Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите
Директор ВШТМиМФ,
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
А. М. Кривцов
«___»_____2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Моделирование позвоночника с помощью пассивных маркеров для расчёта сагиттального баланса

по направлению подготовки
01.03.03 «Механика и математическое моделирование»
профиль
01.03.03_02 Биомеханика и медицинская инженерия

Выполнил
студент гр. 5030103/80201 Н.М. Милчев

Руководитель
доцент ВШТМиМФ
к.ф.-м.н. А. Ю Аксенов

Санкт-Петербург
2022

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

УТВЕРЖДАЮ

Директор Высшей школы теоретической механики и математической физики

А. М. Кривцов

«__» 2022 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Милчеву Николе Мариновичу, группа 5030103/80201

фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: Моделирование позвоночника с помощью пассивных маркеров для расчёта сагиттального баланса

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 06.06.2022
3. Исходные данные по работе:
Литература по анализу изменения сагиттального баланса, литература для работы в Qualisys и C-motion для анализа движений, медицинские энциклопедии по строению позвоночника

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
   1) Обзор научной литературы по теме изучения сагиттального баланса
   2) Разработка алгоритмов по определению сагиттальных параметров.
   3) Выделение циклов шагов движения
   4) Анализ изменения параметров в динамике шага и статике.

Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей

использованные маркеры для видеоанализа и их расположение на теле
5. Консультанты по работе: не предусмотрены.

6. Дата выдачи задания 13.05.2022

Руководитель ВКР _____ А. Ю. Аксенов

(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 13.05.2022

(дата)

Студент _____ Н.М. Милчев

(подпись) инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 32 с., 22 рисунков, 8 таблиц

ДИНАМИЧЕСКИЙ САГИТТАЛЬНЫЙ БАЛАНС, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ, ПОХОДКА ЧЕЛОВЕКА, ШАГОВЫЙ ЦИКЛ.

Данная работа посвящена разработке маркерного анализа позвоночника в статике и динамике. Представлен обзор методов расчета параметров сагиттального баланса и выделения событий циклов шага. На основе обзора методов выделения циклов шага был реализован метод для выделения событий циклов шага. Произведен анализ результата маркерного анализа.

ABSTRACT

32 pages, 22 figures, 8 tables

DYNAMIC SAGITTAL BALANCE, EVALUATION CRITERIA, HUMAN GAIT, gait cycle.

This work is devoted to the development of marker analysis of the spine in statics and dynamics. A review of methods for calculating the parameters of the sagittal balance and highlighting the events of gait cycles is presented. Based on a review of the methods for highlighting step cycles, a method was implemented to highlight the events of step cycles. The analysis of the result of the marker analysis was carried out.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
ГЛАВА 1 ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИЗУЧЕНИЯ САГИТТАЛЬНОГО БАЛАНСА 7
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ САГИТТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ 10
1. Выбор анатомической плоскости 10
2. Расчёт вертикальной оси на основе смещения относительно позвонка S2 11
3. Расчёт вертикальной оси на основе смещения относительно общего центра гравитации 11
4. Расчет грудного кифоза 11
5. Расчет поясничного лордоза 12
6. Выделение циклов шагов движения 12
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ДИНАМИКЕ ШАГА И СТАТИКЕ 17
7. Сагиттальная вертикальная ось 19
8. Фронтальная вертикальная ось 24
9. Грудной кифоз 28
10. Поясничный лордоз 33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 38

Введение

Проблема заболеваний позвоночника стоит очень остро в современном мире. В России зафиксировали 13356,6 случаев заболеваний костно-мышечная системы на 100 000 человек среди взрослого населения и 5621,2 случаев среди детей за 2018 год [6]. Для взрослого населения России заболевания костно-мышечная системы является 26,8% от всех случаев заболеваний, и самой большой группой заболеваний.

Существуют методики, позволяющие диагностировать заболевания опорно-двигательной системы, среди них можно выделить следующие:

– Рентгенография.

– УЗИ позвоночника.

– Магнитно-резонансная томография.

– Компьютерная томография.

– Видеоанализ кинематики движения человека.

Несмотря на то, что золотым стандартом методологии является рентгенографии [2], изучение первых четырех указанных способов наводит, на решаемую проблему: отсутствие возможности анализировать позвоночник в динамике. Данная проблему позволяет обойти последняя методика, видеоанализ, которая позволяет реконструировать скелет человека в движении и провести динамическую оценку параметров позвоночника. Сагиттальный баланс является одним из ключевых параметров для оценки опорно-двигательного аппарата.

Сагиттальный баланс позвоночника – это физиологическое выравнивание позвоночника наиболее эффективным образом мышечными силами. Параметры сагиттального баланса принято рассматривать согласно концепции «конуса экономии энергии», предложенной в 1994 году Ж. Дюбуссе [9]. Согласно ней оптимальный баланс позвоночного столба позволяет сохранить положение туловища внутри границ базы опоры обозначенного конуса, вершина которого располагается под ступнями, а

основание конуса находится на уровне плеч, без избыточных затрат энергии. Сагиттальный дисбаланс приводит положение тела к границам конуса, что вызывает повышенные мышечные усилия и затраты энергии. Смещение за границы вызывает декомпрессионный дисбаланс и приводит к невозможности поддержания туловища без дополнительных систем опоры. Для поддержания общего центра давления в пределах своей базы опоры формируются биомеханические компенсаторные механизмы, которые в случае незначительных деформаций возникают в сагиттальной плоскости и при выраженных аномальных искривлениях позвоночника во фронтальной плоскости. Необходимость в прямолинейном хождении позволяет утверждать, что сагиттальный баланс является одним из важнейших параметров, характеризующий опорно-двигательный аппарат человека.

Основной целью данной работы является изучение изменения баланса в динамике и сравнение полученных результатов со статикой.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

– Обзор научной литературы по теме изучения сагиттального баланса.

– Разработка алгоритмов по определению сагиттальных параметров.

– Выделение циклов шагов движения.

– Анализ изменения параметров в динамике шага и сравнение со статикой.

Данная выпускная квалификационная работа состоит из трех разделов. В первом разделе описаны основные понятия, связанные с сагиттальным балансом и перечислены ключевые параметры необходимые для расчета и получения количественной характеристики. Во втором разделе определяется алгоритм для вычисления перечисленных параметров. Здесь же приводятся методики выделения шагов, для более конкретного анализа. В третьем разделе выполнено вычисления параметров для имеющихся моделей перемещений туловища и проведен анализ полученных данных для статики и динамики.

ГЛАВА 1 ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИЗУЧЕНИЯ САГИТТАЛЬНОГО БАЛАНСА

На текущий момент литературы для оценки сагиттального баланса методом 3D видеоанализа движений, публикации последнего десятилетия при анализе в поисковых ресурсах PubMed, eLibrary, Cochrane Library, Scholar Google на эти темы крайне малочисленные. Однако следует выделить, что они сходятся в том, что на стабильность осанки влияют множество факторов, включая выравнивание тела, мышечную подготовку и реакцию опорно-двигательного аппарата на внешнее воздействие. Необходимость учитывать перечисленные факторы позволяют говорить о преимуществе методики видеоанализа над традиционной рентгенографией, так как измерение конуса энергии на основе смещения позволяет получить более полное представление о влиянии стабильности позы на равновесие и дополнительные мышечные усилия.

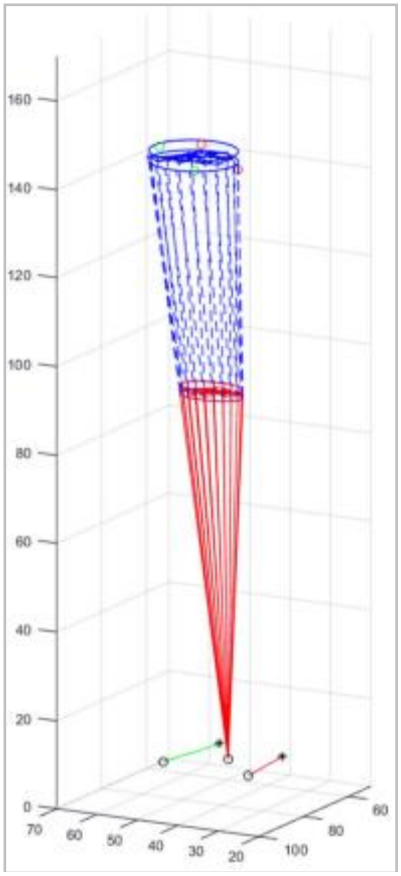

Рисунок 1 — Пример визуализации конуса экономии энергии

Необходимо выделить основные клинические параметры, учет которых позволяет определить общий баланс. В клинической практике для анализа статики используются следующие параметры [15]:

– Шейный лордоз.

– Наклон 1 позвонка грудного отдела.

– Грудной кифоз.

– Сагиттальная и фронтальная вертикальная ось

– Поясничный лордоз.

Из перечисленных параметров за глобальный баланс отвечают следующие: грудной кифоз, сагиттальная и вертикальная ось и поясничный лордоз.

Грудной кифоз и поясничный лордоз характеризуют локальный баланс позвоночника [11]. Существует много исследований по измерению сагиттального выравнивания нормальных популяций, в которых описываются характеристики изгибов грудного и поясничного отделов, а также связь между поясничным отделом позвоночника, крестцом и тазом. Комбинация данных параметров позволяет говорить о глобальном балансе, например используется формула $TK + LL \leq 20°$ [14]

Отдельно выделяют параметры глобального баланса: сагиттальную и фронтальную вертикальную ось [13].

Необходимо учитывать, что на текущий момент отсутствует связь между параметрами, выделяемыми на основе видеоанализа и полученными по данным рентгенографии [4]. В связи с этим существует два отдельных алгоритма для вычисления сагиттальной и фронтальной оси. Один больше приближен к рентгенографическим результатам, второй же дает более четкую картину движения в динамике.

Помимо этого, существуют несколько понятий, который характеризуют механические свойства тела. В их число входят:

– Общий центр масс.

– Общий центр давления.

Общий центр масс является точечным эквивалентом массы тела в глобальной системе отсчета и характеризует движение тела как единого целого. Существует несколько различных методик вычисления общего центра масс, среди которых наиболее популярен расчётный метод [7]. Общий центр давления, в свою очередь, является точкой расположения вектора вертикальной силы реакции опоры и колеблется по обе стороны от общего центра масс.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ САГИТТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

1. Выбор анатомической плоскости

При рассмотрении смещения позвоночника необходимо выбрать анатомическую плоскость, в которой будет происходить расчёты. Существуют 4 основных плоскости [1]:

– Аксиальная плоскость.

– Фронтальная плоскость.

– Сагиттальная плоскость.

– Парасагиттальная плоскость.

Первая плоскость (аксиальная) лежит в поперечной плоскости тела. Сагиттальная плоскость лежит в плоскости двусторонней симметрии. Фронтальная плоскость идет вдоль передне-задней оси тела перпендикулярно сагиттальной плоскости. Последняя (парасагиттальная) плоскость идет параллельно сагиттальной плоскости. Поскольку баланс рассматривается в контексте стоячей позы, минимизирующей затраты энергии, то для расчета баланса потребуется рассмотреть смещения во фронтальной и сагиттальной плоскостях.

