



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ РЕНТГЕНОГРАММ ПОЗВОНОЧНИКА С РАСЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ САГИТТАЛЬНОГО БАЛАНСА: РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ КЛИНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Д.В. Иванов¹, Е.О. Перецманас², А.В. Доль¹, Л.В. Бессонов¹, А.А. Ковзалов¹, А.А. Родин², Ю.Ю. Щепетева²,
Е.С. Кузьмина³, О.А. Смышкова³, А.А. Кисель⁴

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия;

²Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний, Москва, Россия;

³Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования, Смоленск, Россия;

⁴ООО «Меритус», Москва, Россия

Цель исследования. Разработать и оценить систему автоматизированного анализа фронтальных и боковых рентгенограмм позвоночника в положении пациента стоя с последующим расчетом параметров сагиттального баланса и персонализированных целевых позвоночно-тазовых параметров на основе тазового индекса (PI).

Материал и методы. Ретроспективное двухцентровое исследование. В анализ включены обезличенные цифровые рентгенограммы позвоночника и таза в прямой и боковой проекциях, выполненные в положении стоя у 1076 пациентов. Для обучения, валидации и тестирования использовали 973 полностью размеченных и верифицированных исследования. Для автоматической сегментации применяли архитектуру U-Net с последующим расчетом параметров сагиттального баланса и возможностью вычисления фронтальных параметров. Отдельный анализ согласия экспертных и автоматических измерений выполнен для параметров PI, PT, SS, GLL и L₄–S₁. Качество сегментации оценивали по метрикам Dice (коэффициент Дайса) и IoU (коэффициент Жаккара). Дополнительно анализировали межэкспертную вариабельность разметки и сопоставляли результаты по схемам «модель–эксперт» и «эксперт–эксперт».

Результаты. На тестовой выборке среднее значение коэффициента Дайса между моделью и экспертом составило 90,1 %, что находится в пределах межэкспертной вариабельности (88,5–93,4 %). При сравнении автоматических и экспертных измерений параметров PI, PT, SS, GLL и L₄–S₁ на выборке из 46 пациентов отмечено высокое согласие между методами: значения ICC(A,1) находились в диапазоне 0,989–0,996, а границы их 95% доверительных интервалов — в диапазоне 0,977–0,998; средняя абсолютная ошибка составила 0,84–1,14°, а доля наблюдений с абсолютным расхождением не более 2,5° — 93,5–97,8 %. Полный цикл анализа одного пациента занимал менее трех секунд на графическом процессоре (GPU). Компоненты прототипа прошли успешную пилотную эксплуатацию.

Заключение. Разработанная система обеспечивает автоматическое распознавание анатомических структур на рентгенограммах позвоночника и расчет параметров сагиттального баланса с высокой согласованностью с экспертными измерениями. Система может использоваться для стандартизации рентгенографических измерений; ее применение в предоперационном планировании требует дальнейшей клинической валидации.

Ключевые слова: позвоночник; рентгенография; сагиттальный баланс; фронтальный баланс; позвоночно-тазовые параметры; искусственный интеллект; автоматическая сегментация; хирургия позвоночника.

Для цитирования: Иванов Д.В., Перецманас Е.О., Доль А.В., Бессонов Л.В., Ковзалов А.А., Родин А.А., Щепетева Ю.Ю., Кузьмина Е.С., Смышкова О.А., Кисель А.А. Автоматизированный анализ рентгенограмм позвоночника с расчетом параметров сагиттального баланса: разработка и валидация системы поддержки клинических измерений // Хирургия позвоночника. 2026. Т. 23, № 3. С. 68–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.3.68-75>

AUTOMATED ANALYSIS OF SPINAL RADIOGRAPHS WITH CALCULATION OF SAGITTAL BALANCE PARAMETERS:
DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A CLINICAL MEASUREMENT SUPPORT SYSTEM

D.V. Ivanov¹, E.O. Peretsmanas², A.V. Dol¹, L.V. Bessonov¹, A.A. Kovzalov¹, A.A. Rodin², Yu.Yu. Shchepeteva²,
E.S. Kuzminova³, O.A. Smychkova³, A.A. Kisel⁴

¹Saratov State University, Saratov, Russia;

²National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases, Moscow, Russia;

³Federal Center for Traumatology, Orthopedics and Endoprosthesis, Smolensk, Russia;

⁴Meritus LLC, Moscow, Russia

Objective. To develop and evaluate a system for automated analysis of standing anteroposterior and lateral spinal radiographs with subsequent calculation of sagittal balance parameters and determination of personalized target spinopelvic parameters based on the pelvic incidence (PI).

