

Научная статья

УДК 616.711-007.5-053.6-07

DOI: 10.17816/pmj42396-108

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ И КЛИНИЧЕСКОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ В ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЗВОНОЧНИКА У ПОДРОСТКОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОСПЕКТИВНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

**И.Д. Шитоев^{1,2}, С.В. Муравьев³, Ю.В. Каракулова³, Г.З. Клоян^{2,3*},
П.Н. Чайников³, М.А. Ковалев³**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

²Йорд Тех, г. Пермь,

³Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера,
Российская Федерация

COMPARATIVE EFFECTIVENESS OF COMPUTER OPTICAL TOPOGRAPHY AND CLINICAL PHOTOGRAMMETRY IN ASSESSING SPINAL DEFORMITY IN ADOLESCENTS: RESULTS OF A PROSPECTIVE STUDY

**I.D. Shitoev^{1,2}, S.V. Muravyev³, Yu.V. Karakulova³, G.Z. Kloyan^{2,3*},
P.N. Chainikov³, M.A. Kovalev³**

¹Perm National Research Polytechnic University,

²Yord Tech, Perm,

³Ye.A. Vagner Perm State Medical University, Russian Federation

© Шитоев И.Д., Муравьев С.В., Каракулова Ю.В., Клоян Г.З., Чайников П.Н., Ковалев М.А., 2025
e-mail: kloyang@mail.ru

[Шитоев И.Д. – ассистент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; генеральный директор, ORCID: 0000-0002-6391-9271; Муравьев С.В. – кандидат медицинских наук, доцент кафедры физической и реабилитационной медицины с курсом медико-социальной экспертизы, ORCID: 0000-0002-3342-4710; Каракулова Ю.В. – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой неврологии и медицинской генетики, ORCID: 0000-0002-7536-2060; Клоян Г.З. (*контактное лицо) – биомеханик, преподаватель кафедры медицинской информатики и управления в медицинских системах, ORCID: 0000-0001-6615-8159; Чайников П.Н. – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой спортивной медицины, лечебной, физической культуры и здоровья, ORCID: 0000-0002-3158-2969; Ковалев М.А. – ординатор кафедры неврологии и медицинской генетики, ORCID: 0000-0003-2873-1553].

© Shitoev I.D., Muravyev S.V., Karakulova Yu.V., Kloyan G.Z., Chainikov P.N., Kovalev M.A., 2025
e-mail: kloyang@mail.ru

[Shitoev I.D. – Assistant of the Department of Computational Mathematics, Mechanics, Biomechanics; CEO, ORCID: 0000-0002-6391-9271; Muravyev S.V. – PhD (Medicine), Associate Professor of the Department of Physical and Rehabilitation Medicine with a Course in Medical and Social Expertise, ORCID: 0000-0002-3342-4710; Karakulova Yu.V. – DSc (Medicine), Professor, Head of the Department of Neurology and Medical Genetics, ORCID: 0000-0002-7536-2060; Kloyan G.Z. (*contact person) – Biomechanist, Lecturer of the Department of Medical Informatics and Management in Medical Systems, ORCID: 0000-0001-6615-8159; Chainikov P.N. – PhD (Medicine), Associate Professor, Head of the Department of Sports Medicine, Therapeutic Physical Education and Health, ORCID: 0000-0002-3158-2969; Kovalev M.A. – Resident of the Department of Neurology and Medical Genetics, ORCID: 0000-0003-2873-1553].

Цель. Изучить диагностическую репрезентативность клинической фотограмметрии ScolView™ в сравнении с результатами компьютерной оптической топографии.

Материалы и методы. В качестве материала исследования выступили протоколы функционирования компьютерной оптической топографии и ScolView™ 160 испытуемых обоего пола (средний возраст $8 \pm 0,78$ года).

Результаты. Несмотря на отличные физические принципы методов, выходные данные ScolView™ обладают значительным количеством достоверных корреляционных связей, которые поддаются логической клинической интерпретации. Данные исследования обнаружили в общей сложности 54 достоверных критерия Спирмена в диапазоне 0,712–0,800 при сравнении выходных данных обоих методов в трех плоскостях.

Выводы. Проведенная работа является пионерской и в то же время проспективной – в целях более глубокого анализа выходных данных ScolView™ с сегрегацией испытуемых на группы сравнения в зависимости тяжести деформации позвоночника.

Ключевые слова: сколиоз, многоплоскостная деформация позвоночника, фотограмметрия, компьютерная оптическая топография, ScolView™.

Objective. To study the diagnostic representativeness of ScolView™ clinical photogrammetry compared to the results of computer optical topography.

Materials and methods. The study material included protocols for the functioning of computer optical topography and ScolView™ for 160 participants of both sexes with an average age of 8 ± 0.78 years.

Results. Despite the excellent physical principles of the methods, the ScolView™ outputs have a significant number of reliable correlations that lend themselves to logical clinical interpretation. The study data determined a total of 54 reliable Spearman criteria in the range of 0,712–0,800 when comparing the output data of both methods in three planes.

Conclusions. The work carried out is pioneering and at the same time prospective – for the purpose of a deeper analysis of the output data of ScolView™ with the segregation of the participants into comparison groups depending on the severity of spinal deformity.

Keywords. Scoliosis, multilane spinal deformity, photogrammetry, computer optical topography, ScolView™.

ВВЕДЕНИЕ

Объективная оценка выраженности деформации позвоночника – актуальная задача современного этапа развития детской травматологии-ортопедии [1]. Это связано с тем, что задачи такой оценки лежат в базовых принципах диагностических мероприятий в вертебродологии, которые можно изложить таким образом:

1. Принцип безопасности – диктует необходимость снижения лучевой нагрузки в ходе рутинного рентгенографического исследования [2].