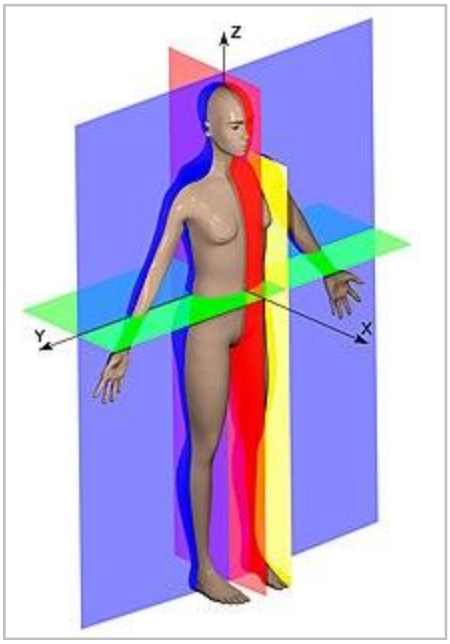

Рисунок 2 — Визуализация анатомических плоскостей

2. Расчёт вертикальной оси на основе смещения относительно позвонка S2

На текущий момент расчёт сагиттального баланса с помощью видеоанализа отличается от варианта расчёта по данным рентгенографии. В клинической практике баланс рассчитывается как смещение сагиттальной вертикальной линии от межпозвоночного диска L5-S1, где смещение на более чем 5 см является нарушением баланса. Расчёт баланса на основе проекции точки от C7 позвонка относительно проекции точки от S2 позвонка на опорной плоскости. В связи с максимальной тождественностью CVA-R и CVA-G 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

3. Расчёт вертикальной оси на основе смещения относительно общего центра гравитации

Сагиттальный баланс может быть также рассчитан как смещения 7 позвонка шейного отдела относительно точки проекции COG (общего центра гравитации), который лежит впереди позвонка S2 и точное расположение которого меняется с каждым новым положением тела и его конечностей. Общий центр гравитации расположен 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 гравитации) 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. Инструменты видеоанализа позволяют рассчитать положения общего центра масс как точку, к которой приведено среднее значение четырех векторов, приложенных к тазовой кости.

4. Расчет грудного кифоза

Данный параметр в клинической практике рассчитывается как угол в сагиттальной плоскости между двумя линиями C7–T6 и T9–T12 [12]. В данной работе он рассчитывался по более распространённой методике — как смещение между проекцией 5 и 12 позвонком грудного отдела [3]. Параметр также был рассмотрен как во фронтальной, так и в сагиттальной плоскости.

5. Расчет поясничного лордоза

Данный параметр в клинической практике рассчитывается как угол в сагиттальной плоскости между двумя линиями T12–L3 и L3–S1 [12]. В данной работе он рассчитывался по более распространённой методике — как смещение между первыми позвонками поясничного и крестцового отдела соответственно. Параметр также был рассмотрен как во фронтальной, так и в сагиттальной плоскости

6. Выделение циклов шагов движения

Изменение параметров позвоночника в динамике следует рассматривать в разрезе циклов шагов. Из-за цикличности походки человека анализ изменения параметра в течении одного цикла позволит характеризовать изменения баланса в целом.

Циклы шага строятся на основе повторения событий (повторяющихся положений) ипсилатеральной (ведущей) и контралатеральной ноги [5].

В ходе цикла шага выделяют следующие события:

– Начальный контакт ведущей ноги.

– Отрыв пальцев контралатеральной ноги.

– Подъем пятки лидирующей ноги.

– Начальный контакт контралатеральной ноги.

– Отрыв пальцев лидирующей ноги.

– Сведение ног.

– Момент вертикали лидирующей ноги.

– Конченый контакт лидирующей ноги.

Цикл походки выделяет две фазы: фаза переката и фаза переноса, где фаза переката начинается с момента соприкосновения стопы ведущей ноги с поверхностью и заканчивается отрывом стопы от земли. Фаза переноса в свою очередь протекает от момента отрыва стопы до момента соприкосновения. Обычно выделение походки происходит на основе силовых платформ, систем измерения планетарного давления под стопами или же акселерометров и гироскопов. Существует различны алгоритмы, которые позволяют выделить циклы шагов. Часть из них основываются на ножных датчиках давления, анализе сил реакции опоры или анализе моделей смещений стопы. Другая часть основывается на анализе данных полученных с датчиков акселерометров [8]. В данной работе использовался преобразованный алгоритм, основанный на алгоритме выделения событий на основе перемещений маркера расположенных на плечевом суставе [12]. Первоначальное отличие алгоритма заключается в исследовании перемещений, а не ускорений маркера.

Последовательность самого алгоритма:

– Берётся вторая численная производная по оси Y.

– Из полученных данных отфильтровываются значения низких частот с помощью фильтра с конечной импульсной характеристикой, характеристический полином которого имеет 11 порядок.

Полученные значения преобразуются в бинарный сигнал: для чисел больше нуля в соответствие ставится 1, для чисел меньше – 0.

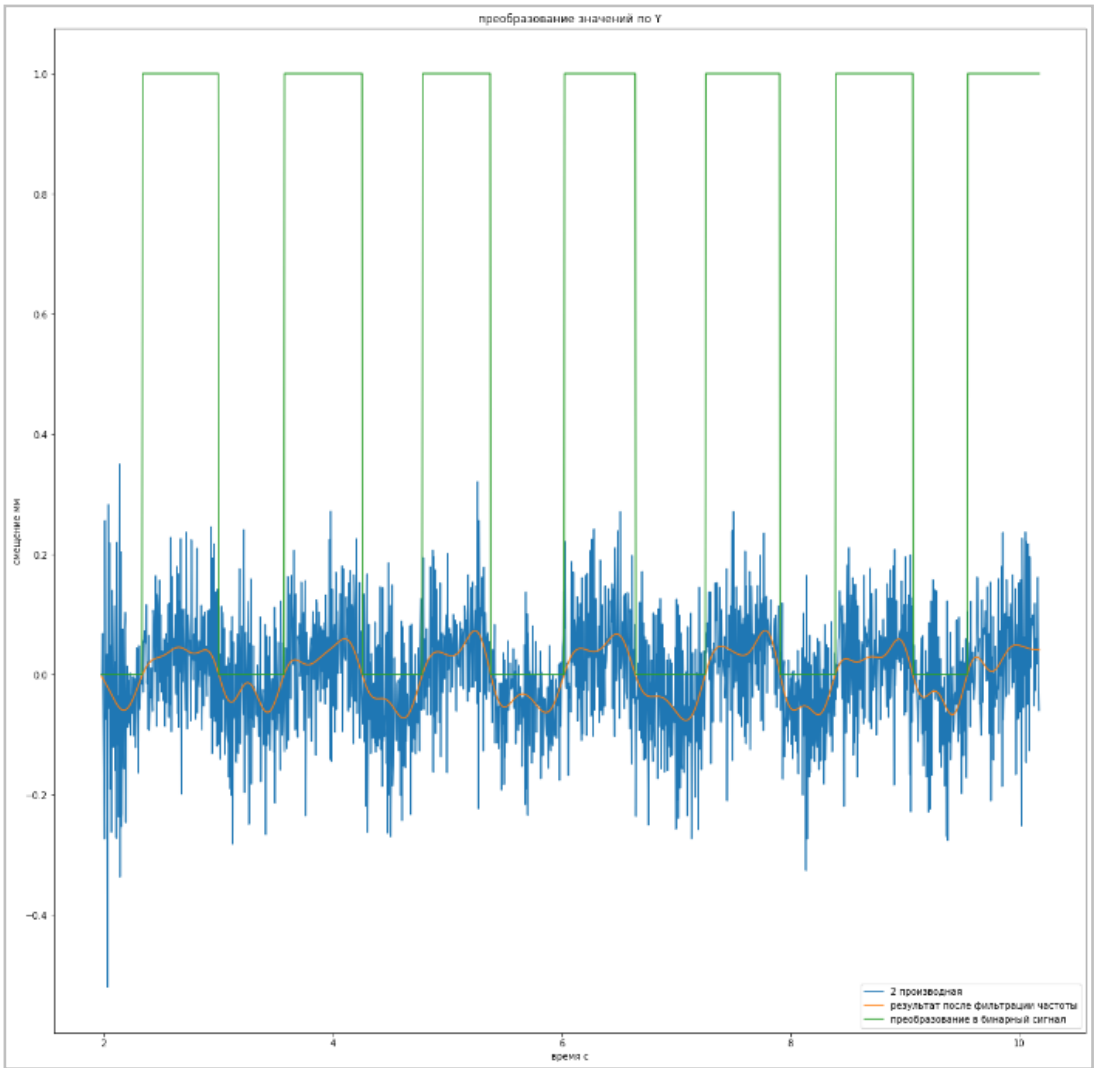

Рисунок 3 — Визуализация преобразования значений по оси «y»

«Затем берется первая производная по оси Z и при выполнении двух условий:

– точка является локальным экстремумом,

– значение преобразованного сигнала по оси Y равно 1

точка считается точкой отрыва или точкой соприкосновения. В течение одного бинарного импульса таких значений несколько, точкой отрыва считается ближайшая точка перехода бинарного импульса от нуля к единице, точка соприкосновения – ближайшая к переходу от 1 к нулю. Полученный результат необходимо сравнить с ручным разбиением на события на основе алгоритма, основанного на изменении перемещения правой стопы. Анализ разметки, полученной данным алгоритмом с ручной разметкой, показывает,

что ошибка не превышает 5% и составляет в среднем 2.33%, что позволяет использовать данный алгоритм для выделения циклов шага.

Таблица 1 — Усредненная по шагам относительная разница между разметкой алгоритма и ручной разметкой

	1 пациент	2 пациент	3 пациент	4 пациент	5 пациент
Δ_{mean}	1.826	2.20	0.55	0.53	0.45

Было произведено численное сравнение погрешности между выбором маркера, находящегося на левом и на правом плече. Относительная ошибка не превышает 16%.

Таблица 2 — Усредненная по шагам относительная разница для разметки алгоритма между значениями, полученными с левого и правого маркера

	1 пациент	2 пациент	3 пациент	4 пациент	5 пациент
Δ_{mean}	2.24	2.96	4.36	0.33	9.3

Данные результаты позволяют говорить о том, что выбор плеча для выделения на циклы шагов не влияет на итоговый результат.

Необходимо добавить, что текущий алгоритм работает исключительно при взятии правой ноги в качестве ведущей, однако можно видоизменить алгоритм для левой ведущей ноги. Для этого необходимо инвертировать бинарный сигнал. Полученные результаты позволяют говорить о возможности использования такого алгоритма.

