

УДК 004.942

Разработка системы эффективного анализа сагиттального позвоночно-тазового баланса

Жук Д. М.^{1,*}, Никулина А. А.¹

[*zhuk@bmstu.ru](mailto:zhuk@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Позвоночно-тазовый сагиттальный баланс – это нейтральное вертикальное выравнивание позвоночника в сагиттальной плоскости, обеспечивающее снижение стрессовых нагрузок на мышечно-связочные структуры. Достижение сагиттального баланса является основой успешного хирургического лечения и минимизации развития осложнений. На сегодняшний день, не существует стандартизированной методики количественной оценки сагиттального позвоночно-тазового баланса, позволяющей проводить его эффективный анализ и планировать оперативное вмешательство с учетом сохранения нормальной биомеханики пояснично-крестцового отдела позвоночника. Цель настоящего исследования – разработка диагностической системы для индивидуальной коррекции позвоночно-тазового сагиттального баланса по авторской методике на основе данных методов медицинской визуализации с функцией автоматического расчета и оптимизированного подбора значений параметров на основании заданного ряда условий. Исследование проводилось совместно с кафедрой травматологии и ортопедии РМАПО. Для решения поставленной задачи применялся алгоритм случайного поиска. Условием останова алгоритма являлось достижение значения целевой функции в заданном интервале, начальными точками которого выступают значения расчетных (угловых) величин. Было исследовано взаимовлияние угловых величин, используемых в предложенном методе, и доказано их пропорциональное изменение, а так же определена четкая математическая зависимость между геометрическими и анатомическими параметрами пояснично-крестцового отдела позвоночника. На базе проведенного исследования создан ряд алгоритмов, позволяющих производить автоматизацию индивидуального определения оптимальных параметров позвоночно-тазового баланса на этапе предоперационного планирования у пациентов с заболеваниями позвоночника. Это позволяет повысить эффективность работы врача, свести к минимуму риск средне- и долгосрочных послеоперационных осложнений и избежать повторного оперативного вмешательства, а так же прогнозировать отдаленные осложнения уже выполненных операций.

Ключевые слова: позвоночно-тазовый сагиттальный баланс, алгоритм случайного поиска, предоперационное планирование, моделирование геометрических зависимостей

Введение

Прямохождение позволило человеку достичь интеллектуального, технологического и социального развития. Однако, переход к прямохождению оказался возможным только через морфологическую адаптацию скелета, в частности, нижних конечностей, таза и позвоночника [10]. Таз является ключевым звеном всех преобразований, выступая в качестве свободного базиса и подвергаясь действию силы тяжести от позвоночного столба, а так же силе реакции опоры, передаваемой через головки тазобедренных суставов [5]. Параллельно с адаптацией таза, появление изгибов позвоночного столба позволило достичь нейтрального вертикального выравнивания позвоночника в сагиттальной плоскости для снижения стрессовых нагрузок на мышечно-связочные структуры – сагиттального баланса [1,3,11]. В положении стоя сагиттальный баланс весьма хрупок, поскольку все стрессовые нагрузки от действия силы тяжести сохраняются во всех компонентах вертикальной динамической системы, которой является позвоночный столб [4,10,12].

При выполнении хирургических операций на позвоночнике, достижение сагиттального баланса является основой успешного лечения и минимизации развития осложнения, известного в литературе под названием «Синдром смежного уровня»: нарушение биомеханики в позвоночном сегменте выше уровня фиксации [7]. Синдром смежного уровня относится к отдаленным последствиям оперативного лечения (от 4 лет и более), имеет выраженные клинические проявления и требует выполнения повторного оперативного вмешательства, что особенно неблагоприятно для пожилых пациентов.

Причины развития синдрома смежного уровня недостаточно ясны, однако все больше авторов сходятся во мнении, что нарушение сагиттального баланса и развитие синдрома смежного уровня тесно связаны между собой [7,12]. На сегодняшний день, не существует стандартизированной методики количественной оценки сагиттального позвоночно-тазового баланса, позволяющей проводить его эффективный анализ и планировать оперативное вмешательство с учетом сохранения нормальной биомеханики пояснично-крестцового отдела позвоночника.

Цель исследования: Создание диагностической системы для индивидуальной коррекции позвоночно-тазового сагиттального баланса по авторской методике на основе данных методов медицинской визуализации с функцией автоматического расчета, подбора оптимальных значений геометрических и анатомических параметров на основании заданного ряда условий.

В результате исследования, проведенного совместно с кафедрой травматологии и ортопедии РМАПО, создан ряд алгоритмов, позволяющих производить автоматизацию индивидуального определения оптимальных параметров позвоночно-тазового баланса на

предоперационном этапе, а так же прогнозировать отдаленные осложнения уже выполненных операций.

Материалы и методы исследования

Для оценки состояния пояснично-крестцового отдела позвоночника была использована методика, впервые предложенная и апробированная Джахафом М. Т. [13,14]. Методика заключается в оценке соотношения геометрических и анатомических параметров пояснично-крестцового отдела позвоночника в пределах одной анатомической области и осуществляется следующим образом.

