

Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 6. С. 827-833.

Genij Ortopedii. 2021. Vol. 27, no. 6. P. 827-833.

Обзорная статья

УДК 612.76:616.711-007.5:616.8-009.18-004.92

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-827-833>

Методы и критерии оценки динамического сагиттального баланса тела (несистематизированный обзор)

Т.И. Долганова^{1,2}, А.Ю. Аксенов¹, С.О. Рябых¹, И.И. Гарипов¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

² Курганский государственный университет, Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Тамара Игоревна Долганова, rjik532007@rambler.ru

Аннотация

Рентгенография позвоночника дает возможность оценить нарушения глобального сагиттального баланса позвоночника только в статике. В этой связи все большую актуальность приобретает оценка динамического сагиттального баланса по данным трехмерного (3D) анализа походки: баланса туловища в целом (в сагиттальной и фронтальной плоскостях) и пояснично-крестцового отдела в частности, определение компенсаторных механизмов, задействованных пациентом при ходьбе за счет сегментов тела и конечностей. Зарубежные публикации последнего десятилетия при анализе в поисковых ресурсах PubMed, e-Library, Cochrane Library, Scholar Google на эти темы немногочисленны, а отечественных и вовсе нет, что, в свою очередь, требует самостоятельного подробного анализа. **Цель.** Первичный анализ литературы с выявлением методов и критериев оценки динамического баланса тела. **Материалы и методы.** При подготовке обзора были использованы поисково-информационные ресурсы PubMed, eLibrary, Cochrane Library, Scholar Google. В ресурсе научной электронной библиотеки e-Library публикации оценки сагиттального динамического баланса отсутствуют, что, в свою очередь, требует самостоятельного подробного анализа. **Результаты и обсуждение.** В оценке динамического сагиттального баланса использовалась поструральная модель, учитывающая траекторию движения общего центра массы (CoP) под стопой. Оценивать компенсаторные механизмы для сохранения динамического сагиттального баланса возможно только по данным трехмерного (3D) анализа движения походки. Компенсированное / декомпенсированное состояние динамического баланса определяли по данным реакции опоры (Ground Reaction) в 3-х плоскостях, движения грудной клетки относительно таза, по оценке фронтального вертикального выравнивания (CVA-G) и сагиттального вертикального выравнивания (SVA-G). **Заключение.** Стандартный медицинский блок 3D-анализа походки позволяет количественно оценивать компенсаторные механизмы при нарушении сагиттального баланса, такие как паттерн синфазной / антифазной координации туловища относительно таза; компенсированное / декомпенсированное состояние динамического баланса по данным реакции опоры (Ground Reaction) в трех плоскостях; компенсаторные механизмы, проявляющиеся в параметрах кинетики и кинематики суставов нижней конечности. Оценка динамического сагиттального баланса осуществляется в лабораториях, где имеется программа с дополнительной расчетной опцией. При её формировании предложено два основных направления, учитывающие либо максимальное приближение к рентгенологическому критерию, либо максимальное приближение к анатомическому положению общего центра массы.

Ключевые слова: позвоночник, динамический сагиттальный баланс, критерии оценки, видеоанализ походки, платформа анализа ходьбы

Для цитирования: Методы и критерии оценки динамического сагиттального баланса тела (несистематизированный обзор) / Т.И. Долганова, А.Ю. Аксенов, С.О. Рябых, И.И. Гарипов // Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 6. С. 827-833. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-827-833>.

Review article

Methods and Criteria for Assessing Dynamic Sagittal Body Balance (Non-systematic Review)

T.I. Dolganova^{1,2}, A.Yu. Aksenov¹, S.O. Ryabikh¹, I.I. Garipov¹

¹ National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation

² Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Tamara I. Dolganova, rjik532007@rambler.ru

Abstract

Radiography of the spine makes it possible to assess disorders in the global sagittal balance of the spine only in statics. Therefore, the assessment of the dynamic sagittal balance according to the data of three-dimensional (3D) gait analysis including the balance of the trunk in general (in the sagittal and frontal planes) and the lumbosacral area, in particular, and determination of the compensatory mechanisms employed by the patient while walking due to the body segments and limbs, is getting more topical. Foreign publications on these topics in the last decade in the search resources of PubMed, e-Library, Cochrane Library and Scholar Google are not numerous, and there are no domestic ones at all, that, in turn, requires an independent detailed study. **Purpose** Primary analysis of the literature with the identification of methods and criteria for assessing the dynamic balance of the body. **Materials and Methods** In preparation of the review, the search and information resources of PubMed, eLibrary, Cochrane Library and Scholar Google were used. In the resources of the scientific e-Library, there are no publications on the sagittal dynamic balance, that, in turn, requires an independent detailed analysis. **Results and Discussion** The postural model that considers the trajectory of movement of the center of mass (CoP) below foot was used to assess the dynamic sagittal balance. It is possible to evaluate the compensatory mechanisms for maintenance of dynamic sagittal balance basing only on the data of three-dimensional (3D) analysis of gait motions. Compensated / decompensated condition of the dynamic balance was defined according to the data of the ground reaction in 3 planes, the motions of the chest with regards to the pelvis, and according to the evaluation of the frontal vertical alignment (CVA-G) and sagittal vertical alignment (SVA-G). **Conclusion** The standard medical block for 3D gait analysis allows to perform quantitative estimation of compensatory mechanisms for sagittal imbalance, such as in-phase / antiphase coordination pattern of the trunk with regards to the pelvis; the compensated / decompensated condition of the dynamic balance according to the Ground Reaction data in three planes; and compensatory mechanisms, manifested in the parameters of the kinetics and kinematics of the lower limb joints. Assessment of dynamic sagittal balance is carried out in laboratories, where there is a software with an additional calculation option. Two main directions were proposed for its formation, taking into account either the maximum approximation to the X-ray criterion, or to the anatomical position of the center of mass.

