

Гений ортопедии. 2022. Т. 28, № 5. С. 734-744.  
Genij Ortopedii. 2022. Vol. 28, no. 5. P. 734-744.



### Обзорная статья

УДК 616.711-007.24-073(048.8)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744>

## **Эволюция оптической диагностики деформаций позвоночника. Методы и перспективы развития (обзор литературы)**

**И.Д. Шитоев<sup>1,2</sup>, С.В. Муравьев<sup>1</sup>, Ю.В. Каракулова<sup>3</sup>, В.И. Печерский<sup>4</sup>, В.Н. Никитин<sup>2,5</sup>, Г.З. Клоян<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Йорд Тех, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>3</sup> Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера, Пермь, Россия

<sup>4</sup> Клинический Санаторий-профилакторий «Родник», Пермь, Россия

<sup>5</sup> СколВью, Пермь, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Гаянэ Зурабиевна Клоян, [kloyang@mail.ru](mailto:kloyang@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Диагностика деформаций позвоночника у детей и подростков – одно из ведущих направлений непрерывного развития современной травматологии и ортопедии. На протяжении последних столетий методы оптической диагностики сколиоза и нарушения осанки стремительно совершенствовались параллельно с развитием технологий оптической и цифровой оценки, что потребовало проведения структурного анализа накопленных данных. **Цель.** Изучить клинические и технические особенности методов оптической диагностики деформации позвоночника. **Материалы и методы.** Поиск литературных источников проводился в открытой электронной базе медико-биологических публикаций PubMed и научной электронной библиотеке eLIBRARY. Глубина поиска – 10 лет. **Результаты и обсуждение.** В статье последовательно представлен анализ развития методов оптической диагностики деформаций позвоночника в историческом порядке. Представлены основные методы и системы оптической диагностики: муаровая топография, система ISIS, современные методы компьютерной оптической топографии, растровой стереографии, фотограмметрические способы оценки в клинической медицине и травматологии-ортопедии, в частности. Последовательно изложены особенности описанных методов и систем, их достоинства и недостатки. Статья содержит результаты оценки точности, надежности и воспроизводимости методов оптической диагностики. Представлены последние сведения о возможностях внедрения технологии оценки деформации позвоночника с использованием современных персональных телекоммуникационных устройств. **Заключение.** Эволюция современных трендов развития оптической диагностики деформации позвоночника реализует современные тренды клинической медицины: безопасность, повышение точности, простота эксплуатации, цифровизация и развитие медицинского «Интернета вещей».

**Ключевые слова:** деформация позвоночника, сколиоз, оптическая диагностика, фотограмметрия

**Для цитирования:** Эволюция оптической диагностики деформации позвоночника. Методы и перспективы развития (обзор литературы) / И.Д. Шитоев, С.В. Муравьев, Ю.В. Каракулова, В.И. Печерский, В.Н. Никитин, Г.З. Клоян // Гений ортопедии. 2022. Т. 28, № 5. С. 734-744. DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744. EDN OCJEGH.

### Review article

## **Evolution of optical diagnosis of spinal deformity. Methods and future development (literature review)**

**I.D. Shitoev<sup>1,2</sup>, S.V. Muravev<sup>1</sup>, Y.V. Karakulova<sup>3</sup>, V.I. Pecherskiy<sup>4</sup>, V.N. Nikitin<sup>2,5</sup>, G.Z. Kloyan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Yord Tech, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>3</sup> E.A. Vagner Perm State Medical University, Perm, Russian Federation

<sup>4</sup> Clinical Sanatorium-dispensary «Rodnik», Perm, Russian Federation

<sup>5</sup> ScolView, Perm, Russian Federation

**Corresponding author:** Gayane Z. Kloyan, [kloyang@mail.ru](mailto:kloyang@mail.ru)

### Abstract

**Introduction** Diagnosis of spinal deformities in children and adolescents is important for continuous development of modern traumatology and orthopaedics. Methods of optical diagnosis of scoliosis and postural disorders have been rapidly improving along with optical and digital assessment technologies over the past centuries and required a structural analysis of the accumulated data. **The purpose** was to explore clinical and technical aspects of optical diagnosis of spinal deformities. **Material and methods** The original literature search was conducted on key resources including the National Library of Medicine (PubMed) and Scientific Electronic eLibrary. The search depth was 10 years. **Results** The article presents a review of the methods historically developed in optical diagnosis of spinal deformities. Major methods and systems of optical diagnosis presented included moire topography, the ISIS system, modern methods of computer optical topography (raster stereography) photogrammetric methods used in clinical medicine and in trauma and orthopaedics. Characteristics of the methods and systems are described with advantages and disadvantages discussed. The article reports evaluated accuracy, reliability and reproducibility of optical diagnostic methods. The article presents the latest information about the possibilities of introducing technology for assessing spinal deformity using modern personal telecommunication devices. **Conclusion** The evolution of modern trends in optical diagnosis of spinal deformity is important for medicine to facilitate safety, greater accuracy, ease of operation, digitalization and development of the Internet of Medical Things.

**Keywords:** spinal deformity, scoliosis, optical diagnostics, photogrammetry

**For citation:** Shitoev I.D., Muravev S.V., Karakulova Y.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, vol. 28, no. 5, pp. 734-744. DOI: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-734-744.

### ВВЕДЕНИЕ

На фронтисписе первого тома пионерского труда профессора Николая Андри де Буарегара, ставшего основоположником термина и травматологии-ортопедии

вообще, указана латинская крылатая фраза «Наес est regula recti» [1], которая переводится как «Это правило правильного» или же буквально «Это правило

вертикального». Эти слова, как и символ травматологии-ортопедии – деревце, подвязанное к вертикальной опоре, – отражают суть проблемы диагностического поиска при оценке выраженности деформации позвоночника – обнаружение и эксплуатация эталонных значений пространственных характеристик позвоночного столба как «точки отсчета» для оценки выраженности его деформации.

Исключая методы рентгенографической оценки – рутинную рентгенографию и компьютерную томографию – методы оптической, а точнее, визуальной оценки деформации позвоночного столба сводились к субъективному зрительному изучению рельефа области спины или сопоставлению расположения топографических

образований с заведомо истинными эталонными параметрами. Типичным примером такого эталона в современной травматологии-ортопедии был отвес – некий предмет достаточного веса, подвешенный на нити, относительно взаимного расположения которой осуществлялась интерпретация клинических характеристик деформаций позвоночника. Аналогично проводилась оценка выраженности физиологических изгибов позвоночного столба относительно стены помещения [2]. На протяжении нескольких последовательных столетий методы визуальной и оптической диагностики совершенствовались с опорой на развитие оптических, лучевых и цифровых технологий, и именно они сегодня находятся на пике актуальности своего дальнейшего развития.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск литературных источников проводился в открытой электронной базе медико-биологических публикаций PubMed ([www.pubmed.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.pubmed.ncbi.nlm.nih.gov)) и научной электронной библиотеке eLIBRARY (<https://www.elibrary.ru>) за период с 2012 по 2022 г.

nlm.nih.gov) и научной электронной библиотеке eLIBRARY (<https://www.elibrary.ru>) за период с 2012 по 2022 г.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для современной трактовки оптических принципов диагностики в травматологии-ортопедии прежде всего целесообразен анализ понятия «фотограмметрия», который логично интерпретируется как «графическое измерение с помощью света» [3, 4]. Вкупе с этим Американское общество фотограмметрии и дистанционного зондирования (ASPRS) трактует термин «фотограмметрия» как инструмент получения точной информации о структуре поверхности объекта устройством, которое не находится в непосредственном контакте с объектом [5]. Исходя из этой трактовки, фотограмметрия должна включать в себя иные методы визуализации, которые используются в клинической практике – рентгенографию, компьютерную рентгеновскую томографию, магнитно-резонансную томографию и даже методы ультразвукового 3D-моделирования (для объектов, не контактирующих с датчиком непосредственно [6]). Именно поэтому логично предложить более широкую интерпретацию термина «клинической фотограмметрии», дополнив ее тем, что предметом клинической фотограмметрии являются оптические эффекты объекта (пациента), полученные в результате регистрации и объективной оценки свойств светового пучка, облучающего объект, в видимом диапазоне. Это подтверждается мнением Luhmann [7], согласно которому фотограмметрия может быть использована только тогда, когда объект может быть зарегистрирован исключительно фотографически. В соответствии с этой интерпретацией далее будут рассмотрены методы современной клинической фотограмметрии (ФМ).

