

АЮПОВА И.О.,

к.м.н., ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: aurovaio@mail.ru

КОЛСАНОВ А.В.,

д.м.н., профессор, профессор РАН, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

ПОПОВ Н.В.,

д.м.н., доцент, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: n.v.porov@samsmu.ru

ХАМАДЕЕВА А.М.,

д.м.н., профессор, ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава РФ, г. Самара, Россия,
e-mail: a.m.khamadeeva@samsmu.ru

ДАВИДЮК М.А.,

Народный университет, г. Пасадена, Калифорния, Соединенные Штаты Америки,
e-mail: maksdave@gmail.com

КИРЮКОВ С. Р.,

к.т.н., доцент, Самарский филиал ГАОУ ВО МГПУ, г. Самара, Россия, e-mail: kirukov@mgpu.ru

АЮПОВ О.Н.,

МУ «Реавиз», г. Самара, Россия, e-mail: doktor.aon@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕФАЛОМЕТРИЧЕСКИХ ОРИЕНТИРОВ НА БОКОВЫХ ТЕЛЕРЕНТГЕНОГРАММАХ

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_70

Аннотация. Цель. Оценить перспективность применения нейронных сетей для цефалометрического анализа при помощи анализа точности ручной и идентификации анатомических ориентиров на цифровых латеральных телерентгенограммах.

Материалы и методы. Выполнена разметка 100 обезличенных телерентгенограмм в боковой проекции одиннадцатью врачами- ортодонтами по 21 параметру, получено 23100 цифровых рентгеновских изображения с нанесенной на них опорной точкой. Проведено сравнение координат опорной точки с «базовой точкой», то есть усредненной координатой для каждой опорной точки среди всех ее локализаций.

Результаты. По критерию среднего отклонения от «базовой точки» наилучшая точность достигнута для вершин режущих краев центральных резцов верхней (is) (0,589, ДИ = 95%) и нижней челюстей (ii) (0,835, ДИ = 95%), а также для середины входа в турецкое седло (S) (0,662, ДИ = 95%).

Для группы ориентиров с наименьшей согласованностью, куда вошли такие точки как P₀ (4,330, ДИ = 95%), P_t (2,999, ДИ = 95%) и Va (2,887, ДИ = 95%), для автоматизации идентификаций и повышения качества цефалометрического анализа, вероятно, будет недостаточным применение только искусственных нейронных сетей и потребуются внедрение других элементов машинного обучения.

Заключение. Учитывая результаты нашего исследования, можно сделать вывод, что предложенный метод демонстрирует высокую точность для большинства точек и может быть использован для автоматизации цефалометрического анализа с дальнейшим развитием технологий машинного обучения.

Ключевые слова: согласованность экспертных оценок, идентификация опорных ориентиров, диагностические ошибки, цефалометрические ориентиры, ручная трассировка, релевантность цефалометрического анализа, нейронные сети, искусственный интеллект, ИИ, глубокое машинное обучение.

Для цитирования: Аюпова И.О., Колсанов А.В., Попов Н.В., Хамадеева А.М., Давидюк М.А., Кирюков С. Р., Аюпов О.Н. Экспериментальный анализ точности идентификации цефалометрических ориентиров на боковых телерентгенограммах. *Врач и информационные технологии.* 2025; 1: 70-81. doi: 10.25881/18110193_2025_1_70.

AYUPOVA I.O.,

PhD, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: aupovaio@mail.ru

KOLSANOV A.V.,

DSc, Professor, Professor of the RAS, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: a.v.kolsanov@samsmu.ru

POPOV N.V.,

DSc, Associate Professor, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: n.v.popov@samsmu.ru

KHAMADEEVA A.M.,

DSc, Professor, FSBEI HE SamSMU MOH Russia, Samara, Russia, e-mail: a.m.khamadeeva@samsmu.ru

DAVIDIUK M.A.,

University of the People, Pasadena, California, United States of America, e-mail: maksdave@gmail.com

KIRYUKOV S.R.,

PhD, Associate Professor, Samara branch of Moscow City University, Samara, Russia, e-mail: kirukov@mgpu.ru

AYUPOV O.N.,

Medical University «Reaviz», Samara, Russia, e-mail: doktor.aon@mail.ru

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ACCURACY OF CEPHALOMETRIC LANDMARK IDENTIFICATION IN LATERAL TELEROENTGENOGRAMS

DOI: 10.25881/18110193_2025_1_70

Abstract. *Objective.* To evaluate the promising application of neural networks for cephalometric analysis by analyzing the accuracy of manual identification of anatomical landmarks on digital lateral teleroentgenographs.

Materials and Methods. Markup of 100 anonymized teleroentgenographs in lateral projection by eleven orthodontists on 21 parameters was performed, 23100 digital X-ray images with a reference point plotted on them were obtained. The coordinates of the reference point were compared with the "base point", i.e. the averaged coordinate for each reference point among all its localizations.

Results. According to the criterion of average deviation from the "base point", the best accuracy was achieved for the apices of the incisal edges of the central incisors of the maxilla (is) (0.589, CI = 95%) and mandible (ii) (0.835, CI = 95%), as well as for the middle of the entrance to the Turkish saddle (S) (0.662, CI = 95%). For the group of landmarks with the lowest consistency, which included points such as Po (4.330, CI = 95%), Pt (2.999, CI = 95%) and Ba (2.887, CI = 95%), the use of artificial neural networks alone is likely to be insufficient to automate identifications and improve the quality of cephalometric analysis and other machine learning elements will need to be implemented.