Таблица 3 — Усредненная по шагам относительная разница для разметки алгоритма между значениями для левой и правой ведущей ноги

	1 пациент	2 пациент	3 пациент	4 пациент	5 пациент
Δ_{mean}	2.30	2.70	3.30	0.30	8.1

Также необходимо частоту фильтрации. На выбор имелись частоты, которые больше 1.8% от частоты записи данных, так как выбирать фильтрующую частоту ниже указанного диапазона не имеет смысла в силу того, что бинарный сигнал преобразуется в линию. Непосредственный анализ, привел к выводу, что оптимальная частота фильтрации составляет 2% от оригинальной частоты. При варьировании данного параметра, изменение в

разметки либо отсутствуют, либо отмечают неверные избыточные события цикла шага.

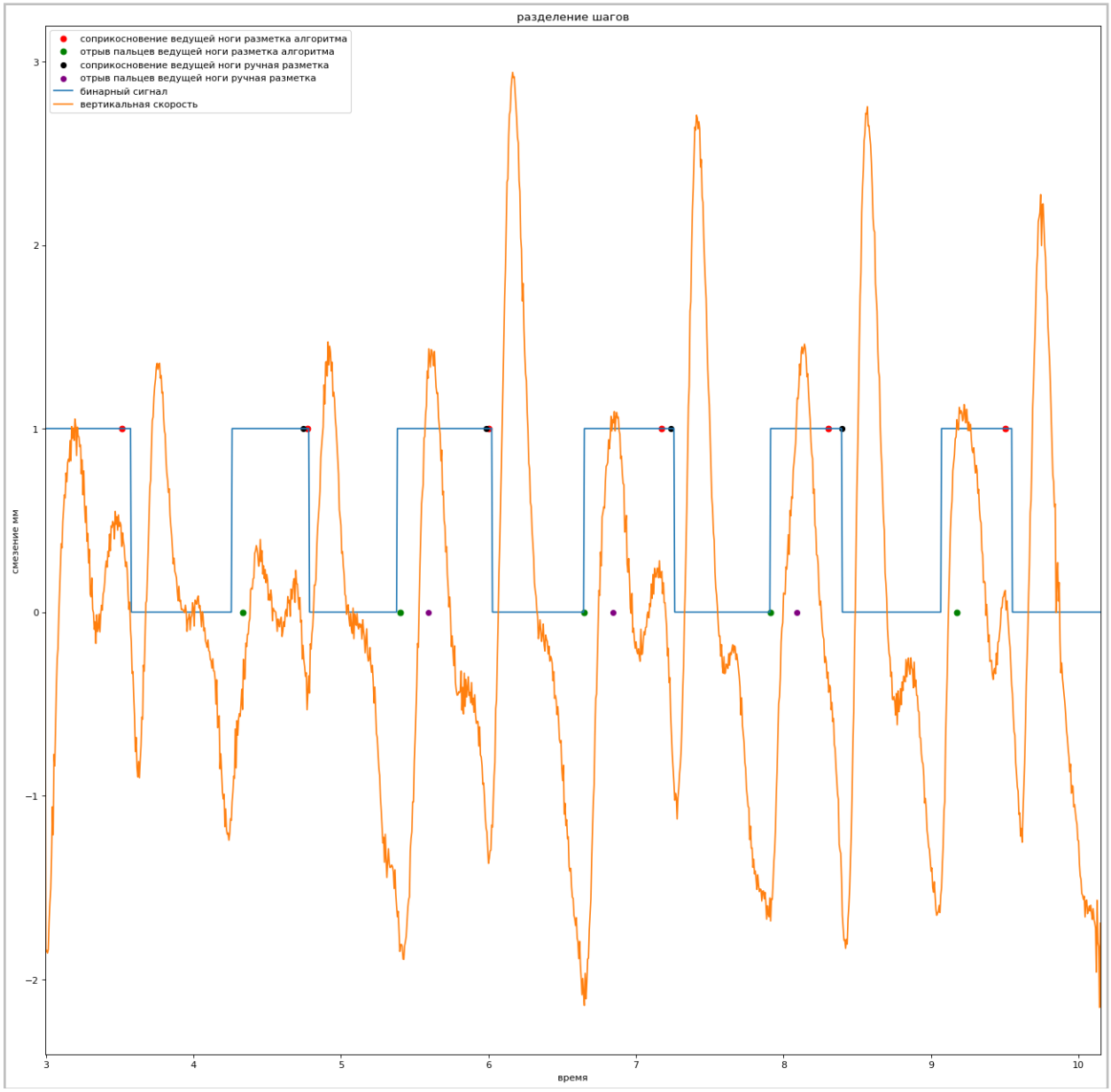

Рисунок 4 — Пример разделения движения на события цикла шага

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ДИНАМИКЕ ШАГА И СТАТИКЕ

Для оценки сагиттального баланса привлекались три здоровых человека, которые перемещались по беговой дорожке со скоростью 5 км. Кинематика движения регистрировалась при помощи 8 высокоскоростных инфракрасных камер Miqus M5 с частотой съемки 100 Гц.

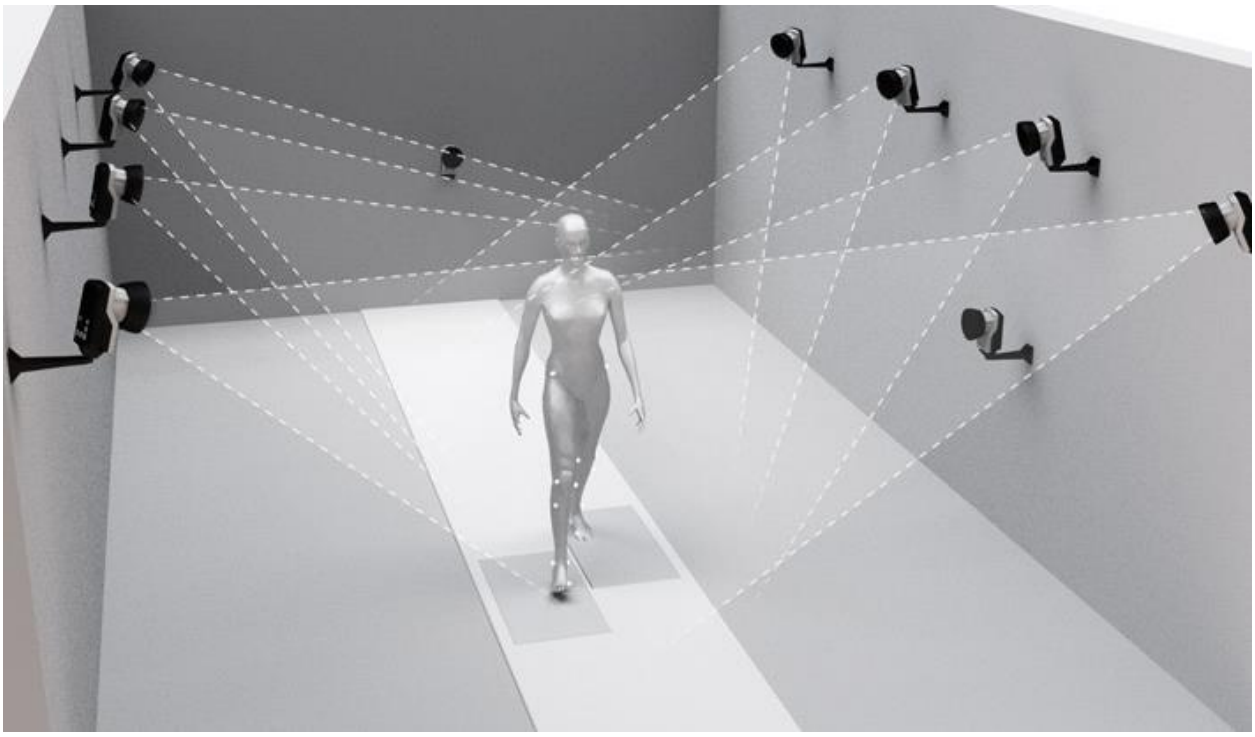

рисунок 5 — Визуальное расположение оптических камер.

Перед каждым тестом система калибровалась, чтобы погрешность измерения камер не превышала 1 мм. Для этого использовалась калибровочная трость с рамой с известными дистанциями между маркерами.

рисунок 6 — Калибровочный инструмент для триангуляции камер Miqus M5 (Qualisys)

Для регистрации движения позвоночного столба на поверхность кожи устанавливались маркеры размером 9.5 мм.

Тестировались несколько маркерных моделей для расчета кинематических показателей позвоночника такие как: CAST и IOR [10].

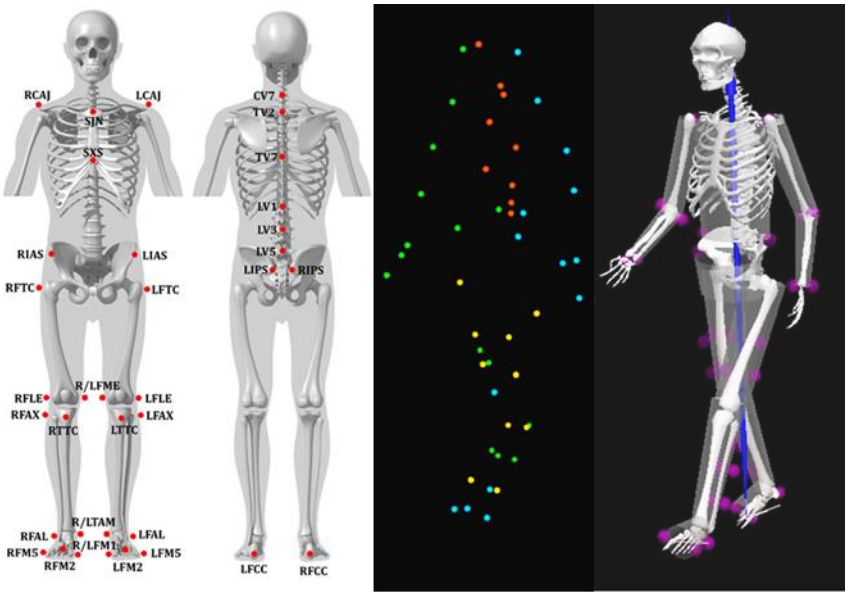

рисунок 7 — IOR клиническая маркерная модель реконструкции верхних и нижних конечностей

Для сбора данных IOR маркерная модель была адаптирована с увеличением количества маркеров, установленных на поверхности спины на линии позвоночного столба.

