(9):67-73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.04.038>
- Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю., и др. Сравнительный анализ мобильного приложения для измерения параметров сагиттального баланса «СпиноМетр» с системой Surgimap: апробация межэкспертной надежности. // *Гений ортопедии*. — 2021. — Т.27. — №1. — С.74-79. [Ivanov DV, Kirillova IV, Kossovich LYu, et al. Comparative analysis of the SpinoMeter mobile application and Surgimap system for measuring the sagittal balance parameters: inter-observer reliability test. *Genij Ortopedii*. 2021;27(1):74-79 (In Russ.)] doi: <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-1-74-79>
- Rizzato A, Benazzato M, Cognolato M, Grigoletto D, Paoli A, Marcolin G. Different neuromuscular control mechanisms regulate static and dynamic balance: A center-of-pressure analysis in young adults. *Human Movement Science*. 2023;90:103120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2023.103120>.
- Долганова Т.И., Аксенов А.Ю., Рябых С.О., Гарипов И.И. Методы и критерии оценки динамического сагиттального баланса тела (несистематизированный обзор). // *Гений ортопедии*. — 2021. — Т.27. — №6. — С.827-833. [Dolganova TI, Aksenov AYu, Ryabykh SO, Garipov II. Methods and Criteria for Assessing Dynamic Sagittal Body Balance (Non-systematic Review). *Genij Ortopedii*. 2021;27(6):827-833 (In Russ.)] doi: <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-827-833>
- Шульга А.Е., Зарецков В.В., Островский В.В., и др. Особенности сагиттального баланса пациентов при посттравматических деформациях грудного и поясничного отделов позвоночника. // *Гений ортопедии*. — 2021. — Т. 27. — №6. — С.709-716. [Shulga AE, Zaretskov VV, Ostrovskij VV, et al. Peculiarities of the sagittal balance of patients with post-traumatic deformities of the thoracic and lumbar spine. *Genij Ortopedii*. 2021; 27(6):709-716. (In Russ.)] doi: <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-709-716>
- Долганова Т.И., Аксенов А.Ю., Гарипов И.И., и др. Количественная оценка сагиттального и фронтально-латерального баланса осевого скелета методом 3D-видеоанализа. // *Гений ортопедии*. — 2023. — Т.29. — №3. — С. 307-315. [Dolganova TI, Aksenov AYu, Garipov II, et al. Quantitative assessment of the sagittal and coronal balance of the axial skeleton using 3D motion capture. *Genij Ortopedii*. 2023;29(3):307-315 (In Russ.)]. doi: <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2023-29-3-307-315>
- Бяловский Ю.Ю., Ракитина И.С. Повторяемость оценки восприятия разных величин дополнительного респираторного сопротивления. // *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины*. — 2022. — Т.12. — №2. — С.21-27. [Byalovsky YuYu, Rakitina IS. Repeatability of the assessment of perception of different values of additional respiratory resistance. *Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine*. 2022;12(2):21-27 (In Russ.)] doi: <https://doi.org/10.37279/2224-6444-2022-12-2-21-27>
- Мамаев А.Н., Кудлай Д.А. Статистические методы в медицине. М.: Практическая медицина. — 2021. — С.136. ISBN 978-5-98811-635-6 [Mamaev AN, Kudlai DA. Statistical methods in medicine. M: Practical medicine. 2022:136 (In Russ.)]
- Almarwani M, VanSwearingen J, Perera S, Sparto PJ, Brach JS. Challenging the motor control of walking: Gait variability during slower and faster pace walking conditions in younger and older adults. *Arch. Gerontol. Geriatr*. 2016;66:54-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.archger.2016.05.001>
- Nardone A, Tarantola J, Galante M, Schieppati M. Time course of stabilometric changes after a strenuous treadmill exercise. *Archives of physical medicine and rehabilitation*. 1998;79(8):920-924. doi: [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(98\)90088-0](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(98)90088-0)
- Аксенов А.Ю., Клишкова Т.А., Долганова Т.И. Программа анализа динамического баланса осевого скелета в локомоторных стереотипах по данным 3D видеоанализа. Свидетельство о государственной регистрации программы РФ № 2022684723; опубл. 16 декабря 2022 г. [Aksenov AYu, Klishkovskaya TA, Dolganova TI. Program for analyzing the dynamic balance of the axial skeleton in locomotor stereotypes based on 3D video analysis data. Certificate of state registration of the program of the Russian Federation No. 2022684723; published December 16, 2022. (In Russ.)]
- Pesenti S, Pomero V, Prost S, et al. Curve location influences spinal balance in coronal and sagittal planes but not transversal trunk motion in adolescents with idiopathic scoliosis: a prospective observational study. *Eur. Spine J*. 2020;29:1972-1980. doi: <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06361-3>

