

Новая интеллектуальная система для автоматической диагностики сколиоза по фронтальным рентгенограммам позвоночника: точность, преимущества и ограничения

Д.Х.И. Кассаb¹, И.Г. Камышанская¹, С.В. Трухан²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

² Esper LLC, Московская область, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Сколиоз — одна из самых распространённых деформаций позвоночника, которую обычно диагностируют с помощью фронтальных спондилограмм по методу Кобба. Автоматические методы измерения, основанные на искусственном интеллекте, компенсируют многие недостатки стандартных методов и могут значительно сэкономить время врача-рентгенолога.

Цель — проанализировать точность, преимущества и недостатки новой программы искусственного интеллекта при автоматическом определении степени сколиоза и измерении угла Кобба на фронтальных рентгенограммах.

Материалы и методы. Всего исследовано 114 рентгенограмм на предмет соответствия измерений угла Кобба, выполняемых автоматически программой искусственного интеллекта и рентгенологом с использованием метода Бленда–Альтмана в программе Microsoft Excel. Кроме того, были проведёны клинические испытания точности системы с использованием ограниченных данных (120 рентгенограмм). Точность системы в определении степени выраженности сколиоза оценивали по показателям чувствительности, специфичности, точности и площади под ROC-кривой.

Результаты. Больше согласованности в измерениях угла Кобба, вычисляемых программой искусственного интеллекта и рентгенологом, найдено в группах сколиоза I и II степени. Только в 2,8% случаев наблюдалась клинически значимая разница в измерении углов Кобба (вариабельность >5°). Показатели диагностической точности, полученные в ходе ограниченного клинического исследования в городской Мариинской больнице (Санкт-Петербург), также подтвердили надёжность системы: чувствительность составила 0,97, специфичность — 0,88, точность (общая валидность) — 0,93, а площадь под ROC-кривой — 0,93.

Заключение. В целом, программа искусственного интеллекта может автоматически точно определять степень выраженности сколиоза, а также измерять углы искривления позвоночника на фронтальных спондилограммах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

сколиоз; искусственный интеллект; позвоночник.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Кассаb Д.Х.И., Камышанская И.Г., Трухан С.В. Новая интеллектуальная система для автоматической диагностики сколиоза по фронтальным рентгенограммам позвоночника: точность, преимущества и ограничения // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, №2. С. XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD630093>

Рукопись получена: 11.04.2024

Рукопись одобрена: 15.05.2024

Опубликована online: 19.07.2024

© Эко-Вектор, 2024

Статья доступна по лицензии [CC BY-NC-ND 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

A new artificial intelligence program for the automatic evaluation of scoliosis on frontal spinal radiographs: Accuracy, advantages and limitations

Dima Kh.I. Kassab¹, Irina G. Kamyshanskaya¹, Stanislau V. Trukhan²

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia;

² Esper LLC, Moscow oblast, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Scoliosis is one of the most common spinal deformations that are usually diagnosed on frontal radiographs using Cobb's method. Automatic measurement methods based on artificial intelligence can overcome many drawbacks of the usual method and can significantly save radiologist's time.

AIM: To analyze the accuracy, advantages, and disadvantages of a newly developed artificial intelligence program for the automatic diagnosis of scoliosis and measurement of Cobb's angle on frontal radiographs.

MATERIALS AND METHODS: In total, 114 digital radiographs were used to test the agreement of Cobb's angle measurements between the new automatic method and the radiologist using the Bland–Altman method on Microsoft Excel. A limited clinical accuracy test was also conducted using 120 radiographs. The accuracy of the system in defining the scoliosis grade was evaluated by sensitivity, specificity, accuracy, and area under the receiver operating characteristic curve.

RESULTS: The agreement of Cobb's angle measurement between the system and the radiologist's calculation was found mostly in grade 1 and 2 scoliosis. Only 2.8% of the results showed a clinically significant angle variability of $>5^\circ$. The diagnostic accuracy metrics of the limited clinical trial in City Mariinsky Hospital (Saint Petersburg, Russia) also proved the reliability of the system, with a sensitivity of 0.97, specificity of 0.88, accuracy (general validity) of 0.93, and area under the receiver operating characteristic curve of 0.93.

CONCLUSION: Overall, the artificial intelligence program can automatically and accurately define the scoliosis grade and measure the angles of spinal curvatures on frontal radiographs.

KEYWORDS:

scoliosis; artificial intelligence; spine.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kassab DKhI, Kamyshanskaya IG, Trukhan SV. A new artificial intelligence program for the automatic evaluation of scoliosis on frontal spinal radiographs: Accuracy, advantages and limitations. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD630093>

Submitted: 11.04.2024

Accepted: 15.05.2024

Published online: 19.07.2024

© Eco-Vector, 2024

This article can be used under the [CC BY-NC-ND 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

ОБОСНОВАНИЕ

Сколиоз — одна из наиболее распространённых деформаций позвоночника среди всех возрастных групп. Сколиоз представляет собой боковое искривление позвоночника в корональной плоскости с углом $\geq 10^\circ$ и торсией (скручиванием) тел позвонков и их задних элементов. Сколиоз в основном диагностируется на основании фронтальных рентгенограмм. Метод Кобба считается золотым стандартом в оценке угла сколиотической деформации позвоночника [1–8]. В последние годы многие исследователи активно изучают возможности использования искусственного интеллекта (ИИ) для оценки сколиоза с помощью различных методов визуализации, которые позволили бы получать более объективные результаты и снизить вариабельность измерений по методу Кобба у разных исследователей [9–14].

Мы разработали новую программу, основанную на машинном обучении. На первом этапе разработки системы произведено обучение искусственной нейронной сети таким образом, чтобы автоматически идентифицировать тела позвонков. Для этого из базы данных (XrScl) [15] были отобраны 1000 снимков позвоночника. Выполнена разметка каждого рентгеновского изображения, где тела позвонков определились с использованием четырёх опорных точек, и все тела грудных и поясничных позвонков на каждом снимке были пронумерованы. После обучения нейросеть могла самостоятельно определять тела позвонков и их номера. На втором этапе автоматически измерялся угол Кобба и определялась степень сколиоза. Автоматическое измерение угла Кобба может осуществляться при помощи трёх методов:

- 1) классический метод Кобба, при котором угол сколиоза измеряется между верхней и нижней границами тела верхнего и нижнего конечного позвонка соответственно;
- 2) метод, используемый в практике рентгенологов (в частности, в городской Мариинской больнице при котором угол сколиоза определяется между максимально наклонёнными гранями замыкательных пластинок тел верхнего и нижнего конечного позвонка;
- 3) метод средних линий, при котором угол сколиоза определяется между максимально наклонёнными средними линиями тел позвонков, проведёнными через среднюю часть тела конечных позвонков.