Keywords: spine, dynamic sagittal balance, assessment criteria, video gait analysis, gait analysis platform

For citation: Dolganova T.I., Aksenov A.Yu., Ryabikh S.O., Garipov I.I. Methods and Criteria for Assessing Dynamic Sagittal Body Balance (Non-systematic Review). *Genij Ortopedii*, 2021, vol. 27, no 6, pp. 827-833. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2021-27-6-827-833>.

ВВЕДЕНИЕ

Переход к прямохождению у человека осуществлялся через морфологическую адаптацию скелета в онтофилогенезе, в частности, нижних конечностей, таза и позвоночника [1]. Таз выступает в качестве свободного базиса и подвергается действию силы тяжести

от позвоночного столба, силе реакции опоры, передаваемой через головки бедренных костей [2]. Изгибы позвоночного столба позволяют сохранять нейтральное вертикальное выравнивание позвоночника в сагиттальной плоскости для снижения стрессовых нагрузок

на мышечно-связочные структуры – сагиттальный баланс [3, 4, 5].

Поддержание правильного положения позвоночника в сагиттальной плоскости имеет решающее значение для обеспечения горизонтального взгляда и направления гравитационных сил через проекцию общего центра давления между опорной поверхностью стоп без дополнительных компенсаторных механизмов [6, 7, 8, 9, 10]. Выравнивание позвоночника – это постуральная рентгенографическая информация, в настоящее время оцениваемая на статических рентгенограммах, которые служат основой для предоперационной и послеоперационной оценки пациентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При подготовке обзора были использованы поисково-информационные источники: научный поисковый портал PubMed, e-Library, Cochrane Library, Scholar

С позиции оценки сагиттального баланса методом 3D-видеоанализа движений рассматривается два аспекта биомеханики позвоночника: проблемы баланса туловища в целом (в сагиттальной и фронтальной плоскостях) и пояснично-крестцового отдела в частности. Зарубежные публикации последнего десятилетия при анализе в поисковых ресурсах PubMed, e-Library, Cochrane Library, Scholar Google на эти темы не столь многочисленны, а отечественных и вовсе нет, что, в свою очередь, требует самостоятельного подробного анализа.

Первичный анализ литературы с выявлением методов и критериев оценки динамического баланса тела определил **цель исследования**.

Googl, сайт Wiki компании C-motion, ресурсы научной электронной библиотеки e-library с 1980 по 2021 год включительно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры глобального баланса позвоночника принято рассматривать в контексте «конуса экономии энергии» (COE – cone of economy), предложенного в 1994 г. J. Dubousset [11]. Согласно данной концепции, оптимальный баланс позвоночного столба позволяет сохранять положение туловища внутри границ базы опоры (BOS – base of support), обозначенного конуса (с вершиной в области стоп) без дополнительных затрат энергии. Усугубление сагиттального дисбаланса приводит к положению туловища ближе к периферии конуса, что приводит к увеличению мышечных усилий и затрат энергии, вызывающих боль, усталость и нарушение трудоспособности. Данное состояние расценивается как компенсированный дисбаланс позвоночника. Если тело смещено за пределы конуса, поддержание равновесия невозможно без применения средств дополнительной опоры, и возникает декомпенсированный дисбаланс.

Учитывая, что линия тяжести должна находиться в пределах BOS, чтобы удовлетворять критериям устойчивости, следует учитывать следующие факторы:

- увеличение границ базы опоры (BOS) увеличивает стабильность (линия тяжести должна сместиться на большее расстояние, чтобы выйти за пределы BOS);

- смещение центра тяжести к центру увеличивает устойчивость (маловероятно, что линия тяжести выйдет за пределы BOS). В настоящее время данное исследование широко выполняется методом стабилометрии [12–16].

Для поддержания общего центра давления в пределах своей базы опоры (BOS) формируются биомеханические компенсаторные механизмы, которые выявляются при анализе данных кинетики походки [17].

В оценке изменения сагиттального баланса при ходьбе использовалась постуральная модель, учитывающая траекторию движения общего центра массы (CoP), который в норме под стопой перемещается от пяточного отдела к переднему отделу стопы и с отклонением медиально/латерально (рис. 1) [18, 19].

При отклонении траектории от нормы ЦНС пытается противодействовать гравитационным силам, регулируя выравнивание сегментов тела так, чтобы любое нарушение в этой биомеханической системе снижало эффективность эквивалентных реакций [20]. Существует значимая взаимосвязь между позой тела, эффективностью компенсаторных реакций и качеством походки [21]. В случаях незначительных деформаций компенсаторные реакции формируются в сагиттальной плоскости, но при выраженных аномальных искривлениях позвоночника во фронтальной плоскости – в виде изменения вариабельности шага [22]. Показано, что измененность кифотического и лордотического компонентов связаны с амплитудой смещения CoP. Сила корреляции угла лордоза для смещения CoP в сагиттальной плоскости составляет 0,999 и принимает линейное значение [20].