Предположим, что поясничный лордоз есть дуга окружности (L), проходящей через верхний передний угол $L1$ позвонка (точка A) и верхний передний угол $S1$ позвонка (точка B). Построим прямую, проходящую через точки A и B . Для дуги окружности (L) данная прямая есть хорда (c) окружности, отделяющая от окружности дугу (L), находящуюся между двумя крайними точками хорды. Часть круга, ограниченная дугой (L) и хордой (c) есть *круговой сегмент*. Разделим хорду на два равных отрезка, построив из данной точки перпендикуляр h от хорды к дуге окружности. Перпендикуляр h есть высота кругового сегмента. Зная высоту сегмента (h) и длину хорды (c) радиус окружности рассчитываем по формуле:

$$R = \frac{h}{2} + \frac{c^2}{8h}, \quad (1)$$

где R – радиус круга, мм; h – высота сегмента, мм; c – длина хорды, мм.

Далее, найдем угол сегмента окружности по формуле:

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{c}{2R} \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (2)$$

Длина дуги окружности определяется по формуле:

$$L = \alpha R \cdot \frac{\pi}{180}, \quad (3)$$

где L – длина дуги окружности, мм; α – угол сегмента.

Все угловые величины выражались в градусах. Помимо геометрических параметров, у всех пациентов определялись анатомические параметры позвоночно-тазового сагиттального баланса: угол лордоза, угол наклона крестца, угол отклонения крестца.

Угол лордоза β определялся как угол между верхней замыкательной пластинкой тела позвонка $L1$ и верхней замыкательной пластинкой тела позвонка $S1$ [1,11].

Угол наклона крестца (SS от англ. *Sacral Slope*) – это угол между горизонтальной плоскостью и верхней замыкательной пластинкой позвонка $S1$ [2,6].

Угол отклонения крестца (SD от англ. *Sacral Deviation*) – угол между перпендикуляром, опущенным от верхней замыкательной пластинки $S1$ позвонка к вентральному краю диска $S1-S2$ сегмента и вертикальной плоскостью [13,14].

Графическое отображение измеряемых параметров представлено на рис. 1.

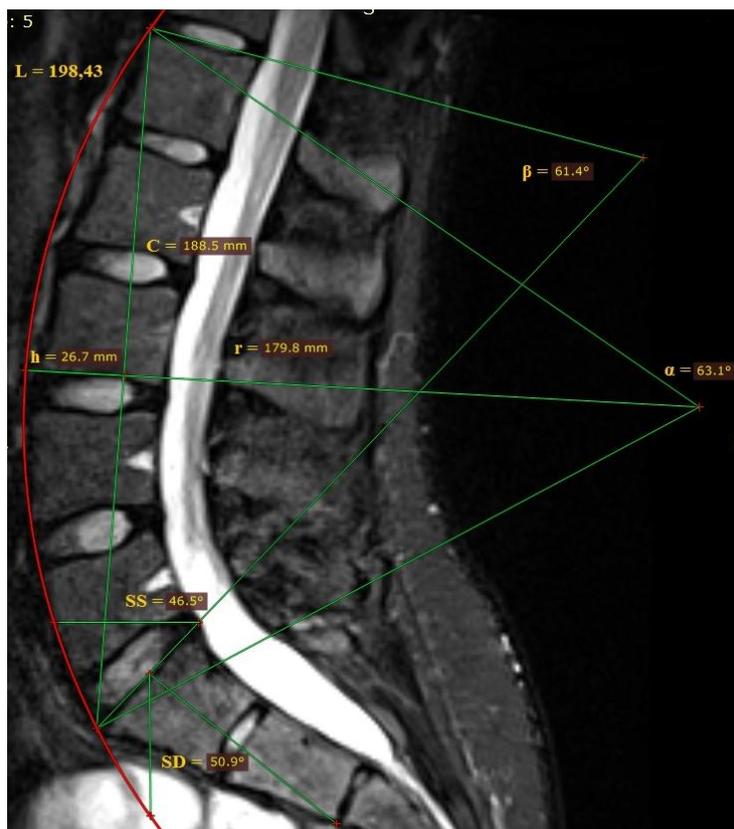


Рис. 1. Определение сагиттальных позвоночно-тазовых параметров

У всех пациентов измерялись следующие параметры: угол лордоза, длина хорды, высота сегмента, угол наклона крестца, угол отклонения крестца. Для оценки параметров позвоночно-крестцового баланса использовались коэффициенты отношения углов, взятых в пределах одной анатомической области:

1. Отношение угла лордоза к центральному углу (поясничный коэффициент)

$$K_L = \frac{\beta}{\alpha}$$

2. Отношение угла наклона крестца к углу отклонения крестца (крестцовый коэффициент)

$$K_S = \frac{SS}{SD}$$

3. «Позвоночно-крестцовый баланс» (*LSB*, от англ. Lumbo-Sacral balance) – модуль математической разности крестцового и поясничного коэффициентов:

$$LSB = |K_S - K_L|. \quad (4)$$

Для разработки диагностической системы были использованы данные магнитно-резонансной томографии (МРТ) и рентгенографии 33 человек, у которых выполнялись исследования до и после ригидной фиксации поясничного отдела позвоночника по приведенному алгоритму. Это позволило:

1. Определить предельно допустимые значения хирургической коррекции позвоночно-тазового сагиттального баланса;
2. Проаннотировать закономерности полученных изменений угловых величин позвоночно-тазового комплекса;
3. Определить статистическую значимость различий между группами по значениям предложенных коэффициентов.