Material and Methods. A retrospective two-center study was conducted. The analysis included anonymized digital radiographs of the spine and pelvis in anteroposterior and lateral projections obtained in a standing position from 1,076 patients. A total of 973 fully annotated and expert-verified studies were used for training, validation, and testing. Automatic segmentation was performed using a U-Net architecture, followed by calculation of sagittal balance parameters with the possibility of deriving coronal parameters. A separate analysis of agreement between expert and automated measurements was conducted for the PI, PT, SS, GLL, and L4–S1 parameters. Segmentation quality was assessed using the Dice coefficient and IoU (Jaccard index). Inter-expert variability of annotations was additionally analyzed, and results were compared using “model–expert” and “expert–expert” schemes.

Results. On the test dataset, the mean Dice coefficient between the model and the expert was 90.1%, falling within the range of inter-expert variability (88.5–93.4%). A comparison of automated and expert measurements of PI, PT, SS, GLL, and L4–S1 parameters in a subset of 46 patients demonstrated high agreement between the methods: ICC(A,1) values ranged from 0.989 to 0.996; the 95% confidence intervals for ICC(A,1) ranged from 0.977 to 0.998; the mean absolute error ranged from 0.84° to 1.14°, and the proportion of measurements with an absolute difference of no more than 2.5° was 93.5–97.8%. The complete analysis cycle for a single patient required less than 3 seconds on a graphics processing unit (GPU). The prototype components successfully underwent pilot testing.

Conclusion. The developed system enables the automatic recognition of anatomical structures on spinal radiographs and the calculation of sagittal balance parameters with a high level of agreement with expert measurements. The system may be used to standardize radiographic measurements; however, its use in preoperative planning requires further clinical validation.

Key Words: spine; radiography; sagittal balance; frontal balance; spinopelvic parameters; artificial intelligence; automated segmentation; spine surgery.

Please cite this paper as: Ivanov DV, Peretsmanas EO, Dol AV, Bessonov LV, Kovzalov AA, Rodin AA, Shchepeteva YuYu, Kuzminova ES, Smychkova OA, Kisel AA. Automated analysis of spinal radiographs with calculation of sagittal balance parameters: development and validation of a clinical measurement support system. Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika). 2026;23(3):68–75. In Russian. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2026.3.68-75>

Количественная оценка сагиттального и фронтального баланса позвоночника по рентгенограммам в положении пациента стоя имеет ключевое значение для диагностики, планирования хирургического лечения и оценки его результатов. Параметры SVA, PT, LL, PI и PI–LL mismatch связаны с функциональным статусом пациентов и риском неблагоприятных исходов после коррекции деформаций позвоночника [1–4]. В отечественной литературе также подчеркивается значение стандартизированной оценки PI, PT, SS, LL и SVA при анализе нарушений сагиттального профиля [5–7]. Однако ручные и полуавтоматические измерения остаются оператор-зависимыми и подвержены межэкспертной вариабельности.

Методы глубокого обучения, включая U-Net, широко применяются для автоматического анализа медицинских изображений [8, 9]. Для рентгенограмм позвоночника показана возможность автоматической сегментации и идентификации позвонков [10], однако качество таких систем

зависит от согласованности обучающей разметки: шумные или противоречивые метки могут снижать устойчивость модели и формировать систематические ошибки [11].

Именно поэтому актуальна разработка системы, объединяющей стандартизированную разметку рентгенограмм, автоматическую сегментацию анатомических структур и расчет параметров сагиттального баланса с определением персонализированных целевых значений на основе тазового индекса (PI). Возможность вычисления фронтальных параметров рассматривается как техническое расширение, требующее отдельной количественной валидации.

Цель исследования – разработать и оценить систему автоматизированного распознавания анатомических структур на фронтальных и боковых рентгенограммах позвоночника в положении пациента стоя с последующим расчетом параметров сагиттального баланса и персонализированных целевых позвоночно-тазовых параметров на основе PI.

Материал и методы

Дизайн исследования и источник данных

Проведено ретроспективное двух-центровое исследование по разработке и валидации системы автоматизированного анализа рентгенограмм позвоночника. Исходные данные получены из Национального медицинского исследовательского центра фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний (Москва) и Федерального центра травматологии, ортопедии и эндопротезирования (Смоленск). Включали обезличенные цифровые рентгенограммы позвоночника и таза в прямой и боковой проекциях, выполненные в положении пациента стоя. Критерии исключения: выраженные артефакты и отсутствие полного покрытия от шейного отдела до проксимальных отделов бедер.

Демографические и клинические характеристики пациентов были недоступны вследствие полной анонимизации данных. Исследование не предполагало вмешательства или работы с персональными данными. Получение

индивидуального согласия и отдельного одобрения локального этического комитета не требовалось.