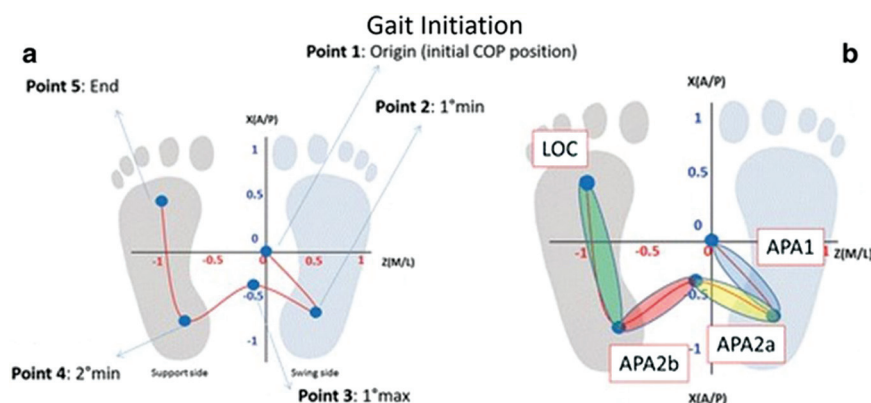


Рис. 1.: а – проекция центра давления (CoP -) смещения в передне-заднем и медио-латеральном направлении при ходьбе. Опорная конечность – левая ступня, неопорная – правая ступня; б – разделение траектории центра давления (CoP -) для анализа во времени цикла шага [18]

Но данный метод оценки сагиттального баланса не имеет общих параметров с оценкой статического сагиттального баланса по данным рентгенографии, который широко используется в клинической практике [23, 24, 25] в виде отклонения сагиттальной вертикальной оси (СВО) от линии отвеса, проведенной от центра тела С7 позвонка до проекции заднего края верхней замыкательной пластинки первого крестцового позвонка (S1) в горизонтальной плоскости. Данный параметр дает возможность оценить нарушение глобального сагиттального баланса позвоночника, и по определению Общества Исследования Сколиоза (Scoliosis Research Society) положительный сагиттальный баланс определяется при смещении СВО кпереди от межпозвонкового диска L5–S1. При этом смещение СВО кпереди более 5 см от заднего края верхней замыкательной пластинки S1 следует расценивать как нарушение сагиттального баланса [26]. Но этот рентгенологический параметр не дает информации о положении общего центра давления в базе опоры, и отсутствует корреляция с истинной линией гравитации (GL). С возрастом истинная линия гравитации (GL) в сагиттальной плоскости располагается кпереди от позвоночника, но проецируется в пределах базы опоры, в то время как увеличивается наклон таза кзади (ретроверсия таза), и исчезает поясничный лордоз. Повседневная деятельность и функциональные аспекты пациентов больше связаны с динамическим статусом позвоночно-тазового сегмента. Улучшение динамических параметров, измеренных с помощью трехмерного анализа, показало большую значимость для прогнозирования результатов хирургического вмешательства, чем угловые измерения, выполняемые при простой рентгенографии [27].

Динамический сагиттальный баланс можно оценить только по данным трехмерного (3D) анализа движения походки. Это позволяет понимать и оценивать компенсаторные механизмы, задействованные пациентом при ходьбе за счет сегментов тела и конечностей [28]. На сегодняшний день трехмерный анализ походки (3D Gait Analysis 3DGA) – «золотой стандарт» количественной оценки кинематики (углы) и кинетики (силы) суставов во время ходьбы и широко используется у различных групп пациентов с нарушениями походки.

Любое ненормальное изменение изгиба позвоночника приводит к компенсации, сначала на уровне таза посредством вращения, затем в нижних конечностях

посредством сгибания колена. Этот механизм поддерживает гравитационную линию в пределах базы опоры (BOS), но не эргономичен. Когда линия тяжести выходит за пределы этой базы опоры, регистрируются различные компенсаторные механизмы [29]:

- сокращение *m. erector spinae* поднимает туловище вертикально, требуя болезненных аномальных усилий со стороны мышц спины, чтобы предотвратить падение вперед;
- ретроверсия таза вокруг головок бедренных костей;
- гиперэкстензия бедер, тем не менее, имеет предел, известный как резерв разгибания, который обычно составляет 10°;
- сгибание колен при тяжелых формах; контролируется четырехглавой мышцей.

На примере больных с идиопатическим сколиозом Varghese et al. [30] продемонстрировали увеличение фронтального смещения (отвес С7 [C7–GL] более 30 мм) вправо с формированием компенсационных механизмов нижних конечностей во время походки, приводящее к значительному ограничению ипсилатерального отведения бедра, и уменьшение диапазона сгибания бедра и колена ($p < 0,05$). В оценке сагиттального баланса авторы предлагают учитывать комплекс параметров и их отклонения от нормы, но не определяют, какие значения и как отражают степень нарушения сагиттального баланса (табл. 1) [28]. Компенсированное / декомпенсированное состояние динамического баланса определяли по данным реакции опоры (Ground Reaction) в 3-х плоскостях. Kramers-de Quervain et al. [31] и Schizas et al. [32] сообщили, что величина асимметрий в вертикальной составляющей силы реакции опоры у пациентов с подростковым идиопатическим сколиозом не превышала 4 %, что было сопоставимо с нормой, опубликованной Herzog et al. [33]. Однако Chen et al. [34] регистрировали нарушения постуральной стабильности у пациентов со сколиозом с увеличением амплитуды колебаний во фронтальной и сагиттальной плоскостях. Подобные данные отмечены и авторами данной работы (рис. 2).