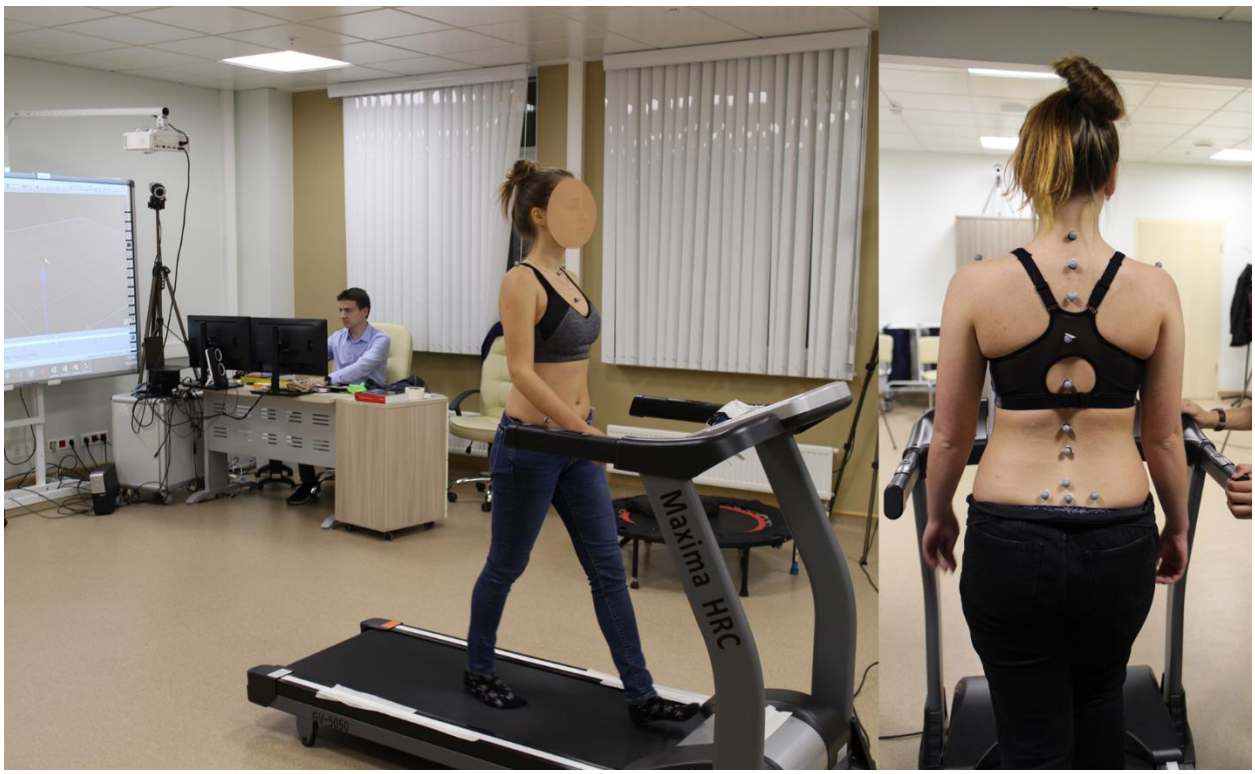

рисунок 8 — Регистрация кинематики позвоночника

7. Сагиттальная вертикальная ось

При анализе параметров сагиттального баланса в течение цикла шага необходимо выделить максимальное и минимальное значение, а также амплитуду, которая вычисляется как разница между максимальным и минимальным значением

Рассмотрим смещение вертикальной оси для трех пациентов, при вычислении её как смещения относительно позвонка S1.

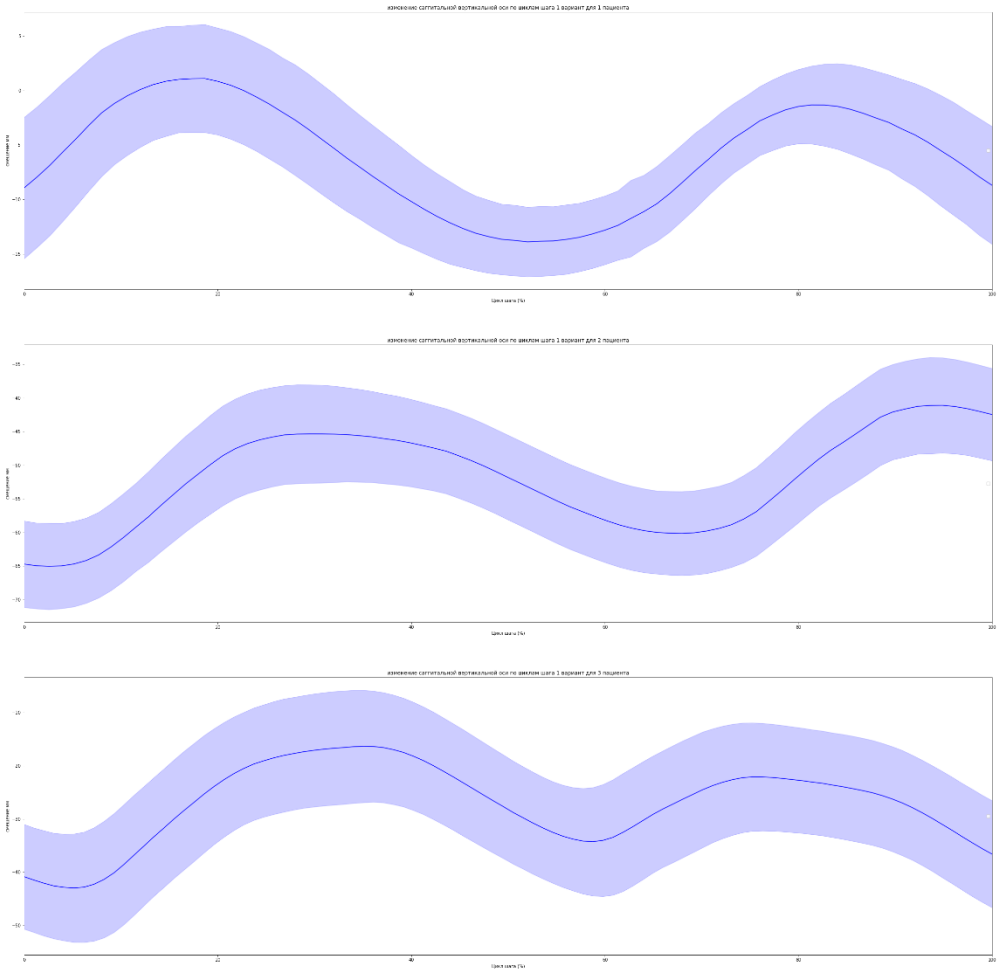

Рисунок 9 — Изменение сагиттальной вертикальной оси по циклам шага для 1 варианта

Изменение параметра в динамике происходит периодически и колебания происходят в ограниченном промежутке.

Рассмотрим изменение оси при разбитии шага на фазу переноса и фазу переката (Рисунок 10).

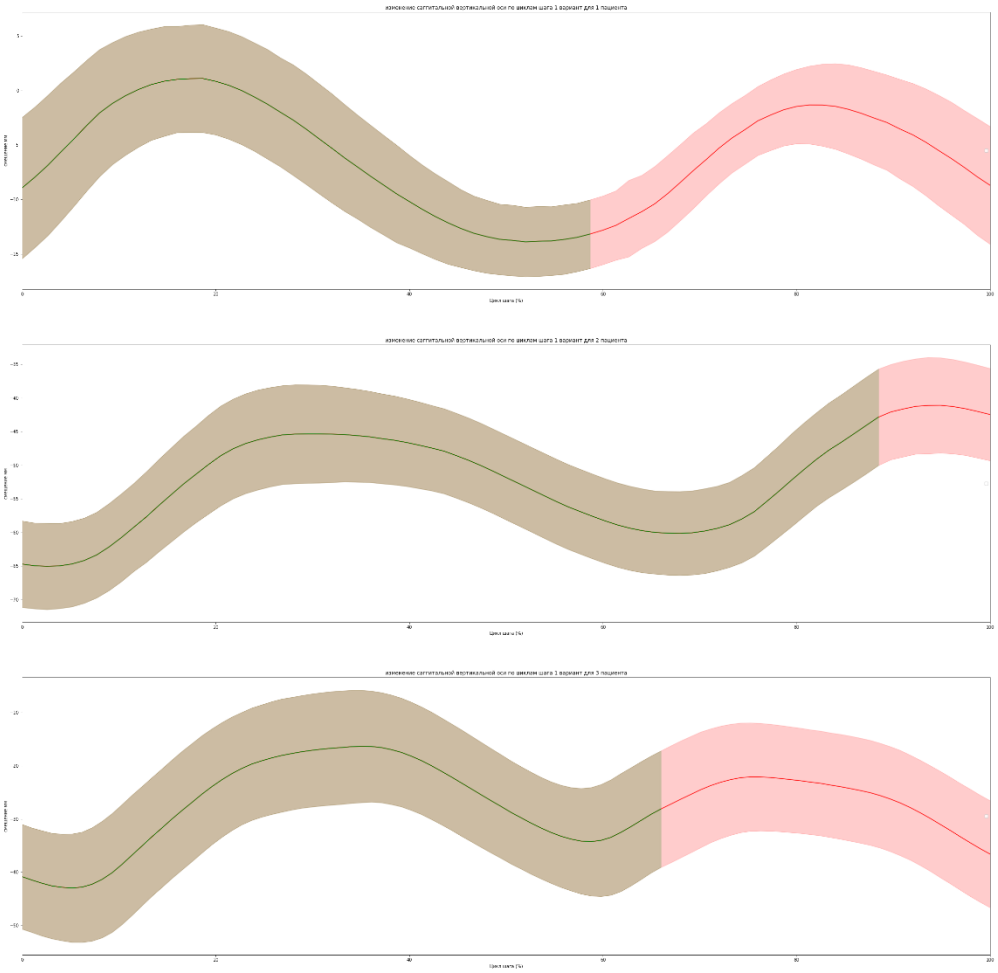

Рисунок 10 — График изменений сагиттальной вертикальной оси по циклам шага для 1 варианта

Как можно заметить из графика, колебательное смещение оси происходит в фазе переката и в фазе переноса смещение убывает.

При расчете сагиттальной вертикальной оси как смещения относительно общего центра масс мы получаем следующую картину, которую отображает Рисунок 11.