Принципиально по технологическому признаку все способы современной ФМ можно разделить на группы:

1) ФМ одной камерой – в этом случае анализу подвергаются параметры изображения объекта в одной плоскости в условии немобильности камеры. Если для ФМ используется стереоскопическая камера, которая осуществляет два снимка с разных ракурсов одновременно, становится возможным проведение частичной трехмерной реконструкции объекта по двум изображениям. В современной биометрии чаще всего стереоско-

пические эффекты камеры реализуются технологиями многообъективной камеры или разветвителя объектива. Фактически стереоскопическая съемка равносильна способу ФМ несколькими камерами;

2) ФМ несколькими камерами – в этом случае для реконструкции трехмерного объекта используются снимки с камер, расположенных в окрестностях объекта. В зависимости от цели исследования может быть использовано неограниченное количество камер;

3) ФМ с технологией SFM – технология SFM (structure from motion) в ФМ основывается на возможности автоматизированного обнаружения и сопоставления ключевых – реперных – точек изображения объекта в перекрывающихся областях. Реконструкция трехмерной модели объекта основывается на информации, полученной из изображений видеопотока или «пачки» фото, сделанных с разных ракурсов. На сегодняшний день технология SFM кажется самой перспективной в прикладной биометрии [8], поскольку не требует использования нескольких камер, специальных устройств и оборудования для их размещения [3].

Все этапы современной интеграции ФМ в клиническую травматологию и ортопедию можно разделить на два основных.

Первый этап – ФМ-анализ изображений тени, спроецированных на поверхности тела человека. Для упрощения логического изложения методы первого этапа предлагается называть топографическими.

Дебютным на этом этапе стал метод муаровой топографии (1970 г.). Суть метода сводилась к анализу теней на объемном объекте, полученных при прохождении светового пучка от единственного источника света через решетку при условии фиксированного известного расстояния от источника света до объекта. Сам термин муаровой топографии связан с предметом этого метода исследования, которым являются деформации теневой решетки, которая, в свою очередь, напоминает эффект «переливов» при изменении угла падения света на отрез плотной шелковой или полушелковой ткани («муара») [9]. Автором этой новаторской разработки стал Н. Takasaki – со-

трудник Национального бюро стандартов и Технологий (г. Вашингтон, США) – поставщика эталонных стандартов в метрологии, ранее занятый другими разработками в области оптических измерений [10]. На протяжении трех лет Takasaki совершенствовал разработанный метод и в 1973 г. обнародовал первые результаты изучения живых объектов методом муаровой топографии [11], а спустя два года (1975 г.) были получены первые результаты оценки рельефа и контуров тела человека [12]. Несмотря на успешный старт, метод муаровой топографии не нашел широкого распространения в клинической практике, однако продолжает широко использоваться в промышленности и метрологии [13]. Основными ограничениями использования метода муаровой топографии называют экономическую неэффективность и переменную точность метода [6].

Следующим методом на первом этапе современного развития оптических диагностических технологий стало появление телевизионно-компьютерной трехмерной системы измерения формы поверхности (ISIS-scanning) в Оксфордском инженерном ортопедическом центре (1988 г., Оксфорд, Соединенное Королевство) под руководством A.R. Turner-Smith. Предложенное устройство представляло физически связанные между собой горизонтальной осью источник света и телевизионную камеру, которая размещалась ниже источника света. При облучении поверхности спины световым пучком проходила регистрация видеокамерой освещенной области поверхности в течение 2 секунд. На основании разработанных алгоритмов проводилась компьютерная обработка полученных результатов [14], погрешность измерений была представлена в диапазоне  $\pm 3$  мм. Там же в Оксфорде – в ортопедическом центре Наффилда – было проведено первое внедрение разработанного метода. На протяжении двух лет оценивались изменения изначально полученных показателей деформации позвоночника у 51 ребенка, при этом была обнаружена достоверная корреляция между величиной латерального отклонения линии позвоночника при ISIS-сканировании и значением угла Кобба ( $p < 0,0001$ ) [15]. Использование ISIS-сканирования продолжало внедряться – метод был использован для оценки длины позвоночного столба и параметров его деформации в сагиттальной и фронтальной плоскостях, а ISIS-сканирование было рекомендовано для прогнозирования дыхательных нарушений у пациентов со сколиозом [16].

Система ISIS2 была успешно адаптирована для дополнения существующей классификации идиопатического сколиоза по Lenke, которая в основном используется для выбора тактики хирургического лечения сколиоза. В одном из проведенных исследований на основании результатов ISIS2 все испытуемые были разделены на 5 кластеров на основании оценки деформации позвоночника во фронтальной и сагиттальной плоскостях и асимметрии туловища испытуемых. Проведенная автоматизированная сегрегация на кластеры представляла собой новый аспект описания идиопатического сколиоза по Lenke и может быть применена для перцептивного клинического внедрения [17].

На территории нашей страны значимой вехой развития трехмерной оценки геометрии позвоночного

столба стала компьютерная оптическая топография (КОТ, КомОТ/ТОДП – компьютерный оптический топограф), которая сегодня является признанным эффективным инструментом в вертебрологии детского и подросткового возраста на международном уровне и рекомендована для использования в процессе достижения «гармонии» 3D-коррекции деформаций позвоночника [18]. Метод КОТ был разработан В.Н. Сарнадским (ООО «МЕТОС», г. Новосибирск, РФ) и основан на анализе картины вертикальных черно-белых полос, спроектированных на поверхность спины пациента. На протяжении последних десятилетий метод КОТ отлично зарекомендовал себя как метод проведения скрининговых единовременных исследований большого потока пациентов [19]. На территории г. Новосибирска была реализована программа ежегодного сплошного обследования отдельных групп школьников. Так, на протяжении одного учебного года объектами исследования становились до 45 тысяч детей, а методология программы рекомендована для реализации в регионах России резолюцией X Юбилейного съезда травматологов-ортопедов (г. Москва, 2014 г.) [20, 21]. Масштабная интеграция КОТ в скрининговые исследования детей и подростков была проведена на территории Пермского края под руководством профессора М.Г. Дудина в ООО Клинический санаторий-профилакторий «Родник» (г. Пермь, РФ). Группе авторов по результатам многолетних изысканий удалось обнаружить новые вехи в этиопатогенезе идиопатического сколиоза [22, 23, 24], а именно, по результатам проведенных работ было выделено восемь патогенетических моделей деформации позвоночника, между которыми происходит «миграция» детей на протяжении нескольких лет [25].

При оценке точности КОТ наиболее приближенным методом диагностики деформаций позвоночного столба становится EOS-аппарат (Tamas Illes), по факту являющийся рентгенографической установкой с низкодозовым излучением [26].

Метод КОТ нашел свое применение не только в изучении статико-динамических свойств позвоночного столба, как единой биомеханической системы [27], но и в прикладном изучении гипотезы несопряженности роста спинного мозга и позвоночника на пересечении методов оптической и нейрофункциональной диагностики [28, 29]. Применение метода КОТ не ограничивается изучением деформации позвоночника у детей и подростков, поскольку широко используется в качестве метода оценки эффективности хирургического лечения врожденных заболеваний опорно-двигательного аппарата, в том числе крупных суставов [30, 31].

Универсальность и интегративность метода КОТ в смежные дисциплины расширяется. Так, например, КОТ нашел применение в синергизме спортивной медицины и педагогических спортивных технологий, поскольку результаты использования КОТ эксплуатируются для обнаружения причинно-следственных связей между видом спортивной деятельности и прогрессированием деформации позвоночного столба [32, 33, 34]. Кроме этого, КОТ используется в акушерстве. Например, при оценке осанки у беременных в третьем триместре не были обнаружены достоверные результаты,

свидетельствующее об изменениях со стороны поясничного лордоза [35], который, как принято считать, углубляется на поздних сроках беременности [36]. Принципиально метод топографической оценки рельефа поверхностей еще шире используется в клинической практике в целом. Его применяют в оперативной офтальмологии при оценке дефектов роговицы при оперативном лечении катаракты [37].

