



ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
<https://doi.org/10.24835/1607-0763-1103>

Обзор рентгенодиагностических on-line сервисов, основанных на искусственных нейронных сетях В СТОМАТОЛОГИИ

© Мокренко М.Е. *, Гусейнов Н.А., Аль Хаффар Ж., Тутуров Н.С., Саркисян М.С.

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Минобрнауки России; 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Российская Федерация

Цель исследования: анализ доступных on-line сервисов и программ, использующих искусственные нейронные сети (ИНС), в стоматологии, в особенности для цефалометрического анализа.

Материал и методы. Проведен поиск научных публикаций в информационно-аналитических системах PubMed, Google Scholar и eLibrary без ограничения по срокам публикации по комбинациям из следующих ключевых слов: artificial intelligence, deep learning, computer vision, neural network, dentistry, orthodontics, cephalometry, cephalometric analysis. Были проанализированы 1612 статей, из которых 23 публикации использованы для составления обзора.

Результаты. Глубокое машинное обучение на основе ИНС успешно применяется в различных разделах медицины в качестве аналитического инструмента для обработки различных данных. Особенно успешно ИНС применяются для распознавания изображений в рентгенологии и гистологии. В частности, в стоматологии компьютерное зрение используется для диагностики заболеваний челюстно-лицевой области, планирования оперативного лечения, в том числе имплантации, а также для цефалометрического анализа для нужд врачей-ортодонтов и челюстно-лицевых хирургов.

Заключение. В настоящее время существует множество программ и on-line сервисов для цефалометрического анализа. Однако лишь 7 из них используют ИНС для автоматической разметки и анализа снимков. Также недостаточно данных для оценки точности их работы и удобства.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, искусственный интеллект, рентгенология, цефалометрический анализ, ортодонтия, челюстно-лицевая хирургия

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Мокренко М.Е., Гусейнов Н.А., Аль Хаффар Ж., Тутуров Н.С., Саркисян М.С. Обзор рентгенодиагностических on-line сервисов, основанных на искусственных нейронных сетях в стоматологии. *Медицинская визуализация*. 2022; 26 (3): 114–122. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1103>

Поступила в редакцию: 17.11.2021. **Принята к печати:** 21.04.2022. **Опубликована online:** 15.06.2022.

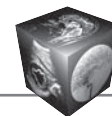
Review of online X-ray diagnostic services based on artificial neural networks in dentistry

© Mark E. Mokrenko*, Nidjat A.O. Guseynov, Jacqueline Alhaffar, Nikolay S. Tuturov, Martiros S. Sarkisyan

The Peoples' Friendship University of Russia; 6, Miklukho-Maklay str., Moscow 117198, Russian Federation

Aim. This review is devoted to the analysis of available on-line services and programs using artificial neural networks (ANNs) in dentistry, especially for cephalometric analysis.

Materials and methods. We searched for scientific publications in the information and analytical databases PubMed, Google Scholar and eLibrary using combinations of the following keywords: artificial intelligence, deep learning, computer vision, neural network, dentistry, orthodontics, cephalometry, cephalometric analysis. 1612 articles were analyzed, of which 23 publications were included in our review.



Results. Deep machine learning based on ANN has been successfully used in various branches of medicine as an analytical tool for processing various data. ANNs are especially successfully used for image recognition in radiology and histology. In dentistry, computer vision is used to diagnose diseases of the maxillofacial region, plan surgical treatment, including dental implantation, as well as for cephalometric analysis for the needs of orthodontists and maxillofacial surgeons.

Conclusion. Currently, there are many programs and on-line services for cephalometric analysis. However, only 7 of them use ANNs for automatic landmarking and image analysis. Also, there is not enough data to evaluate the accuracy of their work and convenience.

Keywords: artificial neural network, artificial intelligence, radiology, cephalometric analysis, orthodontics, maxillofacial surgery

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Mokrenko M.E., Guseynov N.A., Alhaffar J., Tuturov N.S., Sarkisyan M.S. Review of online X-ray diagnostic services based on artificial neural networks in dentistry. *Medical Visualization*. 2022; 26 (3): 114–122. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1103>

Received: 17.11.2021.