2. Принцип высокой точности – обеспечивает своевременное выявление отклонений объективных показателей, свидетельствующих о характере динамики течения патологического процесса [3].

3. Принцип снижения квалификационных требований к оператору диагностической установки – имеет в большей степени экономический эффект за счет последующего снижения затрат на обучение персонала и возможность расширения объема исследований за счет повышения пропускной способности диагностической установки [4].

Эти «три кита» диктуют необходимость разработки новых диагностических инструментов.

Современные инструменты в диагностике деформации позвоночника у детей [5] представлены двумя основными группами, в равной степени обладающими недостатками, не позволяющими им быть максимально широко интегрированными в лечебно-диагностический процесс.

Первая группа – лучевые методы. Прежде всего это рентгенография позвоночника – «золотой стандарт» в диагностике деформаций позвоночника [5]. Именно благодаря данному методу возникла классическая номенклатура классификации деформаций позвоночника в зависимости от полученных угловых величин (по Коббу и Чаклину) [6], которые позволяют сегрегировать конкретные клинические случаи по группам в зависимости от степени тяжести патологического процесса. Технологически близкими к рутинной рентгенографии считаются мультиспиральная рентгеновская компьютерная томография и EOS-сканирование (Цифровая рентгенографическая система EOS, EOS Imaging, Франция), по существу являющаяся низкодозовым методом рентгеновской визуализации.

Вторая группа методов диагностики – оптические методы, построенные на анализе изображений дорсальной поверхности тела человека с наложенными теневыми «полосами», которые искажаются в зависимости от особенностей деформации этой поверхности. Передовыми диагностическими установками в этой области являются компьютерная оптическая топография (далее КОТ, КомОТ, ТОДП, ООО «МЕСТОС», г. Новосибирск) [7] и система DIERS (DIERS International GmbH, Schlangenbad, Germany) [8; 9]. Оба этих метода обнаружили свою точность в многочисленных сравнительных исследованиях [3; 10], в которых эталонными выступали методы рентгенографии, что полностью подтверждает соответствие как оптических топографических, так и рентгенографических методов диагностики принципу «точности» [11]. В то же время принцип «снижения квалификационных требований» к оператору рентгеновских и оптических топографических установок в полной мере применен быть не может, поскольку каждая из них требует участия медицинских кадров высокого уровня профессиональной подготовки [12]. Заключительный принцип безопасности в полной мере подхо-

дит для описания оптической топографии, не связанной, в отличие от рентгенографии, с лучевой нагрузкой на пациента.

Все эти положения, описывающие современный этап развития методов диагностики деформации позвоночника, находящиеся в русле современных тенденций развития науки и техники, требуют разработки новых – прежде всего цифровых и легкодоступных – инструментов для диагностики деформации позвоночника. Таким перспективным методом может стать фотограмметрия [13] – метод пространственной оценки трехмерной модели частей или всего тела, воспроизведенной из серии фотоснимков с разных ракурсов.

Ранее нами [14] сообщалось о разработке нового перспективного продукта – программного обеспечения для персонального телекоммуникационного устройства (смартфона) *ScoView*[™] для клинической фотограмметрии туловища, а именно дорсальной его поверхности. Этот цифровой продукт обладает функционалом для построения трехмерного изображения тела человека путем регистрации фиксированных на поверхности трехмерной модели реперных точек, посредством оценки пространственных взаимоотношений которых определяются геометрические характеристики позвоночного столба.

Цель исследования – изучить диагностическую репрезентативность клинической фотограмметрии *ScoView*[™] в сравнении с результатами компьютерной оптической топографии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящая работы была проведена в рамках мониторингового исследования совокупности испытуемых – школьников младшего школьного возраста (1–3-й классы, средний возраст $8 \pm 0,78$ года). Генеральная совокупность испытуемых составила 166 человек, при этом девочек было 86,

а мальчиков – 80. До проведения исследования были получены информированные согласия на диагностическое вмешательство от всех родителей испытуемых. Предметом исследования выступили обезличенные протоколы, полученные по результатам использования методов, описанных ниже.

Всем детям была выполнена клиническая фотограмметрия *ScolView*[™]. Построение трехмерного изображения проводилась на основании 120 снимков, полученных с разного ракурса. По результатам построения трехмерной модели были идентифицированы следующие реперные точки (рис. 1): N_0 – срединная точка задней поверхности шеи, N_1 – левая точка задней поверхности шеи, N_2 – правая точка задней поверхности шеи, A_1 – точка левой подмышечной впадины, A_2 – точка правой подмышечной впадины, S_1 – точка левого плечевого сустава, S_2 – точка правого плечевого сустава, G_0 – вершина грудного кифоза, G_1 – угол левой лопатки, G_2 – угол правой лопатки, W_0 – вершина поясничного кифоза, W_1 – левая точка талии, W_2 – правая точка талии, B_1 – левая точка ягодич, B_2 – правая точка ягодич, O – вершина ягодичной складки.

В результате идентификации парных реперных точек были оценены пространственные характеристики отрезков, образованных ими по отношению к горизонту: ε/ε' – угол положения линии ягодич, ζ/ζ' – угол положения линии талии, ι/ι' – угол положения линии лопаток, ν/ν' – угол положения линии подмышечных впадин, ξ/ξ' – угол положения линии плеч, τ/τ' – угол положения линии шеи. Обозначение без символа «'» – положение отрезка в фронтальной плоскости (перекос), обозначение с символом «'» – положение отрезка в горизонтальной плоскости (ротация).