Протокол ручной разметки анатомических структур

Разметку выполняли по стандартизированному многоэтапному протоколу: первичное контурирование, экспертная проверка, коррекция и утверждение результата. На фронтальных и боковых рентгенограммах размечали тела позвонков C_1-L_5 при их видимости, крестец, головки бедренных костей и подвздошные кости на прямых снимках. Каждому контуру присваивали анатомическую метку из predetermined списка.

Предобработка изображений и аугментация

Изображения приводили к размеру 512×512 пикселей, интенсивность нормализовали к диапазону от 0 до 1. Для повышения обобщающей способности модели применяли стандартные аугментации: повороты, масштабирование, горизонтальное отражение для прямых снимков, изменение яркости и контраста, добавление гауссова шума (случайных изменений яркости пикселей с нормальным распределением).

Модель сегментации

Для автоматического распознавания анатомических структур использовали U-Net с энкодером ResNet34 (блоком извлечения признаков изображения). На вход подавали одноканальное изображение 512×512 пикселей, на выходе получали маски тел позвонков, крестца, головок бедренных костей и тазовых ориентиров. Модель обучали с комбинированной функцией потерь Dice Loss и Cross-Entropy Loss, оптимизатором AdamW, начальной скоростью обучения 10^{-4} , размером пакета 8 изображений и ранней остановкой по результатам валидации.

Расчет параметров сагиттального баланса и вычисление фронтальных параметров

По сегментационным маскам автоматически рассчитывали PI, SS, PT, GLL и L_4-S_1 . Центры тел позвонков определяли по минимальным ограничиваю-

щим прямоугольникам, бикоксофеморальную ось – как середину отрезка между центрами головок бедренных костей. Также алгоритм предусматривал расчет целевых значений параметров, связанных с PI, по опубликованным клиническим соотношениям [3]. Их клиническая интерпретация требует учета возраста и других характеристик пациента.

Под фронтальными параметрами в настоящей работе понимаются параметры, рассчитываемые по прямой рентгенограмме во фронтальной плоскости; их количественная валидация в данном исследовании не проводилась и рассматривается как отдельный этап дальнейшей работы.

Метрики оценки и анализ межэкспертной вариабельности

Качество сегментации оценивали по коэффициенту Дайса (Dice) и коэффициенту Жаккара (IoU) с усреднением по анатомическим структурам и тестовым изображениям. Точность автоматических измерений оценивали на подвыборке из 46 пациентов, для которых были доступны парные экспертные и автоматические значения PI, PT, SS, GLL и L_4-S_1 . Основной массив из 973 исследований использовали для обучения и валидации сегментации. Рассчитывали средние значения, стандартное отклонение (SD), среднюю разность, 95% доверительный интервал (ДИ) средней разности, среднюю абсолютную ошибку (MAE), корень из средней квадратической ошибки (RMSE), коэффициент внутриклассовой корреляции для абсолютного согласия ICC(A,1) с 95% ДИ и долю измерений с абсолютным расхождением $\leq 2,5^\circ$. Систематическое смещение оценивали по средней разности и ее 95% ДИ.

Эксперименты по влиянию объема данных и согласованности разметки

Дополнительно оценивали влияние объема обучающей выборки и согласованности разметки на качество модели. Статистический анализ выполняли в Python с использованием SciPy и NumPy. Проверку нормальности распределения не проводили;

систематическое смещение оценивали описательно по средней разности и 95% ДИ.

Результаты

Характеристика датасета

Собраны анонимизированные рентгенограммы 1076 пациентов. Полностью размеченные и экспертно верифицированные данные включали 973 исследования, или 1946 снимков. Разделение на обучение, валидацию и тест выполняли на уровне пациентов в соотношении 70 : 15 : 15.

Под пациентом понимали уникального субъекта исследования, под исследованием – набор рентгенограмм одного пациента, под снимком – отдельное изображение в прямой или боковой проекции.

Качество сегментации

При пиксельной оценке сегментации по всем анатомическим структурам увеличение обучающей подвыборки с 600 до 1000 снимков сопровождалось ростом IoU с 0,57 до 0,59 и Dice с 0,72 до 0,74. Визуальный анализ показал, что модель уверенно выделяет контуры тел позвонков в большинстве отделов позвоночника; основные ошибки возникали в зонах низкой контрастности и наложения анатомических структур, где вариабельность экспертной разметки также была выше (рис.).

