

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.1.01

УДК 531/534: [57+61]

ОБОБЩЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ САГИТТАЛЬНОГО БАЛАНСА

Д.В. Иванов¹, А.С. Фалькович¹, А.М. Донник¹, А.В. Полиенко¹, Е.С. Оленко¹,
А.В. Крутько²

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Российская Федерация, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, e-mail: ivanovdv@gmail.com, falkovichas@yandex.ru, olenco@mail.ru

² Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова, Российская Федерация, 127299, Москва, ул. Приорова, 10, e-mail: ortho-ped@mail.ru

Аннотация. Сагиттальный баланс позвоночника характеризует его физиологическое выравнивание мышечными усилиями наиболее эффективным образом. Оптимальные позвоночно-тазовые взаимоотношения формируют биомеханически эффективный и оптимальный сагиттальный профиль позвоночника, что снижает расход энергии на поддержание равновесного состояния и уменьшает риски дегенеративных повреждений межпозвоночных дисков. Сагиттальный баланс описывается с помощью основных угловых параметров: тазового индекса, поясничного лордоза, наклона таза и наклона крестца. При выполнении хирургического лечения врачи пытаются сформировать оптимальные позвоночно-тазовые взаимоотношения, для чего на этапе предоперационного планирования измеряют актуальные параметры баланса конкретного пациента и с помощью эмпирических формул рассчитывают их теоретические значения. Для расчета оптимальных параметров сагиттального баланса конкретного пациента различными научными группами разработан ряд эмпирических зависимостей. Однако в научном сообществе нет единого мнения, какими конкретно формулами пользоваться при планировании лечения. В данной работе предпринята попытка обобщить имеющиеся в научной литературе данные о параметрах сагиттального баланса и разработать новые, единые для всех этих данных регрессионные зависимости, позволяющие связать между собой его параметры. Для этого из литературных источников были взяты исходные данные для построения таких зависимостей. Также были использованы собственные данные – результаты измерений параметров сагиттального баланса пациентов Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова Саратовского государственного медицинского университета. Из найденных статей были выбраны исходные числовые данные, связывающие между собой основные параметры сагиттального баланса. Данные были оцифрованы и обработаны при помощи методов статистики. Были получены регрессионные зависимости, позволяющие рассчитать поясничный лордоз, наклон таза и наклон крестца через тазовый индекс конкретного пациента. Полученные зависимости обобщают известные на сегодняшний день данные измерений, проведенных исследователями нескольких стран у пациентов различного возраста, позволяют рассчитывать оптимальные параметры сагиттального баланса и могут быть применены при предоперационном

© Иванов Д.В., Фалькович А.С., Донник А.М., Полиенко А.В., Оленко Е.С., Крутько А.В., 2022

Иванов Дмитрий Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики, Саратов

Фалькович Александр Савельевич, д.т.н., заведующий кафедрой медицинской кибернетики, Саратов

Донник Анна Михайловна, старший преподаватель кафедры медицинской кибернетики, Саратов

Полиенко Асель Валерьевна, ассистент кафедры математической теории упругости и биомеханики, Саратов

Оленко Елена Сергеевна, д.м.н., профессор кафедры основ медицины и медицинских технологий, Саратов

Крутько Александр Владимирович, д.м.н., заведующий отделением нейровертебрологии, Москва

планировании хирургического лечения последствий заболеваний и повреждений позвоночно-тазового комплекса. Обобщающие зависимости позволяют систематизировать накопленный в литературе клинический опыт и были использованы при разработке первой в мире системы предоперационного планирования хирургического лечения последствий и заболеваний позвоночно-тазового комплекса с биомеханической поддержкой решения врача.

Ключевые слова: сагиттальный баланс, позвоночно-тазовые взаимоотношения, тазовый индекс, поясничный лордоз, наклон таза, наклон крестца, регрессионный анализ, медицинская статистика, биомеханическое моделирование, предоперационное планирование

ВВЕДЕНИЕ

Статический сагиттальный баланс нормального позвоночника – это его физиологическое выравнивание наиболее эффективным образом с помощью мышечных сил [14]. Оптимальные позвоночно-тазовые взаимоотношения позволяют сформировать биомеханически эффективный сагиттальный профиль позвоночника, снизить расход энергии и риск дегенерации соседних позвоночно-двигательных сегментов [4]. Сагиттальный баланс может быть описан с помощью угловых позвоночно-тазовых параметров (рис. 1): тазовый индекс (*PI*), поясничный лордоз (*LL*), наклон таза (*PT*) и наклон крестца (*SS*) [11]. Изучению сагиттального баланса посвящены работы многих современных авторов. В базе данных *Pubmed* содержится более 23000 статей, так или иначе касающихся вопросов, связанных с сагиттальным балансом.

Таз является «фундаментом», на котором «установлен» позвоночник. В сагиттальной (боковой) проекции ширина таза определяется количественно с помощью тазового индекса *PI*. *PI* анатомически фиксирован, не меняется после подросткового возраста и индивидуален для каждого человека [21]. Таз может вращаться вокруг головки бедренной кости до определенного предела. Это вращение характеризуется углом наклона таза *PT*. Когда таз поворачивается назад (ретроверсия),

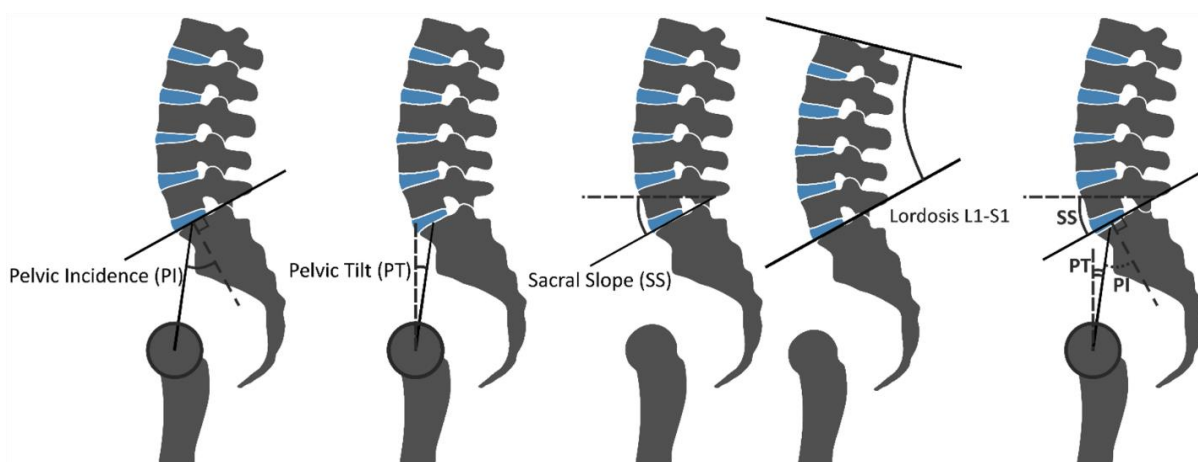


Рис. 1. Основные параметры сагиттального баланса: *PI* – угол между линией, перпендикулярной к середине замыкательной пластинки *S1*, и линией, соединяющей ту же точку с центром головки бедренной кости; *PT* – угол между линией, проведенной через центр головки бедренной кости и середину замыкательной пластинки *S1*, и вертикальной линией; *SS* – угол между горизонтальной линией и линией, проведенной через замыкательную пластинку *S1*; *LL* (поясничный лордоз) угол, между линиями, проведенными через верхнюю замыкательную пластинку *L1* и замыкательную пластинку *S1*

PT увеличивается, а при повороте таза вперед (антеверсия) PT уменьшается. Возможность вращения таза вокруг оси головки бедренной кости – основной механизм регуляции сагиттального баланса. Пациенты с малым PI имеют небольшую способность компенсировать сагиттальный дисбаланс за счет ретроверсии таза.