Важно отметить, что, помимо указанных точек, *ScolView*[™] идентифицирует линию позвоночника – кривую N_0O – соответствующую линию, соединяющую проекции остистых отростков позвонков, которая была стратифицирована на 17 равных сегментов (далее – V -сегмент), которые были обозначены как V_0-V_1 , V_2-V_3 , V_3-V_4 , V_4-V_5 , V_5-V_6 , V_6-V_7 , V_7-V_8 , V_8-V_9 , V_9-V_{10} , $V_{10}-V_{11}$, $V_{11}-V_{12}$, $V_{12}-V_{13}$, $V_{13}-V_{14}$, $V_{14}-V_{15}$, $V_{15}-V_{16}$, $V_{16}-V_{17}$, $V_{17}-V_{18}$, где расположение точки V_0 совпадает с положением N_0 , а O – V_{18} соответственно. Для оценки ротации отдельных позвонков в горизонтальной

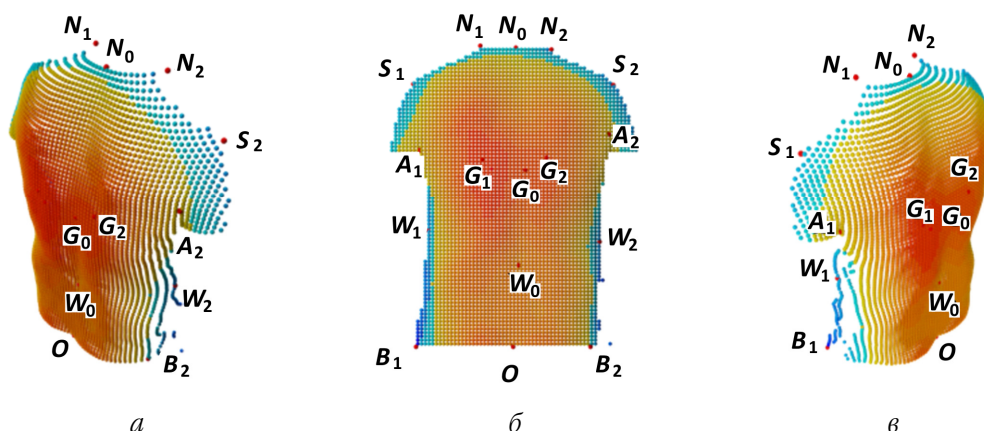


Рис. 1. Образцы трехмерных изображений дорсальной поверхности тела человека, порождаемых *ScolView*[™], где красным отмечены реперные точки; а, в – вид полупрофиль справа/слева (косая проекция) соответственно; б – вид анфас (прямая проекция сзади). Здесь и далее: градиентом цвета (от красного до синего) выделена «высота» точек поверхности объекта (переднезадний размер трехмерной модели – от большего к меньшему соответственно)

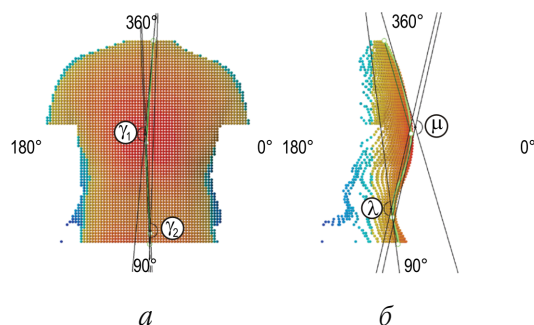


Рис. 2. Образцы трехмерных изображений дорсальной поверхности тела человека, порождаемых *ScolView*TM, где зеленым указана кривая N_0O ; а, б – вид в фронтальной и сагиттальной плоскости (вид сзади и сбоку соответственно), символами указаны углы деформации линии позвоночника (далее в тексте)

плоскости, были отложены перпендикуляры P_nV_n от каждой точки V_n (где $0 \leq n \leq 18$, n – порядковый номер V-сегмента – в рострально-каудальном направлении, P_n – точка пересечения отложенного перпендикуляра с N_0O) к отрезку N_0O (V_0V_{18}). Следует отметить, что в этом случае длина перпендикуляров, отложенных от V_0 и V_{18} , равна нулю, а V_0 и V_{18} совпадают с расположением N_0 и O соответственно. Таким образом, были рассчитаны углы ротации каждого сегмента: в грудной (θ_n) и поясничной (η_n) дугах кривой N_0O . Следует отметить, что номенклатурное соотношение дуг к грудному и поясничному отделу позвоночника было условным, поскольку сегрегация углов ротации V-сегментов строилась по принципу их принадлежности к «верхней» (грудной) и «нижней» (поясничной) части кривой N_0O , разделенной точкой ее пересечения с отрезком N_0O .

Дополнительным пулом выходных данных *ScolView*TM, свидетельствующих о деформации позвоночника в сагиттальной и фронтальной плоскостях, стали значения углов деформации кривой N_0O во фронтальной и сагиттальной плоскостях (вид сзади и сбоку соответственно). В качестве примера, указанные углы представлены на рис. 2.

Углы, которые удалось обнаружить при анализе пространственного расположения кривой N_0O , указывают на топографические особенности линии позвоночника. Подробная интерпретация обозначений этих углов представлена в табл. 1.

Совокупный объем выходных данных *ScolView*TM, описывающий пространственное взаимоотношение реперных точек, представлен 123 показателями, которые будут наименованы при наличии достоверных корреляционных связей с отдельными результатами, полученными при помощи КОТ.

В качестве эталонного инструмента использовалась компьютерная оптическая топография. В настоящем исследовании изучались базовые показатели КОТ.

В качестве метода статистической оценки (Statistica 12.0) корреляционных связей был выбран непараметрический критерий Спирмена (S_r). Достоверным считали значение $p \leq 0,05$. В качестве обоснования выбора метода статической оценки следует заметить, что типичные критерии оценки аналитической надежности метода оказались неприменимы для сравнения, поскольку технологии использованных методов кардинально разнятся, будучи объединенными исключительно предметом изучения – рельефом дорсальной поверхности туловища человека.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты в исследовании целесообразно рассматривать последовательно, относительно данных *ScolView*TM, которые были разделены на четыре основные группы: данные координат реперных точек, данные фронтальной, сагиттальной и горизонтальной плоскостей соответственно.