При измерении углов Кобба и определении степени сколиоза мы проверили точность новой автоматической системы.

ЦЕЛЬ

Проанализировать точность, преимущества и недостатки новой программы ИИ при автоматическом определении степени сколиоза и измерении угла Кобба на фронтальных спондилограммах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ДИЗАЙН ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено наблюдательное ретроспективное одноцентровое выборочное неконтролируемое исследование.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для оценки надёжности новой программы ИИ в измерении углов Кобба из базы данных XrScl (тестовый набор 1) [15] было отобрано 114 цифровых рентгенограмм позвоночника и рентгенограмм органов грудной клетки (ОГК). Эта база данных включает в себя более 2500 снимков. Таким образом, мы могли использовать различные наборы данных для обучения и проверки системы. Согласованность углов Кобба, измеряемых программой и рентгенологом, проверяли с использованием метода Бленда–Альтмана в программе Microsoft Excel. Рассчитывали среднюю разность между двумя методами («систематическое расхождение») и 95% доверительные интервалы (2 стандартных отклонения, SD). Сравнивались только те углы, которые были измерены с помощью обоих методов (рентгенолог и ИИ).

Для проверки возможности внедрения новой программы в медицинскую практику были проведены предварительные клинично-технические испытания (ПКТИ) в Санкт-Петербургском государственном бюджетном учреждении здравоохранения «Городская Мариинская больница». Для исследования было отобрано 120 рентгенограмм из архива Мариинской больницы и Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г.А. Альбрехта» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации (тестовый набор 2). Надёжность системы в определении степени

сколиоза проверяли путём расчёта площади под ROC-кривой и таких параметров, как чувствительность, специфичность и точность. Эти параметры рассчитывали по следующим формулам (где TP, TN, FP и FN означают истинно положительный, истинно отрицательный, ложноположительный и ложноотрицательный результаты соответственно):

- чувствительность — $\frac{TP}{TP + FN}$;
- специфичность — $\frac{TN}{TN + FP}$;
- точность — $\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$.

Рентгенограммы в наборах данных 1 и 2 оценивались двумя рентгенологами, один из которых имел опыт работы более 25 лет, а другой — более 9 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ

УЧАСТНИКИ (СУБЪЕКТЫ) ИССЛЕДОВАНИЯ

В тестовом наборе 1 рентгенограммы были распределены по четырём группам выраженности сколиоза (в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации № 565¹) следующим образом:

- I степень — 5–10°, 16%;
- II степень — 11–25°, 15%;
- III степень — 26–50°, 16%;
- IV степень — >50°, 16%.

К этой классификации была добавлена группа «норма» (0 степень; <5°, 37%). Кроме того, проанализировано и сопоставлено 179 углов (5,1–91,3°), найденных как врачом, так и системой ИИ. Для ПКТИ системы тестовый набор 2 разделили на одинаковые по количеству снимков группы — нормальные и патологические (со сколиозом) — по 60 рентгенограмм в каждой. Рентгенограммы со сколиозом распределили в зависимости от степени сколиоза (I–IV), по 15 снимков на каждую степень.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласованность измерений угла Кобба между ИИ и рентгенологом наблюдалась в основном при сколиозе I и II степени. При этом средняя разница в измерении составляла 0,10 и 0,46, а SD — 1,29 и 1,73 соответственно. Углы, измеренные двумя методиками, различались на <4,5° в 95% случаев при всех степенях сколиоза, за исключением группы со сколиозом III степени, где 95% доверительные интервалы составляли от –6,60° до 7,85°. Наибольшее SD (3,69°) также было выявлено в этой группе. Результаты статистического анализа данных для каждой степени сколиоза представлены на рис. 1 и рис. 2 (графики Бленда–Альтмана), а также в табл. 1. Только 2,8% результатов были клинически неудовлетворительными (вариабельность >5°).

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 04.07.2013 г. № 565. «Об утверждении Положения о военно-врачебной экспертизе». Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/87900/>