Движение грудной клетки относительно таза (thoraco-pelvic coordination) может быть классифицировано как синфазное (патологическое), если 2 сегмента вращаются вместе в том же направлении, или антифазное (нормальное), если есть вращение 2-х сегментов в противоположных направлениях (рис. 3) [35].

Таблица 1

Параметры силы ходьбы (кинетика) при исследовании пациентов с патологией позвоночника

Параметры	Определение и примечания	Плоскость измерения
Ground reaction force (BW) – Сила реакции опоры	Положительное значение силы реакции опоры, нормированное на массу тела	передняя/задняя, медиальная/латеральная, вертикальная
Joint moments (Nm/kg) – Кинетика движений суставов	Тазобедренный, коленный, голеностопный суставы	сагиттальная, фронтальная, горизонтальная
Power peak (W/kg) – Максимальная мощность (<i>positive peak</i>)	Произведение внутреннего суставного момента и угловая скорость сустава	сагиттальная, фронтальная, горизонтальная
Work (Работа) Суммарная площадь W/kg (<i>positive + negative W/kg</i>)	Суммарная мощность интегрирована во времени; отрицательное значение (<i>negative W/kg</i>) указывает на поглощение энергии (через эксцентрическую мускулатуру)	сагиттальная, фронтальная, горизонтальная

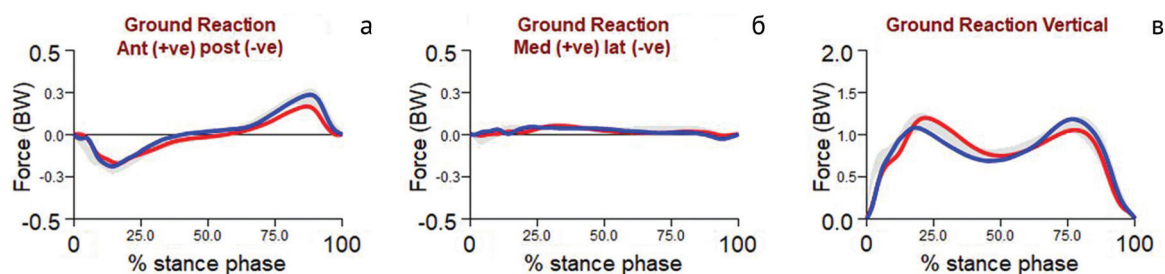


Рис. 2. Данные реакции опоры пациентки 9 лет с идиопатическим сколиозом 4 степени (Lenke I). Отмечена асимметрия реакции опоры: а – сагиттальная плоскость – 23 %, б – фронтальная плоскость – 3 %, в – вертикальная составляющая – 14 %

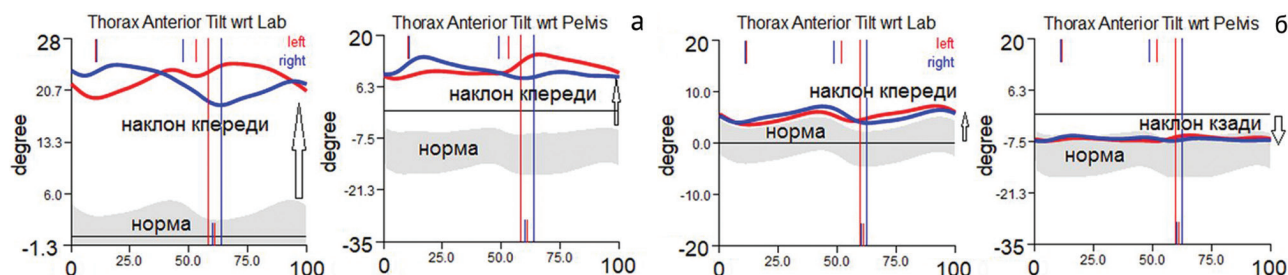


Рис. 3: а – **паттерн синфазной координации** – грудная клетка относительно пола и таза имеет наклон кпереди; б – **паттерн антифазной координации**. Грудная клетка относительно пола наклонена кпереди, относительно таза – кзади

Изучая синфазную или антифазную координацию при нарушенном сагиттальном балансе в статике, Park et al. [36] обнаружили, что пациенты с подростковым идиопатическим сколиозом продемонстрировали значительно более высокую синфазность и более низкую антифазную координацию ($p < 0,05$), что привело к снижению неустойчивости во время ходьбы по сравнению со здоровым контролем.

Измерение профиля осанки в статике и при ходьбе проводится по оценке фронтального вертикального выравнивания (CVA-G) и сагиттального вертикального выравнивания (SVA-G). Они определяются как горизонтальное расстояние от S2 к вертикальной линии, опущенной от C7 во фронтальной и сагиттальные плоскости, соответственно в момент первоначального контакта при каждом шаге с опорой на правую или левую конечность. Данные критерии были предложены в качестве максимально тождественных к ранее описанным рентгенографическим параметрам CVA-R и SVA-R. В расчет берутся значения на момент начала опоры.

Для анализа компенсаторных механизмов при дисбалансе предложено рассматривать динамический баланс во время ходьбы [37, 38] как взаимосвязь между общим центром масс (CoM) и расстоянием от него общего центра давления (CoP). Общий центр масс (CoM) является точечным эквивалентом общей массы тела в глобальной системе отсчета, общий центр давления (CoP) является точкой расположения вектора вертикальной силы реакции опоры. Было описано, что CoP колеблется по обе стороны от CoM, где амплитуда смещений CoP всегда превышает амплитуду смещений CoM.