Для оценки взаимовлияния углов, используемых в методе вычисления сагиттального позвоночно-тазового баланса, взят за основу метод, который был предложен Никулиной А.А. [17]. В методе впервые выявлена связь угловых параметров сагиттального баланса с помощью математической модели. Данные параметры являются компонентами единой биологической системы, которым является позвоночный столб.

Схематичное изображение углов β (угол ABC), SS (угол DGE) и SD (угол GKO) представлено на рис. 2а. Используя в качестве примера рис. 1., проведена прямая GM параллельная оси OY (рис. 2б).

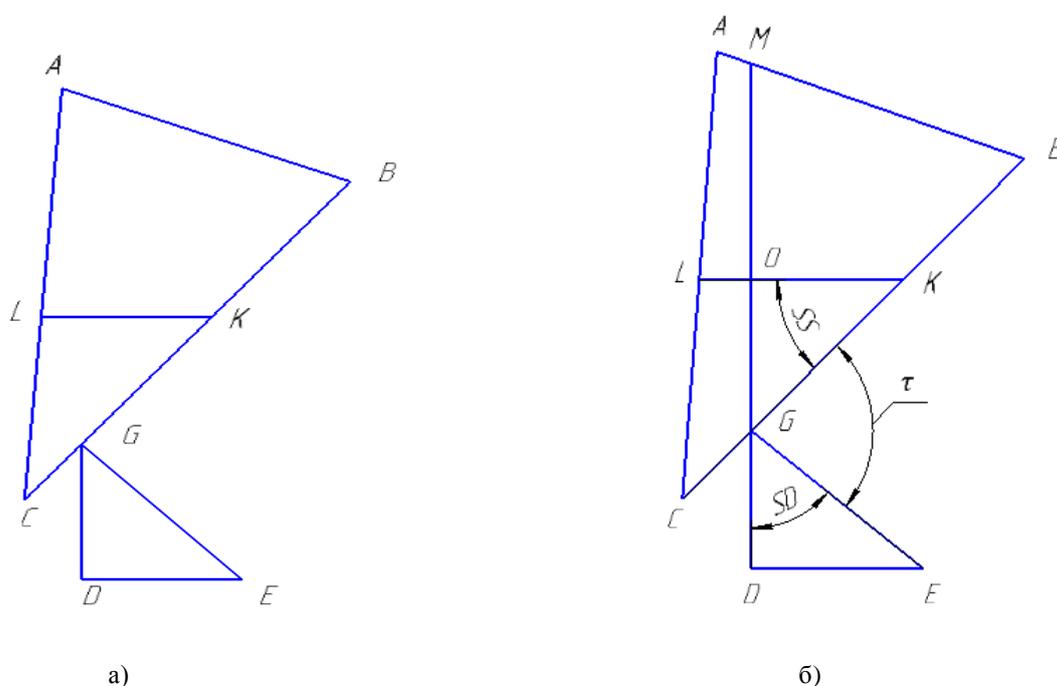


Рис. 2. Моделирование изменения и зависимости угловых параметров а) схематичное изображение углов β , SS и SD ; б) построение прямой GM

Примем $EGB = \tau$. Величина угла EGB является постоянной, так как крестцовые позвонки являются сросшимися и их взаиморасположение не изменяется [9].

$$OGK = 180^\circ - \tau - SD \quad (5)$$

В итоге получаем формулу:

$$SS = GKO = 90^\circ - OGK = \tau + SD - 90^\circ \quad (6)$$

Отсюда следует, что изменение углов SS и SD происходит на одинаковую величину с одинаковыми знаками. Все угловые величины приведены в градусах.

Рассмотрим углы α и β (рис. 3а). В качестве примера так же воспользуемся рис. 1. Проведем прямые CS и SA (рис. 4б)