Кроме KOT на территории нашей страны используется технологически близкая немецкая система DIERS Formetric 4D (DIERS, DIERS International GmbH, г. Шпангенбад, Германия), которая, в том числе, была успешно внедрена для изучения распространенности дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника у взрослых [38]. В России значительный опыт использования системы DIERS накоплен сотрудниками Института экспериментальной медицины РАМН (г. Санкт-Петербург, РФ), а именно, лабораторией Оптической топографии, постурологии и клинической биомеханики под руководством профессора Б.Я. Величко. На основании результатов многолетнего сотрудничества был подписан договор о производстве немецкой системы на территории Российской Федерации в рамках государственной программы № 328 «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» от 15.04.2014 [39].

Разработчики системы DIERS рекомендуют называть метод, который используется в их установке, растровой стереографией, по сути, являющейся частным случаем стереофотограмметрии, где предметом анализа, как и в методе KOT, является теневая решетка, наложенная на поверхность спины пациента. Также как и KOT, система DIERS проводит 3D-реконструкцию позвоночника, основываясь на топографии поверхности области спины. Производитель системы DIERS заявляет о возможности четырехмерного исследования позвоночника, понимая под «четвертым измерением» возможность динамической оценки пространственных характеристик позвоночного столба во времени, а именно, сравнение и анализ параметров, полученных в результате незначительных колебаний тела или по итогам выполнения функциональных (в том числе постуральных) тестов. Система DIERS показала высокие результаты в сравнительных исследованиях, где в качестве эталонного инструмента выступала рентгенография позвоночника: коэффициент корреляции между углами Кобба и аналогичными значениями, полученными системой DIERS, составлял 0,758-0,872, при этом среднее значение разницы данных рентгенографии и растровой стереографии составляло 6,98-9,42°. Надежность и воспроизводимость метода по сравнению с «золотым стандартом» оценки деформации позвоночника – рентгенографией – была неоднократно обоснована в целом ряде исследований [6, 40].

Растровая стереография была успешно внедрена в изучение влияния разновеликих нижних конечностей на параметры деформации позвоночного столба. В рамках эксперимента, в котором приняли участие 115 детей, было доказано, что разница длины нижних конечностей до 15 мм не приводит к значимым деформациям позвоночника, а сопровождается нарушени-

ем пространственного расположения пояса нижних конечностей [41]. В то же время результаты этого исследования позволяют актуализировать потребность изучения сроков возникновения компенсаторных изменений со стороны позвоночника у детей и подростков с разновеликими нижними конечностями.

Примечательной отличительной чертой доказательной базы диагностической эффективности системы DIERS является исследование, в котором выходные параметры растровой стереографии были подтверждены при помощи технологии лазерного 3D-сканирования [6].

Резюмируя описание системы DIERS, важно отметить практические аспекты обследования детей и подростков с деформацией позвоночника, связанные с тем, что авторы рекомендуют проводить растровую стереографию:

- 1) для первичной оценки деформации позвоночника, когда необходимость в рентгенографии остается неясной;
- 2) для динамической оценки деформации позвоночника;
- 3) для количественной оценки (в том числе 3D) оценки деформации позвоночника;
- 4) каждые 3-6 месяцев [6].

Важность использования систем KOT и DIERS в клинической ортопедии неоспорима. Это подтверждается существующей разницей интерпретации полученных данных, поскольку подход зарубежных ученых к изучению оптико-топографических данных при проведении обследования пациентов, не имеющих явных заболеваний позвоночника, отличается от такового в нашей стране. Наиболее ценными с этой позиции кажутся результаты, которые зарубежные авторы рекомендуют использовать в качестве «коридора» нормы. Так было показано, что в общей совокупности для здоровых женщин выявлена ротация (наиболее выраженная в объеме  $2,2 \pm 3,5^\circ$  на уровне одиннадцатого грудного позвонка) и боковое отклонение на протяжении дуги в составе II-IV грудных позвонков. В то же время, значения среднего квадратичного отклонения показателей, полученных в этом исследовании, очевидно превышали величину среднего значения показателей, что заставляет свидетельствовать о возможном неправильном распределении данных, что, в свою очередь, может говорить о еще большей разнородности клинических форм деформации позвоночника в рамках «нормы». Наиболее примечательным в этой работе стал вопрос, которым задавались авторы, а именно, есть ли необходимость коррекции выявленных нарушений у практически здоровых лиц [31]?

Второй этап современного ФМ-исследования в травматологии-ортопедии связан с обработкой нативных фото – то есть изображений, на которые не были наложены «специальные» оптические эффекты (тень). Поэтому методы второго этапа можно считать логически более приближенными к термину ФМ вообще, и, соответственно, далее под термином ФМ предполагается понимать методы, оценивающие нативные фото объектов.

Началом применения измерений деталей фотоаппаратного объекта можно считать исследование аме-

риканского врача Холмса, который впервые по фотоизображению оценивал изменения походки инвалидов гражданской войны в попытке разработки оптимальных моделей протезов [3, 42]. Это стало практически единственным прецедентом использования ФМ одной нестереоскопической камерой в практике протезирования и травматологии-ортопедии вообще.

На территории нашей страны метод ФМ нашел широкое применение в самых разных сферах – от моделирования музейных объектов геологического наследия [43] до магнитно-ионосферных наблюдений в задачах прогноза и диагностики природных и техногенных экстремальных событий [44], однако применение метода в медицинской практике остается весьма ограниченным.

В зарубежных исследованиях ФМ широко используется в оценке пространственных показателей в ветеринарии [45] и клинической медицине. Конкурирующим с ФМ в клинической медицине является метод 3D-сканирования, его явными преимуществами являются воспроизведение максимально точных геометрических форм, возможность использования для изучения бликующих и отражающих предметов, а также предметов мягкой консистенции. В то же время ФМ метод обеспечивает более реалистичные структуры поверхности и достаточно высокую передачу геометрических характеристик объектов [46].

Логическую связь между прикладным применением ФМ в ветеринарии и клинической медицине стало антропологическое исследование австралийских ученых, продемонстрировавшее тесную корреляцию показателей метода компьютерной томографии и ФМ, проведенной при помощи камеры смартфона (цифровой инструмент – Agisoft PhotoScan, Agisoft Metashape, г. Санкт-Петербург, РФ). В этом исследовании были оценены пространственные показатели моделей трех черепов (Bone Clone, г. Лос-Анджелес, США), которые подвергались оценке методом ФМ и компьютерной томографии. В результате проведенного анализа авторы заявили о том, что коэффициенты корреляции данных, полученных при эксплуатации обоих методов, лежали в диапазоне от 0,9862 до 0,9980 ( $p < 0,05$ ), а метод ФМ является надежной и точной альтернативой методу компьютерной томографии [47]. Тот же ФМ-инструмент – Agisoft PhotoScan – был оценен в исследовании британских ученых, которые изучали ФМ-способ воспроизведения моделей черепа по результатам обработки «пачек» фотографий в количестве 50, 75, 100, 150 и 200 штук. По результатам проведенной работы авторы рекомендуют оптимальное по качеству построенной модели и скорости обработки количество фотографий, равное 150, для построения трехмерной модели черепа в высоком качестве [48].

Широкие перспективы интеграции метода ФМ в клиническую практику были представлены в сравнительном исследовании судебных экспертов: группой авторов были оценены пространственные характеристики рубцовых изменений кожи у 86 испытуемых тремя методами: оптической топографией (в оригинале – «структурированным светом»), ФМ одной камерой и методом «линейки». Примечательно, что по точности измерений при фокусном расстоянии 10–40 см авторами был представлен рейтинг методов от более к менее точному: оптическая топография, ФМ, метод «линейки». При этом

акцент авторов указывает на то, что оба лидирующих по точности метода могут использоваться для оценки стереозффектов рубцовых изменений с высокой степенью доверия, а недостатком метода ФМ служит более продолжительная обработка полученных результатов [49].

В последнее время ФМ получила широкое распространение в моделировании патологических процессов хирургического профиля с прикладным применением в области цифровизации процесса овладения практическими навыками хирургами, воссоздания «музея цифровой патологии» и интеграции со средами виртуальной реальности и моделями тканей и органов, воссозданных при помощи 3D-печати [50].