Accepted for publication: 21.04.2022.

Published online: 15.06.2022.

Введение

Искусственные нейронные сети.

Основные перспективы применения и исторический очерк в стоматологии

Если судить по объему публикаций за последние два десятилетия, искусственная нейронная сеть (ИНС) – самая применяемая методика, основанная на искусственном интеллекте в медицине [1]. ИНС – это вычислительный аналитический инструмент, который создан по аналогии биологической нервной системы. Она состоит из сетей тесно связанных компьютерных процессоров, называемых “нейронами”, которые способны выполнять параллельно вычисления для обработки данных и предоставление информации. Способность ИНС учиться на примерах, анализировать нелинейные данные, обрабатывать неточную информацию и сортировать ее, позволяя применять модель к независимым данным, сделала ее очень привлекательным аналитическим инструментом в области медицины. W.S. McCulloch и W. Pitts (1943) опубликовали статью, в которой описывается первый искусственный нейрон, использующий простые бинарные пороговые функции [2]. В 1951 г. Minsky и Edmonds разработали стохастический нейронный аналоговый калькулятор, который признан первой нейронной сетью в истории [3]. В 1955 г. A. Newell и H.A. Simon впервые в истории разработали программы искусственного интеллекта [4]. Программа под названием Logic Theorist доказала 38 из первых 52 аксиом “Principia Mathematica” [5]. Следующим важным этапом являлась разработка психологом F. Rosenblatt в 1958 г. перцептрона в качестве практической модели. По задумке автора, перцептрон – это математическая модель, предназначенная для иллюстрации фундаментальных свойств восприятия информации моз-

гом [6]. В 1959 г. A. Samuel ускорил разработку ИНС, введя термин “машинное обучение” [7].

На сегодняшний день известно множество вариаций перцептрона, но самой популярной моделью была многослойная сеть перцептрона с прямой связью. Данные сети состоят из нескольких слоев нейронов, а именно входного слоя, одного или нескольких средних или скрытых слоев и выходного слоя, каждый из которых полностью связан с другим слоем. Нейроны связаны ссылками, и каждая ссылка имеет связанный с ней числовой вес. Нейронная сеть “учится” путем многократной корректировки этих объемов числовых данных. Одним из важных свойств ИНС является то, что они могут самообучаться. Использование многослойного перцептрона с прямой связью ограничивалось отсутствием подходящего алгоритма обучения до тех пор, пока P. Werbos (1974) не ввел обучение с обратным распространением [8]. Существуют и другие актуальные сети, которые активно применяются [9–11].

ИНС уже нашли широкое применение в различных направлениях в медицине. Их способность точно классифицировать и распознавать закономерности привлекла исследователей к применению их при решении многих клинических проблем в медицине. Поскольку мы понимаем, что диагностика, лечение и прогнозирование результатов во многих клинических ситуациях зависят от сложного взаимодействия многих клинических, биологических и патологических переменных, растет потребность в аналитических инструментах, таких как ИНС, которые могут использовать сложные взаимосвязи между этими переменными. W.G. Vaxt был одним из первых исследователей, изучавших клинические возможности ИНС [12]. Он разработал модель нейронной сети, которая



точно диагностировала острый инфаркт миокарда. С тех пор ИНС стали применяться почти во всех областях медицины.

ИНС используются в клинической диагностике, анализе изображений в рентгенологии и гистологии. Примером может служить PAPNET, компьютеризированная автоматизированная система скрининга, основанная на нейронных сетях [13]. Она была разработана для помощи цитологу в исследовании гистологических препаратов шейки матки. PAPNET является одной из немногих моделей ИНС, которая продвигалась на коммерческой основе.