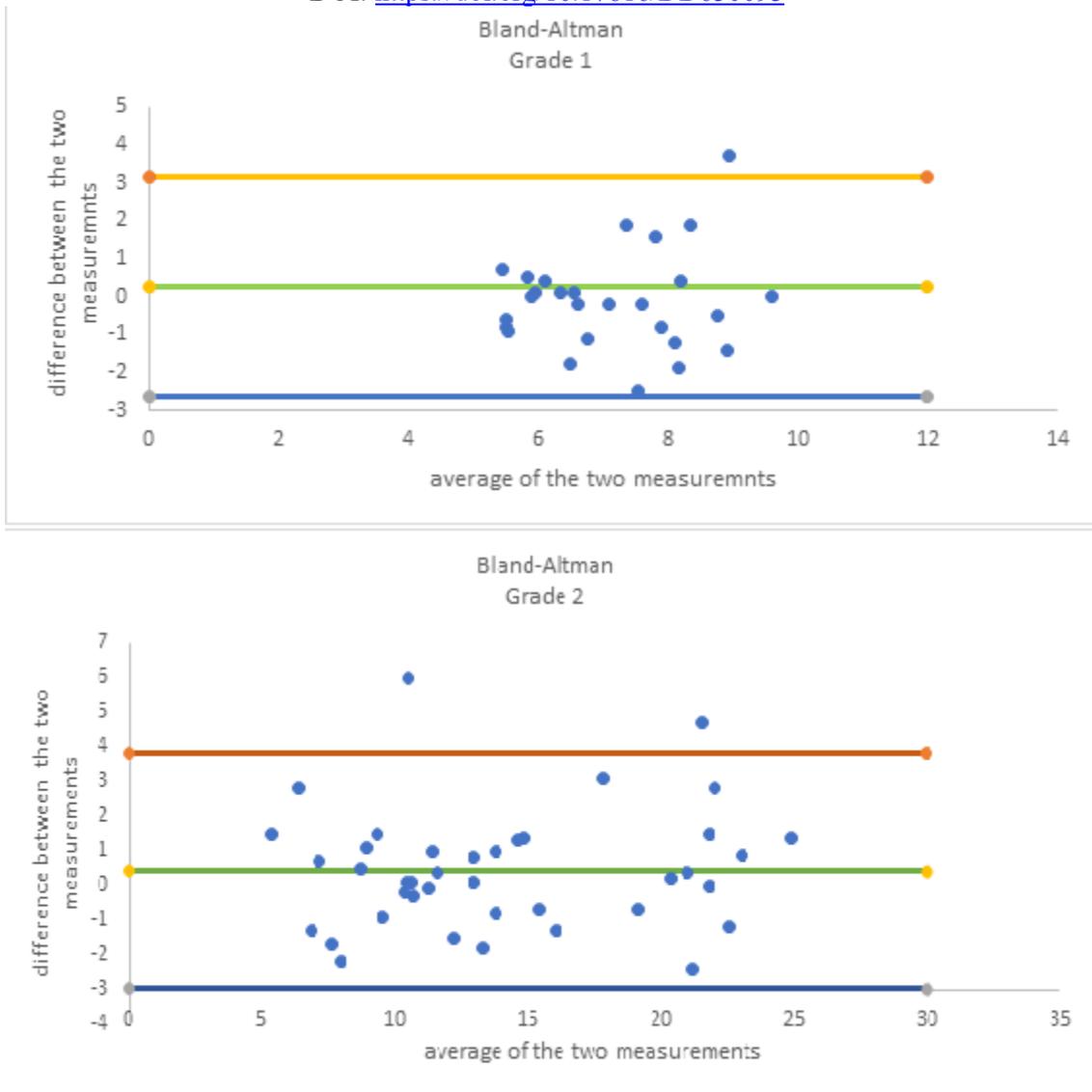


Рис. 1. Результаты измерений по методу Бленда-Альтмана. Согласованность измерений угла Кобба по двум методикам на рентгенограммах со сколиозом I и II степени.

Таблица 1. Статистические параметры для оценки согласованности двух методик измерения угла Кобба при различных степенях сколиоза.

Параметр	I степень	II степень	III степень	IV степень
Средняя разность	-0,10	0,46	0,62	0,00
Стандартное отклонение	1,29	1,73	3,69	2,32
Верхний предел доверительного интервала	2,43	3,84	7,85	4,56
Нижний предел доверительного интервала	-2,63	-2,93	-6,60	-4,55

ACCEPTED

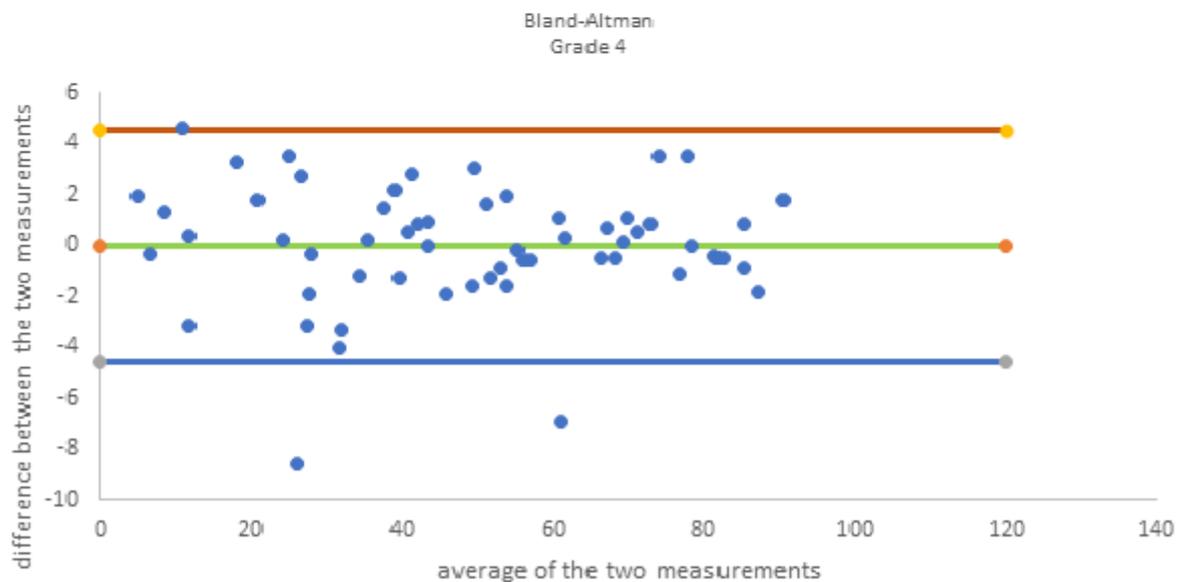
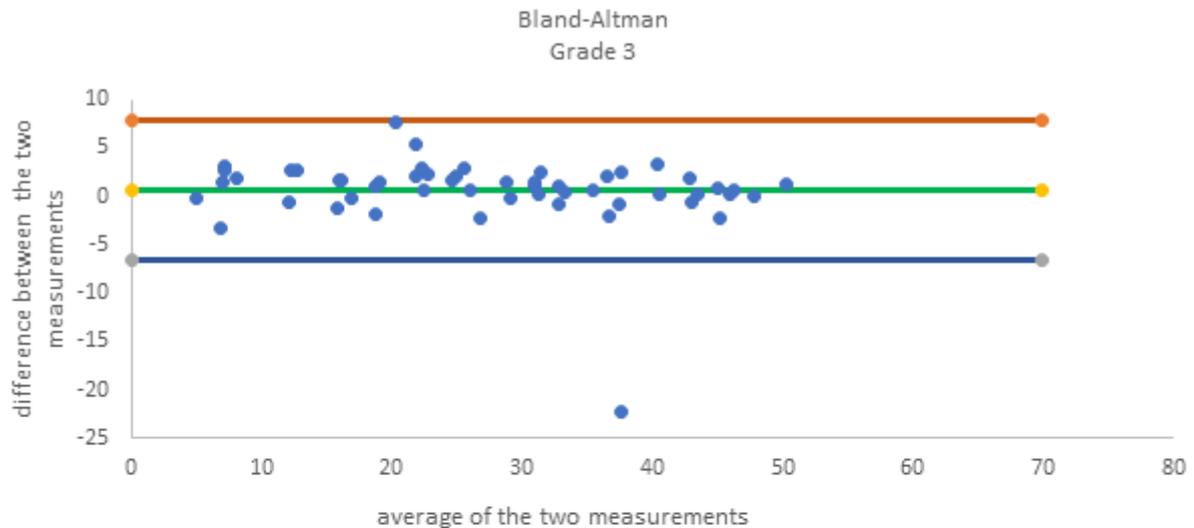


Рис. 2. Результаты измерений по методу Бленда–Альтмана. Согласованность измерений угла Кобба по двум методикам на рентгенограммах со сколиозом IV степени.

Показатели диагностической точности предварительных клинико-технических испытаний в Мариинской городской больнице (тестовый набор 2) также подтвердили надёжность системы в определении степени сколиоза:

- чувствительность составила 0,97;
- специфичность — 0,88;
- точность (общая валидность) — 0,93;
- площадь под ROC-кривой — 0,93 (рис. 3).

Среднее время анализа каждого снимка программой ИИ составило 5 с. Полученные результаты подтверждают эффективность системы в определении степени сколиоза.