Conclusion. Considering the results of our study, we can conclude that the proposed method demonstrates high accuracy for most points and can be used to automate cephalometric analysis with further development of machine learning technologies.

Keywords: expert evaluation consistency, reference landmark identification, diagnostic errors, cephalometric landmarks, manual tracing, relevance cephalometric analysis quality, neural networks, artificial intelligence, AI, deep machine learning.

For citation: Ayupova I.O., Kolsanov A.V., Popov N.V., Khamadeeva A.M., Davidiuk M.A., Kiryukov S.R., Ayupov O.N. Experimental analysis of the accuracy of cephalometric landmark identification in lateral teleroentgenograms. Medical doctor and information technology. 2025; 1: 70-81. doi: 10.25881/18110193_2025_1_70.

ВВЕДЕНИЕ

Телерадиография, или телерентгенография (ТРГ) – метод исследования лицевого скелета в боковой, фронтальной и аксиальной проекциях, выполняемый с увеличенным фокусным расстоянием. Полученные при этом снимки делаются с целью проведения цефалометрического анализа. Отличие длиннофокусной съемки от близкофокусной заключается в том, что в первом случае отсутствует проекционное увеличение объекта за счет дивергенции проходящего сквозь него луча, что обеспечивает соответствие величины визуализируемых структур истинным анатомическим размерам. В связи с этим специалист получает возможность проводить измерения непосредственно по снимку и производить расчет степени отклонения величин от среднестатистической нормы, соответствующей тому или иному типу строения лицевого скелета [1]. В настоящее время существует множество методов цефалометрического анализа в ортодонтии. Общеизвестным является тот факт, что для эффективной диагностики требуется комплексный подход, включающий использование комбинации из нескольких способов. Это существенно усложняет задачу и делает процесс трудоемким. Цефалометрия может сопровождаться как случайными, так и системными ошибками, связанными с определением опорных координат [2]. Это может привести к неточным измерениям соотношений между ними [3].

Для оптимизации результатов диагностики все чаще прибегают к помощи цифровых методов, что выражается в росте предложения на рынке ПО и Web-сервисов для ортодонтической практики. Данные коммерческие продукты с успехом решили вопрос измерения линейных, угловых и индексных параметров челюстно-лицевой области пациента, но путь к полной автоматизации процесса невозможен без идентификации анатомических ориентиров с помощью машинного обучения или при помощи подходов искусственного интеллекта (ИИ) [4–9].

Работы с применением ИИ, машинного обучения и глубокого обучения для оценки и анализа ТРГ широко представлены в международных наукометрических базах данных [4, 10, 11]. Однако не утихают споры об эффективности цефалометрического анализа, выполненного в автоматизированном режиме [12]. Когда дело

доходит до меры надежности при идентификации цефалометрического ориентира, не существует определенной «достоверной координаты» или золотого стандарта, который мог бы обеспечить подтверждение того, где находится истинное местоположение ориентира [9, 13]. При тестировании точности в поиске анатомических ориентиров различными методами ИИ, некоторые исследования сравнивают их между собой, другие же – с экспертами с различным опытом клинической работы [12–22].

Кроме того, обучение искусственных нейронных сетей (ИНС) часто основано на опыте врача-эксперта и в большинстве исследований дает сопоставимые результаты [4–9, 12]. ИИ в настоящее время является инструментом, по заявлению многих авторов, позволяющим минимизировать время анализа и повысить диагностическую ценность за счет уменьшения субъективных ошибок [4, 12, 14], однако идентификация ориентиров по-прежнему остается рутинной задачей, требующей помощи врача-специалиста. Уровень качества цефалометрического анализа, выполненного в автоматизированном режиме, определяется опытом эксперта, осуществляющего проверку и коррекцию результатов, таким образом мы снова возвращаемся к возможному возникновению «человеческого фактора» и зависимости от экспертного мнения [12, 15]. Использование методов с ложной идентификацией цефалометрических ориентиров может привести к ошибочным решениям в составлении плана ортодонтического лечения [14, 20].

Подобные исследования идут на фоне того, как в настоящий момент разгораются споры о целесообразности использования многих опорных точек для диагностики аномалий челюстно-лицевой области в силу их высокой изменчивости [23–25] или сложности анатомических структур [24, 25].

Так, например, Kotuła J. et al. [24] и Kumar V. et al. [26] заявляют о ненадежности точек, включенных в большинство известных методик: A, B, Or, Po, S и N. При этом Houston W.J.B. et al. [27] отмечают, что A обладает более высокой дисперсностью положения относительно B, что подтверждается и более поздними исследованиями [30–32]. Однако в работе Kim Y.H. et al. [32] вариативность определения точки B резко увеличивается и превосходит таковую для A при

включении в работу ИНС архитектуры CNN, а в работе Hwang H.W. et al. [9] и специалисты, и YOLOv3 показывают лучшие показатели A относительно B.

В свое время высокую вариативность определения ориентиров A, B и P₀ [3] объясняли сложностью идентификации ориентиров, расположенных на кривых линиях, о чем еще в 1971 году говорили касательно точек G₀ [28] и апикальной части нижнего фронтального резца. Однако вариативность расположения точек A, B и P₀ было бы логичнее объяснить их тесной взаимосвязью с наиболее обсуждаемой в последнее время Франкфуртской горизонталью (FH). Так Kattan E.E. et al. [25] и Park J.A. [29] предлагают искать альтернативу ей, так как признают опорную точку P₀ как ненадежную координату. Сложности определения G₀ очевидно возникают вследствие необходимости геометрических построений, относительно которых необходимо производить определение ориентира, а также в силу различий в представлении экспертов и нечеткости формулировок идентификаций [13, 35].