Угол наклона крестца SS – компенсационный угол PT , характеризует положение концевой пластины позвонка $S1$. Углы PT , PI и SS математически связаны следующей формулой: $PI = PT + SS$. Из этой формулы следует, что у пациента с большим PI больше вероятность ретроверсии таза. Это важное знание при анализе компенсаторных механизмов.

При опирании на таз позвоночник за счет действия мышц адаптирует свою форму в боковой проекции, чтобы оставаться в равновесии. Форма поясничного отдела позвоночника определяется углом LL (поясничный лордоз). LL – угол между верхней замыкательной пластинкой поясничного позвонка $L1$ и верхней замыкательной пластинкой позвонка $S1$. Важно, что порядка 70 % угла LL локализовано в нижней поясничной дуге между позвонками $L4$ и $S1$.

Показано [5, 20], что несбалансированный позвоночник коррелирует с потерей качества жизни пациента и прогрессирующей болью в пояснице, что может быть показанием к выполнению хирургического лечения. Послеоперационные изменения в сагиттальном балансе также могут приводить к выпрямлению поясничного лордоза и наклону туловища кпереди, что также может сопровождаться болями в спине [6, 10].

При выполнении хирургического лечения заболевания или повреждения позвоночно-тазового комплекса (ПТК) хирурги стремятся сформировать оптимальные позвоночно-тазовые взаимоотношения, для чего выполняют тщательное предоперационное планирование, в рамках которого измеряют актуальные параметры баланса конкретного пациента и рассчитывают их теоретические значения [12]. С развитием современных информационных технологий предоперационное планирование стало возможным с использованием мобильного телефона с установленным на нем мобильным приложением [2], предназначенным для измерения и расчета оптимальных параметров баланса.

Для расчета теоретических (или оптимальных) значений параметров сагиттального баланса многими авторами предпринимаются попытки разработать математические формулы [12, 16–19, 21, 23]. Основная проблема при разработке таких формул состоит в том, чтобы собрать довольно большие группы пациентов, имеющих здоровый позвоночник.

Принято считать, что параметр PI является индивидуальным для каждого человека и остается неизменным в течение жизни [21]. Показано [18–21], что существует связь между PI и другими основными угловыми параметрами сагиттального баланса, значения которых могут меняться при развитии дегенеративно-дистрофических заболеваний и травмах позвоночно-тазового комплекса.

Таким образом, актуальность разработки и апробации зависимостей, связывающих основные параметры сагиттального баланса и параметр PI , не вызывает сомнений. Решение этой проблемы позволит для каждого пациента на этапе предоперационного планирования рассчитать его оптимальные параметры сагиттального баланса и таким образом выполнить планирование хирургического лечения. Другими словами, измерив актуальные значения параметров и рассчитав их оптимальные значения, врач увидит, какой параметр и на сколько необходимо скорректировать во время лечения.

Данная работа посвящена обобщению известных в литературе формул, связывающих основные параметры сагиттального баланса. В результате проведенного

исследования были получены оригинальные обобщающие формулы, позволяющие рассчитать теоретические значения параметров SS , PT и LL через параметр PI для каждого конкретного пациента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Был осуществлен поиск научной литературы, посвященной получению линейных регрессионных зависимостей, связывающих параметры *Pelvic Incidence (PI)*, *Pelvic Tilt (PT)*, *Lumbar Lordosis (LL)* и *Sacral Slope (SS)*. Поиск осуществлялся в базах данных научной литературы *eLIBRARY*, *PubMed*, *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*. Ключевыми словами для поиска статей являлись:

- *sagittal parameters formula*;
- *relationship between sagittal parameters*;
- *correlation between sagittal parameters*;
- связь параметров сагиттального баланса.

Научные статьи, которые включались в данное исследование, должны были быть посвящены поиску регрессионных зависимостей для параметров сагиттального баланса пациентов без патологий позвоночно-тазового комплекса. Также были использованы данные из исследования, представленного в статье [2].

Из найденных статей были выбраны только те [7, 12, 16, 21, 22], в которых в виде графиков были опубликованы исходные данные измеренных параметров сагиттального баланса. Затем данные из этих статей были оцифрованы и использованы при построении новых обобщающих зависимостей. Для оцифровки графиков использовали программное обеспечение *Microsoft Paint*, *Microsoft Excel*. Качество оцифровки контролировалось по совпадению регрессионных параметров и коэффициентов корреляции, приведенных в соответствующих публикациях и рассчитанных в данной работе по оцифрованным данным.

Для построения обобщающих зависимостей также были использованы данные из собственного исследования [2]. При построении обобщающих зависимостей использовались методы регрессионного и дисперсионного анализа, реализованные в офисном пакете *Microsoft Excel*.

Данные из найденных работ и из собственного исследования использовались, чтобы установить, имеются ли статистически достоверные различия между опубликованными в них данными, или же все полученные разными авторами результаты можно считать частью одной выборки и, следовательно, по ним можно построить обобщающую регрессионную зависимость.

В исследования включались только те статьи, в которых исследуемые параметры сагиттального баланса измерялись на основе рентгенограмм пациентов в положении стоя. На самом деле компьютерную томографию [9] ПТК выполняют пациенту в положении лежа, а в этом положении происходит спрямление естественных лордотических и кифотического изгибов позвоночника. Поэтому параметры сагиттального баланса ПТК измеряют только по рентгенограммам, сделанным пациентам в положении стоя. Также из рассмотрения исключались статьи с результатами косвенных измерений исследуемых параметров. Так, в работах [18] и [17] вместо непосредственно измеренного параметра LL рассматривалась сумма величин $LLUA$ (верхняя дуга поясничного лордоза) и $LLLA$ (нижняя дуга поясничного лордоза).

На рис. 1 приведены основные параметры сагиттального баланса, зависимости между которыми обобщались в данной работе. В частности, были получены зависимости параметров LL , SS и PT от параметра PI , а также впервые была получена зависимость параметра SS от PI и LL .

Далее были построены единые зависимости параметров сагиттального баланса по имеющимся в работах экспериментальным данным оценки правомерности построения.

Выборки оцифрованных значений параметров сагиттального баланса из статей сравнивались друг с другом по следующей методике. Данные из всех источников объединялись в одну выборку, по которой рассчитывались линейные регрессионные зависимости – формулы $LL = a_1 \cdot PI + b_1$; $SS = a_2 \cdot PI + b_2$ и $SS = a_3 \cdot PI + b_3 \cdot LL + c_3$.