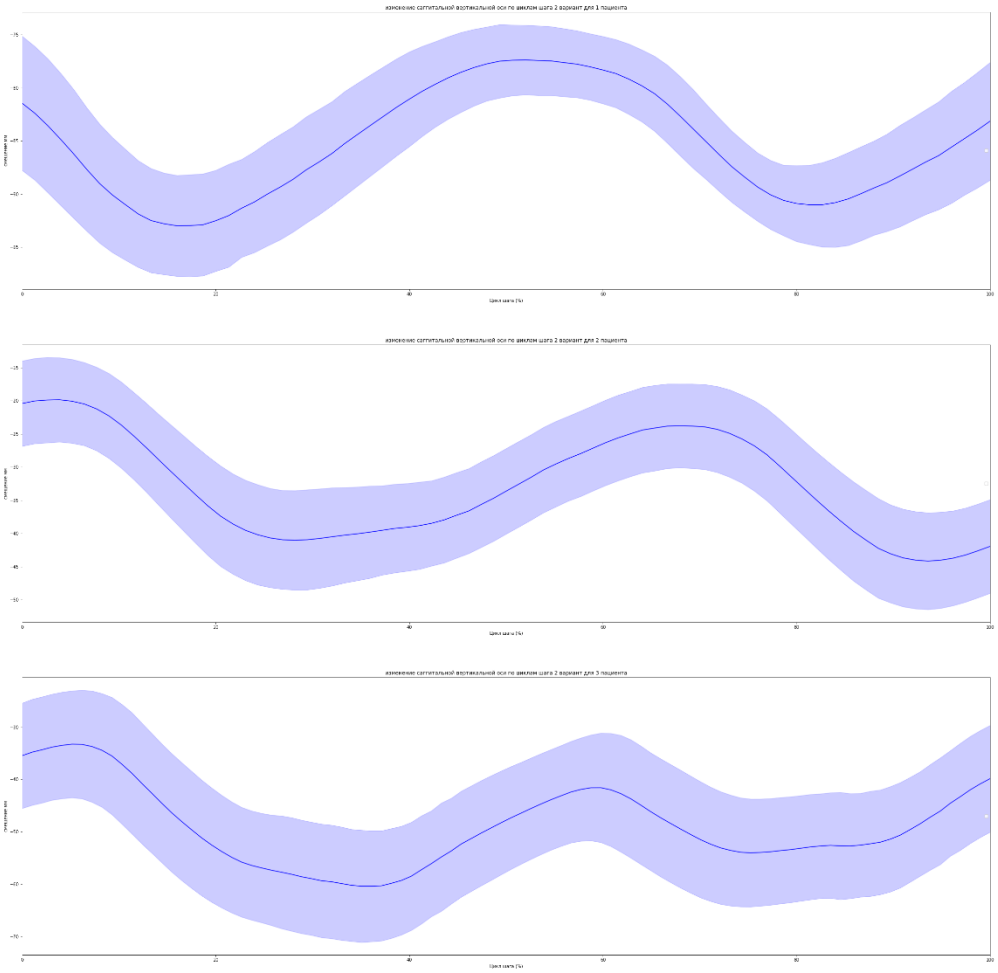

Рисунок 11 — График изменений сагиттальной вертикальной оси по циклам шага для 2 варианта

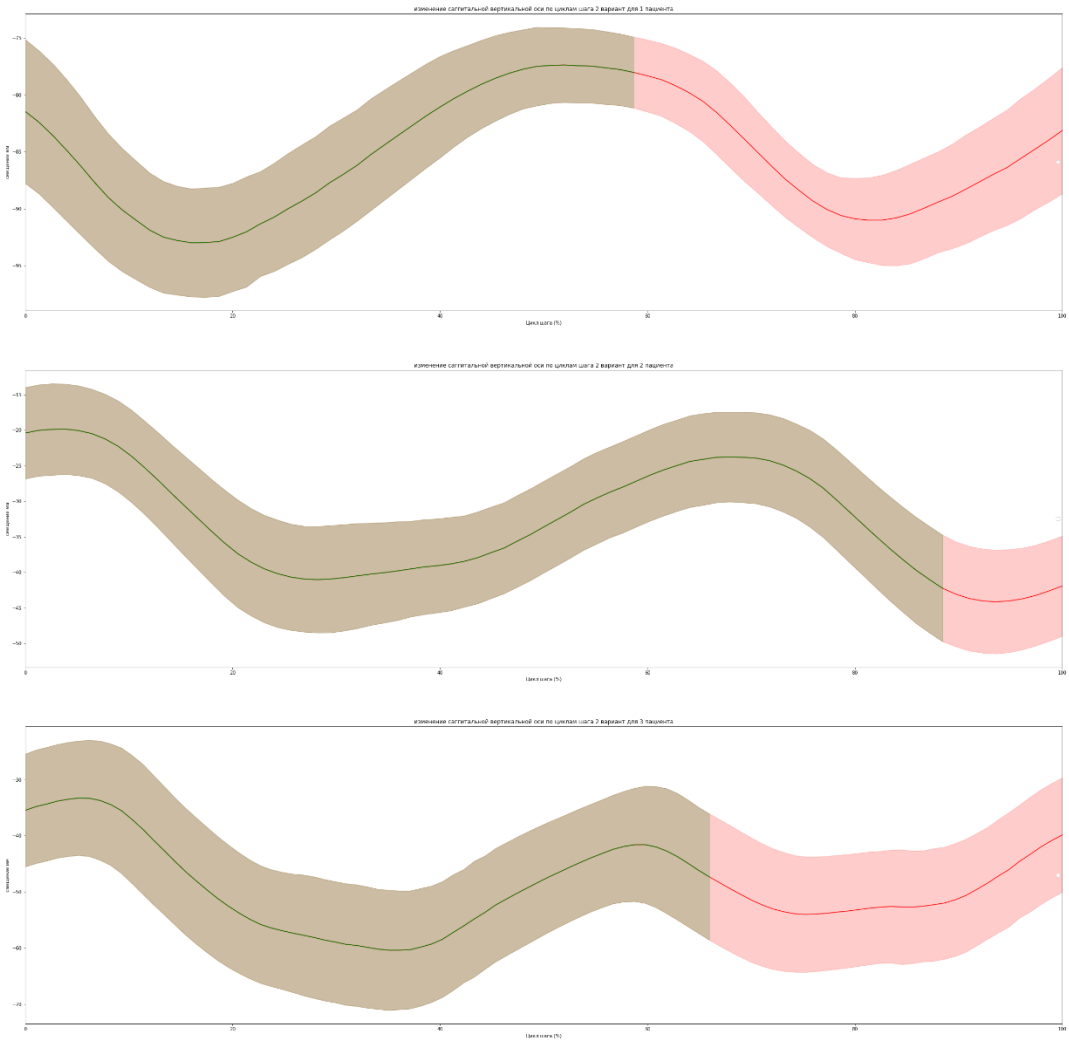

Рисунок 12 — График изменений сагиттальной вертикальной оси по циклам шага для 2 варианта

Изменение смещения вертикальной оси при расчёте вторым способом имеет такой же характер, как и при расчете первым способом, за исключением того, что абсолютное значение смещения более велико и произошла вертикальная инверсия графика. В таблице 4 указаны изменение ключевых параметров для обоих вариантов расчёта.

таблица 5 Биомеханические параметры для сагиттальной вертикальной оси

	изменение сагиттальной вертикальной оси по циклам шага 1 вариант(мм)			изменение сагиттальной вертикальной оси по циклам шага 2 вариант(мм)		
пациент	1	2	3	1	2	3
максимальное	3.2 ±4.2	-39.9 ±6.6	-15.1 ±10.4	-76.0 ±2.9	-18.9 ±6.0	-31.1 ±7.8
минимальное	-15.1 ±2.8	-65.8 ±6.0	-45.1 ±7.6	-95.3 ±3.8	-45.7 ±6.9	-61.7 ±10.4
амплитуда	18.3 ±3.4	25.9 ±4.9	30.1 ±5.8	19.3 ±2.9	26.7 ±4.9	30.6 ±5.7
в статике	4.2	-33.5	16.7	-94.6	-50.7	-92.8

Известно, что для статики нормой является смещение сагиттальной вертикальной оси относительно позвонка S1 не превосходящее 5 см [4] Исходя из чего можно сказать, что состояние каждого пациента в статике можно описать как норму. В динамике максимальное и минимальное значение коррелирует со значением в статике для различных пациентов, что нельзя сказать про амплитуду

8. Фронтальная вертикальная ось

Фронтальная вертикальная ось также рассчитывалась относительно позвонка S1 и относительно центра масс.

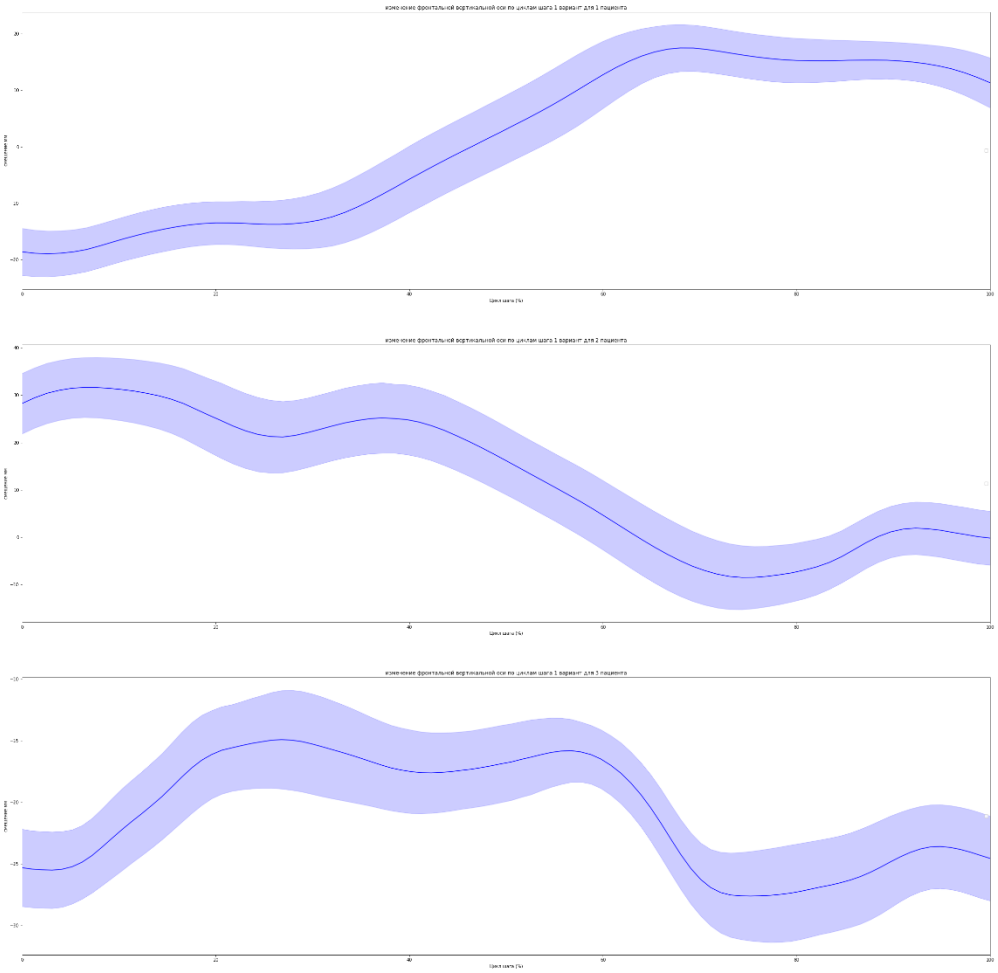

Рисунок 13 — График изменений фронтальной вертикальной оси по циклам шага для 1 варианта