Таким образом, актуальным на сегодняшний день является вопрос предварительного экспериментального определения валидности тех или иных цефалометрических ориентиров с дальнейшим поиском пригодных для включения в формирование выборки для обучения ИНС, так как логичнее было бы сначала определить надежность самого метода, что вероятно позволит решить многие проблемы возникающие в настоящее время в автоматизированном цефалометрическом анализе телерентгенограмм.

При подготовке выборки для обучения нейронных сетей различной архитектуры назревает острый вопрос корректности исходных данных и возможности включения тех или иных ориентиров в цефалометрический анализ в целом. Следовательно, наше исследование должно ответить на вопросы: 1. Можно ли считать выбранный метод цефалометрического анализа твердотканного профиля лица клинически достоверным. 2. Какие анатомические ориентиры врачи-специалисты определяют с наилучшей согласованностью, и, следовательно, на них возможна работа с нейронными сетями, основанными на «обучении с учителем». 3. Какие опорные координаты требуют иных подходов исследований и машинного обучения, если

будет выявлено неудовлетворительное качество идентификации их врачами-специалистами.

Таким образом, экспериментальное изучение точности идентификации цефалометрических ориентиров на телерентгенограммах в боковой проекции предвещает перспективность применения и совершенствования метода расшифровки цефалометрических данных с использованием цифровых технологий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на базе кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии ФГБОУ ВО «СамГМУ» Минздрава РФ (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации). Комитет по биоэтике при Самарском государственном медицинском университете одобрил данную научную работу, как соответствующую этическим нормам (протокол №239 от 10.11.2021).

Для достижения целей исследования был проведен библиографический анализ [8, 12, 19, 20], позволяющий считать отклонения анатомических точек до 4 мм клинически приемлемыми, до 2 мм – удовлетворительными и до 1 мм – хорошими. При этом метод исследования признается достоверным лишь в случае, когда не менее 80% координат в нем ограничено областью приемлемых значений [12]. Точность локализации ориентиров на ТРГ в боковой проекции определяет клиническую значимость используемых методов анализа.

Для изучения из архива заранее обезличенных ТРГ в боковой проекции с помощью генератора случайных чисел отобраны 100 цифровых изображений. Ранжирование выборки по полу, возрасту, наличию каких-либо нозологических форм патологии не производилось. Рентгенологические снимки были получены на аппарате Planmeca (Prolin XC) (Planmeca OY, Хельсинки, Финляндия) в градациях серого с разрешением 8 бит на пиксель, размер которого составлял 0,26 мм, и имели формат файла PNG размером 2016×2696 пикселей.

Двумя наиболее опытными специалистами были определены точки O_г и P₀, по средним координатам которых производилась ориентация

снимков для дальнейшего изучения специалистами.

Затем группой экспертов, состоящей из одиннадцати врачей ортодонтов с клиническим опытом работы от 1 до 8 лет, на изображениях мануальным методом определялись ориентиры. Разметка производилась с помощью программного обеспечения Paint.Net, при этом применялся графический инструмент «карандаш» с точностью до 1 пиксель. Это позволило повысить корректность идентификации данных.

В исследование был включен 21 твердотканый ориентир, наиболее часто применяемый при цефалометрическом анализе в ортодонтии.

Таким образом, для анализа было получено 23100 изображений с нанесенными на них анатомическими ориентирами.

После определения локализации твердотканых ориентиров автоматически с помощью скриптов Python на плоскостных изображениях происходило извлечение координат по осям x и y , формировалась первичная статистика, фильтрация выбросов и обработка данных. Исключались изображения, на которых отсутствовал ориентир, определенный специалистом, или же выявлялось наличие двух и более отдельных точек, а также размер графического отображения локализации составлял более 1 пикселя. Для оценки точности идентификации точек для каждой из них был принят «базовый ориентир», как средняя по всем специалистам координата по двум осям. Исследование проводилось на уровне надежности $\gamma = 0,95$. Случайной величиной было выбрано евклидово расстояние от точки, определенной экспертом, до «базового ориентира». Выбросы исключались в том случае, если отклонение от среднего по всем специалистам для изображения превышало значение доверительного интервала для математического ожидания.

Для оценки статистических характеристик использовались следующие формулы:

Среднее отклонение:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

(здесь и далее: n – объем выборки, x_i – значения случайной величины);

Стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2};$$

Доверительный интервал для математического ожидания:

$$(\bar{X} - t_{\gamma} \cdot s / \sqrt{n}; \bar{X} + t_{\gamma} \cdot s / \sqrt{n}),$$

где t_{γ} – параметр распределения Стьюдента, определяемый по статистическим таблицам.

Коэффициент вариации

$$K_{\text{var}} = \frac{s}{\bar{X}}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Распределение локализаций по абсолютным отклонениям для каждого из анатомических ориентиров, определенных мануальным методом на цифровых ТРГ, демонстрирует достаточную плотность расположения координат, однако по некоторым из параметров выявлена значительная вариативность идентификации.

О сложностях локализаций точек P_0 , G_0 , A , B , A_{ii} , A_{is} , A_r , G_n , G_0 , l_1 , l_2 , O_r , SNA , SNP говорят и данные мировой литературы [4–9, 12, 14, 19–35].