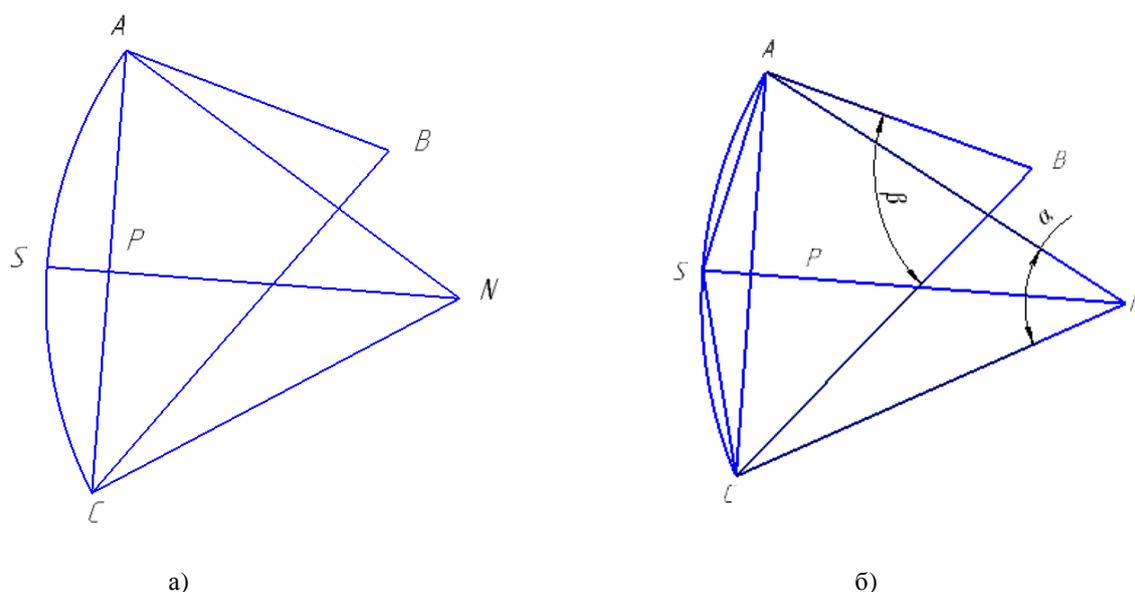


Рис. 3. Моделирование изменения и зависимости угловых параметров а) схематичное изображение углов α и β ; б) построение прямых CS и SA

Величина углов BCS и SAB так же является постоянной с учетом анатомического строения позвоночного столба [9], при условии отсутствия клиновидной деформации позвонков (в данной методике не рассматривается). Рассмотрев четырехугольник $CSAB$ и $CSAN$, выразим угол β через α :

$$\beta = 360^\circ - SAB - BCS - \left(\left(\frac{4320 \cdot \sin \alpha/2}{3(3\pi \cdot \alpha + 360 \cdot \sin \alpha/2)} \right) \cdot \frac{360}{\pi} \right) \quad (7)$$

Объединим формулы (1), (2), (14) в одну систему уравнений. Тогда имеем:

$$\begin{cases} SS = \tau + SD - 90^\circ \\ \beta = 360^\circ - SAB - BCS - \left(\left(\frac{4320 \cdot \sin \alpha/2}{3(3\pi \cdot \alpha + 360 \cdot \sin \alpha/2)} \right) \cdot \frac{360}{\pi} \right) \end{cases} \quad (8)$$

Где угол τ – известен, и не изменяется.

Все угловые величины представлены в градусах. Разброс разности изменений углов до и после операции находятся приблизительно в одном коридоре значений. Углы β , SS и SD пропорционально изменяются как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, что отражает взаимосвязь компонентов единой биологической системы, которой является позвоночный столб.

Статистическая обработка данных выполнялась в программе IBM SPSS Statistics Version 19 (IBM corp. USA). Работа с изображениями, включая измерение угловых и линейных величин, выполнялась в программе Unigraphics NX 8.5 (Siemens PLM Software. USA). Разработка программного компонента системы выполнялась в программе Visual Studio 2013 (Microsoft Corp. USA).

Результаты

Предоперационное планирование является одним из ключевых этапов подготовки к оперативному лечению. На данном этапе хирург должен оценить все возможные риски, связанные с операцией, предложить оптимальный способ оперативного лечения и объем предполагаемого оперативного вмешательства. Но что более важно, в случае с заболеваниями позвоночника, определить степень коррекции нарушений и возможные пути их устранения в случае выявления. На сегодняшний день не существует единой стандартизированной системы предоперационного планирования степени коррекции сагиттального позвоночно-крестцового баланса.

В предложенной методике используется сравнение только угловых величин, значения которых не меняются при изменении масштаба. Это позволяет исследователю уйти от масштабирования, обрабатывать изображения любого формата, представленных на различных носителях, как электронных, так и материальных, что существенно увеличивает её применимость.

Методика показала высокую чувствительность при оценке дегенеративных заболеваний позвоночного столба [13, 14], а так же обладает высокой прогностической ценностью в оценке развития «синдрома смежного уровня» после оперативного лечения.

При сравнении результатов оперативного лечения 33 пациентов, при помощи Т-критерия Вилкоксона, было выявлено отсутствие статистической значимости различий в значении параметра *LSB* у пациентов до и после оперативного лечения (Таблица 1), что свидетельствует о неэффективности методов определения сагиттального позвоночно-тазового баланса, имеющихся в арсенале хирургов на сегодняшний день. Таким образом, создание подобной системы является чрезвычайно важной задачей.

Таблица 1. Ранги и статистика Т-критерия Вилкоксона для предложенных коэффициентов

		<i>N</i>	Ср.ранг	Сумма рангов	<i>Z</i>	Асим.знач.
<i>Ks</i>	Отр. ранги	12	15,75	189,00	-0,896	0,370
	Пол. ранги	18	15,33	276,00		
	Связи	1				
<i>Kl</i>	Отр. ранги	10	13,10	131,00	-2,088	0,037
	Пол. ранги	20	16,70	334,00		
	Связи	1				
<i>LSB</i>	Отр. ранги	10	16,80	168,00	-1,568	0,117
	Пол. ранги	21	15,62	328,00		
	Связи	0				
Всего		33				

Для решения поставленной задачи – оптимизации значений параметров в заданном диапазоне, был использован алгоритм случайного поиска, относящийся к алгоритмам нелинейного математического программирования, имеющих широкую популярность в решении практических инженерных задач [16]. Случайный поиск имеет большую эффективность, значительно превосходит обычные методы поиска в случае дискретно-

непрерывной оптимизации, не требует дополнительного исследования целевой функции и применяется при наличии большого количества параметров [15]. Следует помнить, что в подобных алгоритмах нахождение точного минимума не требуется – решением может считаться любое значение, которое лучше некоторой заданной величины.