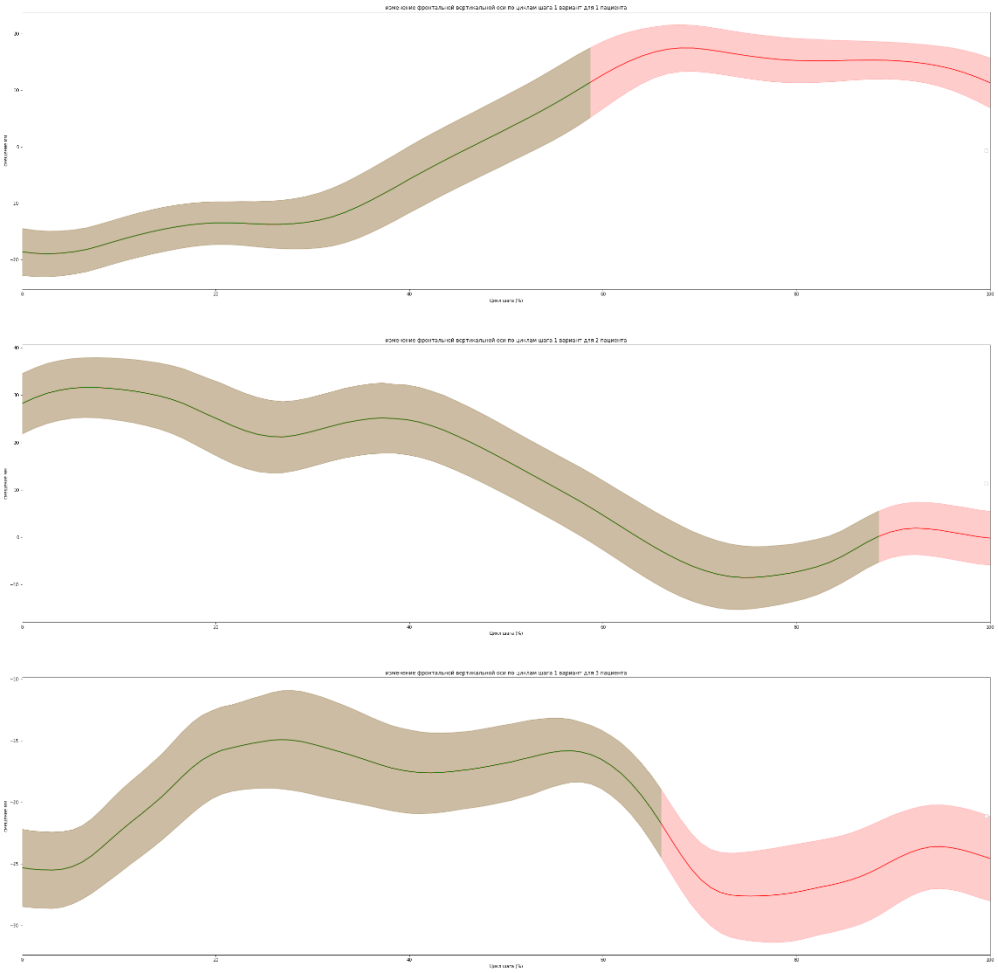

Рисунок 14 — График изменений фронтальной вертикальной оси по циклам шага для 1 варианта

Данные, полученные путём расчёта относительно позвонка S1 не дают возможности сказать о характере изменения фронтальной вертикальной оси в динамике в течении цикла шага и в её различных фазах.

Для случая расчёта относительно центра масс динамическое изменение вертикальной оси также не носят общий характер.

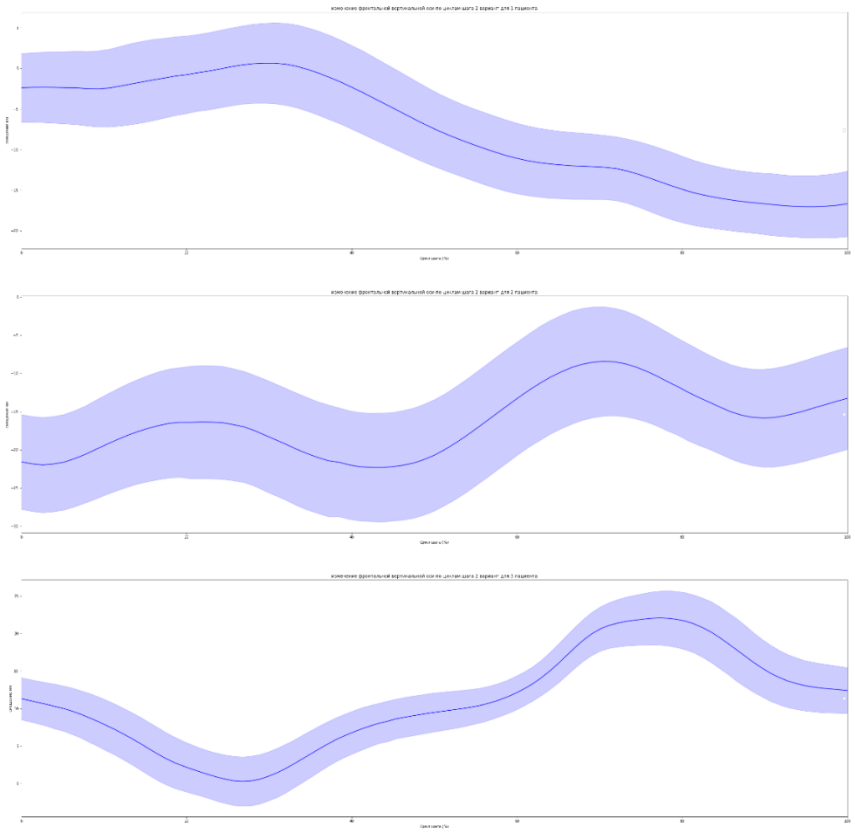

Рисунок 15 — График изменений фронтальной вертикальной оси по циклам шага для 2 варианта

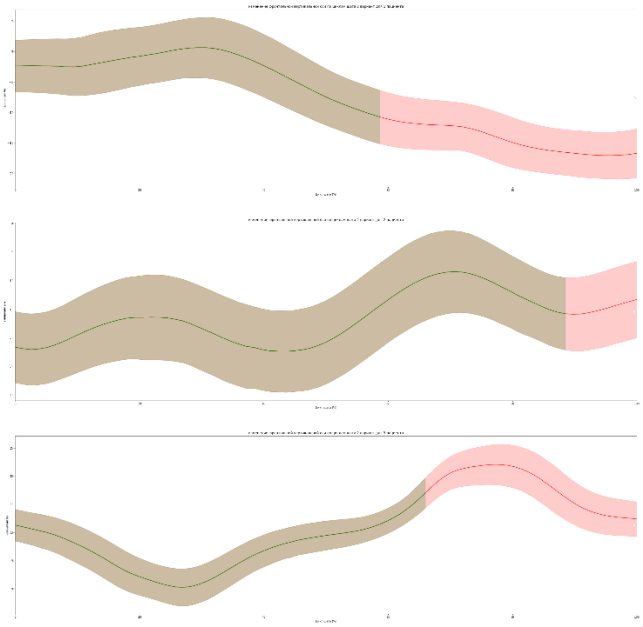

Рисунок 16 — График изменений фронтальной вертикальной оси по циклам шага для 2 варианта

При рассмотрении биомеханических параметров, важно учитывать, что отклонение относительно позвонка S1 более не превосходящее 4 см [4]. Это позволяет заявить, что у пациентов отсутствует нарушение нормы. Также нельзя выделить явную зависимость биомеханических параметров между статикой и динамикой.

таблица 6 Биомеханические параметры для фронтальной вертикальной оси

	изменение фронтальной вертикальной оси по циклам шага 1 вариант (мм)			изменение фронтальной вертикальной оси по циклам шага 2 вариант (мм)		
пациент	1	2	3	1	2	3
максимальное	18.5 ±3.9	32.1 ±6.3	-13.3 ±3.2	1.4 ±4.9	-7.0 ±4.9	22.6 ±3.4
минимальное	-19.5 ±4.0	-9.1 ±6.4	-29.8 ±2.8	-18.0 ±3.2	-24.6 ±7.2	-0.1 ±3.2
амплитуда	38.0 ±4.0	41.2 ±6.9	16.5 ±3.1	19.5 ±5.5	17.5 ±4.1	22.7 ±4.1
в статике	10.0	7.9	-20.8	-14.2	-12.7	7.8

9. Грудной кифоз

Этот параметр мы рассмотрим в двух плоскостях — сагиттальной и фронтальной.

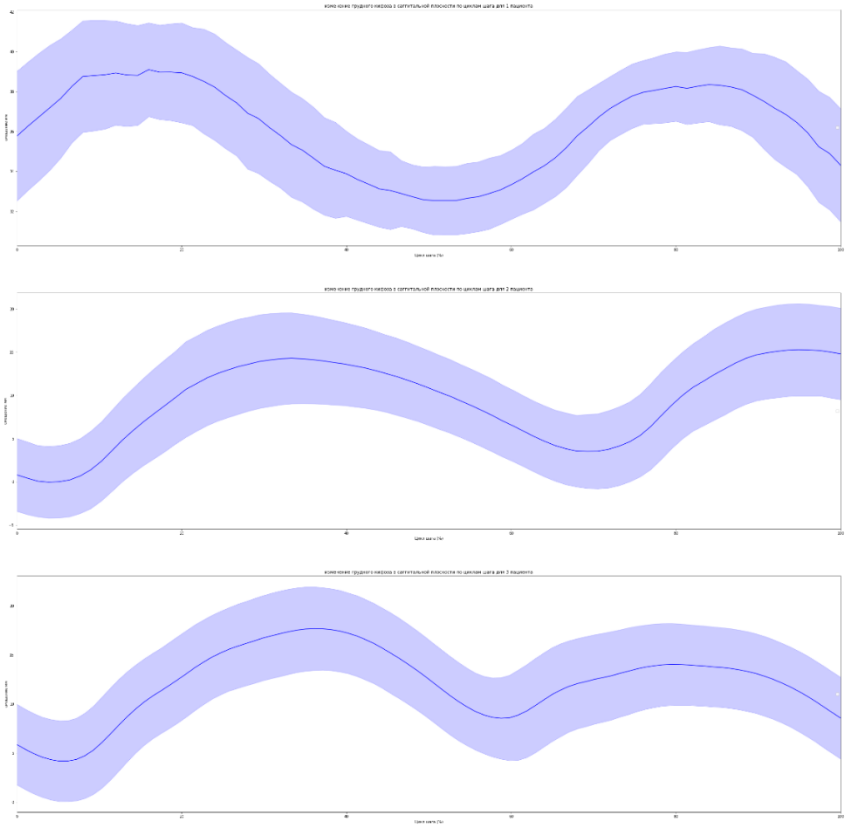

Рисунок 17 — График изменений грудного кифоза в сагиттальной плоскости по циклам шага