ОБСУЖДЕНИЕ

РЕЗЮМЕ ОСНОВНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная часть исследования была проведена в больнице, где лиц призывного возраста проверяли на наличие сколиоза в рамках многочисленных обследований для прохождения медицинской комиссии по призыву на воинскую службу. Таким образом, рентгенограммы в тестовых наборах 1 и 2 были

разделены на группы согласно федеральному приказу № 565¹. Согласно этой классификации, любые небольшие искривления позвоночника менее 10° считаются сколиозом I степени.

Новая система автоматической оценки степени сколиоза по цифровым спондилограммам (программа ИИ) может помочь рентгенологам в быстром и точном определении степени сколиоза и в измерении угла Кобба, особенно при массовом скрининге сколиоза и в случае большой нагрузки в медицинских учреждениях. В таких ситуациях рентгенологи могут использовать новую программу ИИ как объективный инструмент с более высокой точностью диагностики сколиоза, поскольку при использовании врачами одного и того же инструмента можно избежать вариабельности результатов. Кроме того, программа позволяет значительно сэкономить время врача-рентгенолога, необходимое для анализа рентгенограмм. К тому же результаты измерения углов Кобба, вычисленные программы ИИ, были удовлетворительными. В большинстве случаев не было значительных расхождений в измерениях угла Кобба. Пример работы ИИ показан на рис. 4.

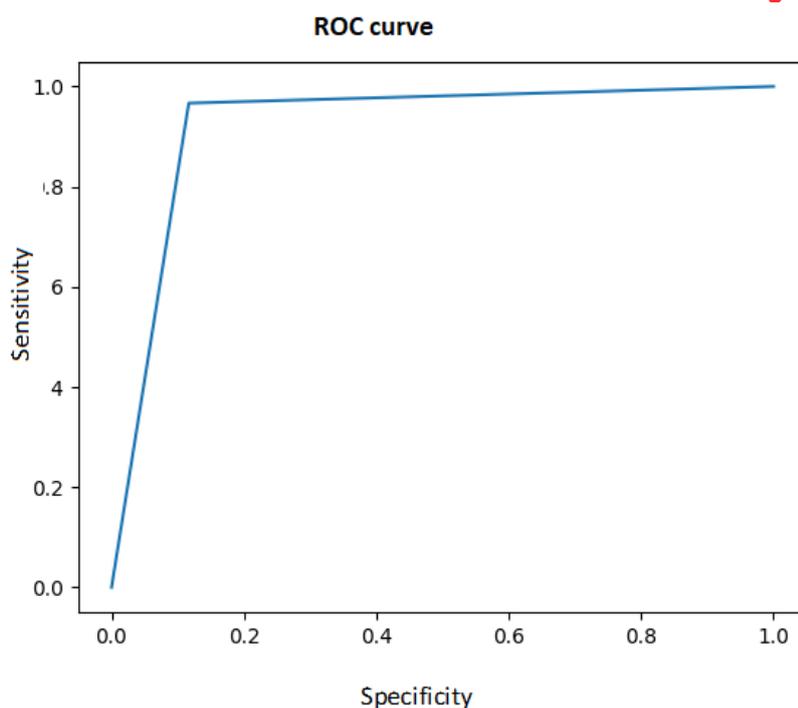


Рис. 3. Подтверждение на ROC-кривой точности новой программы искусственного интеллекта в определении степени сколиоза.

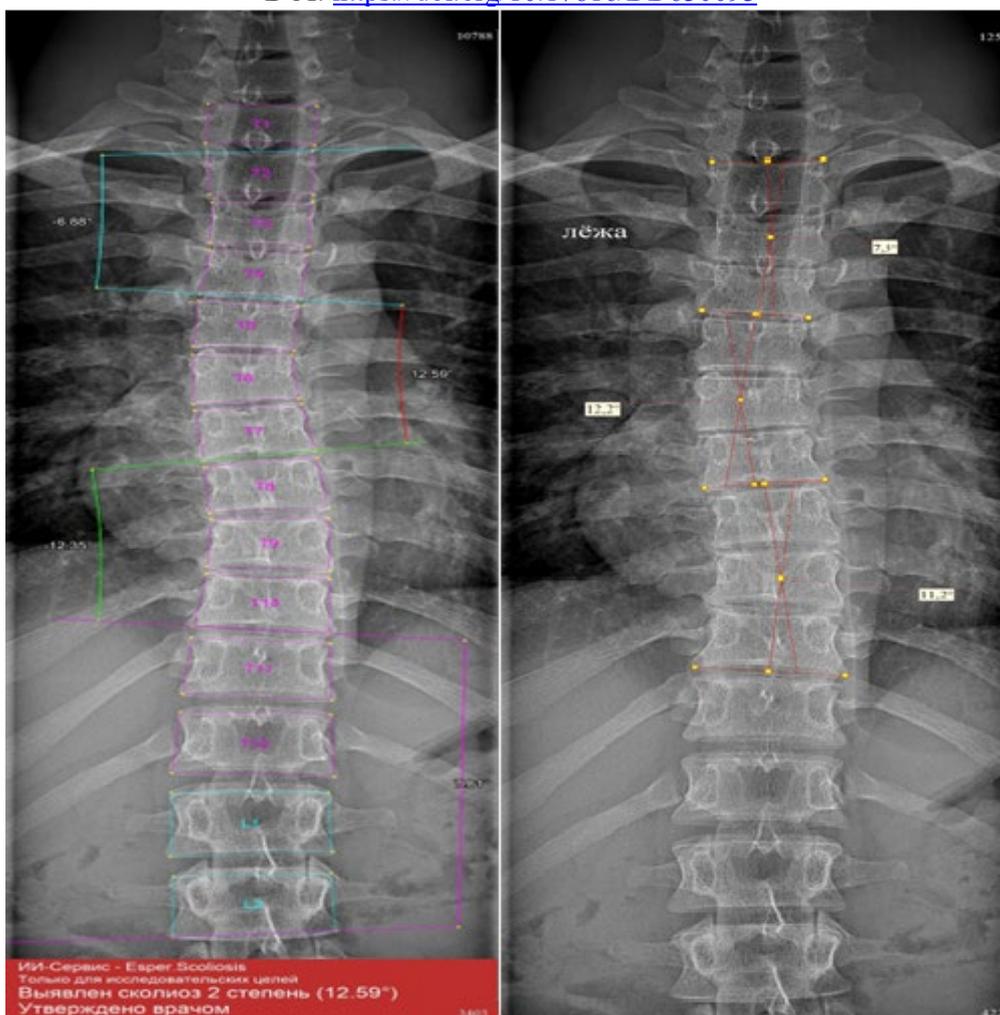


Рис. 4. Рентгеновский снимок со сколиозом II степени. Анализ снимка выполнен программы искусственного интеллекта (слева) и рентгенологом (справа). Рентгенолог не измерял груднопоясничную кривую, так как нижний конечный позвонок не виден на снимке.

ОБСУЖДЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемая программа ИИ даёт возможность измерять углы Кобба тремя различными методами. Все они могут быть полезны врачу-рентгенологу, особенно в тех случаях, когда не используется стандартный метод измерения (как, например, в Мариинской городской больнице при обследовании на сколиоз). Определение замыкательной пластинки наиболее наклонённого позвонка занимает много времени и может привести к несогласованности полученных результатов. Поэтому возможность объективного и автоматического определения верхнего и нижнего конечного позвонка дуги сколиоза, которые между собой образуют наибольший угол искривления, была бы полезна в практике рентгенолога.

Кроме того, программа ИИ позволяет врачу-рентгенологу изменять разметку позвонков, которую она автоматически сделала. Это очень важно, поскольку любые ошибки в разметке могут привести к неверному конечному результату. Дальнейший анализ результатов показал, что неточная разметка тел позвонков и их границ приводила к менее точным результатам измерения угла Кобба и определения степени сколиоза. В основном такие ошибки наблюдались при оценке сколиоза на некачественных снимках и на рентгенограммах ОГК. Границы позвонков среднегрудного отдела на снимках обычно не видны на фоне органов средостения. Многие нормальные снимки ОГК (0 степень, определяемая рентгенологом) были распознаны программой как сколиоз I степени по причине обнаружения кривой с ложноположительными результатами (проксимальная или среднегрудная кривая) (рис. 5). Ещё одна распространённая ошибка также наблюдалась при разметке границ тела позвонка L5 (рис. 6). Прилегающие костные структуры (соседние крестцовые и подвздошные кости) затрудняют определение границ тела L5, в особенности его нижней замыкательной пластинки.

Что касается ошибок при оценке снимков со сколиозом группы «норма», большинство измерений, выполненных программой ИИ, превышали угол 5° , но были очень близки к нему. Однако такая минимальная вариабельность измерений между программой ИИ и рентгенологом приводила к изменению оценки сколиоза — с 0 на I степень (рис. 7). Большинство таких углов (70%) находилось в диапазоне $5-6^\circ$, как показано на круговой диаграмме (рис. 8).

В большинстве случаев программа точно оценивала рентгенограммы со сколиозом (III и IV степени), хотя иногда отмечались ошибки в определении и нумерации позвонков или ошибки в измерении угла Кобба. Сколиоз IV степени характеризуется максимальной ротацией позвонков, смещением ножки дуги позвонков за среднюю линию и деформацией тела позвонка. При этом обычная форма позвонка изменяется, а границы его тела становятся менее чёткими (рис. 9).

В некоторых случаях на точность программы в диагностике сколиоза III или IV степени не влияла значительная вариабельность измерений угла Кобба между программой и рентгенологом. Как правило, такие ошибки встречались при оценке вторичного искривления позвоночника (рис. 10).

Ещё одним ограничением является то, что предложенная программа ИИ может быть использована только для оценки фронтальных рентгенограмм. Эта программа не позволяет определять искривления позвоночника на боковых рентгенограммах и при других исследованиях, таких как компьютерная томография.

Большинство вышеупомянутых ошибок могут быть устранены рентгенологами непосредственно при работе с программой, поскольку она предоставляет возможность изменять разметку позвонков для получения более точных результатов. Даже если рентгенолог будет вносить изменения в автоматическую разметку позвонков, выполняемую программой, он будет затрачивать гораздо меньше времени, необходимого для получения результатов, чем при обычном измерении сколиоза методом Кобба. Кроме того, мы считаем, что в будущем разметка позвонков может быть более точной при условии предоставления системе программе ИИ гораздо большего количества данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматическая система (программа ИИ) может служить надёжным объективным инструментом для определения степени сколиоза и измерения углов Кобба на фронтальных рентгенограммах позвоночника, значительно экономя время врача-рентгенолога. Основными факторами, которые могут повлиять на результаты работы программы, являются качество рентгенограмм и точность разметки позвонков. Эти факторы могут быть учтены на практике при использовании программы ИИ, так как рентгенолог может корректировать разметку позвонков и получать более точные результаты.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределён следующим образом: Д.Х.И. Кассаб — обзор литературы, сбор и анализ литературных данных, написание текста и редактирование статьи, статистический анализ; И.Г. Камышанская — постановка цели и задач исследования, сбор и анализ материала исследования, организация взаимодействий между соавторами статьи, написание текста, редактирование статьи, С.В. Трухан — создание программ, концепция исследований, статистический анализ данных.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. DKHI Kassab — literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the article, statistical analysis; IG Kamyshanskaya research concepts, data collection, analysis and review of the results, organizing communications between co-author, writing the text, editing the article, SV Trukhan — program creation, research concepts and statistical analysis.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Negrini S., Donzelli S., Aulisa A.G., et al. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth // *Scoliosis*. 2018. Vol. 3, N 13. doi: 10.1186/s13013-017-0145-8
2. Бирченко Н.С. Об асимметрии нагружения правой и левой ноги у детей, больных сколиозом // *Фундаментальные исследования*. 2005. № 4. С. 9–12. EDN: IUMILP
3. Ортопедия. Клинические рекомендации / под ред. С.П. Миронова. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2018.
4. Котельников Г.П., Ларцев Ю.В., Рыжов П.В. Травматология и ортопедия. Издание 2-е, переработанное. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2021.
5. Lenke C.L. Revised glossary of terms [Internet]. Milwaukee, WI : Scoliosis Research Society; c2023 [дата обращения: 05.06.2023]. Доступ по ссылке: <https://www.srs.org/professionals/online-education-and-resources/glossary/revised-glossary-of-terms>
6. O'Brien M.F., Kuklo T.R., Blanke K.M., et al. Radiographic Measurement Manual. Spinal Deformity Study Group. Miami, Florida : Medtronic Sofamor Danek USA, 2008.
7. Malfair D., Flemming A.K., Dvorak M.F., et al. Radiographic evaluation of scoliosis: review // *American journal of roentgenology*. 2010. Vol. 194, N 3. P. 8–22. doi: 10.2214/AJR.07.7145
8. Imhof H., Halpern B., Herneth A.M., et al. Direct diagnosis in radiology. Spinal imaging. 2nd ed. Thieme, 2021.
9. Kaul V., Enslin S., Gross S.A. History of artificial intelligence in medicine // *Gastrointest Endosc*. 2020. Vol. 92, N 4. P. 807–812. doi: 10.1016/j.gie.2020.06.040
10. Падалко М.А., Орлов С.В., Наумов А.М., Назариков С.И., Лушников А.А. Автоматическая система определения углов сколиотической деформации позвоночника человека // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: физико-математические и технические науки*. 2019. № 3. С. 55–68. EDN: WMPiXX
11. Леин Г.А., Нечаева Н.С., Мамедова Г.М. Автоматизация анализа рентгенограмм позвоночника для объективизации оценки степени тяжести сколиотической деформации при идиопатическом сколиозе (предварительное сообщение) // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2020. Т. 8, № 3. С. 317–326. EDN: SJOTEB doi: 10.17816/PTORS34150
12. Khanal B., Dahal L., Adhikari P., et al. Automatic Cobb angle detection using vertebra detector and vertebra corners regression. Cai Y, Wang L, Audette M, et al. Computational methods and clinical applications for spine imaging. Lecture Notes in Computer Science. Switzerland : Springer Nature, 2020. P. 81–87.
13. Horng M., Kuok S., Fu M., et al. Cobb angle measurement of spine from X-Ray images using convolutional neural network // *Computational and mathematical methods in medicine*. 2019. Vol. 2019. doi: 10.1155/2019/6357171
14. Pan Y., Chen Q., Chen T., et al. Evaluation of a computer-aided method for measuring the Cobb angle on chest X-rays // *Eur Spine journal*. 2019. Vol. 28, N 12. P. 3035–3043. doi: 10.1007/s00586-019-06115-w
15. Патент РФ на регистрацию базы данных № 2022620577/ 17.03.2022. Кассаб Д.Х.И., Камышанская И.Г., Черемисин В.М., Черемисин А.А. База данных рентгенограмм позвоночника со сколиозом различных степеней (XrScl).