В данной задаче, условием останова алгоритма будет являться достижение значения целевой функции (*LSB*) в интервале от 0,2 до 1,0 [13, 14]. Начальные точки – значения угловых величин, полученных в результате обработки снимков и их математического расчета.

Достоинствами описанного алгоритма являются его простота, устойчивость и интуитивная понятность. Недостатками – низкая скорость сходимости, а также неопределенность в выборе условия останова.

Программный модуль автоматизированного расчета

Описание модели расчета значений параметров и определение оптимального баланса производилось на объектно-ориентированном языке высокого уровня C# в интегрированной среде разработки Visual Studio 2013 (Microsoft). Для разработки графического интерфейса использовались стандартные элементы управления среды.

Для подсчета значений параметров на языке программирования C# была переписана система уравнений (8). Подбор значений переменных, позволяющих получать оптимальное значение параметра *LSB*, осуществлялся при помощи функции:

$$RAN = - \text{rnd.NextDouble()} * 8;$$

Переменная *RAN* имеет диапазон вещественных значений от -8.0 до 0.0. Оптимизация сагиттального баланса производится с помощью метода случайного поиска: изменение каждого из углов на определенную величину вещественного типа, при одновременной проверке на условие соблюдения углов из диапазона, характерного для нормального значения переменной *LSB*. Если при выбранном случайном числе *RAN* в итоге не достигается оптимального баланса, то выбираем другое значение вещественного числа и продолжаем действия до тех пор, пока *LSB* не будет находиться в пределах от 0,2 до 1,0.

Допустимый диапазон изменения угловых величин был определен путем оценки разности значений до и после операции методом доверительных интервалов Неймана, приняв общее значение интервала изменения величины, вычислением средней верхней и нижней границ интервала. В результате нижняя граница интервала -8,0, верхняя граница интервала -0,0.

Для достижения оптимального значения *LSB*, необходимо определять величину углов *SAB, BCS* (рис. 3б). Поскольку, угол β рассчитывается по второму уравнению из системы (8), то в конечном итоге точно определить, будет ли его изменение после

оптимизации входить в интервал от $-0,8$ до $0,0$ невозможно. Поэтому, на выборке из 33 пациентов был определен диапазон значений угла β : от 20° до 70° , использующийся в программе при проверке угла β после оптимизационных расчетов.

Еще одним важным фактором, оказывающим существенное влияние на допустимый диапазон изменения угловых величин, является уровень и протяженность фиксации пояснично-крестцового отдела позвоночника. Под протяженностью фиксации понимается количество позвоночных сегментов, в отношении которых выполняется хирургическое вмешательство. В случае если фиксация затрагивает т.н. «переходную зону» между пятым поясничным позвонком и крестцом (уровень L5-S1), создаются условия для выполнения коррекции положения крестца относительно вертикальной и горизонтальной оси координат.

В нашей системе данная задача решается созданием двух дополнительных условий: уровень фиксации затрагивает поясничный отдел (L), при этом меняются только значения углов α и β или пояснично-крестцовый переход (L и S), когда происходит изменение значений всех угловых величин позвоночно-крестцового баланса (рис.4).

Исходные данные		Дополнительные данные при нарушении баланса		Оптимальные значения параметров	
угол beta	<input type="text"/>			угол beta	<input type="text"/>
высота h	<input type="text"/>			угол alfa	<input type="text"/>
хорда C	<input type="text"/>	угол teta	<input type="text"/>	SS	<input type="text"/>
SS	<input type="text"/>	угол SAB	<input type="text"/>	SD	<input type="text"/>
SD	<input type="text"/>	угол BCS	<input type="text"/>	баланс	<input type="text"/>
выбор отдела	<input type="text"/>				
	Отдел L				
	Отделы L и S				
Выходные данные					
угол alfa	<input type="text"/>				
баланс	<input type="text"/>				

Рис. 4. Окно ввода и вывода данных программы. Выбор дополнительного условия для расчета.

Пример результата работы программы

Рассмотрим пример, когда до и после операции значение баланса осталось в пределах патологического диапазона значений. У данного пациента фиксация затрагивала уровень L5-S1. Сравнение значений угловых величин до и после операции представлено в таблице 2 и рис. 5.

Таблица 2. Сравнение значений всех параметров до, после оперирования и с результатами работы программы

	Угол сегмента	Угол лордоза	Наклон крестца	Отклонение крестца	Баланс
До операции	59,43	49,6	44,6	45,7	0,14
После операции	49,26	47,2	37,1	39,2	0,1
Расчетные значения	51,96	37,7	37,13	38,23	0,25