Дальнейший анализ опишем на примере зависимости $LL(PI)$. На основе полученного «общего» уравнения регрессии вычислялись расчетные значения зависимой переменной $LL_{ci} = a_1 \cdot PI_i + b_1$ для каждого экспериментального значения PI_i . Затем вычислялись регрессионные остатки, то есть разности между экспериментальными и расчетными значениями ($LL_i - (a_1 \cdot PI_i + b_1)$).

Затем были рассмотрены подмножества остатков ($LL_i - (a_1 \cdot PI_i + b_1)$), полученные по данным из каждой рассматриваемой статьи и на основе наших данных. Эти подмножества сравнивались между собой по методике однофакторного дисперсионного анализа. Отдельно по каждому подмножеству были подсчитаны средние, стандартные отклонения и ошибки средних. Затем вычислялись попарные разности между средними и ошибки этих разностей. Отношение разности к соответствующей ошибке разности сравнивалось с верхней 5 % точкой распределения Стьюдента при степени свободы, равной сумме объемов двух выборок минус два. Если отношение разности к ошибке разности было меньше этой величины, подмножества остатков можно было считать частью одной генеральной совокупности. На этом основании делался вывод о том, что данные из нескольких источников допустимо объединять в одну выборку и, соответственно, для описания зависимости между параметрами сагиттального баланса ПТК, установленными в различных статьях, можно пользоваться единой регрессионной зависимостью.

Аналогичные действия выполнялись для зависимостей $SS = a_2 \cdot PI + b_2$ и $SS = a_3 \cdot PI + b_3 \cdot LL + c_3$. Средняя относительная ошибка аппроксимации для регрессионных зависимостей оценивалась по общепринятой формуле

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{LL_i - (a_1 \cdot PI_i + b_1)}{LL_i} \right| 100 \%$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего было найдено 11 статей, в которых в виде графиков были представлены регрессионные зависимости между параметрами сагиттального баланса.

В статьях [9–19] были предложены различные регрессионные зависимости между параметрами *Pelvic Incidence (PI)*, *Pelvic Tilt (PT)*, *Lumbar Lordosis (LL)* и *Sacral Slope (SS)*, построенные на основе проведенных авторами этих работ результатов измерений. Из найденных статей были выбраны работы [7, 12, 16, 21, 22], в которых на графиках были приведены данные исходных замеров по каждому пациенту (табл. 1). Другие работы были исключены из исследования, так как в них были представлены результаты измерений параметров, выполненных по компьютерным томограммам, а также результаты косвенных, а не прямых измерений исследуемых параметров.

Также были изучены зависимости этих параметров, построенные на результатах собственных измерений [2] (далее – результаты измерений), сделанных по рентгенограммам в положении стоя пациентов Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова Саратовского государственного медицинского университета.

Таблица 1

Найденные и использованные в данном исследовании литературные источники, данные собственного исследования, а также найденные формулы, связывающие параметры сагиттального баланса

Источник	Характеристика выборки	Формулы	«Школа»
<i>Le Huec J.C., Hasegawa K.</i> [12]	268 человек (117 мужчин и 161 женщина), средний возраст 37,2 (18–76), без симптомов	$LL = 0,54 \cdot PI + 27,6$ $PT = 0,4429 \cdot PI - 11,389$ $SS = 0,54 \cdot PI + 11,90$	французская
<i>Hyun S.J., Han S., Kim Y.B., Kim Y.J., Kang G.B., Cheong J.Y.</i> [7]	150 мужчин в возрасте $64,1 \pm 6,4$, без симптомов	$LL = 0,62 \cdot PI + 27,61$	американская
<i>Sullivan T.B., Marino N., Reighard F.G., Newton P.O.</i> [21]	125 подростков (47 мальчиков, 78 девочек), средний возраст 13 ± 2 , без симптомов,	$LL = 0,66 \cdot PI + 24,2$	американская
<i>Tanguay F., Mac-Thiong J.M., deGuise J.A., Labelle H.</i> [22]	60 детей (57 девочек и 3 мальчика), с диагнозом подростковый идиопатический сколиоз, перенесшие операцию <i>PSIF</i>	$LL = 0,56 \cdot PI + 33,43$	французская
<i>Legaye J, Duval-Beaupère G.</i> [16]	49 человек (28 мужчин и 21 женщина), от 19 до 30 лет без какой-либо патологии позвоночника	$SS = 0,5481 \cdot PI + 12,7$	французская
Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю. с соавт. [2]	52 пациента, средний возраст 46 (32–57) лет, 28 женщин и 24 мужчины с последствиями травмы позвоночника и спондилолистезом	–	русская

На рис. 2 для примера представлены зависимости параметра LL от PI по данным литературы и по результатам измерений.

Сначала приведем результаты получения взаимосвязи параметров LL и PI . Затем покажем результаты получения зависимости между SS и PI , а связь параметров PT и PI выведем из геометрического соотношения $SS + PT = PI$ [15].

Взаимосвязь параметров LL и PI

Взаимосвязь параметров LL и PI изучалась на основании результатов измерений [2], дополненных данными из работ [16, 12, 7, 21, 22].

По 638 результатам попарных измерений, включающих представленные в литературе [16, 12, 7, 21, 22], а также данные пациентов научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского, была построена линейная регрессионная зависимость (см. рис. 2)

$$LL = 0,502 PI + 33,90. \quad (1)$$

Данные для анализа остатков от регрессии приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 3.

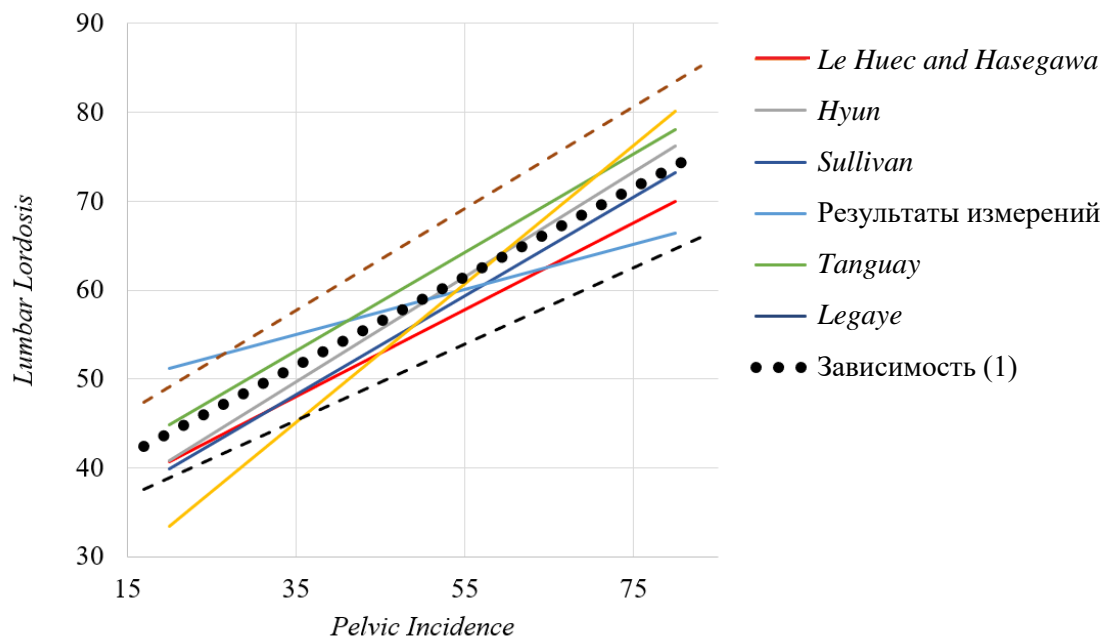


Рис. 2. Зависимости параметров *Lumbar Lordosis* от *Pelvic Incidence*, предлагаемые в работах [7, 12, 16, 21, 22], и результаты измерений