REFERENCES

1. Negrini S, Donzelli S, Aulisa AG, et al. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis*. 2018;3(13). doi: 10.1186/s13013-017-0145-8
2. Birchenko NS. On the asymmetry of right and left leg loading in children with scoliosis. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2005;(4):9–12. (In Russ). EDN: IUMILP
3. Mironov SP, editor. *Orthopedics. Clinical Guidelines*. Moscow: GEOTAR-Media; 2018. (In Russ).
4. Kotel'nikov GP, Lartsev YuV, Ryzhov PV. *Traumatology and Orthopedics. 2nd edition, revised*.

Moscow: GEOTAR-Media; 2021. (In Russ).

5. Lenke CL. Revised glossary of terms [Internet]. Milwaukee, WI: Scoliosis Research Society; c2023 [cited 2023 Jun 05]. Available from: <https://www.srs.org/professionals/online-education-and-resources/glossary/revised-glossary-of-terms>
6. O'Brien MF, Kuklo TR, Blanke KM, et al. *Radiographic Measurement Manual. Spinal Deformity Study Group*. Miami, Florida: Medtronic Sofamor Danek USA; 2008.
7. Malfair D, Flemming AK, Dvorak MF, et al. Radiographic evaluation of scoliosis: review. *American journal of roentgenology*. 2010;194(3):8–22. doi: 10.2214/AJR.07.7145
8. Imhof H, Halpern B, Herneth AM, et al. *Direct diagnosis in radiology. Spinal imaging. 2nd ed.* Thieme; 2021.
9. Kaul V, Enslin S, Gross SA. History of artificial intelligence in medicine. *Gastrointest Endosc*. 2020;92(4):807–812. doi: 10.1016/j.gie.2020.06.040
10. Padalko MA, Orlov SV, Naumov AM, Nazarikov SI, Lushnikov AA. *Automatic system for determining the angles of scoliotic deformity of the human spine*. Vestnik IKBFU. Physics, mathematics, and technology. 2019;(3):55–68. EDN: WMPIXX
11. Lein GA, Nechaeva NS, Mammadova GM, Smirnov AA, Statsenko MM. Automation analysis X-ray of the spine to objectify the assessment of the severity of scoliotic deformity in idiopathic scoliosis: a preliminary report. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2020;8(3):317–326. EDN: SJOTEB doi: 10.17816/PTORS34150
12. Khanal B, Dahal L, Adhikari P, et al. Automatic Cobb angle detection using vertebra detector and vertebra corners regression. Cai Y, Wang L, Audette M, et al. *Computational methods and clinical applications for spine imaging. Lecture Notes in Computer Science*. Switzerland: Springer Nature, 2020. P:81–87.
13. Horng M, Kuok S, Fu M, et al. Cobb angle measurement of spine from X-Ray images using convolutional neural network. *Computational and mathematical methods in medicine*. 2019;2019. doi: 10.1155/2019/6357171
14. Pan Y, Chen Q, Chen T, et al. Evaluation of a computer-aided method for measuring the Cobb angle on chest X-rays. *Eur Spine journal*. 2019;28(12):3035–3043. doi: 10.1007/s00586-019-06115-w
15. Patent RUS database registration № 2022620577/ 17.03.2022. Kassab DKhI, Kamyshanskaya IG, Cheremisin VM, Cheremisin AA. *A database of spinal radiographs with different degrees of scoliosis (XrScl)*. (In Russ).

РИСУНКИ

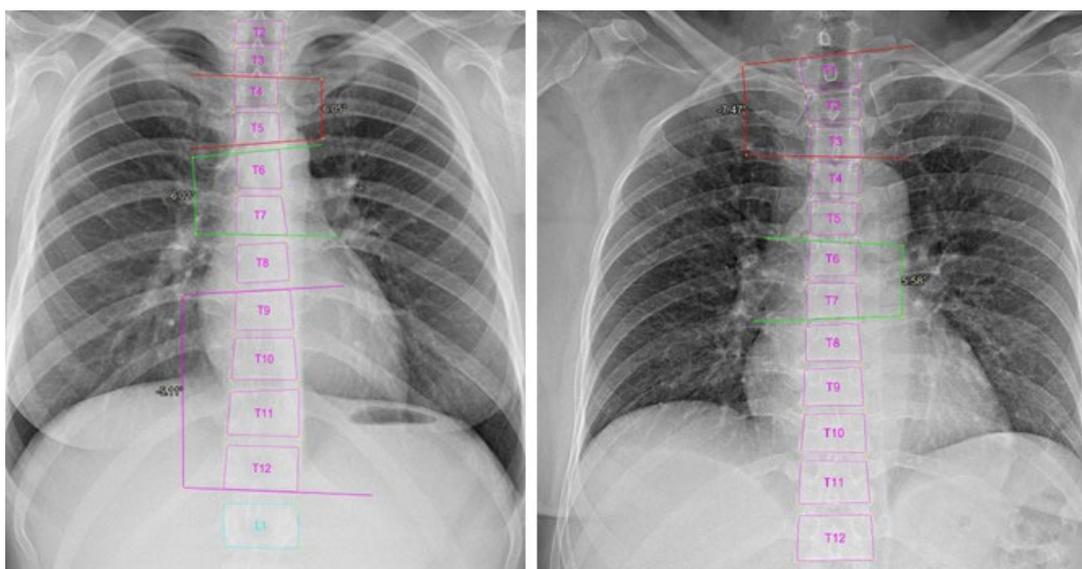


Рис. 5. Ошибки в разметке позвонков на рентгенограммах с степенью 0 (норма). На снимках органов грудной клетки нечёткая визуализация границ позвонков может привести к ложным результатам измерений.