Применение ФМ в травматологии-ортопедии целесообразно описывать, начиная с данных, указывающих на использование ФМ при анализе костной системы в антропологических исследованиях. С этих позиций показательным оказался мета-анализ, проведенный группой по результатам изучения 26 исследований, в которых при помощи ФМ оценивались параметры костного скелета, анатомические особенности развития тела и патоморфология травм. Авторы сошлись во мнении о том, что ФМ-метод оценки параметров тела в целом обладает большим потенциалом, однако комплексная оценка полученных результатов оказывается затруднительной ввиду неоднородности технических параметров, примененных методов и способов подсчета и интерпретации результатов [51].

За рубежом одной из наиболее инновационных разработок в области цифровой оценки параметров деформации позвоночника и рельефа туловища в целом является система из двух камер и программного обеспечения, разработанная сотрудниками Университетской больницы Рейнско-Вестфальского технического университета г. Ахена (University Hospital RWTH, г. Ахен, Германия) и представленная в 2019 г. Разработанная система использовала снимки из восьми разных точек, расположенных вокруг объекта, на основании чего осуществлялась полная 3D-реконструкция модели, в качестве которой авторы использовали фантом Алдерсона (The Alderson Radiation Therapy Phantom, Radiology Support Devices, г. Лос-Анджелес, США), который обычно используется в качестве объекта технологического тестирования навигации при выполнении лучевой терапии. Достоверность проведенных измерений на фантоме была подтверждена результатами компьютерной томографии [52]. Разница значений, полученных с использованием разработанной системы и методом компьютерной томографии, не превышала 0,61–10,52 %. Кроме этого, при тестировании приложения на 35 взрослых добровольцах авторами были получены достаточно высокие показатели межэкспертной (0,9–0,98) и внутриэкспертной достоверности (0,8–0,95) в выявлении практически всех структур поверхности тела и измерении абсолютных величин [53].

Значительный вклад в интеграцию метода ФМ в клиническую ортопедию внесли исследования группы бразильских экспертов – прежде всего университета Риу-Гранди-ду-Сул (UFRGS, г. Рио-Гранде, Бразилия). Во-первых, в проведенном ими мета-анализе были оценены результаты 21 исследования, в которых применялись 20 разнородных методов ФМ и рентгенографии для оценки положения шейного отдела позвоночника

в сагиттальной плоскости. Результаты этой работы показали высокий уровень внутриэкспертной надежности при сравнении ФМ и рентгенографического метода. Так, наиболее близкими были результаты оценки угла Кобба (на дугах C1/II-CVII) и значение ротации позвоночника в шейном отделе [54] при использовании обоих методов. Примечательно, что в то же время другая группа бразильских ученых из Рио-де-Жанейро (CUAM, Бразилия) уже успешно интегрировала метод ФМ в качестве инструмента для оценки разных способов физикального анализа дорсопатии шейного отдела позвоночника [55]. Во-вторых, группой авторов из университета UFRGS оценивалась чувствительность и специфичность метода ФМ при оценке торсии туловища, при этом эталонным инструментом был выбран менее точный, по сравнению с рентгенографией и оптической топографией, прибор сколиометр, а предметом изучения служил реберный гиббус. В своем исследовании авторы обнаружили достоверную корреляцию значений, полученных методом ФМ и сколиометрии ( $p < 0,05$ ), а чувствительность и специфичность ФМ при оценке торсии была выше – 83 и 78 % [56].

С технологической точки зрения исполнения ФМ ценным кажется исследование группы авторов из другого бразильского федерального университета Сан-Пауло (г. Сан-Пауло, Бразилия). Ценность этого исследования состоит в предложенном авторами ассортименте показателей – углов и «расстояний» (программное обеспечение PAS), изучение которых видится перспективным с позиции развития ФМ в ортопедии. Так, авторы у двух групп испытуемых – 30 пациентов со сколиозом и 20 практически здоровых лиц в возрасте 11-18 лет – оценили расчетные показатели между маркерами:

1) углы: правый акромион / мечевидный отросток / левый акромион (A2); угол, образованный точкой на наименьшей окружности талии (во фронтальной плоскости) и ее «верхним и нижним краями» слева (буквальное цитирование, A4L); угол, образованный отрезками, соединяющими «верхний» и «нижний» угол лопатки (A7);

2) «расстояния»: между мечевидным отростком и свободным концом XII ребра справа и слева (D1R/D1L); между мечевидным отростком и передней верхней остью подвздошной кости (D3).

Результаты проведенной работы показали, что значения A2, A7 были достоверно выше, а A4L и D1R/D1L – достоверно ниже у пациентов со сколиозом, в то же время умеренные достоверные значения коэффициента корреляции были обнаружены между A2, D1R/D1L и значением угла Кобба. Несмотря на некоторую фрагментарность представленных в работе сведений, ценность проведенного исследования связана, прежде всего, с пионерской интеграцией в аналитический процесс не только «нативных» показателей указанных маркеров, но и расчетных значений, полученных по результатам расчета их пространственных взаимоотношений [57]. Кроме этого, введенные авторами топографические обозначения можно считать пионерскими в клинической ФМ-номенклатуре.

Еще более ценным оказалось исследование третьей группы бразильских ученых из университета штата Минас-Жерайс (г. Белу-Оризонти, Бразилия), которыми метод ФМ был использован для оценки динамики деформации позвоночного столба у детей со сколиозом. Несмотря на то, что предметом изучения был выбран

только угол Кобба, авторам удалось сравнить динамическую репрезентативность рентгенографического и ФМ методов на разнополой выборке испытуемых в количестве 91 человека как минимум дважды на протяжении срока в среднем 8,6 месяца. При этом в качестве критерия прогрессирования было выбрано значение прироста угла Кобба на 5°. Результаты исследования, ввиду их ценности, представляется изложить подробно. Авторами было показано, что в среднем величина угла Кобба в начале исследования составляла  $39,5 \pm 16,7^\circ$  и  $39,5 \pm 14,3^\circ$ , в конце исследования –  $40,2 \pm 16,2^\circ$  и  $41,3 \pm 15,1^\circ$  для рентгенографического и фотограмметрического исследований соответственно ( $p$  для обеих групп  $p > 0,05$ ). ФМ-метод показал точность 89 % (95 % доверительный интервал = 82,5–95,5) для выявления прогрессирования сколиоза с чувствительностью 94,4 % (95 % доверительный интервал = 89,6–99,2) и специфичностью 86,7 % (95 % доверительный интервал = 79,7–93,7). Представленные сведения позволили авторам рассматривать ФМ как альтернативу рентгенографии, связанной с избыточным лучевым воздействием, и метод диагностики прогрессирования сколиоза [58].

Методологически ценными в разработке трехмерного анализа геометрии позвоночного столба оказались исследование группы канадских ученых, которые оценивали при помощи оптической системы два важных аспекта построения объемных изображений: повторяемость и воспроизводимость полученных данных, в том числе, при съемке модели в статичной позе (А) и в позе «ключицы» (В), в этом случае испытуемые прикладывали первые пальцы кистей тыльной стороной к проекции середины ключицы, а II-IV пальцы – внутренней стороной к боковой поверхности шеи. Авторами было показано, что для положения А надежность была от удовлетворительной до отличной с коэффициентом внутригрупповой корреляции от 0,91 до 0,99 (от 0,85 до 0,99 для нижней границы 95 % доверительного интервала). Для позы В коэффициент внутригрупповой корреляции составил 0,85-0,98 (от 0,74 до 0,99 для нижней границы 95 % доверительного интервала). Полученные данные обнадеживают перспективы развития ФМ-оценки деформации – в том числе позволяют методически облегчить процесс съемки [59].

Надежность ФМ в ортопедии подтверждается результатами исследования группы ученых под руководством David P. и Bliss Jr., которые оценивали корреляцию данных метода ФМ и рентгеновской компьютерной томографии на протяжении 2 лет и 4 месяцев у девяти добровольцев с воронкообразной деформацией грудной клетки. Авторы исследования обнаружили, что наиболее достоверными, оказались пространственные характеристики длины, чем показатели объема и площади грудной клетки, полученные с помощью ФМ ( $p = 0,0013$ ) [60].