Таблица 2

Данные для анализа остатков, не объясненных регрессионной зависимостью (1)

Источник	Количество наблюдений	Среднее	Среднее квадратичное (стандартное) отклонение	Ошибка среднего
Результаты измерений	52	-0,685	14,9	2,07
<i>Le Huec and Hasegawa</i>	95	-3,686	7,84	0,804
<i>Hyun</i>	134	-0,448	7,44	0,643
<i>Sullivan</i>	62	-2,443	10,3	1,31
<i>Tanguay</i>	261	2,519	9,80	0,607
<i>Legaye</i>	34	-1,770	8,67	1,49

Значения критерия Стьюдента на уровне 5 % для попарных разностей составляют от 1,97 до 1,98. Из табл. 2 следует, что данные из работы *Tanguay et al* [22], с одной стороны, и данные из работ [16, 12, 7, 21] – с другой, различаются статистически достоверно. Также отмечается различие между данными *Le Huec et al* [12] и данными *Hyun et al* [7]. Однако сравнение упомянутых данных с результатами измерений [2] и данными *Sullivan et al* [21] не выявило достоверных различий, поэтому можно считать, что данные из работ [7, 12, 21, 22] и результаты измерений являются частью одной генеральной совокупности и формула (1) справедлива для зависимости $LL(PI)$ (рис. 4). Коэффициент корреляции составил 0,49.

Взаимосвязь параметров *SS* и *PI*

Зависимость параметра *SS* от *PI* изучалась на основании результатов измерений [2], дополненных данными из работ [16] и [12]. По 191 результату попарных измерений была построена линейная регрессионная зависимость

$$SS = 0,476 PI + 15,62. \quad (2)$$

Таблица 3

Попарные сравнения средних величин остатков от регрессии (2)

Вариант сравнения	Разности	Ошибки разностей	Отношение попарных разностей к ошибкам разности
{Результаты измерений} – {Le Huec et al}	3,001	2,222	1,35
{Результаты измерений} – {Hyun}	-0,237	2,169	-0,11
{Результаты измерений} – {Sullivan}	1,758	2,453	0,72
{Результаты измерений} – {Tanguay}	-3,203	2,158	-1,48
{Результаты измерений} – {Legaye}	1,085	2,550	0,43
{Le Huec} – {Hyun}	-3,238	1,029	-3,15
{Le Huec} – {Sullivan}	-1,243	1,541	-0,81
{Le Huec} – {Tanguay}	-6,204	1,007	-6,16
{Le Huec} – {Legaye}	-1,916	1,690	-1,13
{Hyun} – {Sullivan}	1,995	1,463	1,36
{Hyun} – {Tanguay}	-2,966	0,884	-3,36
{Hyun} – {Legaye}	1,322	1,620	0,82
{Sullivan} – {Tanguay}	-4,961	1,447	-3,43
{Sullivan} – {Legaye}	-0,673	1,984	-0,34
{Tanguay} – {Legaye}	4,289	1,606	2,67

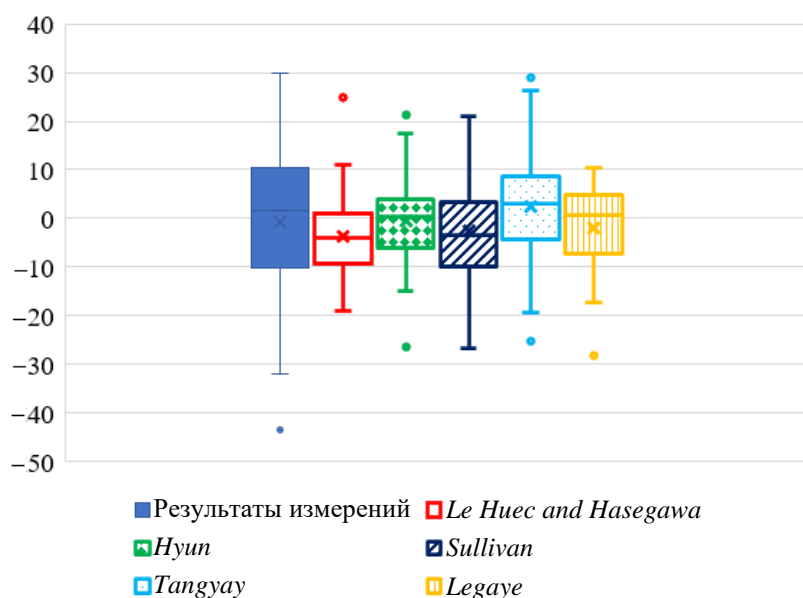


Рис. 3. Распределение остатков от регрессионной зависимости параметров *Lumbar Lordosis* от *Pelvic Incidence* (1) по данным работ [7, 12, 16, 21, 22] и результатам измерений. Горизонтальная черта – медиана; верхняя и нижняя границы прямоугольников («ящичков») – квартили 0,75 и 0,25; косой крестик – среднее

Данные для анализа остатков от регрессии приведены в табл. 4 и 5.