Межэкспертная вариабельность разметки

На 50 случайно отобранных снимках выполнена независимая разметка тремя экспертами. Средний Dice составил 93,4 % при повторной разметке одним экспертом, 92,6 % – при сравнении двух экспертов, 88,5 % – при сравнении эксперта с независимым разметчиком (табл. 1). Эти значения отражают естественную границу воспроизводимости ручной разметки.

Сравнение «нейросеть–врач» и «врач–врач»

При объективной оценке совпадения контуров позвонков средний Dice между моделью и экспертом составил 90,1 %, что находится в диапазоне межэкспертной вариабельности

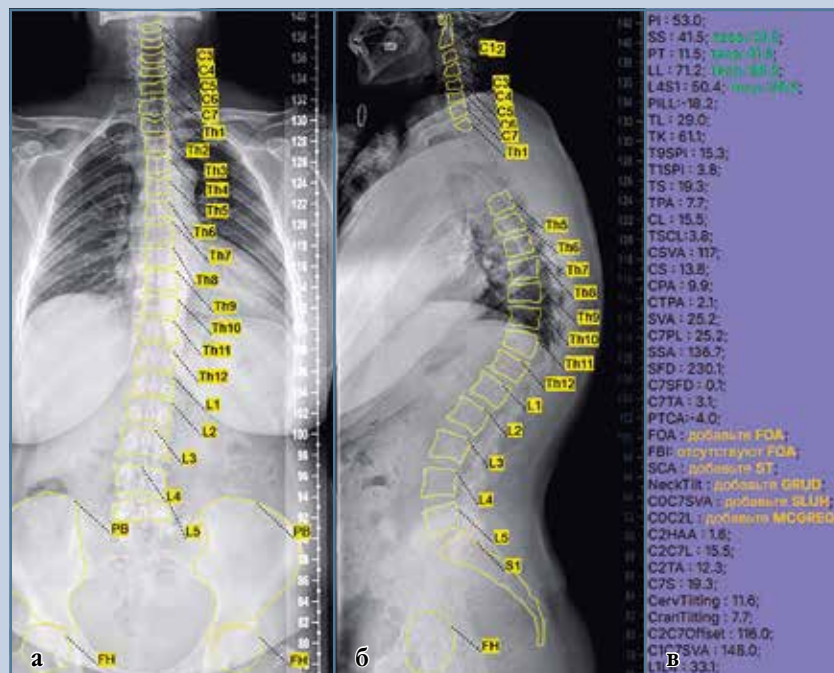


Рис.

Автоматически размеченные фронтальная (а) и сагиттальная (б) рентгенограммы и список вычисленных параметров сагиттального баланса (в)

Таблица 1

Метрики межэкспертной согласованности (Dice/IoU), %

Сравнение	Dice (среднее ± σ)	IoU (среднее ± σ)
Повторная разметка одним экспертом	93,4 ± 2,1	87,7 ± 3,4
Эксперт А vs. эксперт Б	92,6 ± 2,5	86,3 ± 4,0
Эксперт vs. независимый разметчик	88,5 ± 3,8	79,4 ± 5,2

(88,5–93,4 %). Различие с Dice 0,72–0,74 в табл. 2 объясняется разными уровнями оценки: в таблице отражена пиксельная сегментация по всем структурам, тогда как 90,1 % рассчитаны на уровне объектов при сравнении контуров позвонков.

Влияние несогласованности разметки на обучение

Несогласованность разметки снижает устойчивость модели: при ошибках нумерации позвонков или геометрически некорректных контурах качество на валидационной выборке становилось менее стабильным, а итоговые маски могли содержать систематические пропуски или ложные области.

Автоматический расчет параметров баланса

Разработанные алгоритмы позволили автоматически рассчитывать фактические и целевые параметры сагиттального баланса. Вычисление фронтальных параметров реализовано в прототипе, но требует отдельной количественной валидации.

На 46 парных наблюдениях автоматические измерения PI, PT, SS, GLL и L₄–S₁ показали высокое согласие с экспертной оценкой: ICC (A,1) составил 0,989–0,996; 95% ДИ: 0,977–0,998; MAE – 0,84–1,14°, доля расхождений ≤2,5° – 93,5–97,8 % (табл. 2). Полный цикл анализа одного пациента зани-

мал менее трех секунд на графическом процессоре (GPU). Компоненты прототипа прошли пилотную эксплуатацию в Федеральном центре травматологии, ортопедии и эндопротезирования (Смоленск).

При $n = 46$ различия между 93,5 %, 95,7 % и 97,8 % соответствуют 43, 44 и 45 наблюдениям соответственно, поэтому разброс долей отражает единичные случаи превышения порога 2,5°.

Полученные показатели точности относятся к параметрам PI, PT, SS, GLL и L₄–S₁, которые используются при анализе сагиттального профиля и планировании коррекции деформаций позвоночника [6].