CoM находится вокруг позвонка S2 [39], поэтому информация от маркера S2 использовалась для оценки моментов, связанных с CoM, как показано следующим уравнением:

$$\text{Net Moment (M)} = F_x(\text{Perpendicular distance (Z) between CoP and S2}) + F_z(\text{Perpendicular distance (X) between CoP and S2}).$$

Переменными, используемыми в этом исследовании, являются максимальное и минимальное смещение проекции CoP относительно проекции S2 позвонка на уровень пола. Общий центр давления (CoP) оценивался с использованием следующих уравнений:

$$\text{CoP}_{AP} = M_{ML} / F_z \text{ и } \text{CoP}_{AP} = -M_{AP} / F_z,$$

где M_{ML} и M_{AP} – моменты вокруг медиолатерального (ML) и передне-заднего компонентов (AP), а F_z – вертикальная сила [39].

Максимальное и минимальное смещение CoP определяется по максимальной и минимальной координате CoP в медиолатеральной и передне-задней оси стопы. Динамический дисбаланс ходьбы оценивался с использованием расчетного динамического запаса стабильности (DSM – расстояние между экстраполированным центром масс и основанием опоры).

Изменения параметров расстояния в цикле шага были рассчитаны для правой и левой стороны [40] с определением индекса симметрии (SI) по формуле:

$$SI = [(X1 - X2) / 0,5 \times (X1 + X2)] \times 100,$$

где X1 – амплитуда смещения CoP на правой конечности, X2 – амплитуда смещения CoP на левой конечности [37]. Индекс симметрии, равный «0», указывает на то, что силовой параметр одинаков на обеих ногах.

Авторы не выявили корреляции между рентгенографическими данными в статике (CVA-R и SVA-R) и данными 3D-анализа при ходьбе (CVA-G и SVA-G) для фронтальной и сагиттальной плоскости. Однако выявлена положительная корреляционная связь между SVA-R – SVA-G в сагиттальной проекции ($p < 0,05$) и CVA-R – CVA-G во фронтальной плоскости ($p < 0,01$) при регистрации рентгенологических параметров в статике и кинематике 3D-видеоанализа ходьбы [41].

Параметр COG вариабелен, поскольку в анатомическом положении общий центр массы (CoM) или общий центр гравитации (COG) лежит примерно впереди S2 позвонка, и точное расположение COG постоянно

меняется с каждым новым положением тела и конечностей. Пропорции тела человека также будут влиять на расположение COG. Пространственная ориентация таза является ключевой областью для передачи нагрузки от туловища [42]. Общий центр массы (гравитации – COG) был определен по данным магнитно-резонансной томографии вместе с системой видеозахвата движения как точка со смещением на 4 см в передне-заднем направлении от середины между точками ASIS – передние верхние подвздошные ости [43]. Предложено в норме положение центра тяжести определять в плоскости таза (перпендикулярной главной оси тела) на среднем расстоянии сегмента соответствующей оси (рис. 4).

При ходьбе общий центр массы (COG) имеет амплитуду колебаний относительно средней точки между ASIS (точки маркеров передней верхней ости подвздошной кости) в переднем / заднем направлении приблизительно 4 см, в верхнем / нижнем – более 5 см и минимальную – в правом / левом направлении во время цикла шага [44].

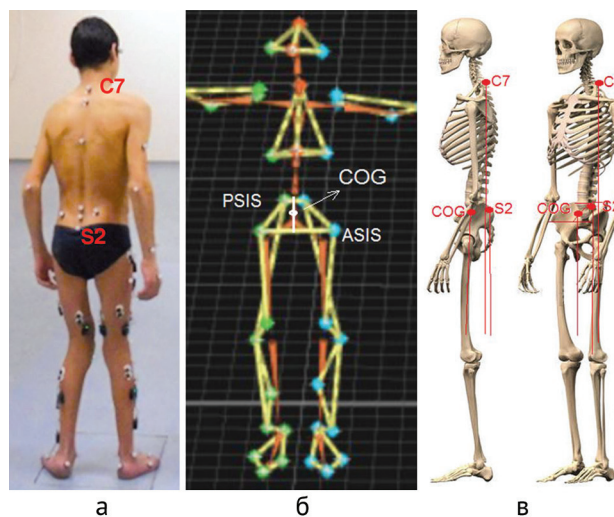


Рис. 4.: а – установка маркеров в процессе исследования 3D-анализа походки (3DGA); б – схема установки маркеров для определения плоскости таза и расчетного общего центра гравитации (массы) – COG; в – схема определения расстояния между проекциями общего центра давления (CoP), S2 позвонка и общим центром гравитации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стандартный медицинский блок 3D-анализа походки позволяет оценивать компенсаторные механизмы при нарушении сагиттального баланса тела, такие как:

- паттерн синфазной / антифазной координации туловища относительно таза;
- компенсированное / декомпенсированное состояние динамического сагиттального баланса по данным реакции опоры (Ground Reaction) в трех плоскостях;
- компенсаторные механизмы, проявляющиеся в параметрах кинетики и кинематики суставов нижней конечности.