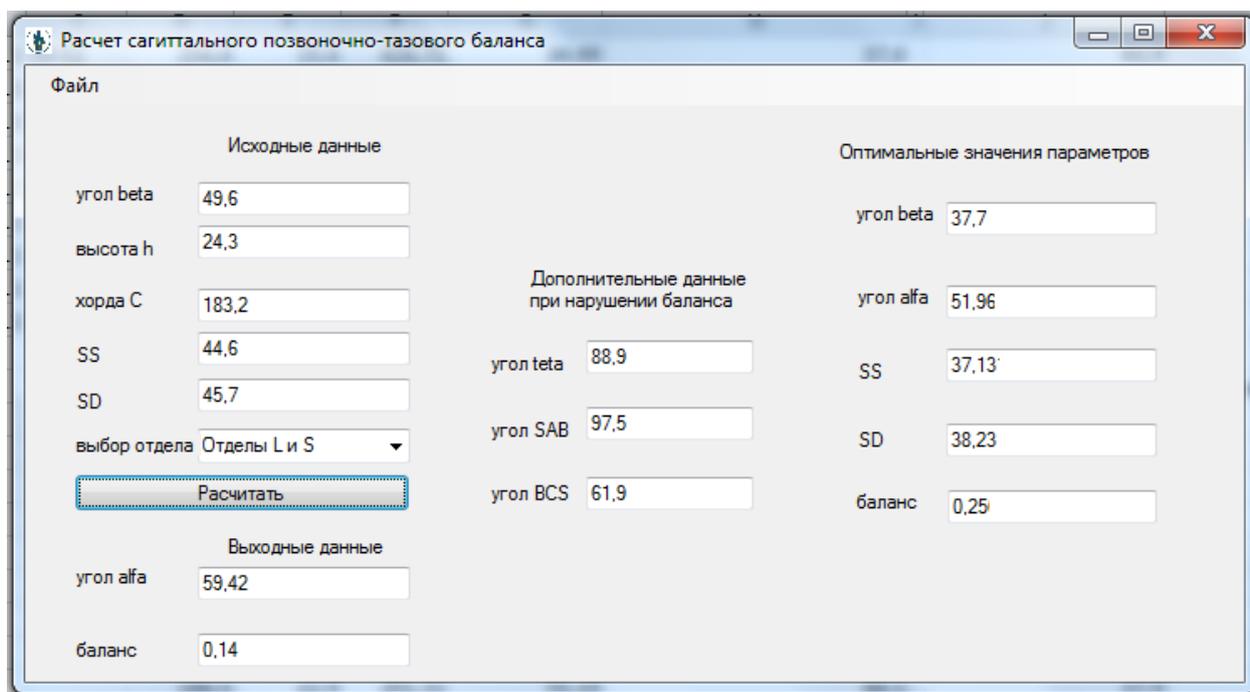


Рис. 5. Окно результата работы программы.

Таким образом, для достижения нормального сагиттального баланса требовалось уменьшить угол наклона крестца и одновременно уменьшить угол лордоза, что является достижимым условием, с точки зрения анатомии и биомеханики пояснично-крестцового перехода. Результат работы программы является приближенным к оптимальному и учитывает особенности строения позвоночного столба данного пациента. Это помогает хирургу точно установить угол изгиба штанги для ее фиксации на позвонках.

Заключение

Совместно с кафедрой травматологии ортопедии РМАПО была разработана методика количественной оценки позвоночно-тазового баланса, основанная на геометрической оценке поясничного отдела позвоночника и крестца. Перед нами встала задача автоматизации расчета угловых величин для достижения значения позвоночно-тазового баланса в пределах допустимых значений.

Полученные результаты позволяют выполнять предоперационное планирование у пациентов с заболеваниями позвоночника, тем самым помогая восстановить позвоночно-тазовый баланс, свести к минимуму риск средне- и долгосрочных послеоперационных осложнений, избежать выполнения повторных оперативных вмешательств, тем самым повысив качество оказываемой медицинской помощи. В то же время у пациентов, прооперированных ранее, появляется возможность прогнозирования развития синдрома смежного уровня и выполнение оперативного вмешательства еще до развития тяжелых клинических проявлений. Программный модуль внедрен в деятельность отделения вертебрыологии ЦКБ РАН (зав. отделением д.м.н., проф. Макиров С.К.) для дальнейшей доработки программы и отработки алгоритмов расчета.

В дальнейших работах нами планируется:

1. Привязка программного модуля к формату DICOM для возможности работы с исходными изображениями без необходимости конвертирования.
2. Разработка графического модуля внутри программы с необходимым инструментарием для решения широкого круга задач по геометрическим построениям и измерениям;
3. Создание графического интерфейса программы для наглядного отображения результатов;
4. Уточнение диапазона изменения угловых величин, а так же математических отношений угловых величин путем увеличения числа наблюдений в выборки.

Список литературы

1. Been E., Kalichman L. Lumbar lordosis // *The Spine Journal*. 2013. Vol. 14, no. 1. P. 87-97. DOI: [10.1016/j.spinee.2013.07.464](https://doi.org/10.1016/j.spinee.2013.07.464)
2. Boulay C., Tardieu C., Hecquet J., Benaim C., Mouilleseaux B., Marty C., Prat-Pradal D., Legaye J., Duval-Beaupere G., Pelissier J. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis // *European Spine Journal*. 2006. Vol. 15, no. 4. P. 415-422. DOI: [10.1007/s00586-005-0984-5](https://doi.org/10.1007/s00586-005-0984-5)
3. Guigui P., Levassor N., Rillardon L., Wodecki P., Cardinne L. Physiological value of pelvic And spinal parameters of sagittal balance: analysis of 250 healthy volunteers // *Revue De Chirurgie Orthopedique Et Reparatrice De L Appareil Moteur*. 2003. Vol. 89, no. 6. P. 496-506.
4. Lazennec J.Y., Brussonc A., Rousseau M.A. Lumbar-pelvic-femoral balance on sitting and standing lateral radiographs // *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2013. Vol. 99, no. 1, suppl. P. S87-S103. DOI: [10.1016/j.otsr.2012.12.003](https://doi.org/10.1016/j.otsr.2012.12.003)
5. Legaye J. Ch. 10. Analysis of the Dynamic Sagittal Balance of the Lumbo-Pelvi-Femoral Complex // In book: *Biomechanics in Applications* / ed. by V. Klika. InTech Publ., 2011. P. 221-246. DOI: [10.5772/19608](https://doi.org/10.5772/19608)
6. Legaye J., Duval-Beaupere G., Hecquet J. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves // *European Spine Journal*. 1998. Vol. 7, iss. 2. P. 99-103. DOI: [10.1007/s005860050038](https://doi.org/10.1007/s005860050038)