Преобразовав полученные при статистической обработке данные в формат таблицы (Табл. 1) можно увидеть, что среднее отклонение точек от «базового ориентира» до 1 мм наблюдается только у 3 анатомических ориентиров из 21; до 2 мм – у 10; до 4 мм – у 7 и координаты точки P_0 в среднем имеют неудовлетворительные отклонения (более 4 мм).

При этом максимальные отклонения по каждому из ориентиров варьировались от 4,844 мм до 17,684 мм (Рис. 1), что сильно превышает доверительные интервалы при определении анатомических координат и указывает на сильное влияние «человеческого фактора» при идентификации координат экспертами. Подобные цифры были получены и в ряде других исследований, посвященных точности идентификации цефалометрических ориентиров [9].

Анализируя полученные данные, возможно сделать заключение о сложностях, возникающих у респондентов нашего исследования при идентификации ориентиров A , A_{ii} , B_a , C , G_0 , O_r , P_0 , P_t , что согласуется с литературными данными [4–9, 12, 14, 19–35], однако не было выявлено

Таблица 1 — Результаты статистической обработки данных

Название точки	Среднее отклонение, мм	Максимальное отклонение, мм	Стандартное отклонение, мм	Средний доверительный интервал, мм
A	2,132	11,196	1,752	5,890
Aii	2,336	17,685	1,837	7,570
Ais	1,767	10,532	1,518	7,254
Ar	1,234	16,835	1,600	2,114
B	1,884	8,585	1,549	3,248
Ba	2,887	15,085	2,690	6,283
C	2,632	10,261	1,949	4,442
Gn	1,242	7,935	0,969	2,456
Go	2,623	12,965	2,025	8,353
li	0,835	12,659	1,302	3,640
Is	0,589	8,268	0,827	3,135
Me	1,339	10,023	1,392	3,403
N	1,829	9,974	1,835	3,910
Or	2,582	12,217	1,954	4,522
Po	4,330	16,703	3,264	7,385
Pog	1,939	8,434	1,444	3,343
Pt	2,999	14,272	2,165	4,887
S	0,662	16,152	0,901	5,268
Se	1,121	4,844	0,762	1,845
SNA	1,500	8,919	1,462	2,849
SNP	1,309	11,376	1,164	2,494

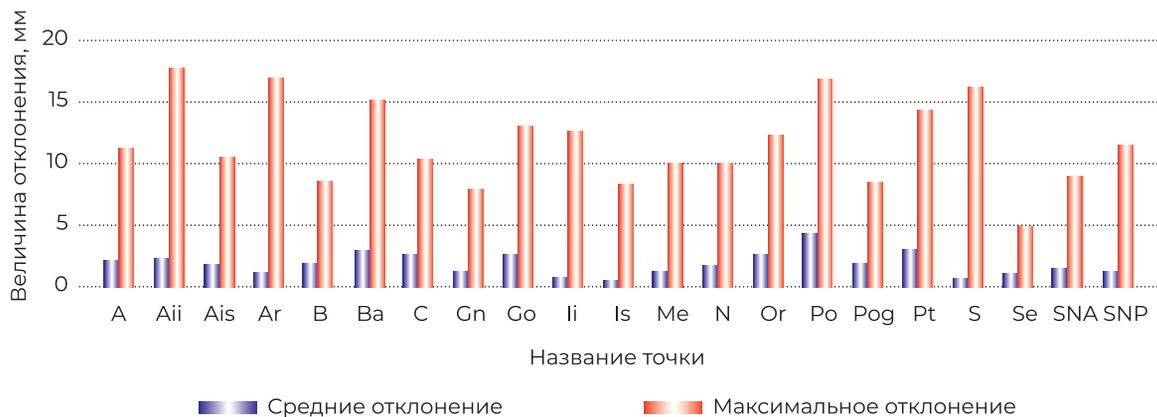


Рисунок 1 — Максимальные и средние абсолютные Величина отклонения локализации твердотканых ориентиров, мм.

существенных отклонений при локализации B, Ais, Ar, Gn, li, Is, SNA, SNP, как у других авторов (Табл. 2).

Отметим, что оценивая корреляцию данных нашего исследования с работами других авторов, можно говорить о достаточно высокой степени ее выраженности – коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,4–0,6 по

абсолютному значению. Исключение составляют лишь данные, представленные в работе Kim Y.H. et al. [32], но здесь можно отметить и практическое отсутствие корреляции между данными специалистов и CNN, полученные ими. В остальном же взаимосвязь между результатами нашего исследования и исследованиями других авторов статистически значима.