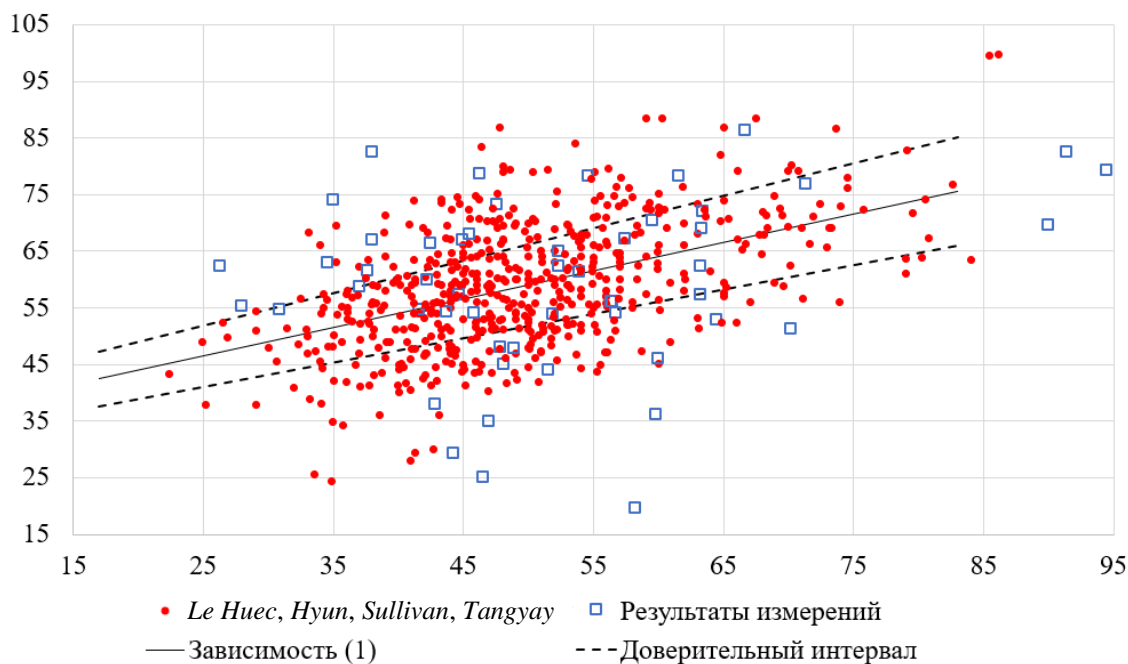


Рис. 4. Зависимость параметров *Lumbar Lordosis* от *Pelvic Incidence* по данным работ [7, 12, 16, 21, 22] и результатам измерений

Таблица 4

Данные для анализа остатков, не объясненных регрессионной зависимостью (2)

Источник	Количество наблюдений	Среднее	Среднее квадратичное (стандартное) отклонение	Ошибка среднего
Результаты измерений	52	1,5	7,92	1,098
<i>Le Huec et al</i>	105	-0,4	4,38	0,427
<i>Legauie et al</i>	34	-1,1	7,73	1,326

Таблица 5

Попарные сравнения средних величин остатков от регрессии (2)

Вариант сравнения	Разности	Ошибки разностей	Отношение попарных разностей к ошибкам разности
{Результаты измерений} – { <i>Le Huec et al</i> }	1,93	1,18	1,64
{Результаты измерений} – { <i>Legauie et al</i> }	2,66	1,72	1,54
{ <i>Le Huec</i> } – { <i>Legauie</i> }	0,73	1,39	0,52

Значения критерия Стьюдента на уровне 5% для попарных разностей составляют от 1,98 до 1,99. Таким образом, данные из работ [16] и [12] и результаты измерений являются частью одной генеральной совокупности и формула (2) справедлива для зависимости $SS(PI)$ (рис. 5). Коэффициент корреляции составил 0,68.

На рис. 6 графически представлен результат анализа остатков от регрессии (2).

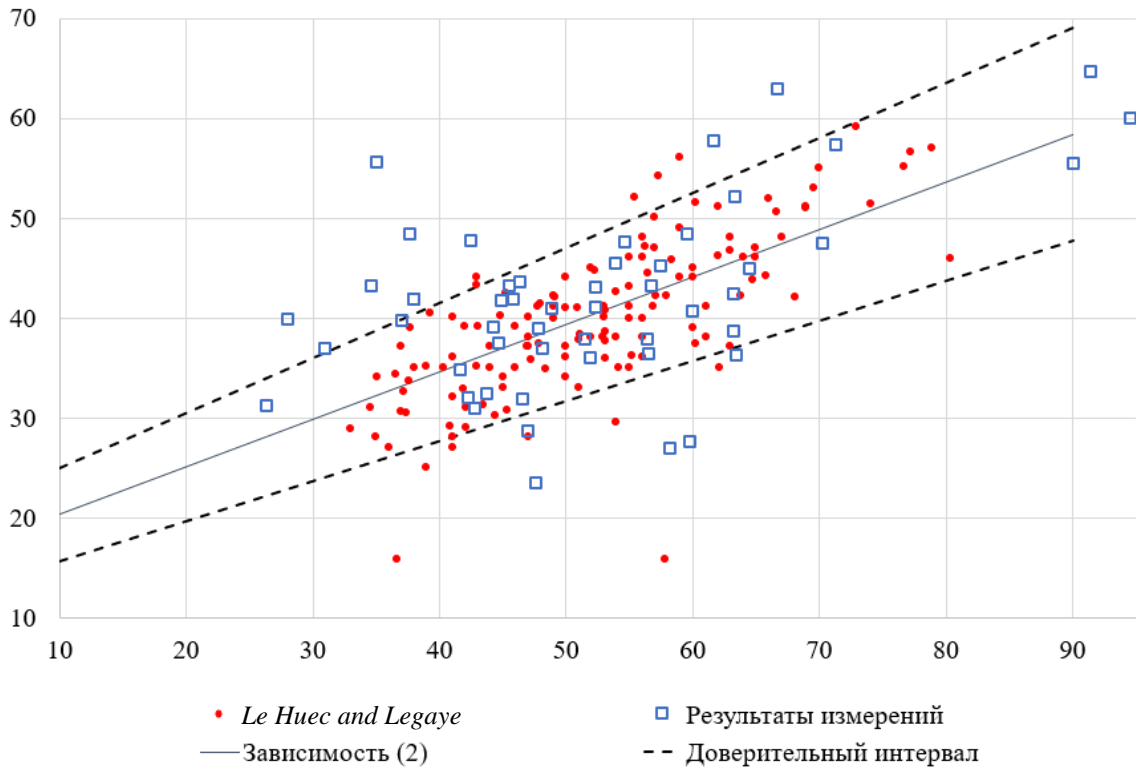


Рис. 5. Зависимость параметров *Sacral Slope* от *Pelvic Incidence* по данным работ [12, 16] и результатам измерений

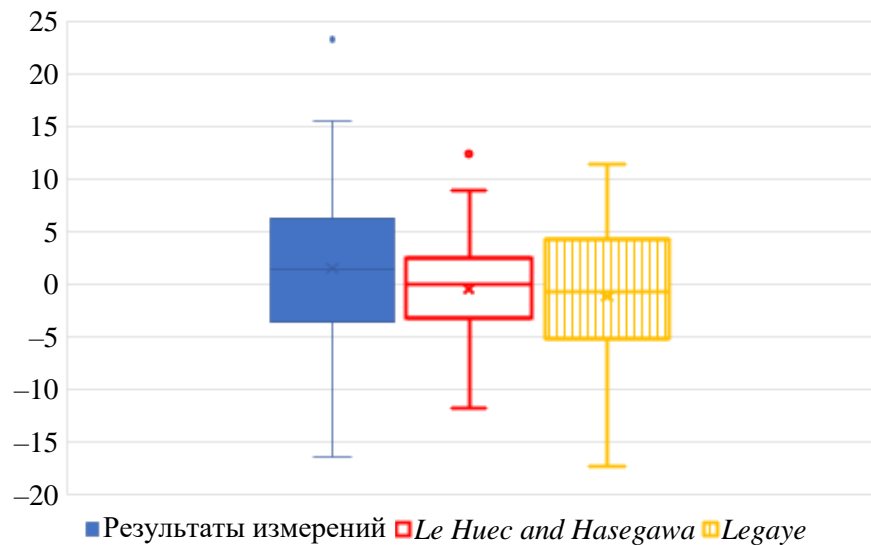


Рис. 6. Распределение остатков от регрессионной зависимости параметров *Sacral Slope* от *Pelvic Incidence* (2) по данным работ [12, 16], и результатам измерений. Горизонтальная черта – медиана; верхняя и нижняя границы прямоугольников («ящиков») – квантили 0,75 и 0,25; косой крестик – среднее