Обсуждение

В настоящем исследовании разработана и валидирована система автоматизированного анализа рентгенограмм позвоночника с расчетом параметров сагиттального баланса. Основные результаты: создание датасета из 1076 пациентов, достижение Dice 0,74 и IoU 0,59 при пиксельной оценке сегментации, сопоставимость качества модели с межэкспертной вариабельностью и высокое согласие автоматических измерений PI, PT, SS, GLL и L₄–S₁ с экспертными.

Полученные показатели сегментации следует интерпретировать с учетом широкого анатомического охвата снимков и наличия зон низкой контрастности. В отличие от работ, ограниченных отдельными отделами позвоночника [10], наш датасет включал изображения от шейного отдела до проксимальных отделов бедренных костей, что затрудняет прямое сопоставление метрик. В целом результаты согласуются с данными о применимости глубокого обучения для анализа рентгенограмм позвоночника [8–10].

Межэкспертная вариабельность оказалась существенным ограничением качества модели. Средний Dice между экспертами составил 88,5–93,4 %, а Dice между моделью и экспертом – 90,1 %. Это означает, что точность алгоритма приблизилась к естественной воспроизводи-

Таблица 2

Согласие между экспертными и автоматическими измерениями параметров баланса позвоночника ($n = 46$)

Параметр	Эксперт, $M \pm SD$	Нейросеть, $M \pm SD$	Средняя разность (нейросеть – эксперт), град.	95% ДИ средней разности, град.	MAE, град.	RMSE, град.	ICC(A,1) (95% ДИ)	Доля $ \Delta $ $\leq 2,5^\circ$, %
PI	$54,40 \pm 12,79$	$54,78 \pm 12,63$	0,39	–0,02–0,79	1,04	1,39	0,994 (0,989–0,997)	93,5
PT	$14,42 \pm 8,68$	$14,70 \pm 8,84$	0,28	–0,11–0,67	0,96	1,32	0,989 (0,979–0,994)	97,8
SS	$39,93 \pm 9,18$	$40,43 \pm 9,03$	0,50	0,11–0,89	1,14	1,38	0,989 (0,977–0,994)	93,5
GLL	$51,55 \pm 12,73$	$51,80 \pm 12,84$	0,26	–0,08–0,59	0,84	1,16	0,996 (0,993–0,998)	95,7
L_4-S_1	$35,39 \pm 11,77$	$35,57 \pm 11,94$	0,18	–0,20–0,55	0,98	1,26	0,994 (0,990–0,997)	95,7

M — среднее значение; SD — стандартное отклонение; MAE — средняя абсолютная ошибка; $RMSE$ — корень из средней квадратической ошибки; $ICC(A,1)$ — коэффициент внутриклассовой корреляции для абсолютного согласия; ДИ — доверительный интервал; Δ — абсолютное расхождение между автоматическим и экспертным измерением.

сти ручной разметки. В таких условиях дальнейший прирост метрик зависит не только от архитектуры модели, но и от качества эталонных данных [8, 11].

Ошибки нумерации позвонков и некорректные контуры приводили к нестабильности сегментации и воспроизведению ошибочных паттернов модели. Именно поэтому многоэтапный контроль разметки является обязательным условием разработки воспроизводимых систем автоматического анализа.

Автоматические измерения PI, PT, SS, GLL и L_4-S_1 показали высокое согласие с экспертными: ICC (A,1) составил 0,989–0,996, MAE – 0,84–1,14°, средняя разность не превышала 0,50°. Эти показатели позволяют рассматривать систему как инструмент стандартизации измерений сагиттального баланса [5, 6].

Алгоритм также предусматривает расчет целевых параметров на основе PI [3]. Однако из-за полной анонимизации данных возраст, пол и диагнозы пациентов были недоступны, поэтому клиническая интерпретация целевых значений требует дальнейшего проспективного исследования.

По величине ошибки результаты сопоставимы с опубликованными

автоматизированными решениями [13, 14]. В работе Korez et al. [13] MAE составила 5,0° для SS, 2,7° – для PT и 5,5° – для PI, тогда как в нашем исследовании – 1,14°, 0,96° и 1,04° соответственно. Прямое сравнение ограничено различиями в дизайне, выборах, протоколах разметки и наборе параметров.

В многоэкспертном исследовании Норре et al. [15] автоматические измерения TK, LL, SS и SVA на боковых рентгенограммах показали значения ICC в диапазоне, полученном у шести врачей-экспертов. Систематический обзор Bishara et al. [16] включил 16 исследований автоматического определения позвоночно-тазовых параметров; опубликованные значения ICC в вошедших в обзор работах варьировали от 0,56 до 1,00.