Таблица 2 — Результаты исследований в литературных источниках

Название точки	Среднее отклонение от «базового ориентира», мм						
	Наши данные	Hwang H.W. et al. [9]	Uğurlu M. [30]	Lindner C. et al. [31]	Kim Y.H. et al. [32]		
	Специалисты	Специалисты	YOLOv3	CranioCatch	FALA	Специалисты	CNN
A	2,132	2,2	2,2	5,124	1,44	1,92	1,88
Aii	2,336	3,2	2,0	3,524	–	–	–
Ais	1,767	2,8	1,8	4,870	–	–	–
Ar	1,234	0,9	1,1	5,570	1,43	1,51	2,31
B	1,884	3,3	3,9	3,416	1,26	1,23	2,01
Ba	2,887	2,0	2,4	–	–	–	–
C	2,632	1,9	1,8	–	–	–	–
Gn	1,242	2,0	2,6	2,172	0,80	–	–
Go	2,623	2,9	2,9	8,304	2,69	–	–
li	0,835	1,1	0,5	5,318	0,89	1,66	1,55
Is	0,589	1,2	0,5	1,774	0,65	1,40	1,36
Me	1,339	1,3	1,2	1,429	0,84	1,34	1,48
N	1,829	1,4	1,1	1,391	1,06	1,33	1,56
Or	2,582	1,4	1,7	2,070	1,24	0,58	1,72
Po	4,330	1,7	2,1	3,963	1,64	0,47	2,15
Pog	1,939	1,3	1,2	1,579	1,00	0,54	1,58
Pt	2,999	2,1	2,4	–	–	–	–
S	0,662	0,7	1,3	0,616	0,80	0,96	2,93
Se	1,121	–	–	–	–	–	–
SNA	1,500	2,3	2,0	4,187	1,49	2,25	2,14
SNP	1,309	1,4	1,8	5,780	0,96	0,90	1,81

Некоторые из исследователей предлагают совершенствование цефалометрического анализа с улучшением качества определения координат опорных точек по средствам внедрения элементов ИИ.

При анализе работ Hwang H.W. et al. [9], направленной на изучение 80 цефалометрических ориентиров, определенных автоматизированной системой идентификации (ИИ) на основе метода глубокого обучения You-Only-Look-Once версии 3 (YOLOv3), с координатами, идентифицированными людьми-специалистами, нам удалось провести оценку 20 параметров. По полученным данным результаты нашего исследования имели меньшие средние отклонения в точках A, Ais, B, SNA, SNB по сравнению с работой специалистов и глубокого машинного обучения; по Aii, Gn, Go, li, Is, S, Me – данные представлялись сопоставимыми, однако по восьми параметрам, рассчитанные расстояния от «базового ориентира» были выше. Рассматривая исследования работы нейронной сети CranioCatch (Эскишехир, Турция) [30], удалось сопоставить данные по идентификации

17 анатомических ориентиров: по 12 из них (A, Aii, Ais, Ar, B, Gn, Go, li, Is, Me, SNA, SNB) наше исследование показало более точные результаты определения; по параметру S – сопоставимые и в точках N, Or, Po, Pog среднее отклонение в нашей работе дало несколько большие цифры. Сопоставляя данные научных трудов по автоматизированному поиску (FALA) Lindner C. et al. [31], мы смогли проанализировать 14 параметров и сделать вывод о сопоставимости по критерию среднего отклонения у 2 ориентиров (Go, SNA), тогда как 5 параметров (S, SNP, Ar, li, Is) имели в нашем исследовании лучшие показатели, а 7 (A, B, Gn, N, Po, Or, Me) определялись специалистами хуже, нежели автоматизированными системами, однако 3 из них имели в нашем исследовании результаты по критерию среднего отклонения «хорошие» и 2 – «удовлетворительные».

Сравнивая полученные данные с результатами библиографических источников, необходимо отметить, что автоматизированные системы анализа рентгенологических изображений во многих работах давали схожую картину. Так

Tanikawa S. et al. [39] при исследовании точности локализации 18 опорных точек на боковых телерентгенограммах отмечали, что семь из них дают неудовлетворительные значения локализаций более чем в 20% (L1 (ii), Ar и N, Po, Ba, U1 (is) и Go). При этом в процессе использования предложенных авторами вариантов оптимизации обучения системы четыре ориентира (Po, Ba, U1 (is) и Go) не показали улучшений.

В нашей работе для каждого из анатомических ориентиров также определялось число изображений со средним отклонением в пределах диапазона отличных, хороших, удовлетворительных и неудовлетворительных значений (Табл. 3). При локализации точек Ba, C, Po и Pt медицинскими специалистами количество точек со средним отклонением, превышающим 4 мм, составило более 20%, а наибольшее из этих значений превышало 40% (для Po). При этом в работе Lindner C. et al. [31] наихудший

результат для FALA был получен относительно точек Go (20,25%) и Po (10,25%), а количество хороших результатов для первого параметра было также сопоставимо с нашими данными и значительно превосходило результаты для второго.

При проведении работы по проверке точности предложенной авторами модели глубокого машинного обучения с учетом вариабельности результатов, полученных разными исследователями, Kim Y. H. et al. [32] указывали на неприемлемые диапазоны точности локализаций точек Or и Po. О проблемах идентификации ориентиров A, Ar, Go, Pg' и Or заявляют и другие авторы [30].

Таким образом, выявлены существенные проблемы при локализации отдельных анатомических ориентиров, однако метод все же можно считать клинически значимым по причине высокого процента (88%) локализаций точек со значениями, входящими в диапазон удовлетворительных.