В результате приведем формулы, связывающие параметры сагиттального баланса, полученные в данной работе. Отметим, что формула $PT(PI)$ была получена из формулы (2) с учетом геометрической связи между PI , PT и SS : $PI = PT + SS$.

$$LL = 0,502 PI + 33,90;$$

$$SS = 0,476 PI + 15,62;$$

$$PT = 0,524 PI - 15,62.$$

Зависимость SS от параметров PI и LL

Для практического применения большой интерес может представлять формула, связывающая три параметра – SS , PI и LL . Поскольку параметр PI мало изменяется как с возрастом, так и в случае большинства заболеваний и повреждений, можно предположить, что параметр SS компенсирует со временем изменяющийся LL с учетом индивидуального для каждого человека и мало изменяющегося в течение жизни значения PI .

Для статистического анализа результаты наших исследований были дополнены данными работ *Legaye* [16] и *Le Huec* [12]. По результатам измерений SS , PI , LL у 52 пациентов научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского, дополненных данными [12, 16] – всего 171 набор данных, – была построена линейная регрессионная зависимость

$$SS = 0,32 PI + 0,37 LL + 2,4. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции для полученной зависимости равен 0,84.

Данные для анализа остатков от регрессии приведены в табл. 6, 7 и на рис. 7, 8.

Нормированная разность (отношение разности между средними к ошибке разности) между нашими данными и данными [16] незначительно превышает критериальное значение распределения Стьюдента на уровне 5 %, равное 1,9; остальные две нормированные разности меньше этой величины. Поэтому можно считать, что все три «выборки» остатков принадлежат одной генеральной совокупности и зависимость SS от PI и LL может быть описана единой формулой для всех трех исследований.

Кроме того, проведено сравнение результатов измерений с объединенными данными работ [16] и [12], данные для анализа остатков представлены в табл. 8.

Таблица 6

Данные для анализа остатков, не объясненных регрессионной зависимостью (3)

Источник	Количество наблюдений	Среднее	Среднее квадратичное (стандартное) отклонение	Ошибка среднего
Результаты измерений	52	0,97	5,87	0,814
<i>Le Huec and Hasegawa</i>	85	-0,11	4,01	0,435
<i>Legaye</i>	34	-1,21	4,13	0,709

Таблица 7

Попарные сравнения средних величин остатков от регрессии (3)

Вариант сравнения	Разности	Ошибки разностей	Отношение попарных разностей к ошибкам разности
{Результаты измерений} – { <i>Le Huec et al</i> }	1,08	0,923	1,176
{Результаты измерений} – { <i>Legaye</i> }	2,19	1,079	2,027
{ <i>Le Huec</i> } – { <i>Legaye</i> }	1,10	0,831	1,326



Рис. 7. Сравнение измеренных значений *SS* и рассчитанных по формуле (3)

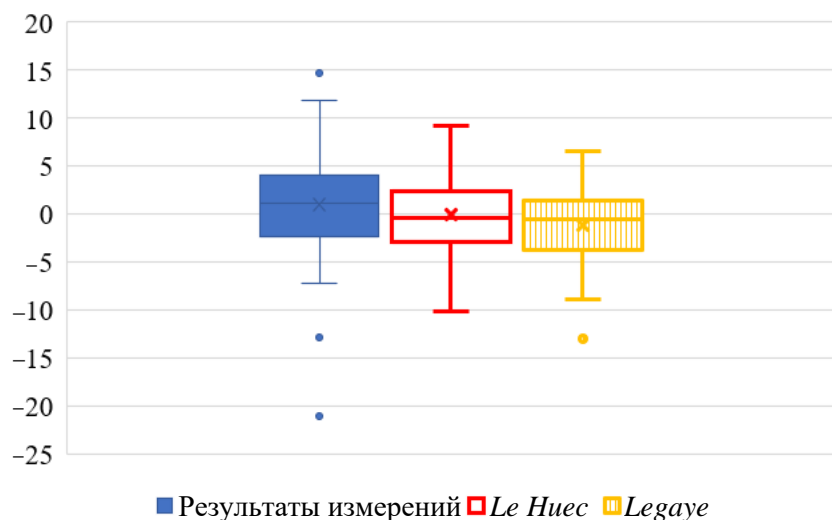


Рис. 8. Распределение остатков от регрессионной зависимости параметров *Sacral Slope* от *Pelvic Incidence* и *Lumbar Lordosis* (3) по данным работ [12, 16], и результатам измерений. Горизонтальная черта – медиана, верхняя и нижняя границы прямоугольников («ящичков») – квантили 0,75 и 0,25, косой крестик – среднее

Таблица 8

Данные для анализа остатков, не объясненных регрессионной зависимостью (3), при объединении результатов работ [12] и [16]

Источник	Количество наблюдений	Среднее	Среднее квадратичное (стандартное) отклонение	Ошибка среднего
Результаты измерений	52	0,97	5,87	0,814
[16] и [12]	119	-0,43	4,06	0,372

В этом случае разность между средними по группам остатков составляет 1,40 с ошибкой 0,895; отношение разности между средними к ошибке разности равно 1,56 при величине критерия Стьюдента 1,97. Это также подтверждает, что формула (3) пригодна для описания соотношений между SS , PI и LL . На самом деле параметр PI индивидуален для каждого человека и практически не меняется в течение жизни даже при дегенеративно-дистрофических заболеваниях (деформациях) позвоночника. Параметры LL и SS связаны друг с другом. Но в этой зависимости участвует также параметр PI , поэтому зависимость SS от LL также индивидуальна для каждого человека.

Важно отметить, что в работах [16] и [12] обследовались здоровые люди, а в данных, предоставленных научно-исследовательским институтом травматологии, ортопедии и нейрохирургии Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского, – пациенты с различными заболеваниями позвоночника. Тем не менее параметры SS и LL как бы компенсируют друг друга как у здоровых, так и у пациентов с заболеваниями позвоночника.

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на то, что в современной научной литературе опубликовано множество формул, связывающих основные угловые параметры сагиттального баланса, их применение в клинической практике затруднено. Это связано с тем, что разные авторы публикуют различные формулы, полученные на собственных ограниченных выборках. Более того, в литературе [3] появились такие термины, как «французская школа» и «американская школа». Отличия этих «школ» заключаются в том, что их представители используют разные формулы для расчета оптимальных значений поясничного лордоза LL (см. табл. 1). Появление данных терминов говорит о том, что назрела проблема обобщения накопленного в науке опыта и получения обобщающих формул, покрывающих все наиболее известные на сегодняшний день зависимости, связывающие между собой основные параметры сагиттального баланса. Таким обобщением на данном этапе являются формулы (1) и (2), удовлетворительно описывающие данные, полученные разными исследователями для пациентов разного пола, возраста и наличия или отсутствия патологий.