При оценке корреляционных связей координат отдельных реперных точек и отрезков, образованных парными реперными точками, был обнаружен ряд логичных достоверных значений критерия.

Таблица 1

**Углы, описывающие топографические особенности кривой N_0O ,
идентифицируемые на трехмерной модели тела человека при помощи *ScolView*[™]**

№ п/п	Условное обозначение	Интерпретация
1	γ_1	Угол бокового отклонения позвоночного столба в грудном отделе позвоночника во фронтальной плоскости
2	γ_2	Угол бокового отклонения позвоночного столба в поясничном отделе позвоночника во фронтальной плоскости
3	χ	Угол перехода бокового отклонения позвоночного столба в грудном и поясничном отделе
4	FB	Фронтальный баланс – отношение значений бокового отклонения позвоночного столба в грудном отделе к аналогичному в поясничном отделе
5	μ	Угол грудного кифоза
6	λ	Угол поясничного лордоза
7	ψ	Угол перехода грудного кифоза и поясничного лордоза
8	SB	Сагиттальный баланс – отношение значений угла грудного кифоза к углу поясничного лордоза

Примечание: углы χ , ψ образованы лучами смежных углов в соответствующей плоскости.

Таким образом, оказалось, что значение «глубины» вершины поясничного лордоза достоверно отрицательно коррелирует с показателем вертикальной ориентации туловища во фронтальной плоскости ($p = -0,667$). Это подтверждается тем, что чем менее был выражен поясничный лордоз, тем в большей степени была вертикализована ось тела у испытуемых. Аналогично значение «высоты» этой же точки достоверно отрицательно коррелировало с величиной кифоза ($p = -0,72$) и показателем смещения границы перехода «кифоз/лордоз» относительно 45° ($p = -0,717$). Это обосновывается тем, что более роstralное положение поясничного лордоза обеспечивает меньшую выраженность грудного кифоза и в принципе смещает топографию перехода грудного кифоза в поясничный лордоз.

Значение «глубины» отрезка, образованного точками обеих подмышечных впадин, обладало достоверно положительной корреляцией с показателями реберной асимметрии ($p = 0,748$), что, в свою очередь, обеспечило достоверную корреляционную

связь с данными выраженности поворота тазового пояса ($p = 0,714$). Такое явление объясняется тем, что большее значение «глубины» отрезка A_1A_2 напрямую связано с асимметрией плечевого пояса, что могло быть компенсировано контрротацией тазового пояса конечностей.

Ожидаемой находкой проведенного анализа оказался достоверный коэффициент корреляции ($p = 0,75$) между «высотой» отрезка, образованного точками дорсальной поверхности шеи в наиболее «узкой» его части и значением вертикальной ориентации туловища в сагиттальной плоскости.

В то же время «высоты» отрезков, образованных парными точками подмышечных впадин и углов лопаток достоверно отрицательно коррелировали со значением отклонения линии остистых отростков от средней линии как вправо, так и влево ($p = -0,8$; $-0,82$ и $p = -0,694$; $-0,698$). Вероятно, это связано с тем, что увеличение отклонения линии остистых отростков в большей степени связано с ротацией, а не перекосом отдельных точек на

поверхности трехмерной модели тела. Этот тезис в полной мере подтверждается достоверной положительной корреляционной связью между значением «высоты» парного отрезка, образованного углами лопаток, и показателями перекоса линии углов лопаток относительно горизонтали ($p = 0,683$) и поворота углов лопаток ($p = 0,7$).

Кроме этого, «высота» положения отрезка, образованного точками дорсальной поверхности туловища на уровне самой «узкой» его части – между правой и левой точкой талии, достоверно положительно ($p = 0,667$) коррелировала со значением перекоса линии тазового пояса относительно горизонтали, что вполне ожидаемо в связи со значительной анатомической близостью этих объектов. К тому же «длина» этих же парных точек имела достоверную положительную корреляционную связь ($p = 0,767$) со значением разворота плечевого пояса относительно таза, тогда как обнаружение достоверной отрицательной корреляционной связи ($p = -0,667$) между величиной «длины» отрезка, образованного «точками ягодич», стало неожиданным и на первый взгляд не имело логичного объяснения.

При оценке корреляционных связей показателей *ScolView*[™], свидетельствующих о деформации позвоночника в фронтальной плоскости (перекос отрезков, образованных парными точками), также были обнаружены достоверные значения критерия Спирмена.

Максимально репрезентативными в этом аспекте оценки *ScolView*[™] стали достоверные корреляционные связи, обнаруженные в отношении показателей отклонения линии остистых отростков – как вправо, так и влево. Так, значения углов перекоса линии, соединяющей подмышечные впадины и углы лопаток, достоверно положительно коррелировали с отклонением линии остистых отростков влево ($p = 0,809$; $0,82$), а отрезки, соединяющие точки плечевых суставов и точки N_1 и N_2 соответственно, – с отклонением линии ос-

тистых отростков вправо ($p = 0,749$; $0,822$). Такие связи могут быть интерпретированы возникновением асимметрии поясов конечностей при развитии трехплоскостной деформации позвоночника, что в полной мере подтверждается наличием достоверной отрицательной корреляционной связи ($p = -0,683$) между показателем поворота тазового пояса и значением перекоса отрезка, соединяющего точки плечевых суставов.

Наиболее информативными с позиции предмета исследования стали корреляции значений, свидетельствующих о деформации линии позвоночника – кривой N_0O в фронтальной и сагиттальной плоскости.