Таблица 3 — Процентное соотношение цефалометрических ориентиров с разной степенью среднего отклонения от эталонного ориентира

Наименование точки	% изображений с отклонением не более 1 мм от базового ориентира	% изображений с отклонением 1–2 мм от базового ориентира	% изображений с отклонением 2–4 мм от базового ориентира	% изображений с отклонением более 4 мм от базового ориентира
A	29,91	28,96	27,9	13,23
Aii	25,69	28,94	30,24	15,13
Ais	37,95	29,64	24,76	7,65
Ar	60,57	25,29	9,71	4,43
B	36,96	25,26	28,07	9,71
Ba	22,34	27,81	27,66	22,19
C	19,52	26,29	33,6	20,59
Gn	51,32	30,15	16,12	2,41
Go	21,37	25,14	33,66	19,83
Ii	80,06	10,96	5,34	3,64
Is	87,21	7,18	4,31	1,3
Me	55,72	23,49	14,46	6,33
N	44,95	24,07	17,29	13,69
Or	21,27	23,74	37,38	17,61
Po	9,5	15,8	33,07	41,63
Pog	31,82	28,18	29,74	10,26
Pt	10,85	29,84	34,88	24,43
S	86,04	10,26	3,13	0,57
Se	53,71	34,5	11,5	0,29
SNA	50	23,33	18,27	8,4
SNP	50,15	32,13	13,51	4,21
Cephalometric analysis	43,57	24,33	20,32	11,78

При оценке степени согласованности мнений экспертов в качестве меры использовались коэффициенты вариации рассматриваемой случайной величины, полученные для каждой точки на 100 рентгеновских изображениях

В табл. 4 приведены средние значения коэффициентов вариации для каждой точки. Эти значения позволяют оценить согласованность мнений экспертов и сделать предварительный вывод об удовлетворительных результатах, получаемых рассмотренным методом. Тем не менее, можно отметить, что этот вывод является весьма предварительным и нуждается в дальнейшем анализе, проводимом с использованием более сложных статистических методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая результаты нашего исследования, можно сделать вывод, что предложенный метод демонстрирует высокую точность для большинства точек и может быть использован для автоматизации цефалометрического анализа с дальнейшим развитием технологий машинного обучения.

Таким образом, при подготовке обучающих данных для искусственных нейронных сетей с методом «обучения с учителем» необходимо прибегать к оценке согласованности экспертных мнений для того, чтобы избежать субъективности в оценке.

Наибольшая согласованность экспертных оценок по критерию минимальных значений среднего отклонения для твердотканного профиля лица была выявлена при определении точек *is*, *S* и *ii* со значениями – 0,589, 0,662 и 0,835 соответственно. Гипотетически, именно в этих точках, при работе ИНС покажут наилучшие результаты, так как большинством исследований доказаны сопоставимость в результатах идентификации врачей-экспертов и ИНС [1–6; 9–16].

Наименьшая согласованность получена для твердотканых точек *Po*, *Pt* и *Ba*, значения средних отклонений составляют 4,330, 2,999 и 2,887 соответственно. Вероятно, что для автоматизации идентификации данных ориентиров и повышения качества цефалометрического анализа будет недостаточно применение ИНС и потребуются внедрение других элементов машинного обучения.

При сравнении полученных в нашей работе результатов с литературными данными необходимо отметить, что ориентиры *B*, *Gn* и *Go* имели

Таблица 4 — Значения коэффициентов вариации

Наименование точки	Средний коэффициент
A	0,6813
Aii	0,6849
Ais	0,6390
Ar	0,5563
B	0,6553
Ba	0,7240
C	0,5982
Gn	0,6792
Go	0,6637
li	0,7066
Is	0,6178
Me	0,7164
N	0,7457
Or	0,5946
Po	0,6824
Pog	0,6868
Pt	0,5526
S	0,5840
Se	0,5995
SNA	0,6555
SNP	0,6525

лучшие показатели, а ориентиры *Ba*, *C*, *N*, *Or*, *Po*, *Pog* и *Pt* требуют более глубокого анализа по ошибкам специалистов при их локализации. Например, [3, 23, 29] сообщается, что ориентиры, расположенные анатомически на кривых, подвержены ошибкам идентификации, также имеют значение уровень знаний исследователя [33], индивидуальное понимание определений ориентиров [34–36], качество цефалометрических изображений [36–38] и двоение контуров структур [37, 38]. Успех же локализации *B*, *Gn* и *Go* в нашем исследовании можно объяснить предварительной автоматизированной ориентацией снимков по Франкфуртской горизонтали, так как все эти точки располагаются на изогнутых линиях. Однако здесь стоит отметить, что проведенная манипуляция никак не улучшила идентификации *A*, *Pog*, *C*, *Or* и *Po*.

Также можно сделать выводы о перспективности разработки и совершенствования моделей глубокого машинного обучения для большинства из выбранных в эксперименте ориентиров (*Aii*, *Ais*, *Ar*, *Gn*, *li*, *Is*, *Me*, *SNA*, *SNB*), для других же (*Go*, *A* и *B*) – целесообразна разработка иных

методов идентификации, так как поиск данных координат вызывает затруднения у специалистов и не дает лучших результатов локализаций при помощи автоматизированных систем, основанных на обучении нейронных сетей [9, 30, 31]. Такие же точки, как Po и Or требуют пересмотра в концепции их определения на местности.

Несмотря на серьёзные недостатки локализации точек на боковых ТРГ, метод анализа твердотканного профиля лица более чем в 88% случаев идентификаций анатомических ориентиров

дает удовлетворительные результаты. Таким образом, его можно считать клинически достоверным. В то же время метод расшифровки цефалометрических данных нуждается в совершенствовании с помощью цифровых технологий.