7. Levin D.A., Hale J.J., Bendo J.A. Adjacent segment degeneration following spinal fusion for degenerative disc disease // Bulletin of the NYU Hospital for Joint Diseases. 2007. Vol. 65, no. 1. P. 29-36.
8. Marty C., BoisAuBert B., Montigny J.P. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants and spondylolisthesis patients // European Spine Journal. 2002, vol. 11, iss. 2. P. 119-125. DOI: [10.1007/s00586-001-0349-7](https://doi.org/10.1007/s00586-001-0349-7)
9. Stagnara P., Mauroy J.C., Dran G., Gonon G.P., Costanzo G., Dimnet J., Pasquet A. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis // Spine. 1982. Vol. 7, no. 4. P. 335-342. DOI: [10.1097/00007632-198207000-00003](https://doi.org/10.1097/00007632-198207000-00003)
10. Vaz G., Roussouly P., Berthonnaud E. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine // European Spine Journal. 2002. Vol. 11, iss. 1. P. 80-87. DOI: [10.1007/s005860000224](https://doi.org/10.1007/s005860000224)
11. Vrtovec T., Pernus F., Likar B. A review of methods for quantitative evaluation of spinal curvature // European Spine Journal. 2009. Vol. 18, iss. 5. P. 593-607. DOI: [10.1007/s00586-009-0913-0](https://doi.org/10.1007/s00586-009-0913-0)
12. Weiler P.J., King G.J., Gertzbein S.D. Analysis of sagittal plane instability of the lumbar spine in vivo // Spine. 1990. Vol. 15, no. 12. P. 1300-1306. DOI: [10.1097/00007632-199012000-00012](https://doi.org/10.1097/00007632-199012000-00012)
13. Джахаф М.Т., Юз А.А. Методика оценки параметров сагиттального позвоночно-крестцового баланса // Научно-практическая конференция молодых ученых «Современная медицина: традиции и инновации» (Москва, 22-23 апреля 2015 г.): тез. докл. / Российская медицинская академия последипломного образования. М., 2015. С. 12-13.
14. Макиров С.К., Джахаф М.Т., Юз А.А. Методика оценки параметров сагиттального позвоночно-крестцового баланса // 6-ая международная конференция «Science4Health'2015» (Москва, 17-18 апреля 2015 г.): докл. М., 2015. С. 163-164.
15. Кушербаева В.Т., Сушков Ю.А. Статистическое исследование алгоритма случайного поиска // Стохастическая оптимизация в информатике. 2007. Т. 3, № 1-1. С. 21-36.
16. Сушков Ю.А. Об одном способе организации случайного поиска // Исследование операций и статистическое моделирование: сб. ст. Вып. 1. Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1972. С. 180-185.
17. Никулина А.А. Математическое моделирование угловых параметров пояснично-крестцового отдела позвоночника // Молодежный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. (в печати).

Developing a System for Efficient Analysis of Lumbosacral Sagittal Balance

D.M. Zhuk^{1,*}, A.A. Nikulina¹

[*zhuk@bmstu.ru](mailto:zhuk@bmstu.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: lumbosacral sagittal balance, random searching algorithm, preoperative planning, geometrical dependence modeling

Lumbosacral sagittal balance is the neutral vertical alignment in the sagittal plane to provide decreasing stress loading on muscular-ligamentous structures. The achieving sagittal balance is a basis to provide successful surgical treatment and minimize further complications. As of today, there is no standard quantitative evaluation method of sagittal lumbo-sacral balance, which allows conducting its effective analysis and planning surgical treatment taking into consideration the preservation of normal biomechanics of lumbosacral spine. The goal of the study is to develop a diagnostic system for individual correction of lumbo-sacral sagittal balance by the author's method with automatic counting and optimized matching of data values based on a specified number of terms using medical visualization data. This study has been conducted with RMAPE's Department of Traumatology and Orthopedic Surgery. To solve the problem, a random searching algorithm has been exploited. The stop condition of the algorithm was to achieve the objective function value in adjusted interval, initial points of which are the calculated (angular) values. The interaction of the angular values, used in the proposed method has been investigated, and their proportional change has been proved. Moreover, the mathematical dependence among geometrical and anatomical parameters of lumbosacral spine has been determined. Based on conducted study, a number of algorithms enabling the automation of the individual determination of optimal lumbosacral balance's parameters at preoperative planning stage for patients with vertebral column diseases have been created. This allows us to raise physician's efficiency, minimize mid- and long-term risk of postoperative complications, and avoid reoperations, and prognosticate long-term complications already performed surgery.