Оказалось, что значение угла бокового отклонения позвоночного столба в грудном отделе во фронтальной плоскости достоверно положительно коррелировало ($p = 0,7$) с величиной показателя реберной и мышечной асимметрии, что логично объясняется общим происхождением этих величин. В то же время значение угла бокового отклонения позвоночного столба в поясничном отделе во фронтальной плоскости обладало достоверной отрицательной корреляционной связью ($p = -0,805$) с величиной перекоса линии углов лопаток относительно горизонтали. Это связано с контрторсией туловища, что логично объясняет достоверное положительное значение критерия Спирмена ($p = 0,731$), обнаруженное между величиной перекоса углов лопаток и значением фронтального баланса. Это же значение – коэффициент фронтального баланса – обладало достоверной положительной корреляционной связью ($p = 0,757$) с показателем вертикальной ориентации туловища (во фронтальной плоскости) и отрицательной ($p = -0,74$) – с величиной поворота углов лопаток. Всё это подтверждает значение коэффициентов отношений величин дуг как интегративного показателя деформации позвоночника.

При оценке параметров линии позвоночника в сагиттальной плоскости были об-

наружены достоверные отрицательные корреляционные связи ($p = -0,767; -0,683$) между величиной грудного кифоза и показателями вертикальной ориентации туловища – как во фронтальной, так и в сагиттальной плоскостях, что объясняется ожидаемой более значительной вертикализацией туловища при менее выраженном грудном кифозе. Довольно необычной находкой стала достоверная отрицательная корреляционная связь ($p = -0,75$) между величиной угла перехода грудного кифоза в поясничный лордоз и показателем поворота тазового пояса, что отчасти может быть связано с усугублением поворота пояса конечностей при увеличении выраженности сколиоза. Самой очевидной находкой, не требующей логического подтверждения, стала достоверная положительная корреляционная связь ($p = 0,75$) между значениями поясничного лордоза как при использовании *ScoView*[™], так и при оценке результатов КОТ. Очередным показателем, подтвердившим свою интегральную функцию, стала величина сагиттального баланса, которая обладала достоверными отрицательными корреляционными связями со значениями вертикальной ориентации туловища во фронтальной плоскости ($p = -0,833$), величиной грудного кифоза ($p = -0,783$) и смещения границы перехода «кифоз/лордоз» относительно 45° ($p = -0,783$).

При оценке корреляционных связей выходных данных *ScoView*[™], свидетельствующих о нарушении геометрии трехмерного объекта в горизонтальной плоскости, целесообразно последовательное описание связей отдельных признаков, анатомически явно не связанных с позвоночным столбом, и показателей, непосредственно относящихся к структуре позвоночного столба.

Так, к первой группе таких показателей относится значение ротации линии ягодич, которое обнаружило достоверную положительную корреляционную связь ($p = 0,694$) с величиной отклонения линии остистых от-

ростков от средней линии вправо. В то же время угол ротации линии лопаток достоверно положительно коррелировал ($p = 0,883$) со значениями перекоса линии тазового пояса относительно горизонтали. В свою очередь угол ротации линии шеи обладал достоверными положительными корреляционными связями с показателями вертикальной ориентации туловища во фронтальной плоскости ($p = 0,867$) и значением перекоса линии углов лопаток относительно горизонтали ($p = 0,75$), а достоверной отрицательной – с величиной поворота углов лопаток ($p = -0,667$). Таким образом, данные корреляционные взаимодействия описывают закономерные явления сочетанного нарушения гармоничной геометрии рельефа поверхности спины, которые в то же время являются проявлением сбалансированных биомеханических явлений, поддерживающих вертикальную ориентацию туловища.

Вторая группа показателей – углы ротации V-сегментов и абсолютные значения протяженности перпендикуляров $P_n V_n$, которые напрямую свидетельствуют о ротационных изменениях позвоночного столба и требуют более пристального внимания к собственным достоверным корреляционным связям с выходными данными КОТ. Так, значение угла ротации η_{10-12} обладало достоверными положительными корреляционными связями с величиной отклонения линии остистых отростков влево ($p = 0,822; 0,73; 0,73$), тогда как показатель η_6 достоверно положительно коррелировал со значением вертикальной ориентации туловища ($p = 0,667$). В свою очередь угол θ_9 демонстрировал достоверную положительную корреляционную связь ($p = 0,782; 0,782$) с величинами перекоса плечевого пояса конечностей и в том числе линии углов лопаток относительно горизонтали. В то же время угол θ_{10} имел достоверную положительную корреляционную связь ($p = 0,678$) с показателем вертикальной ориентации туловища во фронтальной плоскости, а значения углов θ_{13-14} – как и ряд

углов η ранее – с показателем отклонения линии остистых отростков влево ($p = 0,833; 0,8$), а угол θ_{13} , кроме этого, – с аналогичным показателем «вправо» ($p = 0,767$). Все эти корреляции свидетельствуют о явной связи между логически близкими показателями КОТ и *ScoView*TM, указывающими на деформацию проекции позвоночного столба на трехмерном изображении объекта исследования.