Следует принять во внимание, что в большинстве работ [7, 12, 16, 21] приведены параметры сагиттального баланса здоровых людей, а в данном исследовании и в работе [22] рассматриваются характеристики пациентов с различными патологиями позвоночно-тазового комплекса.

Проведенный статистический анализ показал, что зависимости между PI , LL и SS у пациентов с патологиями ПТК в среднем могут быть описаны теми же зависимостями, что и у здоровых людей. При этом важным обстоятельством является то, что погрешность при применении установленных зависимостей для оценки параметров сагиттального баланса пациентов с патологиями ПТК больше, чем у здоровых людей, что продемонстрировано на рис. 2 для зависимости LL от PI . Аналогичная ситуация прослеживается и для зависимостей PT , SS от PI . Преимущество формулы (3), устанавливающей взаимосвязь между тремя основными параметрами сагиттального баланса – SS , PI и LL , подтверждается также величиной средней относительной ошибки аппроксимации, которая составила для этой зависимости 9,6 %, в то время как для формул (1) и (2) (зависимости $LL(PI)$ и $SS(PI)$) она составила 14,6 % и 13,2 % соответственно. С учетом средних значений SS и их вариации, представленных *Le Huec* [13], снижение ошибки аппроксимации 3,6–5 % может оказать существенное влияние на практическое применение разработанной зависимости при предоперационном планировании лечения заболеваний и повреждений ПТК.

Следует отметить, что геометрическая связь между основными параметрами сагиттального баланса не случайна и подтверждается биомеханическими расчетами [8]. Для этого была рассмотрена биомеханическая модель позвоночно-тазового комплекса, на которой симулировали компенсаторные механизмы. В частности, было показано, что антеверсия и ретроверсия таза приводят к существенным компенсаторным изменениям в сагиттальном профиле позвоночника, а также к изменению напряженно-деформированного состояния его структур. Так, при увеличении антеверсии таза (увеличение угла SS) компенсаторно увеличивался и грудной лордоз (угол LL), а наибольшие эквивалентные напряжения были обнаружены в области дугоотростчатых суставов позвонков поясничного отдела и в передних отделах тел верхних грудных позвонков. Дальнейшее увеличение антеверсии таза приводило к нарастанию эквивалентных напряжений в указанных позвонках. Уменьшение угла антеверсии таза (уменьшение угла SS) приводило к сглаживанию (уменьшению LL) поясничного лордоза и грудного кифоза. Наибольшие эквивалентные напряжения были обнаружены в задних отделах позвонков поясничного отдела, а также в передних отделах грудных позвонков.

Приведенные выше формулы могут быть использованы для оценки зависимости между тремя основными параметрами сагиттального баланса. По мере накопления новых данных параметры зависимостей (1), (2) и (3) могут быть уточнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным данным и по данным рентгенограмм пациентов научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского были разработаны новые оригинальные формулы, связывающие параметры сагиттального баланса. Эти формулы позволяют рассчитывать такие параметры, как LL , SS и PT через параметр PI . Разработанные формулы на этапе предоперационного планирования позволяют оценить, какой параметр и на сколько необходимо скорректировать при выполнении хирургического лечения заболеваний и повреждений позвоночно-тазового комплекса конкретного пациента.

Зависимости между PI , LL и SS у пациентов с патологиями ПТК в среднем могут быть описаны теми же формулами, что и у здоровых людей, но погрешность при применении установленных зависимостей для оценки параметров сагиттального баланса пациентов с патологиями ПТК больше, чем у здоровых людей.

Практическая значимость разработанных регрессионных зависимостей состоит в том, что они внедрены в мобильное приложение «СпиноМетр» [2], а также в «Модуле геометрического планирования» и «Управляющем модуле биомеханического моделирования» программной платформы «Аккорд», разработанной в Саратовском университете [1]. Платформа «Аккорд» реализует полный цикл предоперационного планирования хирургического реконструктивного лечения последствий заболеваний и повреждений позвоночно-тазового комплекса с биомеханической поддержкой решения врача в соответствии со способом «планирование-моделирование-прогноз». Вместе с тем платформа является базой для создания систем поддержки принятия врачебных решений с биомеханической поддержкой. Внедрение таких систем в клиническую практику позволит строить индивидуальные послеоперационные прогнозы, основанные на количественных биомеханических методах оценки вариантов лечения. Более того, биомеханическое моделирование, используемое для оценки механической прочности устанавливаемых имплантатов и конструкций, создаваемых во время операции вместе с элементами тела человека, позволяет выбирать для каждого пациента успешный вариант лечения [1]. Это вместе с дооперационной оценкой геометрических параметров

сагиттального баланса позволит повысить качество медицинской помощи, снизить число ревизионных вмешательств и оптимизировать расходы на имплантаты за счет их индивидуального биомеханического моделирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование осуществлено при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бескровный А.С., Бессонов Л.В., Голядкина А.А., Доль А.В., Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю., Сидоренко Д.А. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 118–133. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2021.2.01
2. Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю., Лихачев С.В., Полиенко А.В., Харламов А.В., Шульга А.Е. Сравнительный анализ мобильного приложения для измерения параметров сагиттального баланса «СпиноМетр» с системой Surgimar: апробация межэкспертной надежности // Гений ортопедии. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 74–79. DOI: 10.18019/1028-4427-2021-27-1-74-79
3. Крутько А.В. Сагиттальный баланс. Гармония в формулах. – Новосибирск, 2016. – 68 с.
4. Кудяшев А.Л., Хоминец В.В., Теремшонов А.В., Коростелев К.Е., Нагорный Е.Б., Доль А.В., Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю. Биомеханические предпосылки формирования проксимального переходного кифоза после транспедикулярной фиксации поясничного отдела позвоночника // Российский журнал биомеханики. – 2017. – Т. 21, № 3. – С. 313–323. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2017.3.07
5. Glassman S.D., Bridwell K., Dimar J.R., Horton W., Berven S., Schwab F. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity // Spine (Phila Pa 1976). – 2005. – Vol. 30, no. 18. – P. 2024–2029. DOI: 10.1097/01.brs.0000179086.30449.96
6. Godde S., Fritsch E., Dienst M., Kohn D. Influence of cage geometry on sagittal alignment in instrumented posterior lumbar interbody fusion // Spine (Phila Pa 1976). – 2003. – Vol. 28, no. 15. – P. 1693–1699. DOI: 10.1097/01.BRS.0000083167.78853.D5
7. Hyun S.J., Han S., Kim Y.B., Kim Y.J., Kang G.B., Cheong J.Y. Predictive formula of ideal lumbar lordosis and lower lumbar lordosis determined by individual pelvic incidence in asymptomatic elderly population // Eur. Spine J. – 2019. – Vol 28, no. 9. – P. 1906–1913. DOI: 10.1007/s00586-019-05955-w
8. Ivanov D.V., Kirillova I.V., Kossovich L.Y., Hominets V.V., Kudyashev A.L., Teremshonok A.V. Biomechanics of compensatory mechanisms in spinal-pelvic complex // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 991, no. 1. – P. 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/991/1/012036
9. Johnny R.V., Mary R.R. Classification and correlational analysis on lower spine parameters using data mining techniques // IJRTE. – 2019. Vol. 7, no. 6. – P. 1450–1456.
10. Lazennec J.Y., Ramare S., Arafati N., Laudet C.G., Gorin M., Roger B., Hansen S., Saillant G., Maurs L., Trabelsi R. Sagittal alignment in lumbosacral fusion: relations between radiological parameters and pain // Eur. Spine J. – 2000. – Vol. 9, no. 1. – P. 47–55. DOI: 10.1007/s005860050008
11. Le Huec J.C., Faundez A., Dominguez D., Hoffmeyer P., Aunoble S. Evidence showing the relationship between sagittal balance and clinical outcomes in surgical treatment of degenerative spinal diseases: a literature review // Int. Orthop. – 2015. – Vol. 39, no. 1. – P. 87–95. DOI: 10.1007/s00264-014-2516-6
12. Le Huec J.C., Hasegawa K. Normative values for the spine shape parameters using 3D standing analysis from a database of 268 asymptomatic Caucasian and Japanese subjects // Eur. Spine J. – 2016. – Vol. 25, no. 11. – P. 3630–3637. DOI: 10.1007/s00586-016-4485-5
13. Le Huec J.C., Leijssen P., Duarte M., Aunoble S. Thoracolumbar imbalance analysis for osteotomy planification using a new method: FBI technique // Eur. Spine J. – 2011. – Vol. 20, Suppl. 5. – P. 669–680. DOI: 10.1007/s00586-011-1935-y
14. Le Huec J.C., Saddiki R., Franke J., Rigal J., Aunoble S. Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics // Eur. Spine J. – 2011. – Vol. 20, no. 5. – P. 558–563. DOI: 10.1007/s00586-011-1939-7
15. Le Huec J.C., Thompson W., Mohsinaly Y., Barrey C., Faundez A. Sagittal balance of the spine // Eur. Spine J. – 2019. – Vol. 28, no. 9. – P. 1889–1905. DOI: 10.1007/s00586-019-06083-1
16. Legaye J., Duval-Beaupere G. Sagittal plane alignment of the spine and gravity: a radiological and clinical evaluation // Acta Orthop Belg. – 2005. – Vol. 71. – P. 213–220.