13. Зайцев Г.Н. Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М., «Наука» 1973. 256 с. [Zaitsev GN. Methodology of biometric calculations. Mathematical statistics in experimental botany. Moscow, «Nauka» 1973. 256 p. (In Russ).]
14. Ferreira F, Gago MF, Bicho E, et al. Gait stride-to-stride variability and foot clearance pattern analysis in Idiopathic Parkinson's Disease and Vascular Parkinsonism. *J Biomech.* 2019;92:98-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.05.039>
15. Kim B, Youm C, Park H, Lee M, Noh B. Characteristics of Gait Variability in the Elderly While Walking on a Treadmill with Gait Speed Variation. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(9):4704. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18094704>
16. Verbecque E, Vereeck L, Van de Heyning P, Hallemaans A. Gait and its components in typically developing preschoolers. *Gait Posture.* 2017;58:300-306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.08.012>
17. Hasegawa K, Dubousset JF. Cone of Economy with the Chain of Balance-Historical Perspective and Proof of Concept. *Spine Surg Relat Res.* 2022;6(4):337-349. doi: <https://doi.org/10.22603/ssrr.2022-0038>
18. De Blasiis P, Caravaggi P, Fullin A, et al. Postural stability and plantar pressure parameters in healthy subjects: variability, correlation analysis and differences under open and closed eye conditions. *Front Bioeng Biotechnol.* 2023;11:1198120. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1198120>
19. Haddas R, Satin A, Lieberman I. What is actually happening inside the «cone of economy»: compensatory mechanisms during a dynamic balance test. *Eur Spine J.* 2020;29(9):2319-2328. doi: <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06411-w>
20. El-Gohary TM, Al-Shenqiti AM, Ibrahim SR, Khaled OA, Elkader SMA. Clinical measurements of spinal mobility, static balance, and functional performance in healthy participants: a simple biokinesiologic analysis of performance. *J Phys Ther Sci.* 2019;31(10):771-775. doi: <https://doi.org/10.1589/jpts.31.771>
21. Долганов Д.В., Аксенов А.Ю., Долганова Т.И., Черепанов И.Д. Ротационный компонент туловища в локомоторных стереотипах у здоровых детей. // *Российский журнал биомеханики.* — 2025. — Т.29. — №1. — С.144–153. [Dolganov DV, Aksenov AYU, Dolganova TI, Cherepanov ID. Rotational component of the trunk in locomotor stereotypes in healthy children. *Russian Journal of Biomechanics.* 2025;29(1):144–153 (In Russ.)] doi: <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2025.1.09>
22. Haddas R, Sambhariya V, Kosztowski T, Block A, Lieberman I. Cone of economy classification: evolution, concept of stability, severity level, and correlation to patient-reported outcome scores. *Eur Spine J.* 2021;30(8):2271-2282. doi: <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06678-z>
23. Дюбуссе Ж. 3D в вертебральной патологии: горизонтальная плоскость спрятана в каждой сколиотической деформации. // *Хирургия позвоночника.* — 2021. — Т.18. — №2. — С.93–103. [Dubousset J. Three-dimensionality in vertebral pathology: the horizontal plane is hidden in every scoliotic deformity. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika).* 2021;18(2):93-103. (In Russ)] doi: <https://doi.org/10.14531/ss2021.2.93-103>
24. Lee T, Lee M, Youm C, Noh B, Park H. Association between Gait Variability and Gait-Ability Decline in Elderly Women with Subthreshold Insomnia Stage. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020;17:5181. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17145181>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ [AUTHORS INFO]

***Долганова Тамара Игоревна**, д.м.н. [Tamara I. Dolganova, MD, PhD]; адрес: Россия, 640021, Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6 [address: 6 M. Ulyanovoy Str., 640021, Kurgan, Russia]; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>; Researcher ID: B-8897-2018; Scopus ID: 7801649495; e-Library SPIN: 9221-3900; e-mail: rjik532007@rambler.ru

Чехлова Лада Юрьевна, аспирант [Lada Y. Chehlova, PhD student]; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0197-5840>; e-Library SPIN: 8598-0650; e-mail: Lada.sultanskaya.92@mail.ru

Долганов Дмитрий Владимирович, к.б.н. [Dmitrii V. Dolganov, PhD of Biological Sciences]; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>; e-Library SPIN: 6714-6049; e-mail: paradigma-dv@rambler.ru

Черепанов Иван Дмитриевич, аспирант [Ivan D. Cherepanov, PhD student]; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8261-8581>; e-Library SPIN: 7640-6344; e-mail: smilyha@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ

Рукопись получена: 08.10.2025. Одобрена к публикации: 02.03.2026.

ЦИТИРОВАТЬ:

Долганова Т.И., Чехлова Л.Ю., Долганов Д.В., Черепанов И.Д. Локомоторные характеристики осевого баланса тела в трехкоординатном пространстве // *Остеопороз и остеопатии.* — 2025. — Т. 28. — №4. — С.15-23. doi: <https://doi.org/10.14341/osteo13216>

TO CITE THIS ARTICLE:

Dolganova TI, Chehlova LY, Dolganov DV, Cherepanov ID. Calculated indicator of dynamic axial balance of the body — its reproducibility and repeatability by variation coefficient. *Osteoporosis and bone diseases.* 2025;28(4):15-23. doi: <https://doi.org/10.14341/osteo13216>