Как и значения углов ротации V-сегментов, величины перпендикуляров $P_n V_n$ обладали достаточным объемом корреляционных связей с показателями КОТ, которые указывают на репрезентативность *ScoView*TM в идентификации деформации позвоночника. Наиболее значимыми с этой позиции оказались значения протяженности перпендикуляров $P_1 V_1, P_4 V_4 - P_{10} V_{10}$, которые обладали достоверной корреляционной связью с величиной перекоса линии углов лопаток относительно горизонтали ($p = 0,75; 0,75; 0,833; 0,717; 0,817; 0,82; 0,8; 0,733$), что логично объясняется усугублением асимметрии пояса верхних конечностей при нарастании величины сколиотической дуги. Этим же объясняется обнаруженная достоверная корреляционная связь между протяженностью $P_9 V_9$ и показателем вертикальной ориентации туловища во фронтальной плоскости ($p = 0,667$). С позиции математического происхождения абсолютной величины перпендикуляров $P_n V_n$ логичными оказались достоверные корреляционные связи значений величины грудного кифоза ($p = 0,71; 0,753; 0,793; 0,833$) и смещения границы перехода «кифоз/лордоз» относительно 45° ($p = 0,7; 0,733; 0,744; 0,835$) с размерами перпендикуляров $P_4 V_4 - P_5 V_5, P_9 V_9 - P_{10} V_{10}$, поскольку нарастание длины этих размеров логично связано с повышением выраженности грудного кифоза. Поэтому же значение величины поясничного лордоза обладали достоверной положительной корреляционной связью ($p = 0,767$) с протяженностью перпендикуляра $P_{14} V_{14}$, а отрицательной ($p = -0,7$) – с аналогичным значением $P_6 V_6$.

Завершающим фактом описания корреляционных связей показателей деформации позвоночного столба в горизонтальной плоскости стало обнаружение очередной отрицательной корреляционной связи ($p = -0,167$) между анатомически близкими показателями – поворотом углов лопаток и протяженностью перпендикуляра $P_6 V_6$. Эти данные указывают на менее выраженный поворот плечевого пояса у испытуемых с уплощением грудного кифоза.

Накопленный мировой опыт применения фотограмметрии с точки зрения ее прикладного использования в оценке деформации позвоночника в полной мере не позволяет экстраполировать полученные в настоящем исследовании результаты на итоги работы других групп ученых. Это связано с тем, что их выводы относительно фрагментарны и описывают единичные вехи нарушения геометрии позвоночного столба с позиции современной теории этиопатогенеза [15] сколиоза как многоплоскостной деформации позвоночника. Все современные результаты разработки проблемы фотограмметрической оценки деформации позвоночника можно резюмировать выдающимися работами бразильских исследователей. Так, по результатам метаанализа, осуществленного сотрудниками университета Риу-Гранди-ду-Сул (UFRGS, г. Риу-Гранде, Бразилия), было показано, что метод фотограмметрии демонстрирует наиболее валидные по отношению к рентгенографическому методу исследования значения угла Кобба и показатели ротации позвоночника. Единственным недостатком данного факта стало то, что эта оценка проводилась исключительно при изучении параметров шейного отдела позвоночника [16]. Эта же группа ученых оценивала чувствительность и специфичность фотограмметрии при анализе торсии туловища, а чувствительность и специфичность метода подтверждалось с помощью сколиометра. Несмотря на относительно высокие результаты оценки (чувствительность и специфичность фо-

тограмметрического метода при оценке торсии была выше 83 и 78 % соответственно) [17], недостатком проведенного исследования стала относительная неточность. Это связано с тем, что предметом изучения стал реберный гиббус, который в большей степени формируется за счет деформации реберной части грудной клетки [18].

Всё это позволяет трактовать полученные результаты функционирования *ScolView*TM как пионерские, что, однако, затрудняет экстраполяцию полученных данных в область практической медицины при отсутствии надежного инструмента для оценки валидности. В то же время на основании проведенного масштабного корреляционного анализа можно свидетельствовать, что выходные данные *ScolView*TM действительно репрезентативны.

Это подтверждается множественными корреляционными связями с отдельными результатами КОТ. Поэтому для систематизации полученных данных целесообразной кажется оценка полученных корреляционных связей в разрезе их сегрегации относительно трех плоскостей деформации позвоночника.

Таким образом, все полученные достоверные значения критерия Спирмена были распределены на группы (табл. 2), а в каждой из групп оценивалось его среднее значение и количество достоверных значений данного критерия на основании принадлежности показателей той или иной плоскости. Следует отметить, что такой маневр был осуществлен исключительно для обеспечения наглядности (рис. 3), сведения из табл. 2 не включают в себя данные об отдельных пока-

Таблица 2

Общие сведения критериев Спирмена S_r , полученных при корреляционном анализе выходных данных КОТ и *ScolView*TM

Показатель плоскости SV/КОТ	Плоскость								
	фронтальная			сагиттальная			горизонтальная		
	M	m	n	M	m	n	M	m	n
Фронтальная	0,770	0,043	9	-	-	0	0,712	0,040	2
Сагиттальная	0,800	0,047	2	0,750	0,047	4	0,750	-	1
Горизонтальная	0,773	0,059	22	0,749	0,055	11	0,756	0,102	3

Примечание: M – среднее значение; m – среднее квадратичное отклонение; n – количество достоверных значений критерия Спирмена в группе.

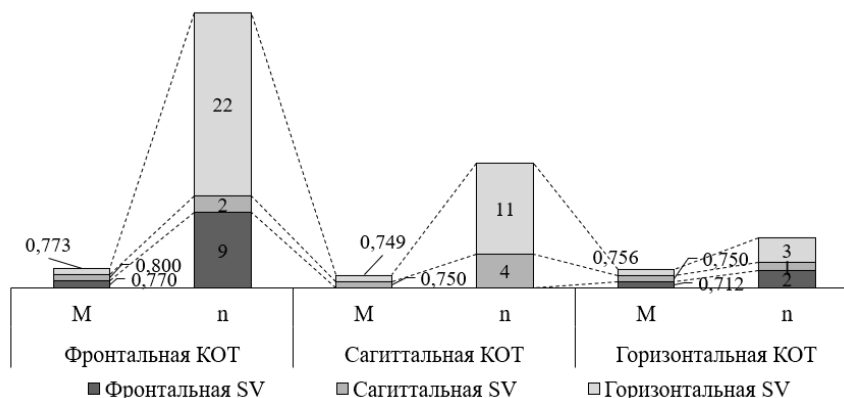


Рис. 3. Средние значения и количество достоверных значений критерия Спирмена S_r в отношении выходных данных КОТ и *ScolView*TM

зателях пространственного расположения реперных точек и отрезков, образованных парными реперными точками, поскольку таковые являются нативными, а их координаты обеспечивают возникновение иных интегративных показателей.