17. Mac-Thiong J.M., Labelle H., Berthonnaud E. Sagittal spinopelvic balance in normal children and adolescents // *Eur. Spine J.* – 2007. – Vol. 16, no. 4. – P. 227–234. DOI: 10.1007/s00586-005-0013-8
18. Pan C., Wang G., Sun J. Correlation between the apex of lumbar lordosis and pelvic incidence in asymptomatic adult // *Eur. Spine J.* – 2019. – Vol. 29, no. 3. – P. 420–427. DOI: 10.1007/s00586-019-06183-y
19. Schwab F., Patel A., Ungar B., Farcy J.P., Lafage V. Adult spinal deformity postoperative standing imbalance: how much can you tolerate? An overview of key parameters in assessing alignment and planning corrective surgery // *Spine (Phila Pa 1976)*. – 2010. – Vol. 35. – P. 2224–2231. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3181ee6bd4.
20. Smith J.S., Bess S., Shaffrey C.I., Burton D.C., Hart R.A., Hostin R., Klineberg E. Dynamic changes of the pelvis and spine are key to predicting postoperative sagittal alignment after pedicle subtraction osteotomy: a critical analysis of preoperative planning techniques // *Spine (Phila Pa 1976)*. – 2012. – Vol. 37, no. 10. – P. 845–853. DOI: 10.1097/BRS.0b013e31823b0892
21. Sullivan T.B., Marino N., Reighard F.G., Newton P.O. Relationship between lumbar lordosis and pelvic incidence in the adolescent patient: normal cohort analysis and literature comparison // *Spine Deform.* – 2018. – Vol. 6, no. 5. – P. 529–536. DOI: 10.1016/j.jspd.2018.02.00
22. Tanguay F., Mac-Thiong J.M., deGuise J.A., Labelle H. Relation between the sagittal pelvic and lumbar spine geometries following surgical correction of adolescent idiopathic scoliosis // *Eur. Spine J.* – 2007. – Vol. 16, no. 4. – P. 531–536. DOI: 10.1007/s00586-006-0238-1
23. Vialle R., Levassor N., Rillardon L., Templier A., Skalli W., Guigui P. Radiographic analysis of the sagittal alignment and balance of the spine in asymptomatic subjects // *J. Bone Joint Surg. Am.* – 2005. – Vol. 87, no. 2. – P. 260–267. DOI: 10.2106/JBJS.D.02043

GENERALIZATION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN SAGITTAL BALANCE GEOMETRIC PARAMETERS

**D.V. Ivanov, A.S. Falkovich, A.M. Donnik, A.V. Polienko (Saratov, Russian Federation),
A.V. Krutko (Moscow, Russian Federation)**

Sagittal balance of the spine characterizes its physiological alignment by muscular forces in the most effective way. Optimal spinal-pelvic relationships form a biomechanically efficient and optimal sagittal profile of the spine, which reduces energy consumption for an equilibrium state maintaining and also decrease the risk of degenerative damage to the intervertebral discs. Sagittal balance is described using the main angular parameters: pelvic incidence, lumbar lordosis, pelvic tilt and sacral slope. To form optimal spinal-pelvic relationships during surgical treatment surgeons measure the actual balance parameters of the patient and use empirical formulas to calculate their theoretical values at preoperative planning stage. To calculate the optimal parameters of the sagittal balance of a particular patient, various scientific groups have developed a number of empirical dependencies. However, there is no consensus in the scientific community on what specific formulas to use when planning treatment. This paper attempts to generalize the data available in the scientific literature on the parameters of the sagittal balance and to develop new generalizing regression dependencies that allow one to link the parameters of the sagittal balance. For this purpose, the source data used for constructing such dependencies were collected from the literature. The results of the sagittal balance measurement of Saratov State Medical University patients were also used in this study. We selected the initial numerical data linking the main parameters of the sagittal balance from the literature. The data was digitized and processed using statistics methods. Regression dependencies were obtained that allow calculating lumbar lordosis, pelvic tilt, and sacral slope through the pelvic incidence of a particular patient. Generalizing dependences make it possible to systematize the clinical experience accumulated in the literature and were used in the development of the world's first system for

preoperative planning of surgical treatment of the consequences and diseases of the spine-pelvic complex with biomechanical support of the doctor's decision.

Key words: sagittal balance, spine-pelvic relationship, pelvic index, lumbar lordosis, pelvic tilt, sacral tilt, regression analysis, medical statistics, biomechanical modeling, preoperative planning.

Получена 17.01.2022

Одобрена 28.02.2022

Принята к публикации 10.03.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Обобщение зависимостей между геометрическими параметрами сагитального баланса / Д.В. Иванов, А.С. Фалькович, А.М. Донник, А.В. Полиенко, Е.С. Оленко, А.В. Крутько // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 8–24. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.1.01

Please cite this article in English as noted in English version of this article.