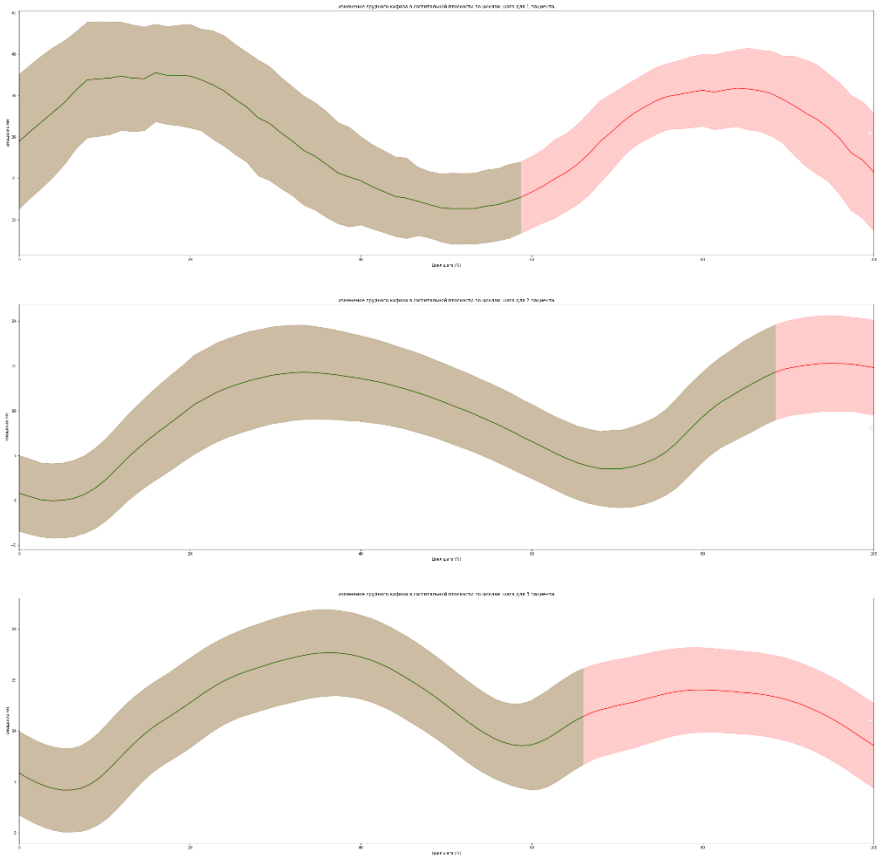

Рисунок 18 — График изменений грудного кифоза в сагиттальной плоскости по циклам шага

Во фронтальной плоскости:

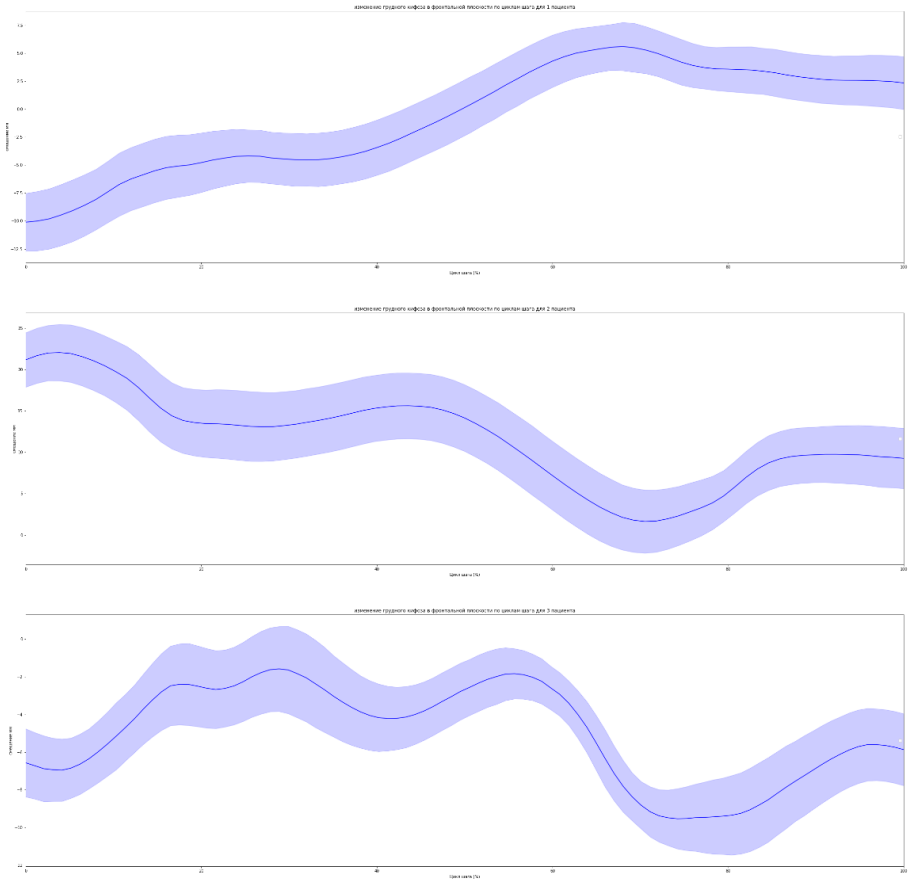

Рисунок 19 — График изменений грудного кифоза во фронтальной плоскости по циклам шага

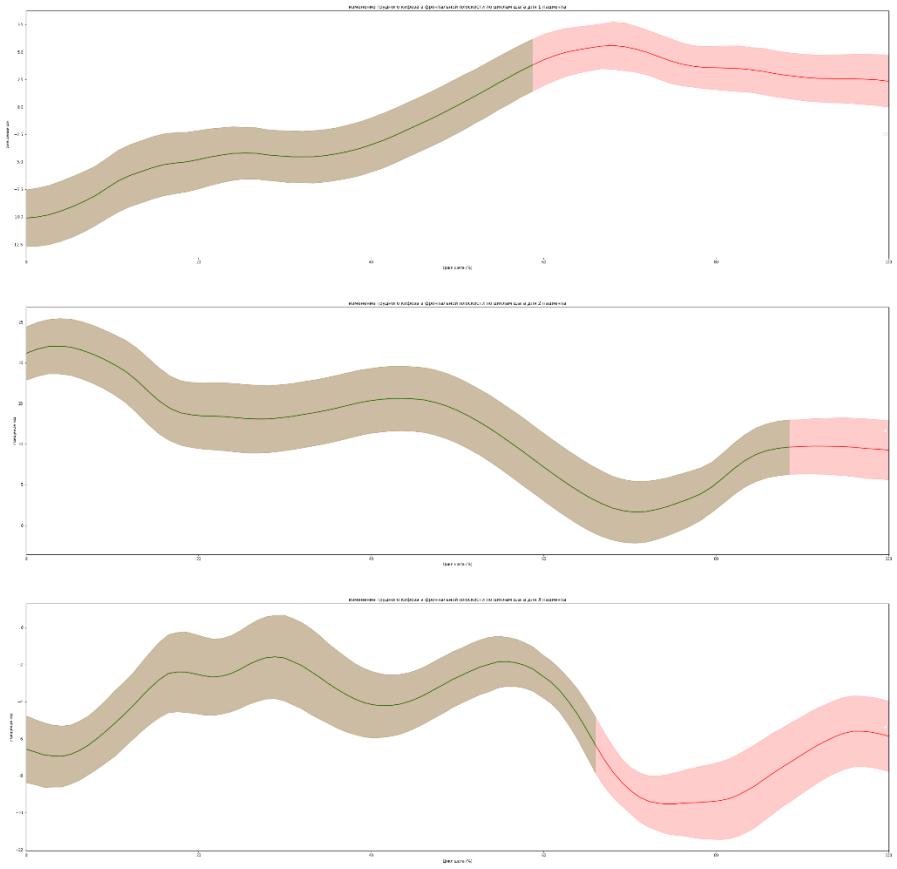

Рисунок 20 — График изменений грудного кифоза во фронтальной плоскости по циклам шага

Также в Таблице 7 указаны значение биомеханических параметров для грудного кифоза

таблица 7 Биомеханические параметры

	изменение грудного кифоза в сагиттальной плоскости по циклам шага (мм)			**изменение грудного кифоза в фронтальной плоскости по циклам шага (мм)**		
пациент	1	2	3	1	2	3
максимальное	40.3 ±2.2	16.6 ±5.1	18.0 ±4.2	6.1 ±1.9	22.3 ±3.3	-0.5 ±1.7
минимальное	31.8 ±1.7	-0.3 ±4.0	3.5 ±3.0	-10.2 ±2.6	1.4 ±3.7	-10.1 ±1.7
амплитуда	8.5 ±2.0	16.9 ±2.9	14.4 ±2.5	16.4 ±2.7	21.0 ±3.8	9.6 ±1.8
в статике	39.9	27.6	29.4	4.5	14.3	-3.3

Полученные данные во фронтальных и сагиттальных плоскостях позволяют сказать о том, что увеличение значения в сагиттальной плоскости приводит к уменьшению амплитуды и присутствует обратная картина для фронтальной плоскости. Также необходимо отметить, что изменение параметра в плоскостях, схоже с изменением сагиттальной и фронтальной вертикальной оси в соответствующих плоскостях.

10.Поясничный лордоз

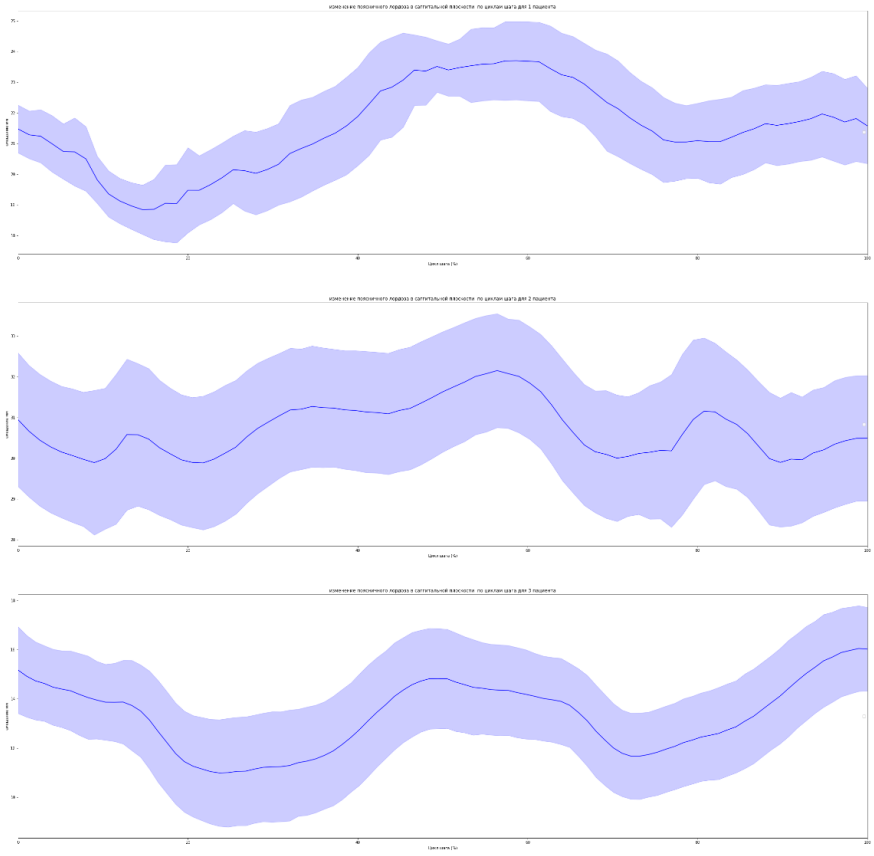

Рисунок 21 — График изменений поясничного лордоза в сагиттальной плоскости по циклам шага по циклам шага