Перспективы в стоматологии

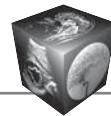
Внедрение ИНС в области стоматологии значительно прогрессирует, хотя очевидно, что это все еще на начальном уровне [14–17]. Были предприняты первые многообещающие попытки автоматизированного выявления кариеса на прицельном рентгеновском снимке [18]. В исследовании E.Y. Kim и соавт. анализ ИНС применялся для построения модели прогнозирования взаимосвязи зубной боли и частоты ежедневной чистки зубов, времени чистки зубов (до еды или после еды и т.д.), использования зубной нити, частоты замены зубной щетки, регулярности профессиональной гигиены и других факторов, включая питание и физические упражнения [19]. В результате была получена прогностическая модель развития зубной боли с точностью около 80%.

Кариес зубов является наиболее распространенным стоматологическим заболеванием во всем мире. Систематический обзор M. Prados-Privado и соавт. (2020) был направлен на определение актуальности вопроса ИНС в диагностике кариеса [20]. Были отобраны 13 исследований. В большинстве из них использовалась прицельная рентгенография зубов. Базы данных изображений варьируются от 87 до 3000 изображений (в среднем 669 изображений). На каждом рентгеновском снимке в 7 из включенных исследований стоматологами был диагностирован кариес зубов. Не во всех исследованиях подробно описано, как диагностировался кариес, а также тип обнаруженного кариозного поражения. Авторы обзора делают выводы, что в силу использования различных ИНС в данных исследованиях и получения разных результатов необходимы исследования, которые сравнивали бы диагностическую ценность эксперта-стоматолога и ИНС. Однако существует ряд работ, которые показали диагностическую ценность ИНС в стоматологии. В систематическом обзоре F. Schwendicke и соавт. (2019) были отобраны и проанализированы 36 статей с 2015 по 2019 г.

Исследования были сфокусированы на стоматологии общей практики (n = 15 исследований), кариеологии (n = 5), эндодонтии (n = 2), пародонтологии (n = 3), ортодонтии (n = 3), рентгенодиагностике в стоматологии (n = 2), судебной стоматологии (n = 2) и лечебного дела (n = 4). Чаще всего выполнялась диагностика, сегментация или классификация анатомических структур, включая зубы (n = 9), костных тканей челюстей (n = 2), а также скелета (n = 4). Чаще всего использовались ортопантограммы (n = 11), за которыми следовали периапикальные рентгенограммы (n = 8), конусно-лучевая КТ (КЛКТ) или КТ (n = 6). Размеры наборов данных варьировались от 10 до 5166 изображений (в среднем 1053). В большинстве исследований для выявления анатомических ориентиров использовались медицинские специалисты, как группа контроля. Сравнение производительности ИНС с результатами независимой тестовой группы стоматологов было проведено в 7 исследованиях; большинство исследований показало, что ИНС работает так же, как экспертная группа [21].

В настоящее время на рынке представлено несколько программ, которые позволяют проводить диагностику стоматологических заболеваний и автоматически заполнять медицинскую документацию. Одна из таких программ – Diagnocat – проводит анализ КЛКТ, панорамных и прицельных снимков на предмет кариеса, разрыхления в костной ткани [22], определяет наличие ретинированных зубов [23], измеряет ширину и высоту альвеолярного отростка и находит границы верхнечелюстных пазух [24]. Программа автоматически создает отчет о наличии заболеваний по каждому зубу и составляет зубную формулу. В работе M. Ezhov (2021) сравнивалась точность диагностики стоматологической патологии по КЛКТ при помощи программы Diagnocat. 24 врача-стоматолога были поделены на 2 группы, первая группа использовала данную программу для помощи в диагностике, а вторая группа анализировала снимки самостоятельно. Были проанализированы 30 снимков. Точность обнаружения патологии у стоматологов, пользовавшихся программой, была статистически выше [16].

Такими же возможностями обладает программа DENTOMO. Она позволяет проанализировать КЛКТ на наличие стоматологической патологии, определяет положение каждого зуба в зубной дуге, автоматически заполняет зубную формулу, составляет предварительный план лечения. Эти возможности помогают стоматологу увеличить скорость работы и улучшить диагностику [17].