Оценка динамического сагиттального баланса требует формирования программы дополнительной расчетной опции. В лабораториях клинической биомеханики предложено два основных направления оценки динамического сагиттального баланса:

- 1) расчет отклонений и диапазон движения в 3-х плоскостях проекции точки от C7 позвонка относи-

тельно проекции точки от S2 позвонка на опорной плоскости. Данный показатель в статике максимально приближен к рентгенологическому критерию нарушения сагиттального баланса в статике, но отсутствует корреляция между рентгенографическими данными и данными 3D-анализа при ходьбе;

- 2) расчет отклонений и диапазон движения проекции точки от C7 позвонка относительно точки проекции COG (общего центра массы), расположенного в проекции плоскости таза, со смещением к центру относительно системы координат от средней точки линии ASIS (передние верхние подвздошные ости) на опорной плоскости. COG (общий центр массы) определен по данным магнитно-резонансной томографии вместе с системой видеозахвата движения и максимально приближен к анатомическому положению общего центра масс, но отсутствует его корреляция с рентгенологическим критерием нарушения сагиттального баланса не только при ходьбе, но и в статике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects / R. Vialle, N. Levassor, L. Rillardon, A. Templier, W. Skalli, P. Guigui // J. Bone Joint Surg. Am. 2005. Vol. 87, No 2. P. 260-267. DOI: 10.2106/JBJS.D.02043.
2. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis / P. Stagnara, J.C. De Mauroy, G. Dran, G.P. Gonon, G. Costanzo, J. Dimnet, A. Pasquet // Spine (Phila Pa 1976). 1982. Vol. 7, No 4. P. 335-342. DOI: 10.1097/00007632-198207000-00003.
3. A new look at the geometry of the lumbar spine / E. Been, A. Barash, H. Pessah, S. Peleg // Spine (Phila Pa 1976). 2010. Vol. 35, No 20. P. E1014-E1017. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ddd433.
4. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis / C. Boulay, C. Tardieu, J. Hecquet, C. Benaïm, B. Mouilleseaux, C. Marty, D. Prat-Pradal, J. Legaye, G. Duval-Beaupère, J. Pélissier // Eur. Spine J. 2006. Vol. 15, No 4. P. 415-422. DOI: 10.1007/s00586-005-0984-5.
5. Adult spinal deformity-postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery / F. Schwab, A. Patel, B. Ungar, J.P. Farcy, V. Lafage // Spine (Phila Pa 1976). 2010. Vol. 35, No 25. P. 2224-2231. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ee6bd4.
6. Spinal alignment versus spinal balance / J. Dubousset, V. Chailier, J.P. Farcy, F.J. Schwab, V. Lafage // Global spinal alignment: principles, pathologies, and procedures / R.W. Haid, F.J. Schwab, C.I. Shaffrey, J.A. Youssef, editors. St. Louis, MO: Quality Medical Publishing. 2014. P. 3-9.
7. Pelvic tilt and truncal inclination: two key radiographic parameters in the setting of adults with spinal deformity / V. Lafage, F. Schwab, A. Patel, N. Hawkinson, J.P. Farcy // Spine (Phila Pa 1976). 2009. Vol. 34, No 17. P. E599-E606. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181aad219.
8. Sagittal plane considerations and the pelvis in the adult patient / F. Schwab, V. Lafage, A. Patel, J.P. Farcy // Spine (Phila Pa 1976). 2009. Vol. 34, No 17. P. 1828-1833. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181a13c08.
9. Sagittal thoracic decompensation following long adult lumbar spinal instrumentation and fusion to L5 or S1: causes, prevalence, and risk factor analysis / Y.J. Kim, K.H. Bridwell, L.G. Lenke, S. Rhim, G. Cheh // Spine (Phila Pa 1976). 2006. Vol. 31, No 20. P. 2359-2366. DOI: 10.1097/01.brs.0000238969.59928.73.