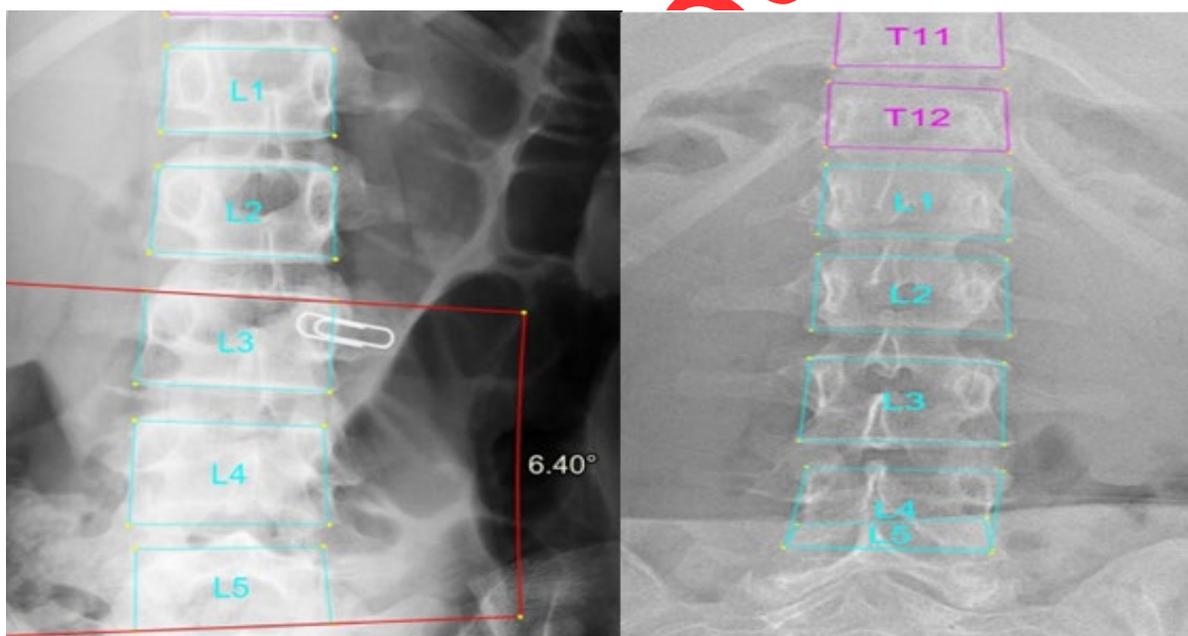


Рис. 6. Ошибки в разметке позвонков на рентгенограммах с оценкой 0 (норма). Ошибки в определении тела позвонка L 5 могут привести к ложноположительным результатам (слева).

ACCEPTED

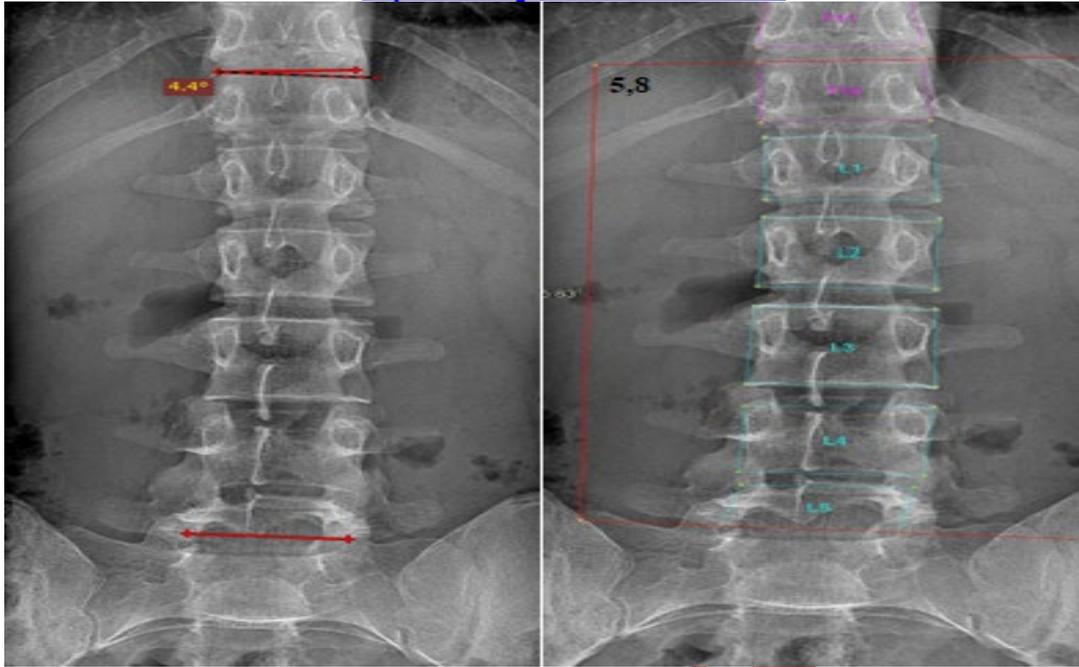


Рис. 7. Ошибки программы при оценке снимков со сколиозом 0 степени. Углы Кобба, измеренные рентгенологом (слева) и программой искусственного интеллекта (справа). Вариабельность измерений незначительна (1,4°), однако врач определяет 0 степень сколиоза, а искусственный интеллект — I степень.

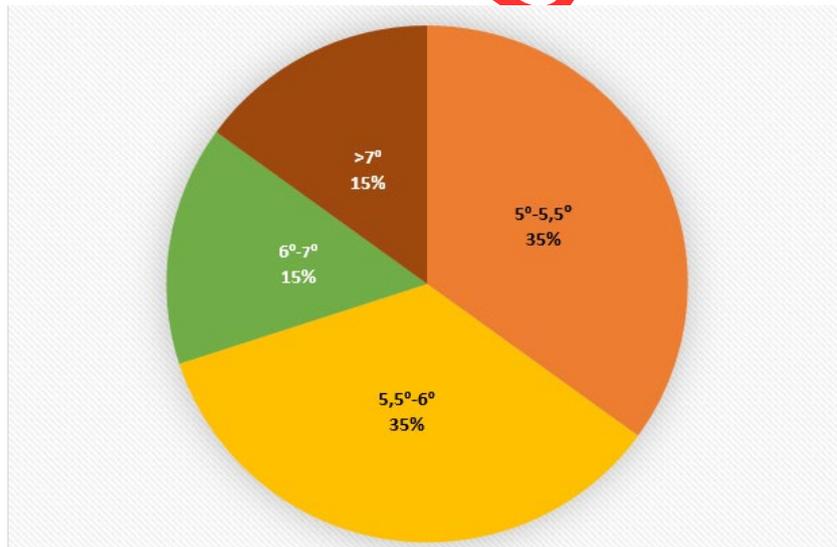


Рис. 8. Распределение углов Кобба, измеренных искусственным интеллектом на нормальных рентгеновских снимках (в группе рентгенограмм без сколиоза).