В отличие от Surgimap, который характеризуется высокой воспроизводимостью измерений и возможностями хирургического планирования, но требует участия пользователя [17, 18], разработанная система ориентирована на автоматическое распознавание структур и расчет параметров баланса. Это потенциально снижает оператор-зависимость.

Полученные данные согласуются с отечественными работами, подчер-

кивающими клиническое значение воспроизводимой оценки PI, PT, SS, LL и связанных параметров при анализе сагиттального баланса [5–7]. В отечественной литературе также описано валидированное мобильное приложение «SmartPlan Balance»: В.Р. Захарин и соавт. [19] показали хорошую и отличную меж- и внутриэкспертную надежность измерений PI, PT, SS, LL и L_4-S_1 , сопоставимую с настольной программой RadiAnt DICOM Viewer.

Пилотная эксплуатация компонентов прототипа подтвердила его практическую применимость, но не заменяет полноценной клинической валидации на независимых выборках.

Разработанная система предназначена для автоматизации количественных рентгенографических измерений и не предназначена для автономной постановки диагноза, определения показаний к хирургическому лечению или выбора объема коррекции. Полученные значения должны интерпретироваться врачом в совокупности с клиническими данными пациента. В настоящем исследовании влияние системы на клинические решения и исходы лечения не оценивали.

Ограничения исследования: отсутствие внешней валидации, небольшой объем подвыборки для оценки

измерений (46 пациентов), недоступность демографических и клинических характеристик вследствие анонимизации данных, отсутствие оценки влияния системы на клинические решения и исходы лечения, а также отсутствие количественной валидации фронтальных параметров.

В настоящей работе количественная оценка согласия автоматических и экспертных измерений выполнена для PI, PT, SS, GLL и L₄–S₁. Параметры SVA, LL и PI–LL mismatch являются клинически значимыми для хирургии деформаций позвоночника, одна-

ко их отдельная валидация в данной выборке требует дополнительного анализа.

Дальнейшие исследования должны включать внешнюю многоцентровую валидацию, расширение выборки, количественную оценку фронтальных параметров и анализ влияния системы на предоперационное планирование.

Заключение

Разработанная система обеспечивает автоматическое распознавание анатомических структур на рентге-

нограммах позвоночника и расчет параметров сагиттального позвоночно-тазового баланса с точностью, сопоставимой с межэкспертной согласованностью.

Система может использоваться для стандартизации рентгенографических измерений и снижения оператор-зависимости. Применение системы в предоперационном планировании требует внешней клинической валидации и оценки влияния на клинические решения.