10. Analysis of an unexplored group of sagittal deformity patients: low pelvic tilt despite positive sagittal malalignment / E. Ferrero, S. Vira, C.P. Ames, K. Kebaish, I. Obeid, M.F. O'Brien, M.C. Gupta, O. Boachie-Adjei, J.S. Smith, G.M. Mundis, V. Challier, T.S. Protopsaltis, F.J. Schwab, V. Lafage; International Spine Study Group // *Eur. Spine J.* 2016. Vol. 25, No 11. P. 3568-3576. DOI: 10.1007/s00586-015-4048-1.
11. Dubousset J. Three-dimensional analysis of the scoliotic deformity. Chapter 22 // *The Pediatric Spine: principles and practice* / Weinstein S.L., editor. New York: Raven Press. 1994. P. 479-496.
12. Haddas R., Lieberman I.H. A method to quantify the "cone of economy" // *Eur. Spine J.* 2018. Vol. 27, No 5. P. 1178-1187. DOI:10.1007/s00586-017-5321-2.
13. Гроховский С.С., Кубряк О.В. Инструментальное тестирование вертикальной устойчивости (на стабиллоплатформе) // *Подиатрия*. 2013. № 2. С. 63-64.
14. Особенности движений центра тяжести у женщин 55-64 лет с риском развития гериатрического синдрома падений / А.В. Дёмин, А.В. Грибанов, М.Н. Панков, О.Н. Попова, А.Б. Гудков // *Журнал медико-биологических исследований*. 2018. Т. 6, № 1. С. 5-13. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2018.6.1.5.
15. Смирнова Л.М. Биомеханические показатели перегрузки сохранной конечности у пациентов с ампутацией голени, бедра или вычленением в тазобедренном суставе // *Гений ортопедии*. 2018. Т. 24, № 1. С. 50-56. DOI 10.18019/1028-4427-2018-24-1-50-56.
16. Особенности нарушения статодинамической функции у пациентов с ампутационными дефектами стопы и их компенсация протезно-ортопедическими изделиями / А.А. Трофимов, Л.М. Смирнова, И.В. Шведовченко, О.Э. Гаевская // *Гений ортопедии*. 2018. Т. 24, № 2. С. 204-208. DOI 10.18019/1028-4427-2018-24-2-204-208.
17. Gravity line analysis in adult volunteers: age-related correlation with spinal parameters, pelvic parameters, and foot position / F. Schwab, V. Lafage, R. Boyce, W. Skalli, J.P. Farcy // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006. Vol. 31, No 25. P. E959-E967. DOI: 10.1097/01.brs.0000248126.96737.0f.
18. Gait initiation and termination strategies in patients with Prader-Willi syndrome / V. Cimolin, N. Cau, M. Galli, C. Santovito, G. Grugni, P. Capodaglio // *J. Neuroeng. Rehabil.* 2017. Vol. 14, No 1. P. 44. DOI: 10.1186/s12984-017-0257-7.
19. Center of pressure displacements during gait initiation in individuals with obesity / N. Cau, V. Cimolin, M. Galli, H. Precilios, E. Tacchini, C. Santovito, P. Capodaglio // *J. Neuroeng. Rehabil.* 2014. Vol. 11. P. 82. DOI: 10.1186/1743-0003-11-82.
20. Evaluation of the association between postural control and sagittal curvature of the spine / A.Ł. Żurawski, W.P. Kiezbak, I.M. Kowalski, G. Śliwiński, Z. Śliwiński // *PLoS One*. 2020. Vol. 15, No 10. e0241228. DOI: 10.1371/journal.pone.0241228.
21. Baczkowicz D., Szczegielniak J., Proszkowiec M. Relations between postural stability, gait and falls in elderly persons – preliminary report // *Ortop. Traumatol. Rehabil.* 2008. Vol. 10, No 5. P. 478-485.
22. Relations between standing stability and body posture parameters in adolescent idiopathic scoliosis / M.L. Nault, P. Allard, S. Hinse, R. Le Blanc, O. Caron, H. Labelle, H. Sadeghi // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002. Vol. 27, No 17. P. 1911-1917. DOI: 10.1097/00007632-200209010-00018.
23. Восстановление сагиттального позвоночно-тазового баланса у больного с сочетанным поражением тазобедренных суставов и позвоночника (клиническое наблюдение) / В.М. Шаповалов, В.А. Аверкиев, А.Л. Кудяшев, В.А. Артюх, Б.Я. Капилевич // *Гений ортопедии*. 2011. № 3. С. 152-155.
24. Сравнительный анализ мобильного приложения для измерения параметров сагиттального баланса "Спинометр" с системой surgimap: апробация межэкспертной надежности / Д.В. Иванов, И.В. Кириллова, Л.Ю. Коссович, С.В. Лихачев, А.В. Полиенко, А.В. Харламов, А.Е. Шульга // *Гений ортопедии*. 2021. Т. 27, № 1. С. 74-79. DOI: 10.18019/1028-4427-2021-27-1-74-79.
25. Влияние локального лордозизирующего трансформинального межтелового спондилодеза на смежные сегменты и позвоночно-тазовые отношения. Рентгенологическое исследование / А.Я. Алейник, С.Г. Млявых, А.Е. Боков, М.В. Тарамженин // *Гений ортопедии*. 2018. Т. 24, № 3. С. 341-348. DOI 10.18019/1028-4427-2018-24-3-341-348.
26. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity / S.D. Glassman, K. Bridwell, J.R. Dimar, W. Horton, S. Berven, F. Schwab // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005. Vol. 30, No 18. P. 2024-2029. DOI: 10.1097/01.brs.0000179086.30449.96.
27. Influence of spino-pelvic and postural alignment parameters on gait kinematics / J. Otayek, A.J. Bizdikian, F. Yared, E. Saad, Z. Bakouny, A. Massaad, J. Ghanimeh, C. Labaki, W. Skalli, I. Ghanem, G. Kreichati, A. Assi // *Gait Posture*. 2020. Vol. 76. P. 318-326. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.12.029.
28. From Static Spinal Alignment to Dynamic Body Balance: Utilizing Motion Analysis in Spinal Deformity Surgery / B.G. Diebo, N.V. Shah, R. Pivec, Q. Naziri, A. Patel, N.H. Post, A. Assi, E.M. Godwin, V. Lafage, F.J. Schwab, C.B. Paulino // *JBJS Rev.* 2018. Vol. 6, No 7. P. e3. DOI: 10.2106/JBJS.RVW.17.00189.
29. Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics / J.C. Le Huec, R. Saddiki, J. Franke, J. Rigal, S. Aunoble // *Eur. Spine J.* 2011. Vol. 20, No Suppl. 5. P. 558-563. DOI: 10.1007/s00586-011-1939-7.
30. The Relationship between Coronal Malalignment and Gait Patterns: Preliminary Analysis on a Prospectively Collected AIS Database / J.J. Varghese, A. Patel, B.G. Diebo, A. Assi, E. Godwin, L.M. Day, H. Bao, V. Lafage, C. Paulino // *Spine J.* 2016. Vol. 16, No 10. P. S348. DOI: 10.1016/j.spinee.2016.07.454.
31. Gait analysis in patients with idiopathic scoliosis / I.A. Kramers-de Quervain, R. Müller, A. Stacoff, D. Grob, E. Stüssi // *Eur. Spine J.* 2004. Vol. 13, No 5. P. 449-456. DOI: 10.1007/s00586-003-0588-x.
32. Gait asymmetries in patients with idiopathic scoliosis using vertical forces measurement only / C.G. Schizas, I.A. Kramers-de Quervain, E. Stüssi, D. Grob // *Eur. Spine J.* 1998. Vol. 7, No 2. P. 95-98. DOI: 10.1007/s005860050037.
33. Asymmetries in ground reaction force patterns in normal human gait / W. Herzog, B.M. Nigg, L.J. Read, E. Olsson // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1989. Vol. 21, No 1. P. 110-114. DOI: 10.1249/00005768-198902000-00020.
34. The postural stability control and gait pattern of idiopathic scoliosis adolescents / P.Q. Chen, J.L. Wang, Y.H. Tsuang, T.L. Liao, P.I. Huang, Y.S. Hang // *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*. 1998. Vol. 13, No 1 Suppl. 1. P. S52-S58. DOI: 10.1016/s0268-0033(97)00075-2.
35. Pelvis-shoulder coordination during level walking in patients with ankylosing spondylitis / M. Mangone, P. Scettri, M. Paoloni, R. Procaccianti, A. Spadaro, V. Santilli // *Gait Posture*. 2011. Vol. 34, No 1. P. 1-5. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2011.02.002.
36. Analysis of coordination between thoracic and pelvic kinematic movements during gait in adolescents with idiopathic scoliosis / H.J. Park, T. Sim, S.W. Suh, J.H. Yang, H. Koo, J.H. Mun // *Eur. Spine J.* 2016. Vol. 25, No 2. P. 385-393. DOI: 10.1007/s00586-015-3931-0.
37. Assessment of the centre of pressure pattern and moments about S2 in scoliotic subjects during normal walking / N. Chockalingam, S. Bandi, A. Rahmatalla, P.H. Dangerfield, el-N. Ahmed // *Scoliosis*. 2008. Vol. 3. P. 10. DOI: 10.1186/1748-7161-3-10.
38. Lafond D., Duarte M., Prince F. Comparison of three methods to estimate the center of mass during balance assessment // *J. Biomech.* 2004. Vol. 37, No 9. P. 1421-1426. DOI: 10.1016/S0021-9290(03)00251-3.
39. Gard S.A., Miff S.C., Kuo A.D. Comparison of kinematic and kinetic methods for computing the vertical motion of the body center of mass during walking // *Hum. Mov. Sci.* 2004. Vol. 22, No 6. P. 597-610. DOI: 10.1016/j.humov.2003.11.002.
40. Assessment of stability during gait in patients with spinal deformity – A preliminary analysis using the dynamic stability margin / A.L. Simon, V. Lugade, K. Bernhardt, A.N. Larson, K. Kaufman // *Gait Posture*. 2017. Vol. 55. P. 37-42. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.03.036.
41. Prospective dynamic functional evaluation of gait and spinal balance following spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis / L.G. Lenke, J.R. Engsborg, S.A. Ross, A. Reitenbach, K. Blanke, K.H. Bridwell // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001. Vol. 26, No 14. P. E330-E337. DOI: 10.1097/00007632-200107150-00020.
42. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves / J. Legaye, G. Duval-Beaupère, J. Hecquet, C. Marty // *Eur. Spine J.* 1998. Vol. 7, No 2. P. 99-103. DOI: 10.1007/s005860050038.