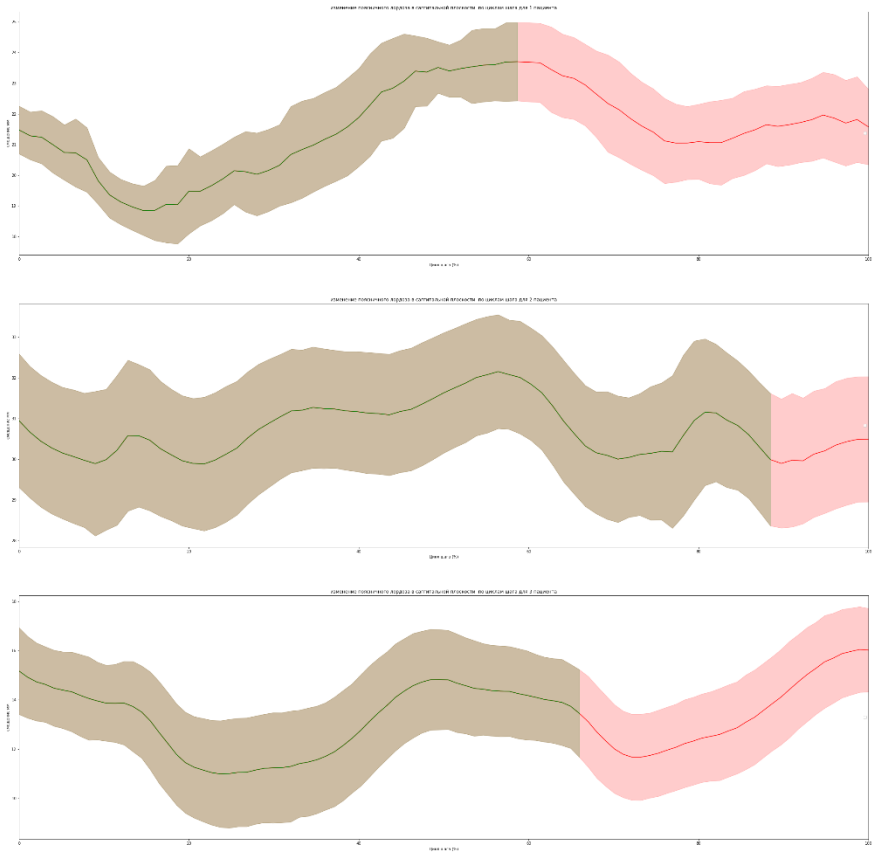

Рисунок 22 — График изменений поясничного лордоза в сагиттальной плоскости по циклам шага по циклам шага

Помимо изменения данных в сагиттальной плоскости, были также изучены изменение параметров во фронтальной плоскости.

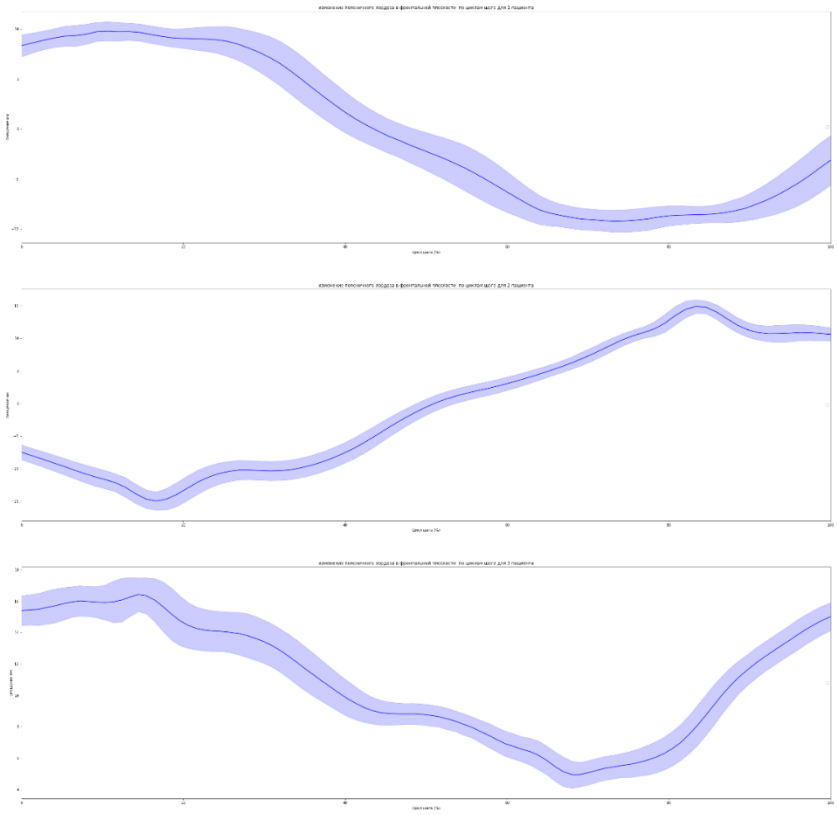

Рисунок 23 — График изменений поясничного лордоза во фронтальной плоскости по циклам шага

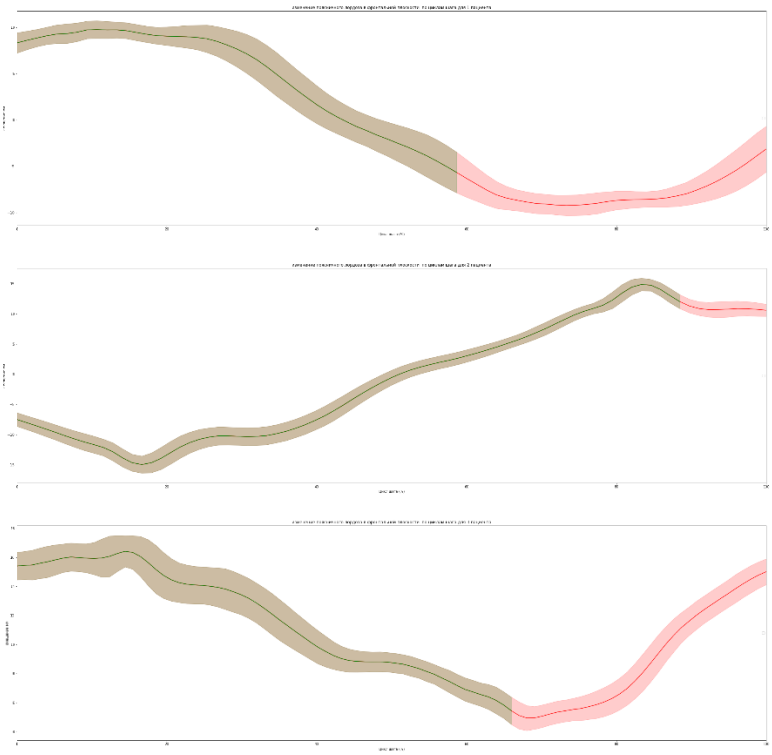

Рисунок 24 — График изменений поясничного лордоза во фронтальной плоскости по циклам шага

Полученные данные во фронтальных и сагиттальных плоскостях позволяют сказать о том, что изменение поясничного лордоза в динамике имеет такой же характер, как и изменение грудного кифоза.

Сводные значения для каждого параметра представлены в указанной ниже таблице

Таблица 8 — Значения смещения поясничного лордоза в статике

	изменение поясничного лордоза в сагиттальной плоскости по циклам шага (мм)			изменение поясничного лордоза в фронтальной плоскости по циклам шага (мм)		
пациент	1	2	3	1	2	3
максимальное	24.0 ±1.2	32.3 ±1.5	16.6 ±1.5	10.0 ±0.8	15.1 ±1.0	17.2 ±1.0
минимальное	18.3 ±0.7	29.0 ±1.6	10.4 ±2.0	-9.5 ±1.0	-15.2 ±1.3	4.6 ±0.6
амплитуда	5.7 ±0.8	3.3 ±1.0	6.3 ±1.0	19.6 ±1.2	30.3 ±1.5	12.6 ±1.2
в статике	26,3	32,1	3,7	-2,0	3,1	12,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был разработан алгоритм для оценки изменения параметром сагиттального баланса, были рассмотрены изменения параметров баланса в динамике и сравнение полученных результатов со статикой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДУБРОВСКИЙ В.И. Биомеханкика. 2003: ВЛАДОС-ПРЕСС. 672.
2. Аксенов Андрей Юрьевич, Клишковская Татьяна Алексеевна, & Долганова Тамара Игоревна Методология видеоанализа в диагностике нарушений локомоторной функции у детей с церебральным параличом при использовании ограниченного числа светоотражающих камер 2019
3. Бурцев А.В., Клинические аспекты саггитального баланса у взрослых. генний ортопедии, 2017. 23(2): p. 228-235.
4. Долганова Т.И., Аксенов Андрей Юрьевич, Рябых С.О., Гарипов И.И., Методы и критерии оценки динамического сагиттального баланса тела (несистематизированный обзор). Гений ортопедии, 2021. 27(6): p. 827-833.
5. Лозовская М.В., Структура шагового цикла по данным анализа кинетических и кинематических параметров походки человека. Вестник новых медицинских технологий.. eJournal, 2017: p. 1-1.
6. Шаповал И.Н., Агеева Л.И., Александрова Г.А., Зайченко Н.М., Кириллова Г.Н., Леонов С.А., Огрызко Е.В., Титова И.А., Харькова Т.Л., Чумарина В.Ж., Пак Ден Нам, 2019. ЗДРАВООХРАНЕНИЕ В РОССИИ.
7. Ципин Л.Л. О точности определения положения общего центра масс тела спортсмена. Российский журнал биомеханики, 2011: p. 8.
8. Auvinet Bernard Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device. 2001.
9. Dubousset J., Three-dimensional analysis of the scoliotic deformity. Raven Press, 1994.
10. Leardini, A., Sawacha, Z., Paolini, G., Ingrosso, S., Nativo, R., & Benedetti, M.G. , A new anatomically based protocol for gait analysis in children. Gait & Posture,, 2007: p. 26
11. Le Huec, J.C., et al., Sagittal balance of the spine. Eur Spine J, 2019. 28(9): p. 1889-1905.

12. Pesenti, S., et al., Characterization of trunk motion in adolescents with right thoracic idiopathic scoliosis. Eur Spine J, 2019. 28(9): p. 2025-2033.
13. Yang, X., et al., Coronal and sagittal balance in Lenke 5 AIS patients following posterior fusion: important role of the lowest instrument vertebrae selection. BMC Musculoskelet Disord, 2018. 19(1): p. 212.
14. Yongjung J. Kim, K.H.B., Lawrence G. Lenke, and G.C. Seungchul Rhim, An Analysis of Sagittal Spinal Alignment Following Long Adult Lumbar Instrumentation and Fusion to L5 or S1: Can We Predict Ideal Lumbar Lordosis. 2006.
15. Xing, R., et al., Characteristics of cervical sagittal parameters in healthy cervical spine adults and patients with cervical disc degeneration. BMC Musculoskelet Disord, 2018. 19(1): p. 37.