Литература/References

- Glassman SD, Bridwell K, Dimar JR, Horton W, Berven S, Schwab F. The impact of positive sagittal balance in adult spinal deformity. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30:2024–2029. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/01.BRS.0000179086.30449.96>
- Schwab F, Ungar B, Blondel B, Buchowski J, Coe J, Deinlein D, Dewald C, Mehdian H, Shaffrey C, Tribus C, Lafage V. Scoliosis Research Society-Schwab adult spinal deformity classification: a validation study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37:1077–1082. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/BRS.0b013e31823e15e2>
- Lafage R, Schwab F, Glassman S, Bess S, Harris B, Sheer J, Hart R, Line B, Henry J, Burton D, Kim HJ, Klineberg E, Ames C, Lafage V. Age-adjusted alignment goals have the potential to reduce PJK. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42:1275–1282. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/BRS.00000000000002146>
- Le Huec JC, Charosky S, Barrey C, Rigal J, Aunoble S. Sagittal imbalance cascade for simple degenerative spine and consequences: algorithm of decision for appropriate treatment. *Eur Spine J*. 2011;20 Suppl 5:S699–S703. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-011-1938-8>
- Макиров С.К., Юз А.А., Джахаф М.Т. Методика оценки параметров сагиттального позвоночно-тазового баланса. *Хирургия позвоночника*. 2015;12(3):55–63. [Makirov SK, Yuz AA, Jahaf MT. Method of assessing the parameters of the sagittal spinal pelvic balance. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2015;12(3):55–63]. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2015.3.55-63> EDN: <https://elibrary.ru/UMGWQX>
- Байков Е.С., Пелеганчук А.В., Сангинов А.Д., Леонова О.Н., Крутько А.В. Хирургическая коррекция сагиттального дисбаланса поясничного отдела позвоночника дегенеративного генеза. *Хирургия позвоночника*. 2020;17(2):49–57. [Bai-kov ES, Peleganchuk AV, Sanginov AD, Leonova ON, Krutko AV. Surgical correction of degenerative sagittal imbalance of the lumbar spine. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2020;17(2):49–57]. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2020.2.49-57> EDN: <https://elibrary.ru/PTCFZB>
- Прудникова О.Г., Аранович А.М., Муштаева Ю.А., Губин А.В. Биомеханические аспекты сагиттального баланса позвоночника у пациентов с ахондроплазией при удлинении конечностей методом Илизарова. *Хирургия позвоночника*. 2018;15(4):7–14. [Prudnikova OG, Aranovich AM, Mushtaeva YuA, Gubin AV. Biomechanical aspects of spinal sagittal balance in achondroplasia patients during Ilizarov limb lengthening. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2018;15(4):7–14]. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/2018.4.7-14> EDN: <https://elibrary.ru/PPXBWX>
- Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, Setio AAA, Ciompi F, Ghafoorian M, van der Laak JAWM, van Ginneken B, S anchez CI. A survey on deep learning in medical image analysis. *Med Image Anal*. 2017;42:60–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
- Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. In: Navab N, Hornegger J, Wells WM, Frangi AF, eds. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: 18th International Conference Munich, Germany, October 5–9, 2015 proceedings, part III*. Cham: Springer, 2015;234–241. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Chen Y, Mo Y, Readie A, Ligozio G, Mandal I, Jabbar F, Coroller T, Papie BW. VertXNet: an ensemble method for vertebral body segmentation and identification from cervical and lumbar spinal X-rays. *Sci Rep*. 2024;14:3341. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-49923-3>
- Karimi D, Dou H, Warfield SK, Gholipour A. Deep learning with noisy labels: exploring techniques and remedies in medical image analysis. *Med Image Anal*. 2020;65:101759. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2020.101759>
- Galbusera F, Casaroli G, Bassani T. Artificial intelligence and machine learning in spine research. *JOR Spine*. 2019;2:e1044. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jsp2.1044>
- Korez R, Putzier M, Vrtovec T. A deep learning tool for fully automated measurements of sagittal spinopelvic balance from X-ray images: performance evaluation. *Eur Spine J*. 2020;29:2295–2305. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-020-06406-7>
- Vrtovec T, Ibragimov B. Spinopelvic measurements of sagittal balance with deep learning: systematic review and critical evaluation. *Eur Spine J*. 2022;31:2031–2045. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00586-022-07155-5>
- Hoppe BF, Rueckel J, Rudolph J, Fink N, Weidert S, Hohlbein W, Cavalcanti-Kussmaul A, Trappmann L, Munawar B, Ricke J, Sabel BO. Automated spinopelvic measurements on radiographs with artificial intelligence: a multi-reader study. *Radiol Med*. 2025;130:359–367. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11547-025-01957-5>
- Bishara A, Patel S, Warman A, Jo J, Hughes LP, Khalifeh JM, Azad TD. Artificial intelligence automated measurements of spinopelvic parameters in adult spinal deformity - a systematic review. *Spine Deform*. 2025;13:1289–1304. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s43390-025-01111-1>
- Vila-Casademunt A, Pellisé F, Acaroglu E, Pérez-Grueso FJ, Martín-Buitrago MP, Sanli T, Yakici S, de Frutos AG, Matamalas A, Sánchez-M rquez JM, Obeid I, Yaman O, Bag J. The reliability of sagittal pelvic parameters: the effect of lumbosacral instru-

- mentation and measurement experience. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015;40:E253–E258. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/BRS.0000000000000220>
18. **Langella F, Villafa e JH, Damilano M, Cecchinato R, Pejrona M, Ismael M, Berjano P.** Predictive accuracy of Surgimap surgical planning for sagittal imbalance: a cohort study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2017;42:E1297–E1304. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/BRS.00000000000002230>
19. **Захарин В.Р., Леонова О.Н., Байков Е.С., Кокорев А.И., Дарчия Л.Ю., Балычев Г.Е., Иванов Д.В., Доль А.В., Бессонов Л.В., Крутько А.В.** Валидация мобильного приложения для расчета сагиттальных параметров позвоночника «SmartPlan Balance». *Хирургия позвоночника*. 2025;22(2):96–103. [Zakharin VR, Leonova ON, Baikov ES, Kokorev AI, Darchia LY, Balychev GE, Ivanov DV, Dol AV, Bessonov LV, Krutko AV. Validation of the SmartPlan Balance mobile application

to measure sagittal parameters of the spine. *Russian Journal of Spine Surgery (Khirurgiya Pozvonochnika)*. 2025;22(2):96–103. DOI: <http://dx.doi.org/10.14531/ss2025.2.96-103>
 EDN: <https://elibrary.ru/TEUJWR>