ACCEPTED

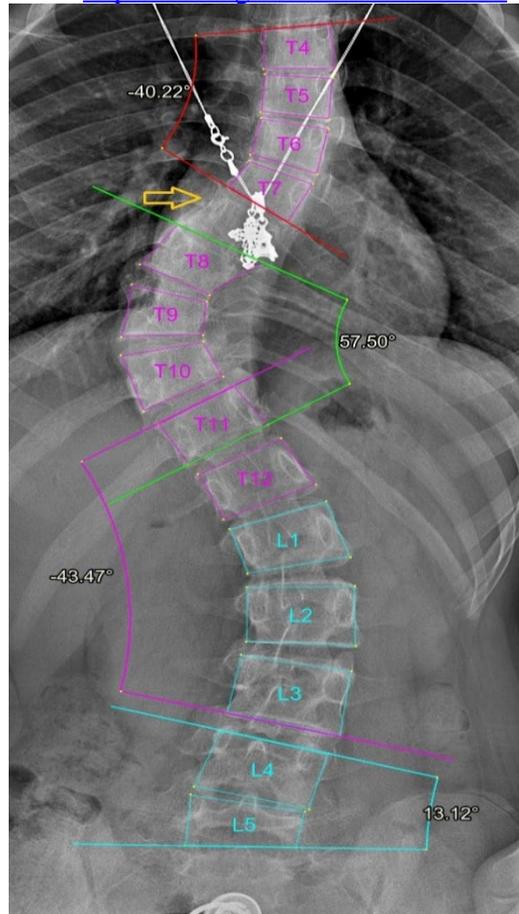
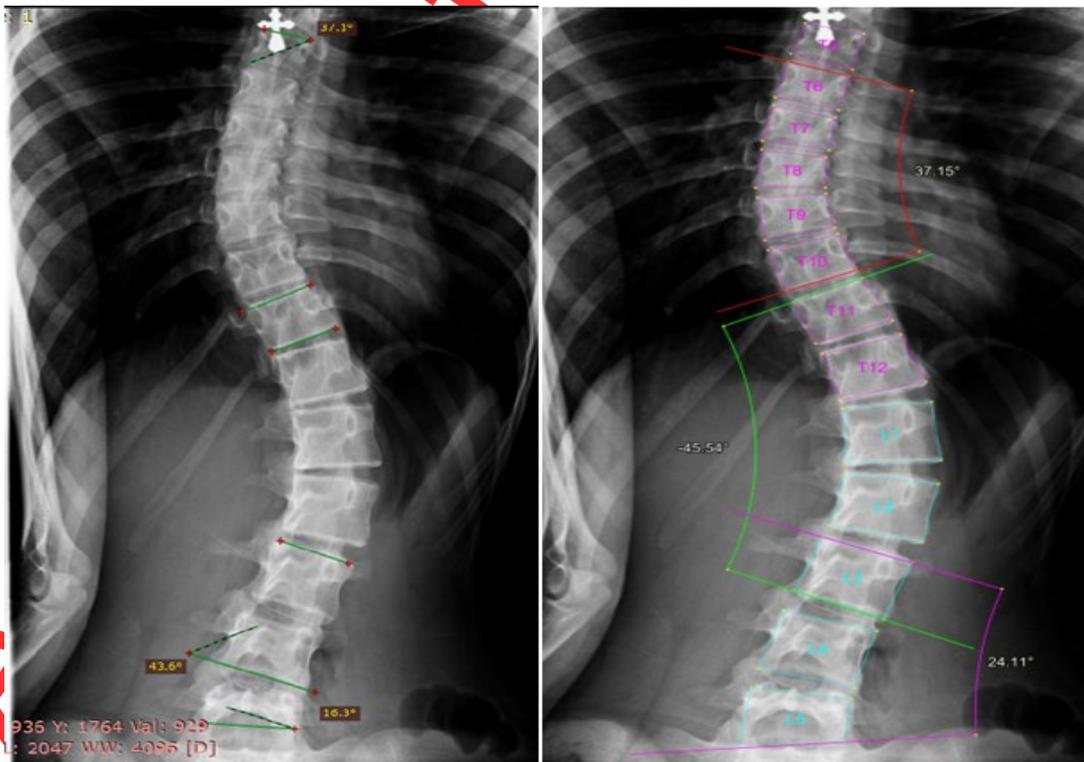


Рис. 9. Особенности разметки позвонков на рентгенограммах при сколиозе III и IV степени. Ошибки в определении и нумерации позвонков, обусловленные их нетипичной формой (жёлтая стрелка).



936 Y: 1764 Val: 929
: 2047 WW: 4095 [D]

Рис. 10. Сколиоз III степени, диагностированный рентгенологом (слева) и искусственным интеллектом (справа). Значительная вариабельность при измерении поясничного изгиба (7,8°) не повлияла на общую оценку сколиоза.

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Кассаб Дима Халед Ибрагим; адрес: Россия, Ленинградская область, 188514, пос. Ропша, ул. Ясная, д. 1; ORCID: 0000-0001-5085-6614; eLibrary SPIN: 4907-7850; e-mail: DimaKK87@gmail.com	* Dima Kh. I. Kassab, MD; address: 1 Yasnaya Str., Ropsha, Leningrad Region, 188514, Russia; ORCID: 0000-0001-5085-6614; eLibrary SPIN: 4907-7850; e-mail: DimaKK87@gmail.com
Камышанская Ирина Григорьевна, д-р. мед. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-8351-9216; eLibrary SPIN: 2422-5191; e-mail: irinaka@mail.ru	Irina G. Kamyshanskaya, MD, Dr. Sci. (Medicine), Assistant Professor; ORCID: 0000-0002-8351-9216; eLibrary SPIN: 2422-5191; e-mail: irinaka@mail.ru
Трухан Станислав Вячеславович; ORCID: 0000-0003-0688-0988; e-mail: stas.truhan@gmail.com	Stanislav V. Trukhan; ORCID: 0000-0003-0688-0988; e-mail: stas.truhan@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Accepted for publication