Следует заметить, что сегодня метод ФМ используется для оценки не только идиопатического сколиоза, но и для оценки деформации позвоночника как симптома в составе ряда наследственных заболеваний. Так, в одном из исследований показано прикладное использование ФМ не только в оценке деформации позвоночника, но и в подборе реабилитационных мероприятий и диагностике постуральных стереотипов, лицевой асимметрии и миотонического симптомокомплекса в составе син-

дрома Шварца–Джампела – хондродистрофической миотонии [61]. Кроме этого, ФМ находит все большее применение не только в травматологии и ортопедии, но и в протезировании ампутированных конечностей. Актуальность конгруэнтности тканей культи и гильзы протеза ампутированной конечности неоспорима. С этих позиций прикладное использование ФМ в оценке пространственных характеристик культи и слепка культи оказалось высокоэффективным инструментом в процессе изготовления индивидуальных протезов. В одном из проведенных исследований ценным с технологической точки зрения ФМ кажется количество снимков, равное 360, позволившее достигнуть максимальной конгруэнтности культи и изготовленного на 3D-принтере протеза на основании данных ФМ [62].

Важным этапом современного развития ФМ в травматологии-ортопедии стало проведение мета-анализа по данным статей, размещенных в международных базах данных PubMed/Medline и LILACS. Целью проведенного мета-анализа стал поиск нормативных значений угловых характеристик путем математической обработки данных, полученных в исследованиях ранее. Важным критерием отбора исследований для мета-анализа стало наличие как рентгенографических (рентгенометрических), так и ФМ-результатов оценки клинически значимых с позиции развития сколиоза физиологических изгибов позвоночника – грудного кифоза и поясничного лордоза. Примечательно, что авторам мета-анализа удалось обнаружить рентгенометрические средние нормативные значения для поясничного лордоза в объеме  $44,07^\circ$  (на уровне L1-L5) и  $58,01^\circ$  (на уровне L1-S1), тогда как среднее нормативное значение для грудного кифоза (на уровне Th1-Th12) составило  $48,33^\circ$ . В то же время важно отметить, что авторам не удалось получить аналогичные значения для ФМ-исследования, поскольку способы измерения аналогичных угловых значений разнились, что логично требует проведения унификации методологии ФМ в ортопедии [63].

Еще одной проблемой прикладного использования ФМ служит определение оптимального бокового смещения камеры для минимизации неопределенности 3D-данных при наложении снимков и генерации трехмерных изображений. Следует заметить, что эта проблема в клиническом применении остается нерешенной, однако значительно влияет на качество полученного трехмерного объекта и его абсолютные пространственные характеристики, а также усложняется ввиду фоторегистрации незначительных движений живого объекта (колебания, дыхательные движения). На сегодняшний день технические аспекты этого вопроса решаются на стадии отработки метода на неживых объектах [64].

Тенденции развития ФМ в травматологии-ортопедии определяются упрощением интеграции метода в клиническую практику за счет использования камеры персонального телекоммуникационного устройства (далее – ПТУ) как инструмента фоторегистрации. Это подтверждает ряд исследований. Как было указано ранее, одно из первых ФМ-исследований в антропологии было выполнено с использованием камеры смартфона [47]. Кроме этого, было проведено пионерское исследование, в котором в качестве диагностического инструмента деформации позвоночника использо-

валось ПТУ (iPad, Apple Inc., г. Купертино, США). В качестве «золотого стандарта» для проведения сравнительного испытания оценивались параметры абсолютного измерения пространственных величин (мм) и углов их взаимоотношения ( $^\circ$ ) при помощи системы захвата движения Qualisys (Qualisys AB, г. Гётеборг, Швеция). Результаты проведенного исследования оказались обнадеживающими: достоверные коэффициенты корреляции при сравнении показателей оказались более 0,98, а погрешность измерения пространственных величин не превышала 3,8 мм, а углов –  $0,2^\circ$  [65].

В то же время использование смартфона в качестве средства измерения имеет ряд отличительных особенностей:

- 1) в качестве оптического измерительного прибора одинаково эффективно могут использоваться камера смартфона и зеркальная камера [66];
- 2) камера смартфона имеет ограничения точности, связанные с конкретной моделью смартфона [67];
- 3) 3D-модели, построенные при помощи камеры смартфона, оказываются на 2 мм больше, чем реальные объекты [3].

К тому же ФМ имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими методами оптической диагностики заболеваний позвоночника:

- 1) ФМ значительно дешевле, чем другие методы визуализации (компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, лазерное сканирование) [68];
- 2) ФМ не требует подготовки или присутствия квалифицированного специалиста [69];
- 3) ФМ совершенно безопасна, в отличие от рентгенографии или компьютерной томографии [70];
- 4) методика ФМ проста в исполнении и обработке полученных изображений, в том числе, с использованием ранее разработанного программного обеспечения [71].

Всю историю развития оптической диагностики в травматологии-ортопедии можно представить в схематическом изображении (рис. 1).

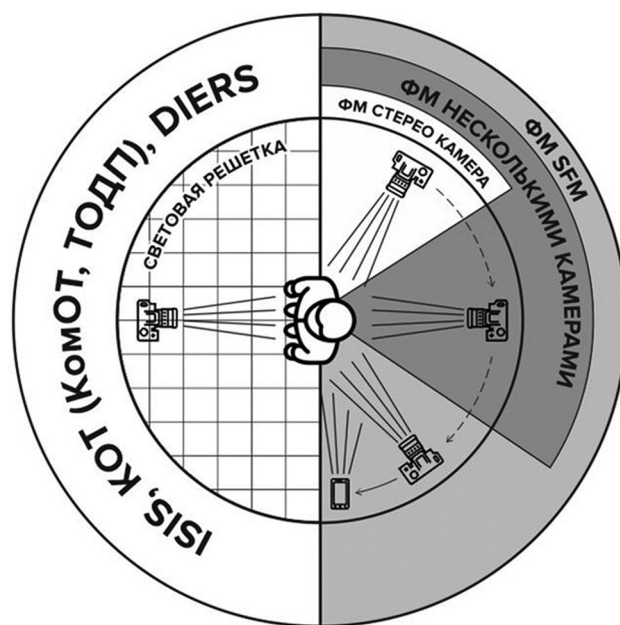


Рис. 1. Схематическое изображение развития фотogramметрии в травматологии-ортопедии

На основании всего изложенного ФМ кажется на сегодняшний день наиболее перспективной с позиции клинического внедрения в детскую и подростковую вертебрологию. На территории Пермского края на основании ранее полученного опыта масштабной оценки деформации позвоночника у детей и подростков [62] и по результатам компьютерной оптической топографии в ООО «Йорд Тех» (ScolView™, г. Пермь, РФ) [72] была разработана ФМ-система клинической диагностики пространственного расположения позвоночника при помощи камеры смартфона. Технически система реализуется следующим образом:

1) выполнение снимков объекта камерой ПТУ (технические требования: оптимальные опико-технические свойства камеры; операционная система Android, iOS) в количестве не менее 70 и не более 200 снимков. Выполняется серийная съемка с расстояния около 1 м, при этом оператор передвигается по полуокружности, обращенной к объекту, делая последовательно серии снимков, перемещая камеру по траектории «зигзаг»;

2) компиляция снимков объекта. При этом происходит экстракция отличительных визуальных эффектов объекта на одном изображении из серии, которые сравниваются с визуальными эффектами другого изображения из серии и накладываются друг на друга в стабильных точках, независимо от ракурса, перемещения и масштаба. На основании полученных данных формируется трехмерный объект;

3) обработка трехмерного объекта – выполняется последовательностью действий:

– расчет расстояния от камеры до объекта (в юнитах, которые переводятся в метрическую систему координат с помощью технологии дополненной реальности – язык программирования Python 3.8 (Python Software Foundation, г. Бивертон, Орегон, США);

– постобработка трехмерного объекта: обрезка фона и окружения, сглаживание и избавление от визуальных шумов;

– выделение горизонтальной плоскости трехмерного объекта – путем одновременной регистрации данных инерционных датчиков ПТУ;

– выделение фронтальной плоскости трехмерного объекта – путем фотофиксации ПТУ поверхности спины в прямой проекции сзади;

– позиционирование трехмерного объекта – осуществляется индикация верха и низа изображения объекта, поворот трехмерного объекта согласно заданным базовым плоскостям, одновременно с этим определяются начало координат и осуществляется коррекция;

– определение реперных точек – алгоритмизированный поиск реперных точек согласно разработанному математическому алгоритму;

4) расчет параметров поверхности спины, анализ проведенных расчетов с помощью разработанного математического алгоритма (язык программирования Python 3.8).