Статья поступила в редакцию 15.05.2026

Рецензирование пройдено 22.09.2026

Подписано в печать 25.09.2026

Received 15.05.2026

Review completed 22.09.2026

Passed for printing 25.09.2026

Дополнительная информация

Вклад авторов. Д.В. Иванов – руководство проектом, разработка схемы разметки, разметка рентгенограмм, обработка результатов, написание текста статьи; Е.О. Перецманас – научное руководство работами, написание текста статьи; Л.В. Бессонов – руководство разработки программной системы, написание текста статьи, тестирование программной системы; А.В. Доль – разработка схемы разметки, разметка рентгенограмм, обработка результатов, тестирование программной системы; А.А. Ковзалов – разработка программной системы; А.В. Родин – разметка рентгенограмм; Ю.Ю. Щепетева – подбор рентгенограмм, разметка рентгенограмм; Е.С. Кузьмина – подбор рентгенограмм, разметка рентгенограмм; О.А. Смышкова – разметка рентгенограмм; А.А. Кисель – разработка схемы разметки, разметка рентгенограмм. Все авторы одобрили рукопись, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Этическая экспертиза. Исследование не предполагало вмешательства или работы с персональными данными; получение индивидуального согласия и отдельного одобрения локального этического комитета не требовалось.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Генеративный искусственный интеллект. При подготовке рукописи авторы использовали DeepSeek-V3 в ограниченном объеме, исключительно как вспомогательный редакционный инструмент: для языковой и стилистической правки отдельных фрагментов текста, повышения ясности изложения, устранения повторов, унификации терминологии, а также для редактирования англоязычных фрагментов рукописи. Искусственный интеллект не использовался для формирования научной гипотезы, получения или генерации исходных данных, статистического анализа, интерпретации результатов, подбора источников литературы, создания таблиц, рисунков или формулирования научных выводов. Все данные, методы, результаты, выводы и клиническая интерпретация подготовлены, проверены и утверждены авторами. Авторы несут полную ответственность за содержание рукописи.

Информация об авторах

✉ Дмитрий Валерьевич Иванов, д-р физ.-мат. наук, доцент; Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=4459-1094; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1640-6091>; Ivanovdv.84@ya.ru

Евгений Оркович Перецманас, д-р мед. наук; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=5555-0393; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7140-3200>; peretsmanas58@mail.ru
 Александр Викторович Доль, д-р физ.-мат. наук, доцент; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=3881-2302; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5842-1615>; dolav86@yandex.ru

Леонид Валентинович Бессонов, канд. физ.-мат. наук, доцент; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=9022-8177; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5636-1644>; bessonov@sgu.ru

Александр Алексеевич Ковзалов; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=7068-6806; ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-9407-3909>; kovzalov.aleksandr@mail.ru

Александр Анатольевич Родин; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=5262-0780; ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-9038-4290>; rodinaa@nmrc.ru

Юлия Юрьевна Щепетева; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4869-6089>; shchepetevau@nmrc.ru

Елена Станиславовна Кузьмина; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=5992-6657; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2876-6844>; muxuxo@gmail.com

Ольга Анатольевна Смышкова; ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-2719-3964>; Olga.Smychkova@orthosmolensk.ru

Александра Алексеевна Кисель, канд. мед. наук; ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-4152-9539>; akisel@spineinfo.ru

Authors' Info

✉Dmitriy Valeryevich Ivanov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor; 83 Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russia; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=4459-1094; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1640-6091>; Ivanovdv.84@ya.ru

Yevgeny Orkovich Peretsmanas, MD, Dr. Sci. (Medicine); eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=5555-0393; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7140-3200>; peretsmanas58@mail.ru

Aleksandr Viktorovich Dol, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=3881-2302;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5842-1615>; dolav86@yandex.ru

Leonid Valentinovich Bessonov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=9022-8177;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5636-1644>; bessonov@sgu.ru

Alexander Alekseyevich Kovzalov; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=7068-6806; ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-9407-3909>; kovzalov.aleksandr@mail.ru

Alexandr Anatolyevich Rodin; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=5262-0780; ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-9038-4290>; rodinaa@nmrc.ru

Yuliya Yuryevna Shchepeteva; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4869-6089>; shchepetevauu@nmrc.ru

Elena Stanislavovna Kuzminova; eLibrary SPIN: https://elibrary.ru/author_items.asp?spin=5992-6657; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2876-6844>; muxuxo@gmail.com

Olga Anatolyevna Smychkova; ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-2719-3964>; Olga.Smychkova@orthosmolensk.ru

Aleksandra Alekseevna Kisel, MD, Cand. Sci. (Medicine); ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-4152-9539>; akisel@spineinfo.ru