Резюмируя проведенную работу, следует отметить, что средним значением критерия Спирмена при оценке корреляционных связей стала величина $0,758 \pm 0,025$, что весьма обнадеживает в перспективе широкого внедрения метода фотограмметрии в рутинный мониторинг динамики деформации позвоночника популяционных групп.

Выводы

Фотограмметрия – сравнительно новый метод в клинической медицине, который

только начинает свою интеграцию в клинической практике. Наиболее перспективной отраслью клинической медицины для использования метода фотограмметрии является травматология-ортопедия, а именно детская вертебрология, специалисты в области которой должны быть заинтересованы в появлении новых и валидных инструментов для диагностики деформации позвоночного столба. Таким инструментом может стать разработанное программное обеспечение *ScolView™*, которое, однако, требует широкого проспективного исследования с сегрегацией испытуемых на группы сравнения и выделения специфических клинических признаков с последующей подготовкой практических рекомендаций по применению фотограмметрии в клинической практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Муравьев С.В., Черкасова В.Г., Чайников П.Н., Мехоношина О.О., Ковалев М.А., Гуцин М.О. Отдельные нейрофизиологические аспекты этиопатогенеза юношеского идиопатического сколиоза. Пермский медицинский журнал 2019; XXXV (4): 39–45. DOI: 10.17816/pmj36439%45 / *Muravyov S.V., Cherkasova V.G., Chaynikov P.N., Mekhonoshina O.O., Kovalev M.A., Guschin M.O.* Particular neurophysiological aspects of etiopathogenesis of juvenile idiopathic scoliosis. *Perm Medical Journal* 2019; XXXV (4): 39–45. DOI: 10.17816/pmj36439%45 (in Russian).
2. Кардинов А.И. Как рентген изменил мир (к 125-летию со дня открытия рентгеновских лучей). Таврический медико-биологический вестник 2020; 23 (4): 57–64. DOI: 10.37279/2070-8092-2020-23-4-57-64 / *Kradinov A.I.* World's changes through 125 anniversary X-ray discovery. *Tavricheskiy Mediko-Biologicheskiy Vestnik* 2020; 23 (4): 57–64. DOI: 10.37279/2070-8092-2020-23-4-57-64 (in Russian).
3. Сернадский В.Н. Цифровая медицина для детской ортопедии. Главный врач Юга России 2018; 4 (63): 64–65. / *Sernadsky V.N.* Tsifrovaia meditsina dlia detskoj ortopedii. *Glavnyi Vrach Iuga Rossii* 2018; 4 (63): 64–65 (in Russian).
4. Репринцева Е.В. Оценка уровня квалификации и сертифицированности врачебного персонала в системах здравоохранения центрального Черноземья. Азимут научных исследований: экономика и управление 2019; 8 (1): 279–281. / *Reprintseva E.V.* Assessment of the qualification and certification level of medical staff in the health systems of the central chernozem region. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration* 2019; 8 (1): 279–281 (in Russian).
5. Колчин Д.В. Ранняя диагностика диспластических и врожденных сколиозов. Гений ортопедии 2012; (1): 54–59. / *Kolchin D.V.* Early diagnostics of dysplastic and congenital scoliosis. *Genij Ortopedii* 2012; (1): 54–59 (in Russian).

6. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Барт В.А., Богатырев Т.Б. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом типа Lenke v с применением 3D-КТ-навигации. Хирургия позвоночника 2016; 13 (3): 49–59. DOI: 10.14531/ss2016.3.49-59 / Kokushin D.N., Vissarionov S.V., Baindurashvili A.G., Bart V.A., Bogatyrev T.B. 3D-CT analysis of anatomical and anthropometric parameters of vertebrae in children with Lenke type V idiopathic scoliosis. *Spine Surgery* 2016; 13 (3): 49–59. DOI: 10.14531/ss2016.3.49-59 (in Russian).
7. Шнайдер Л.С., Сарнадский В.Н., Павлов В.В. Лучевой и оптический методы оценки позвоночно-тазовых взаимоотношений у пациентов с врожденным вывихом бедра. Хирургия позвоночника 2019; 16 (1): 63–69. DOI: 10.14531/ss2019.1.63-69 / Shneider L.S., Sarnadsky V.N., Pavlov V.V. Radiological and optical methods for assessing the spino-pelvic relationships in patients with congenital hip dislocation. *Spine Surgery* 2019; 16 (1): 63–69. DOI: 10.14531/ss2019.1.63-69 (in Russian).
8. Авдеева М.В., Кренева Ю.А., Панов В.П., Филатов В.Н., Мельцер А.В., Карасаева Л.А. Факторы риска развития и прогрессирования дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника по результатам скринингового обследования жителей Санкт-Петербурга. Анализ риска здоровью 2019; (1): 125–134. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.14 / Avdeeva M.V., Kreneva Yu.A., Panov V.P., Filatov V.N., Mel'tser A.V., Karasaeva L.A. Risk factors that cause development and progression of degenerative and dystrophic diseases in the spinal column as per results obtained during screening tests on people living in Saint Petersburg. *Health Risk Analysis* 2019; (1): 125–134. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.14 (in Russian).
9. Колесников В.Н., Шандыбина Н.Д., Эриум С.С. Экология человека: сбережение нации как стратегия успешного развития. Управленческое консультирование 2018; (2): 73–79. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-2-73-79 / Kolesnikov V.N., Shandybina N.D., Erium S.S. Human ecology: Saving the nation as a strategy for successful development. *Administrative Consulting* 2018; (2): 73–79. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-2-73-79 (in Russian).
10. Сарнадский В.Н. Цифровая медицина для детской ортопедии. Главный врач Юга России 2021; (1): 46. / Sernadsky V.N. Digital medicine for pediatric orthopedics. *Glavnyi Vrach Luga Rossii* 2021; (1): 46 (in Russian).
11. Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Баиндурашвили А.Г., Барт В.А., Богатырев Т.Б. Анализ анатомо-антропометрических параметров позвонков у детей с идиопатическим сколиозом типа Lenke v с применением 3D-КТ-навигации. Хирургия позвоночника 2016; 13 (3): 49–59. DOI: 10.14531/ss2016.3.49-59 / Kokushin D.N., Vissarionov S.V., Baindurashvili A.G., Bart V.A., Bogatyrev T.B. 3D-CT analysis of anatomical and anthropometric parameters of vertebrae in children with Lenke type V idiopathic scoliosis. *Spine Surgery* 2016; 13 (3): 49–59. DOI: 10.14531/ss2016.3.49-59 (in Russian).
12. Betsch M., Wild M., Große B., Rapp W., Horstmann T. The effect of simulating leg length inequality on spinal posture and pelvic position: a dynamic rasterstereographic analysis. *Eur. Spine J.* 2012; 21 (4): 691–697. DOI: 10.1007/s00586-011-1912-5
13. DeLorenzo L., Linden A.V., Bergmann P.J., Wagner G.P., Siler C.D., Irschick D.J. Using 3D-digital photogrammetry to examine scaling of the body axis in burrowing skinks. *J. Morphol.* 2020; 281 (11): 1382–1390. DOI: 10.1002/jmor.21253
14. Шитоев И.Д., Муравьев С.В., Каракулова Ю.В., Печерский В.И., Никитин В.Н., Клоян Г.З. Эволюция оптической диагностики деформаций позвоночника. Методы и перспективы развития (обзор литературы). Гений ортопедии 2022; 28 (5): 734–744. DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744 / Shitoev I.D., Muravev S.V., Karakulova Yu.V., Pecherskiy V.I., Nikitin V.N., Kloyan G.Z. Evolution of optical diagnosis of spinal deformity. Methods and

future development (literature review). *Genij Ortopedii* 2022; 28 (5): 734–744. DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744 (in Russian).

15. Дудин М.Г., Пинчук Д.Ю. Идиопатический сколиоз: диагностика, патогенез. СПб.: Человек 2009; 336. / *Dudin M.G., Pinchuk D.Iu.* Idiopathic scoliosis: Diagnosis and pathogenesis. Saint Petersburg: Chelovek 2009; 336 (in Russian).

16. Pivotto L.R., Navarro I.J.R.L., Candotti C.T. Radiography and photogrammetry-based methods of assessing cervical spine posture in the sagittal plane: A systematic review with meta-analysis. *Gait Posture* 2021; 84: 357–367. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.12.033

17. Maddaluno M.L.M., Ferreira A.P.A., Tavares A.C.L.C., Meziat-Filho N., Ferreira A.S. Craniocervical posture assessed with photogrammetry and the accuracy of palpation methods for locating the seventh cervical spinous process: a cross-sectional study. *J Manipulative Physiol Ther.* 2021; 44 (3): 196–204. DOI: 10.1016/j.jmpt.2020.07.012

18. Wise C.A., Sepich D., Ushiki A., Khansbour A.M., Kidane Y.H., Makki N., Gurnett C.A., Gray R.S., Rios J.J., Abituv N., Solnica-Krezel L. The cartilage matrisome in adolescent idiopathic scoliosis. *Bone Res.* 2020; 8: 13. DOI: 10.1038/s41413-020-0089-0

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Пермского научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов:

Шитоев И.Д. – идея статьи, построение дизайна, математическое моделирование, подготовка текста статьи.

Муравьев С.В. – разработка концепции исследования, выполнение практической части, оценка полученных результатов, подготовка текста статьи.

Каракулова Ю.В. – разработка концепции исследования, редактирование текста статьи.

Клюян Г.З. – выполнение анализа биомеханических данных, подготовка текста статьи.

Чайников П.Н. – сбор данных о пациенте, набор материала.

Ковалев М.А. – сбор данных о пациенте, набор материала.

Все авторы утвердили окончательный вариант текста статьи.

Ограничение исследования. Проведенное исследование соответствует стандартам Хельсинкской декларации, одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО ПГМУ им. академика Е.А. Вагнера, протокол ЛЭК №4 от 21.05.2025. Перед началом исследования все пациенты дали согласие на публикацию обезличенных данных.

Поступила: 13.12.2024

Одобрена: 23.05.2025

Принята к публикации: 06.06.2025

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Сравнительная эффективность компьютерной оптической топографии и клинической фотограмметрии в оценке деформации позвоночника у подростков: результаты проспективного исследования / И.Д. Шитоев, С.В. Муравьев, Ю.В. Каракулова Ю.В., Г.З. Клюян, П.Н. Чайников, М.А. Ковалев// Пермский медицинский журнал. – 2025. – Т. 42, № 3. – С. 96–108. DOI: 10.17816/pmj42396-108

Please cite this article in English as: Shitoev I.D., Muravyev S.V., Karakulova Yu.V., Kloyan G.Z., Chainikov P.N., Kovalev M.A. Comparative effectiveness of computer optical topography and clinical photogrammetry in assessing spinal deformity in adolescents: results of a prospective study. *Perm Medical Journal*, 2025, vol. 42, no. 3, pp. 96-108. DOI: 10.17816/pmj42396-108