Логическая схема работы системы представлена на рисунке 2.

Анализ результатов клинического внедрения системы ScolView™ ожидается в последующих публикациях.

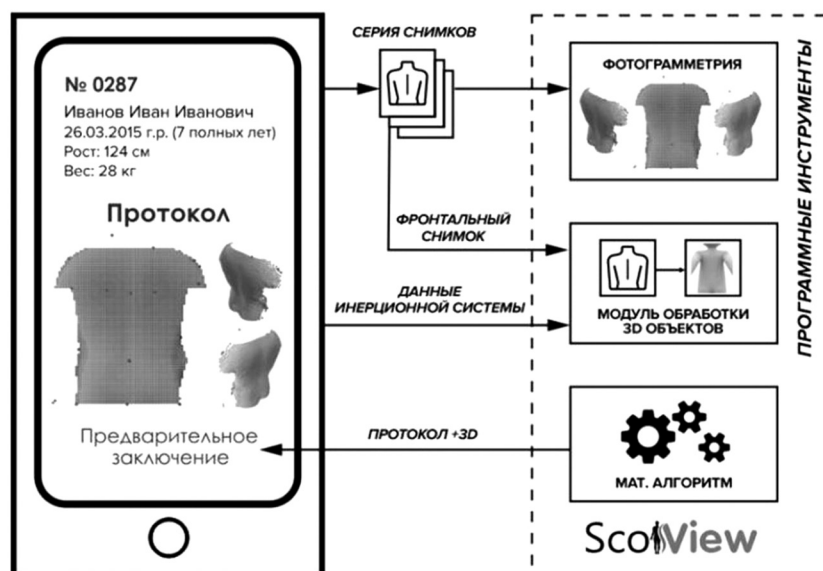


Рис. 2. Логическая схема работы ScolView™

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя информацию о современных методах оптической оценки деформации позвоночника у детей, кажется логичным выделить основные тренды в медико-техническом развитии диагностики в травматологии и ортопедии.

1. Тренд безопасности включает в себя нивелирование лучевой нагрузки на пациента.

2. Тренд повышения точности связан с развитием технологии оптической цифровой фотографии.

3. Тренд простоты эксплуатации обеспечивается возникновением тенденции к снижению требований к квалификации «оператора» диагностического устройства и трансформацией ПТУ в полноценный медицинский прибор.

4. Тренд цифровизации возникает как причина и следствие «крена» функциональной нагрузки по съемке и расшифровке данных в пользу цифровых устройств и алгоритмов.

5. Тренд медицинского «Интернета вещей» – концептуальное глобальное явление, возникшее на основании расширения спектра медицинских услуг, реализуемых с использованием цифровых и сетевых технологий.

Описанные тренды уже сейчас повсеместно реализуются в медицинской практике, продолжают совер-

шенствоваться и проходят «критические точки» своего развития, которые знаменуются внедрением новых технологий или нового прикладного использования ранее изученного метода. Отчасти эволюция этого процесса кажется предсказуемой, поскольку следующим этапом развития оптических и цифровых технологий в оценке деформации позвоночника станет, судя по всему, глубокое внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и возникновение полноценной системы помощи принятия врачебных решений (СППВР) именно в отрасли детской и подростковой вертебрологии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- De Bois-Regard N.A. L'Orthopédie, ou, l'Art de prévenir et de corriger dans les enfans, les difformités du corps: Le tout par des moyens à portée des peres & des meres, & de toutes les personnes qui ont des enfans à élever. Vol. 2. Chez George Friex, 1743. Université de Gand, 2008. 304 p.
- Котельников Г.П., Миронов С.П., Мирошниченко В.Ф. Травматология и ортопедия: учебник. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. 400 с.
- Application of Photogrammetry in Biomedical Science / R. Struck, S. Cordoni, S. Aliotta, L. Pérez-Pachón, F. Gröning // Adv. Exp. Med. Biol. 2019. Vol. 1120. P. 121-130. DOI: 10.1007/978-3-030-06070-1\_10.
- Ey-Chmielewska H., Chruściel-Nogalska M., Frączak B. Photogrammetry and its potential application in medical science on the basis of selected literature // Adv. Clin. Exp. Med. 2015. Vol. 24, No 4. P. 737-741. DOI: 10.17219/acem/58951.
- Estes J., Kline K., Collins E. Remote sensing // International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Ed. by Smelser N.J., Baltes P.B. Pergamon, 2001. P. 13144-13150. DOI: 10.1016/B0-08-043076-7/02526-2.
- Emerging Techniques in Diagnostic Imaging for Idiopathic Scoliosis in Children and Adolescents: A Review of the Literature / S. Girdler, B. Cho, C.M. Mikhail, Z.B. Cheung, N. Maza, S. Kang-Wook Cho // World Neurosurg. 2020. Vol. 136. P. 128-135. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.01.043.
- Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications / S. Robson, T. Luhmann, S. Kyle, I. Harley. Whittles Publishing, Dunbeath, 2006. 528 p.
- Villa C. Forensic 3D documentation of skin injuries // Int. J. Legal Med. 2017. Vol. 131, No 3. P. 751-759. DOI: 10.1007/s00414-016-1499-9.
- Краткая энциклопедия домашнего хозяйства: [в 2-х т.] / под ред. А. И. Ревина. М.: Советская энциклопедия. 1960.
- Takasaki H. Automatic ellipsometer. Automatic polarimetry by means of an ADP polarization modulator III // Appl. Opt. 1966. Vol. 5, No 5. P. 759-764. DOI: 10.1364/AO.5.000759.
- Takasaki H. Moiré topography // Appl. Opt. 1973. Vol. 12, No 4. P. 845-850. DOI: 10.1364/AO.12.000845.
- Chiang C. Moiré Topography // Appl. Opt. 1975. Vol. 14, No 1. P. 177-179. DOI: 10.1364/AO.14.000177.
- A super-grayscale and real-time computer-generated Moiré profilometry using video grating projection / H. Li, Y. Cao, Y. Wan, C. Li, C. Xu, H. Zhang, H. An // Sci. Rep. 2021. Vol. 11, No 1. 19882. DOI: 10.1038/s41598-021-99420-8.
- Turner-Smith A.R. A television-computer three-dimensional surface shape measurement system // J. Biomech. 1988. Vol. 21, No 6. P. 515-529. DOI: 10.1016/0021-9290(88)90244-8.
- ISIS scanning: a useful assessment technique in the management of scoliosis / I. Weisz, R.J. Jefferson, A.R. Turner-Smith, G.R. Houghton, J.D. Harris // Spine (Phila Pa 1976). 1988. Vol. 13, No 4. P. 405-408. DOI: 10.1097/00007632-198804000-00006.
- Correction of body height in scoliotic patients using ISIS scanning / A.J. Carr, R.J. Jefferson, I. Weisz, A.R. Turner-Smith // Spine (Phila Pa 1976). 1989. Vol. 14, No 2. P. 220-222. DOI: 10.1097/00007632-198902000-00014.
- Gardner A., Berryman F., Pynsent P. A cluster analysis describing spine and torso shape in Lenke type 1 adolescent idiopathic scoliosis // Eur. Spine J. 2021. Vol. 30, No 3. P. 620-627. DOI: 10.1007/s00586-020-06620-3.
- Дюбюсс Ж. Достижение гармонии в 3D-коррекции деформаций позвоночника // Хирургия позвоночника. 2018. Т. 15, №1. С. 101-109. DOI: 10.14531/ss2018.1.101-109
- Диагностика статических деформаций позвоночника методом топографической фотометрии в динамике до и после реабилитационных мероприятий у детей школьного возраста / А. Н. Цуканов, Д.В. Чарнаштан, А.А. Валетко, Р. И. Гракович, К.В. Бронская, Д.А. Чечетин // Проблемы здоровья и экологии. 2016. № 3 (49). С. 44-47.
- Сернадский В.Н. Цифровая медицина для детской ортопедии // Главный врач Юга России. 2018. № 4 (63). С. 64-65.
- Сернадский В.Н. Цифровая медицина для детской ортопедии // Главный врач Юга России. 2021. № 1(76). С. 46.
- Кравцова Е.Ю., Муравьев С.В., Фирсова М.Б. Состояние кортикоспинальных трактов при юношеском идиопатическом сколиозе (результаты диагностической транскраниальной магнитной стимуляции) // Медицинский Альманах. 2014. № 3 (33). С. 98-101.
- Кинезиологическое тейпирование в коррекции деформации позвоночника у детей на доклинической стадии юношеского идиопатического сколиоза / Е.С. Антропов, В.Г. Черкасова, С.В. Муравьев, В.И. Печерский // Спортивная медицина: наука и практика. 2016. Т. 6, № 3(24). С. 54-64. DOI: 10.17238/ISSN2223-2524.2016.3.54
- Кравцова Е.Ю., Муравьев С.В., Кравцов Ю.И. Санаторно-курортное лечение болевого синдрома в спине у подростков с юношеским идиопатическим сколиозом // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2017. Т. 94, № 1. С. 41-45. DOI: 10.17116/kurort201794141-45.
- Особенности формирования позвоночника при начальных проявлениях сколиотической деформации / Н.М. Белокрылов, В.И. Печерский, Л.В. Лихачёва, М.Г. Дудин, Л.В. Шарова // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 2012. Т. 7, № 3. С. 6-11.
- Illés S., Somoskeőy S. The EOSTM imaging system and its uses in daily orthopaedic practice // Int Orthop. 2012. Vol. 36, No 7. P. 1325-1331. DOI: 10.1007/s00264-012-1512-y.
- Долганов Д.В., Долганова Т.И., Самылов В.В. Оценка нарушений поструральной функции позвоночника в ортостатических стереотипах // Гений ортопедии. 2018. Т. 24, № 3. С. 357-364. DOI: 10.18019/1028-4427-2018-24-3-357-364.
- Дудин М. Г., Пинчук Д.Ю. Идиопатический сколиоз. Нейрофизиология, нейрохимия. СПб., 2017. 304 с.
- Отдельные нейрофизиологические аспекты этиопатогенеза юношеского идиопатического сколиоза / С.В. Муравьев, В.Г. Черкасова, П.Н. Чайников, О.О. Мехоношина, М.А. Ковалев, М.О. Гушин // Пермский медицинский журнал. 2019. Т. XXXV, № 4. С. 39-45. DOI: 10.17816/pmj36439%45.
- Шнайдер Л.С., Сернадский В.Н., Павлов В.В. Лучевой и оптический методы оценки позвоночно-тазовых взаимоотношений у пациентов с врожденным вывихом бедра // Хирургия позвоночника. 2009. Т. 16, № 1. С. 63-69.
- Evaluation of 3D vertebral and pelvic position by surface topography in asymptomatic females: presentation of normative reference data / C. Wolf, U. Betz, J. Huthwelker, J. Konradi, R.S. Westphal, M. Cerpa, L. Lenke, P. Drees // J. Orthop. Surg. Res. 2021. Vol. 16, No 1. P. 703. DOI: 10.1186/s13018-021-02843-2.