43. Methods to locate center of gravity in scoliosis / J.R. Engsborg, L.G. Lenke, K.W. Hollander, M.L. Uhrich, P.K. Commean, J.R. Lee, K.T. Bae // Spine (Phila Pa 1976). 2003. Vol. 28, No 23. P. E483-E489. DOI: 10.1097/01.BRS.0000099093.36335.16.
44. Center of Mass of Human's Body Segments / M. Adolphe, J. Clerval, Z. Kirchof, R. Lacombe-Delpech, B. Zagrodny // Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 21, No 3. P. 485-497.

Статья поступила в редакцию 08.07.2021; одобрена после рецензирования 23.08.2021; принята к публикации 19.10.2021.

The article was submitted 08.07.2021; approved after reviewing 23.08.2021; accepted for publication 19.10.2021.

Информация об авторах:

1. Тамара Игоревна Долганова – доктор медицинских наук, rjik532007@rambler.ru;
2. Андрей Юрьевич Аксенов – a.aksenov@hotmail.com;
3. Сергей Олегович Рябых – доктор медицинских наук, rso_@mail.ru;
4. Илгиз Ильдарович Гарипов – ilgizgaripow@yandex.ru.

Information about the authors:

1. Tamara I. Dolganova – Doctor of Medical Sciences, rjik532007@rambler.ru;
2. Andrey Yu. Aksenov – Ph.D, a.aksenov@hotmail.com;
3. Sergey O. Ryabykh – Doctor of Medical Sciences, rso_@mail.ru;
4. Ilgiz I. Garipov – ilgizgaripow@yandex.ru.

Статья выполнена в рамках темы «Разработка критериев комплексной оценки динамического баланса (дисбаланса) осевого скелета у пациентов с патологией позвоночника при нейромышечных заболеваниях для обоснования индивидуализированных программ хирургической коррекции» государственного задания на осуществление научных исследований и разработок ФГБУ «НМИЦ ТО им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России.