References

1. Been E., Kalichman L. Lumbar lordosis. *The Spine Journal*, 2013, vol. 14, no. 1, pp. 87-97. DOI: [10.1016/j.spinee.2013.07.464](https://doi.org/10.1016/j.spinee.2013.07.464)
2. Boulay C., Tardieu C., Hecquet J., Benaim C., Mouilleseaux B., Marty C., Prat-Pradal D., Legaye J., Duval-Beaupere G., Pelissier J. Sagittal alignment of spine and pelvis regulated

- by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *European Spine Journal*, 2006, vol. 15, no. 4, pp. 415-422. DOI: [10.1007/s00586-005-0984-5](https://doi.org/10.1007/s00586-005-0984-5)
3. Guigui P., Levassor N., Rillardon L., Wodecki P., Cardinne L. Physiological value of pelvic and spinal parameters of sagittal balance: analysis of 250 healthy volunteers. *Revue De Chirurgie Orthopedique Et Reparatrice De L Appareil Moteur*, 2003, vol. 89, no. 6, pp. 496-506.
 4. Lazennec J.Y., Brussonc A., Rousseau M.A. Lumbar-pelvic-femoral balance on sitting and standing lateral radiographs. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 2013, vol. 99, no. 1, suppl, pp. S87-S103. DOI: [10.1016/j.otsr.2012.12.003](https://doi.org/10.1016/j.otsr.2012.12.003)
 5. Legaye J. Ch. 10. Analysis of the Dynamic Sagittal Balance of the Lumbo-Pelvi-Femoral Complex. In book: Klika V., ed. *Biomechanics in Applications*. InTech Publ., 2011, pp. 221-246. DOI: [10.5772/19608](https://doi.org/10.5772/19608)
 6. Legaye J., Duval-Beaupere G., Hecquet J. Pelvic incidence: a fundamental pelvic parameter for three-dimensional regulation of spinal sagittal curves. *European Spine Journal*, 1998, vol. 7, iss. 2, pp. 99-103. DOI: [10.1007/s005860050038](https://doi.org/10.1007/s005860050038)
 7. Levin D.A., Hale J.J., Bendo J.A. Adjacent segment degeneration following spinal fusion for degenerative disc disease. *Bulletin of the NYU Hospital for Joint Diseases*, 2007, vol. 65, no. 1, pp. 29-36.
 8. Marty C., BoisAuBert B., Montigny J.P. The sagittal anatomy of the sacrum among young adults, infants and spondylolisthesis patients. *European Spine Journal*, 2002, vol. 11, iss. 2, pp. 119-125. DOI: [10.1007/s00586-001-0349-7](https://doi.org/10.1007/s00586-001-0349-7)
 9. Stagnara P., Mauroy J.C., Dran G., Gonon G.P., Costanzo G., Dimnet J., Pasquet A. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine*, 1982, vol. 7, no. 4, pp. 335-342. DOI: [10.1097/00007632-198207000-00003](https://doi.org/10.1097/00007632-198207000-00003)
 10. Vaz G., Roussouly P., Berthonnaud E. Sagittal morphology and equilibrium of pelvis and spine. *European Spine Journal*, 2002, vol. 11, iss. 1, pp. 80-87. DOI: [10.1007/s005860000224](https://doi.org/10.1007/s005860000224)
 11. Vrtovec T., Pernus F., Likar B. A review of methods for quantitative evaluation of spinal curvature. *European Spine Journal*, 2009, vol. 18, iss. 5, pp. 593-607. DOI: [10.1007/s00586-009-0913-0](https://doi.org/10.1007/s00586-009-0913-0)
 12. Weiler P.J., King G.J., Gertzbein S.D. Analysis of sagittal plane instability of the lumbar spine in vivo. *Spine*, 1990, vol. 15, no. 12, pp. 1300-1306. DOI: [10.1097/00007632-199012000-00012](https://doi.org/10.1097/00007632-199012000-00012)
 13. Dzhakhaf M.T., Yuz A.A. Method of estimation of parameters of sagittal spinal-sacral balance. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh "Sovremennaya meditsina: traditsii i innovatsii": tez. dokl.* [Abstracts of Scientific-practical conference of young scientists "Modern medicine: Tradition and Innovation"], Moscow, April 22-23,

2015. Moscow, Russian Medical Academy of Postgraduate Education, 2015, pp. 12-13. (in Russian).
14. Makirov S.K., Dzhakhaf M.T., Yuz A.A. Method of estimation of parameters of sagittal spinal-sacral balance. *6-aya mezhdunarodnaya konferentsiya "Science4Health'2015": dokl.* [6th International Conference "Science4Health'2015"], Moscow, April 17-18, 2015. Moscow, 2015, pp. 163-164. (in Russian).
15. Kuserbaeva V.T., Sushkov Yu.A. Statistical study of random-search algorithm. *Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike*, 2007, vol. 3, no. 1-1, pp. 21-36. (in Russian).
16. Sushkov Yu.A. About one method to random search. *Issledovanie operatsii i statisticheskoe modelirovanie: sb. st. Vyp. 1* [Operations research and statistical modeling: collected articles. Vol. 1]. Leningrad, LSU Publ., 1972, pp. 180-185. (in Russian).
17. Nikulina A.A. Mathematical modeling of angular parameters of lumbosacral spine. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2015. (In Russian, unpublished).