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

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Рogaцкий Д.В. Лучевая диагностика в стоматологии: 2D/3D/. – М.: ТАРКОММ, 2021. – 403 с. [Rogatskii DV. Luchevaya diagnostica v stomatologii 2D/3D/. M.: TARKOMM, 2021. 403 p. (In Russ.)]
2. Kamoen A, Dermaut L, Verbeeck R. The clinical significance of error measurement in the interpretation of treatment results. *Eur J Orthod.* 2011; 14: 569-78.
3. Tng TT, Chan T, Hägg U, Cooke M. Validity of cephalometric landmarks. An experimental study. *Eur J Orthod.* 1994; 14: 110-20. doi: 10.1093/ejo/16.2.110.
4. Bichu YM, Hansa I, Bichu AY, Premjani P, Flores-Mir C, Vaid NR. Applications of artificial intelligence and machine learning in orthodontics: a scoping review. *Prog Orthod.* 2021; 22(1): 18. doi: 10.1186/s40510-021-00361-9.
5. Muraev AA, Tsai P, Kibardin I, Oborotistov N, et al. Frontal cephalometric landmarking: humans vs artificial neural networks. *Int J Comput Dent.* 2020; 23(2): 139-148.
6. Kök H, Izgi MS, Acilar AM. Determination of growth and development periods in orthodontics with artificial neural network. *Orthod Craniofac Res.* 2021; 24(S2): 76-83. doi: 10.1111/ocr.12443.
7. Yao J, Zeng W, He T, Zhou S, et al. Automatic localization of cephalometric landmarks based on convolutional neural network. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2022; 161(3): e250-e259. doi: 10.1016/j.jado.2021.09.012.
8. Londono J, Ghasemi S, Hussain SA, et al. Evaluation of deep learning and convolutional neural network algorithms accuracy for detecting and predicting anatomical landmarks on 2D lateral cephalometric images: A systematic review and meta-analysis. *Saudi Dent J.* 2023; 35(5): 487-497. doi: 10.1016/j.sdentj.2023.05.014.
9. Hwang HW, Park J, Moon JH, et al. Automated Identification of Cephalometric Landmarks: Part 2. Might It Be Better Than human? *Angle Orthod.* 2020; 90(1): 69-76. doi: 10.2319/022019-129.1.
10. Bajjad AA, Gupta S, Agarwal S, et al. Use of artificial intelligence in determination of bone age of the healthy individuals: A scoping review. *J World Fed Orthod.* 2024; 13(2): 95-102. doi: 10.1016/j.ejwf.2023.10.001.
11. Czako L, Sufliarsky B, Simko K, Sovis M, et al. Exploring the Practical Applications of Artificial Intelligence, Deep Learning, and Machine Learning in Maxillofacial Surgery: A Comprehensive Analysis of Published Works. *Bioengineering (Basel).* 2024; 11(7): 679. doi: 10.3390/bioengineering11070679.
12. Оборотистов Н.Ю., Мураев А.А., Мокренко М.Е. и др. Сравнение традиционной – ручной и автоматической систем расстановки цефалометрических точек на телерентгенограмме головы в боковой проекции в специализированных программах // Ортодонтия. – 2022. – №4(100). – С.22-29. [Oborotistov NU, Muraev AA, Mokrenko ME, et al. Sravnenie tradicionnoi – ruchnoi i avtomatizirovannoi sistem rasstanovki cephalometriccheskih toček na telerentgenogramme golovi v bokovoi proekcii v specializirovannih programmah. *Ortodontia.* 2022; 4(100): 22-29. (In Russ.)]
13. Колсанов А.В., Попов Н.В., Аюпова И.О., Ивлева А.И. Согласованность мнений экспертов при изучении позиции опорных точек для изучения мягкотканного профиля лица на цифровых телерентгенологических снимках боковой проекции черепа // Стоматология. – 2021. – №100(4). – С.49-54. [Kolsanov AV, Popov NV, Ayupova IO, Ivleva AI. Soglasovannost mneniy ekspertov pri izuchenii pozicii opornih toček dlya izucheniya myagkotkannogo prophilya licha na chiphrovih telerentgenologicheskikh snimkah bokovoi proekchii cherepa. *Stomatology.* 2021; 100(4): 49-54. (In Russ.)] doi: 10.17116/stomat202110004149.
14. Subramanian AK, Chen Y, Almalki A, Sivamurthy G, Kafle D. Cephalometric Analysis in Orthodontics Using Artificial Intelligence-A Comprehensive Review. *Biomed Res Int.* 2022; 2022: 1880113. doi: 10.1155/2022/1880113.
15. Kunz F, Stellzig-Eisenhauer A, Zeman F, Boldt J. Artificial intelligence in orthodontics. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie.* 2020; 81(1): 52-68. doi: 10.1007/s00056-019-00203-8.