32. Прокопьев Н.Я., Баранхин О.В., Борисов С.А. Глубина лордоза на шейном и поясничном уровне как показатель осанки у мальчиков периода второго детства на начальном этапе занятий единоборствами // Наука-2020. 2021. № 3 (48). С. 52-58.
33. Али Махаммад Али, Прокопьев Н.Я., Христов В.В. Ромб Машкова в оценке функциональной нагрузки на позвоночный столб у юношей сборной команды Сирии по шоссейным гонкам // Sciences of Europe. 2021. Vol. 2, No 85. P. 11-16.
34. Сравнительная характеристика состояния костно-мышечной и вегетативной нервной систем скалолазов детского и подросткового возраста в зависимости от уровня спортивного мастерства / Е.С. Антропов, В.Г. Черкасова, С.В. Муравьев, И.В. Крылова // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 2016. Т. 11, № 4. С. 195-202. DOI 10.14526/01\_1111\_167.
35. Posture and low back pain during pregnancy - 3D study / W.M. Glinkowski, P. Tomasik, K. Walesiak, M. Gluszek, K. Krawczak, J. Michoński, A. Czyżewska, A. Żukowska, R. Sitnik, M. Wielgoś // Ginekol. Pol. 2016. Vol. 87, No 8. P. 575-580. DOI: 10.5603/GP.2016.0047.
36. Беренов К.В., Беренова О.Ф., Карпинская Е.Д. Биомеханические особенности равновесия и параметров позвоночно-тазового баланса у беременных с пояснично-тазовой болью // Травма. 2020. Т. 21, № 3. С. 42-47. DOI: 10.22141/1608-1706.3.21.2020.208420.
37. Розанова О.И., Цыренжапова Е.К. Рельеф-топография роговицы у пациентов с катарактой после ранее выполненной передней радиальной кератотомии // Саратовский научно-медицинский журнал. 2020. Т. 16, № 1. С. 261-265.
38. Факторы риска развития и прогрессирования дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника по результатам скринингового обследования жителей Санкт-Петербурга / М.В. Авдеева, Ю.А. Кренева, В.П. Панов, В.Н. Филатов, А.В. Мельцер, Л.А. Карасаева // Анализ риска здоровью. 2019. № 1. С. 125-134. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.14.
39. Колесников В.Н., Шандыбина Н.Д., Эриум С.С. Экология человека: сбережение нации как стратегия успешного развития. Управленческое консультирование // Главный врач Юга России. 2018. № 2 (110). С. 73-79. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-2-73-79.
40. Rasterstereographic back shape analysis in idiopathic scoliosis after anterior correction and fusion / L. Hackenberg, E. Hierholzer, W. Pözl, C. Götz, U. Liljenqvist // Clin. Biomech. (Bristol, Avon). 2003. Vol. 18, No 1. P. 1-8. DOI: 10.1016/S0268-0033(02)00165-1.
41. The effect of simulating leg length inequality on spinal posture and pelvic position: a dynamic rasterstereographic analysis / M. Betsch, M. Wild, B. Große, W. Rapp, T. Horstmann // Eur. Spine J. 2012. Vol. 21, No 4. P. 691-697. DOI: 10.1007/s00586-011-1912-5.
42. Lane H.B. Photogrammetry in medicine // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1983. Vol. 49, No 10. P. 1453-1456.
43. Астахова И.С., Журавлев А.В. Трёхмерное моделирование как метод визуализации объектов геологического наследия в музейном пространстве // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2019. № 4. С. 31-37.
44. Белинская А.О., Хомутов С.Ю. Возможности магнитно-ионосферных наблюдений в задачах прогноза и диагностики природных и техногенных экстремальных событий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 3. С. 37-45.
45. Using 3D-digital photogrammetry to examine scaling of the body axis in burrowing skinks / L. DeLorenzo, A.V. Linden, P.J. Bergmann, G.P. Wagner, C.D. Siler, D.J. Irschick // J. Morphol. 2020. Vol. 281, No 11. P. 1382-1390. DOI: 10.1002/jmor.21253.
46. Which Tool Is Best: 3D Scanning or Photogrammetry – It Depends on the Task / I. Dixit, S. Kennedy, J. Piemontesi, B. Kennedy, C. Krebs // Adv. Exp. Med. Biol. 2019. Vol. 1120. P. 107-119. DOI: 10.1007/978-3-030-06070-1\_9.
47. Virtual anthropology? Reliability of three-dimensional photogrammetry as a forensic anthropology measurement and documentation technique / R. Omari, C. Hunt, J. Coumbaros, B. Chapman // Int. J. Legal Med. 2021. Vol. 135, No 3. P. 939-950. DOI: 10.1007/s00414-020-02473-z.
48. Morgan B., Ford A.L.J., Smith M.J. Standard methods for creating digital skeletal models using structure-from-motion photogrammetry // Am. J. Phys. Anthropol. 2019. Vol. 169, No 1. P. 152-160. DOI: 10.1002/ajpa.23803.
49. Evaluation of 3D Measuring Methods for Body Surface Damage and Scars / J.M. Wang, J.Y. Mi, W.H. Hu, Z.D. Li, D.H. Zou, Y.J. Chen // Fa Yi Xue Za Zhi. 2020. Vol. 36, No 2. P. 204-209. (in English, Chinese) DOI: 10.12116/j.issn.1004-5619.2020.02.011.
50. Three-Dimensional Pathology Specimen Modeling Using "Structure-From-Motion" Photogrammetry: A Powerful New Tool for Surgical Pathology / J. Turchini, M.E. Buckland, A.J. Gill, S. Battye // Arch. Pathol. Lab. Med. 2018. Vol. 142, No 11. P. 1415-1420. DOI: 10.5858/arpa.2017-0145-OA.
51. Lussu P., Marini E. Ultra close-range digital photogrammetry in skeletal anthropology: A systematic review // PLoS One. 2020. Vol. 15, No 4. P. e0230948. DOI: 10.1371/journal.pone.0230948.
52. Introduction and evaluation of a novel multi-camera surface topography system / R. Michalik, M. Knod, H. Siebers, M. Gatz, T. Dirrichs, J. Eschweiler, V. Quack, M. Betsch // Gait Posture. 2020. Vol. 80. P. 367-373. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.06.016.
53. Development of a new 360-degree surface topography application / R. Michalik, H. Siebers, J. Eschweiler, V. Quack, M. Gatz, T. Dirrichs, M. Betsch // Gait Posture. 2019. Vol. 73. P. 39-44. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.06.025.
54. 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. Vol. 84. P. 357-367. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.12.033.
55. Craniocervical posture assessed with photogrammetry and the accuracy of palpation methods for locating the seventh cervical spinous process: a cross-sectional study / M.L.M. Maddaluno, A.P.A. Ferreira, A.C.L.C. Tavares, N. Meziat-Filho, A.S. Ferreira // J. Manipulative Physiol. Ther. 2021. Vol. 44, No 3. P. 196-204. DOI: 10.1016/j.jmpt.2020.07.012.
56. Validation of the Measurement of the Angle of Trunk Rotation in Photogrammetry / I.J.R.L. Navarro, C.T. Candotti, M.A. do Amaral, V.H. Dutra, G.M. Gelain, J.F. Loss // J. Manipulative Physiol. Ther. 2020. Vol. 43, No 1. P. 50-56. DOI: 10.1016/j.jmpt.2019.05.005.
57. Photogrammetry: a proposal of objective assessment of chest wall in adolescent idiopathic scoliosis / A.S. Alexandre, E.F. Sperandio, L.C. Yi, J. Davidson, P.R. Poletto, A.O. Gotfryd, M.C. Vidotto // Rev. Paul. Pediatr. 2019. Vol. 37, No 2. P. 225-233. DOI: 10.1590/1984-0462/2019/37;2;00001.
58. Accuracy of photogrammetry for detecting adolescent idiopathic scoliosis progression / J.S. Leal, R.M.C. Aroeira, V. Gressler, M. Greco, A.E.M. Pertence, J.A. Lamounier // Spine J. 2019. Vol. 19, No 2. P. 321-329. DOI: 10.1016/j.spinee.2018.06.362.
59. Reliability of trunk shape measurements based on 3-D surface reconstructions / V. Pazos, F. Cheriet, J. Danserau, J. Ronsky, R.F. Zernicke, H. Labelle // Eur. Spine J. 2007. Vol. 16, No 11. P. 1882-1891. DOI: 10.1007/s00586-007-0457-0.
60. Non-Radiographic Severity Measurement of Pectus Excavatum / D.P. Bliss Jr., N.A. Vaughan, R.M. Walk, J.A. Naiditch, A.A. Kane, R.R. Hallac // J. Surg. Res. 2019. Vol. 233. P. 376-380. DOI: 10.1016/j.jss.2018.08.017.
61. Computer photogrammetry as a postural assessment in Schwartz-Jampel syndrome: A case report / A. Paula de Moraes Jorge, E.R. Monteiro, B.J. Hoogenboom, A. Oliveira, M.V. Palassi Quintela // J. Bodyw. Mov. Ther. 2021. Vol. 26. P. 72-76. DOI: 10.1016/j.jbmt.2020.12.017.
62. The Use of Smartphone Photogrammetry to Digitize Transtibial Sockets: Optimization of Method and Quantitative Evaluation of Suitability / S. Cullen, R. Mackay, A. Mohagheghi, X. Du // Sensors (Basel). 2021. Vol. 21, No 24. P. 8405. DOI: 10.3390/s21248405.
63. Porto A.B., Okazaki V.H.A. Thoracic Kyphosis and Lumbar Lordosis Assessment by Radiography and Photogrammetry: A Review of Normative Values and Reliability // J. Manipulative Physiol. Ther. 2018. Vol. 41, No 8. P. 712-723. DOI: 10.1016/j.jmpt.2018.03.003.
64. Guidi G., Malik U.S., Micoli L.L. Optimal Lateral Displacement in Automatic Close-Range Photogrammetry // Sensors (Basel). 2020. Vol. 20, No 21. P. 6280. DOI: 10.3390/s20216280.
65. Validity and reliability of an iPad with a three-dimensional camera for posture imaging / A. Agustsson, M.K. Gislason, P. Ingvarsson, E. Rodby-Bousquet, T. Sveinsson // Gait Posture. 2019. Vol. 68. P. 357-362. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.12.018.
66. Photogrammetry of Human Specimens: An Innovation in Anatomy Education / A.H. Petriceks, A.S. Peterson, M. Angeles, W.P. Brown, S. Srivastava // J. Med. Educ. Curric. Dev. 2018. Vol. 5. 2382120518799356. DOI: 10.1177/2382120518799356.
67. Hernandez A., Lemaire E. A smartphone photogrammetry method for digitizing prosthetic socket interiors // Prosthet. Orthot. Int. 2017. Vol. 41, No 2. P. 210-214. DOI: 10.1177/0309364616664150.
68. Chandler J.H., Buckley S. Structure from motion (SfM) photogrammetry vs terrestrial laser scanning // Geoscience Handbook 2016: AGI Data Sheets. 5th Ed. Alexandria, VA: American Geosciences Institute. Section 20.1. 2016.
69. Villa C., Flies M.J., Jacobsen C. Forensic 3D documentation of bodies: Simple and fast procedure for combining CT scanning with external photogrammetry data // Journal of Forensic Radiology and Imaging. 2017. Vol. 10. P. 47-51. DOI: 10.1016/j.jofri.2017.11.003.

70. Reliability of photogrammetry in the evaluation of the postural aspects of individuals with structural scoliosis / K.R. Saad, A.S. Colombo, A.P. Ribeiro, S.M. João // J. Bodyw. Mov. Ther. 2012. Vol. 16, No 2. P. 210-216. DOI: 10.1016/j.jbmt.2011.03.005.
71. The use of close-range photogrammetry in zooarchaeology: Creating accurate 3D models of wolf crania to study dog domestication / A. Evin, T. Souter, A. Hulme-Beaman, C. Ameen, R. Allen, P. Viacava, G. Larson, T. Cucchi, K. Dobney // Journal of Archaeological Science: Reports. 2016. Vol. 9. P. 87-93. DOI: 10.1016/j.jasrep.2016.06.028.
72. Свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ 2020661234 Российская Федерация. Скрининг система диагностики нарушений осанки / И.Д. Шитоев, В.Н. Никитин ; заявитель и правообладатель ООО «Вайтл Инжиниринг» (RU). № 2020618130. Заявл. 30.07.2020. ; опубл. 21.09.2020. 1 с.

Статья поступила в редакцию 09.06.2022; одобрена после рецензирования 16.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 09.06.2022; approved after reviewing 16.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.

### Информация об авторах:

1. Иван Дмитриевич Шитоев – ShitoevID@yord.tech;
2. Сергей Владимирович Муравьев – кандидат медицинских наук, sergey89.m@mail.ru;
3. Юлия Владимировна Каракулова – доктор медицинских наук, karakulova.yv@psma.ru;
4. Виктор Иванович Печерский – rodnikperm@mail.ru;
5. Владислав Николаевич Никитин – кандидат физико-математических наук, nikitinvladislav86@gmail.com;
6. Гаянэ Зурабиевна Клоян – kloyang@mail.ru.

### Information about the authors:

1. Ivan D. Shitoev –ShitoevID@yord.tech;
2. Sergey V. Muravev – Candidate of Medical Science, sergey89.m@mail.ru;
3. Yulia V. Karakulova – Doctor of Medical Sciences, karakulova.yv@psma.ru;
4. Viktor I. Pecherskiy –rodnikperm@mail.ru;
5. Vladislav N. Nikitin – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, nikitinvladislav86@gmail.com;
6. Gayane Z. Kloyan –kloyang@mail.ru.