16. Persin LS. Orthodontics. National Manual in 2 vol. T.1. Diagnosis of dentoalveolar anomalies. M.: GEOTAR-Media, 2020. P.304. doi: 10.33029/9704-5408-4-1-ONRD-2020-1-304.
17. Meric P, Naoumova J. Web-based Fully Automated Cephalometric Analysis: Comparisons between App-aided, Computerized, and Manual Tracings. Turkish Journal of Orthodontics. 2020; 33(3): 142-149. doi: 10.5152/turkjorthod.2020.20062.
18. Schwendicke F, Chaurasia A, Arsiwala L, et al. Deep learning for cephalometric landmark detection: systematic review and meta-analysis. Clin Oral Investig. 2021; 25(7): 4299-4309. doi: 10.1007/s00784-021-03990-w.
19. Gong BW, Chang S, Zuo FF, et al. Automated cephalometric landmark identification and location based on convolutional neural network. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. 2023; 58(12): 1249-1256. doi: 10.3760/cma.j.cn112144-20230829-00118.
20. Butul B, Sharab L. Obstacles behind the innovation-a peek into Artificial intelligence in the field of orthodontics. A Literature review. The Saudi Dental Journal. 2024. doi: 10.1016/j.sdentj.2024.03.008.
21. Ahn HJ, Soo-Hwan BSH, Baek SH, et al. A Comparative Analysis of Artificial Intelligence and Manual Methods for Three-Dimensional Anatomical Landmark Identification in Dentofacial Treatment Planning. Bioengineering. 2024; 11(4): 318. doi: 10.3390/bioengineering11040318.
22. Silva TP, Pinheiro MCR, Freitas DQ, et al. Assessment of accuracy and reproducibility of cephalometric identification performed by 2 artificial intelligence-driven tracing applications and human examiners. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology. 2024. 137(4): 431-440. doi: 10.1016/j.oooo.2024.01.011.
23. Durão AR, Pittayapat P, Rockenbach MI, Olszewski R, et al. Validity of 2D lateral cephalometry in orthodontics: a systematic review. Prog Orthod. 2013; 14(1): 31. doi: 10.1186/2196-1042-14-31.
24. Kotuła J, Kuc AE, Lis J, Kawala B, Sarul M. New Sagittal and Vertical Cephalometric Analysis Methods: A Systematic Review. Diagnostics. 2022; 12(7): 1723. doi: 10.3390/diagnostics12071723.
25. Kattan EE, Kattan MH, Elhiny OA. A New Horizontal Plane of the Head, ID Design Press, Skopje. Repub. Maced. Open Access Maced. J. Med. Sci. 2018; 6: 767-771. doi: 10.3889/oamjms.2018.172.
26. Kumar V, Sundareswaran S. Cephalometric Assessment of Sagittal Dysplasia: A Review of Twenty-One Methods. Journal of Indian Orthodontic Society. 2014; 48(1): 33-41. doi: 10.5005/jp-journals-10021-1215.
27. Houston WJB, Maher RE, McElroy D, Sherriff M. Sources of error in measurements from cephalometric radiographs. Eur J Orthod. 1986; 14: 149-51. doi: 10.1093/ejo/8.3.149.
28. Baumrind S, Frantz RC. The reliability of head film measurements. 1. Landmark identification. Am J Orthod. 1971; 14: 111-27. doi: 10.1016/0002-9416(71)90028-5.
29. Park JA, Lee JS, Koh KS, Song WC. The use of a zygomatic arc as a reference line for clinical applications and anthropological research. Surg. Radiol. Anat. 2019; 41: 501-505.
30. Uğurlu M. Performance of a Convolutional Neural Network- Based Artificial Intelligence Algorithm for Automatic Cephalometric Landmark Detection. Turk J Orthod. 2022; 35(2): 94-100. doi: 10.5152/TurkJOrthod.2022.22026.
31. Lindner C, Wang CW, Huang CT, Li CH, et al. Fully Automatic System for Accurate Localisation and Analysis of Cephalometric Landmarks in Lateral Cephalograms. Sci Rep. 2016; 6: 33581. doi: 10.1038/srep33581.
32. Kim YH, Lee C, Ha EG, Choi YJ, Han SS. A fully deep learning model for the automatic identification of cephalometric landmarks. Imaging Sci Dent. 2021; 51(3): 299-306. doi: 10.5624/isd.20210077.
33. Durão AP, Morosolli A, Pittayapat P, et al. Cephalometric landmark variability among orthodontists and dentomaxillofacial radiologists: a comparative study. Imaging Sci Dent. 2015; 45: 213-220.
34. Lau PY, Cooke MS, Hägg U. Effect of training and experience on cephalometric measurement errors on surgical patients. Int J Adult Orthodon Orthognath Surg. 1997; 12: 204-213.
35. Аюпова И.О., Морина А.В., Колсанов А.В. и др. Сравнительная оценка методов цефалометрического анализа телерентгенограмм боковой проекции черепа // Институт стоматологии. – 2023. – №1(98). – С.76-78. [Ayupova IO, Morina AV, Kolsanov AV, et al. Sravnitel'naya ocenka metodov chephalometri-cheskogo analiza telerentgenogramm bokovoi proekcii cherepa черепа. Institut stomatologii. 2023; №1(98): 76-78. (In Russ.)]
36. Gravely JF, Benzies PM. The clinical significance of tracing error in cephalometry. Br J Orthod. 1974; 1: 95-101.
37. Колсанова А.В., Попов Н.В., Аюпова И. О. и др. Определение релевантности телерентгенографических исследований в практике врачей-ортодонт // Медицинская техника. – 2023. – №3(339). – С.29-32. [Kolsanov AV, Popov NV, Ayupova IO, et al. Opredelenie relevantnosti telerentgenographicheskikh issledovaniy v praktike vrachei- ortodontov. Medichinskaya tehnika. 2023; 3(339): 29-32. (In Russ.)]
38. Kolsanov AV, Popov NV, Ayupova IO, et al. Determination of the Usability of Telerentgenographic Studies in Orthodontic Practice. Biomedical Engineering. 2023; 57(3): 195-199. doi: 10.1007/s10527-023-10296-6.
39. Tanikawa C, Yamamoto T, Yagi M, Takada K. Automatic recognition of anatomic features on cephalograms of preadolescent children. Angle Orthod. 2010; 80(5): 812-20. doi: 10.2319/092909-474.1.