Онлайн-сервисы и их применение в ортодонтии

До недавнего времени количество ортодонтических приложений и онлайн-сервисов в Google Play и Apple App Store неуклонно росло. Последнее исследование N.R. Siddiqui и соавт. [25] показало, что в 2019 г. количество ортодонтических приложений составило 305. Эти приложения, ориентированные как на пациентов, так и на врачей, сильно различаются по целям их применения.

На сегодняшний день стало возможным применение онлайн-платформ на основе ИНС в медицине, в частности в ортодонтии [26]. Еще в 1931 г. В. Broadbent открыл методику рентгеновского анализа сагиттальных и вертикальных размеров черепа при помощи бокового цефалометрического снимка (боковая телерентгенограмма) [27]. До сих пор данная методика является одной из основных диагностических процедур в ортодонтии и обычно выполняется при планировании ортодонтического лечения. Цефалометрический анализ основан на идентификации радиологических ориентиров (точек) для последующего измерения различных углов, отрезков и соотношений с целью интерпретации черепно-лицевых параметров. В то время как программное обеспечение обычно выполняет цефалометрические расчеты, разметку цефалометрических точек выполняет эксперт-ортодонт. Качество этого анализа во многом зависит от опыта эксперта. Более того, в большинстве случаев межэкспертное мнение расходится [28]. Следующие факторы вызывают трудности во время расстановки цефалометрических точек: 1) черепно-лицевую область трудно четко спроецировать в двухмерное изображение, поскольку сложные анатомические структуры накладываются друг на друга, и 2) разнообразие зубочелюстной морфологии индивидуально и сильно зависит от пациента. Для решения этих проблем были разработаны различные полуавтоматические и полностью автоматизированные методы. В 2014 и 2015 гг. на Международном симпозиуме по биомедицинской визуализации (МСБВ) были поставлены задачи автоматизированного цефалометрического анализа [29]. Поскольку некорректная идентификация цефалометрических точек может привести к неправильному принятию решения в отношении ортодонтического лечения, желательна полностью автоматизированная и надежная идентификация данных точек. Именно в этой стезе алгоритмы ИНС предоставляют новые возможности для поддержки специалистов-ортодонт в их повседневной работе.

Несмотря на большое количество ортодонтических приложений и онлайн-платформ, очень немногие из них были изучены на предмет их достоверности. Веб-интерфейс, мобильные и компьютерные приложения играют все более важную роль в повседневной жизни. Тем не менее онлайн-сервисы в здравоохранении и, в частности, в ортодонтии пока что не пользуются большой популярностью и признанием. В данной статье проводился обзор существующих онлайн-платформ в направлении ортодонтии.

Результаты

Поиск и отбор научных статей

Актуальные ортодонтические онлайн-платформы: WebCeph, ViSurgery, Planmeca Romexis Cephalometric Analysis, CephBot, CephX, Audax-Ceph, Anatomage.

WebCeph

WebCeph является программой для цефалометрического анализа, которое может устанавливаться на устройства с операционными системами iOS, Android, а также использоваться в виде web-версии. Интерфейс web-версии представлен на рис. 1.

В работе М.К. Alam и А.А. Alfawzan (2020) рассматривалась новая методика латерального цефалометрического анализа на основе ИНС. Были изучены 14 различных цефалометрических характеристик среди пациентов с расщелинами нёба, губы, а также альвеолярного гребня. В ретроспективном исследовании участвовали 123 пациента: 31 – без дефектов, 29 – двусторонняя заячья губа и нёбо, 41 – односторонняя заячья губа и нёбо, 9 – односторонняя заячья губа с затрагиванием альвеолярной кости и 13 – односторонняя заячья губа. Средний возраст пациентов 14,77 года. В данном исследовании использовалась онлайн-платформа на основе ИНС WebCeph. Данные, полученные авторами, свидетельствуют о том, что наличие дефектов губы и нёба значительно влияет на распознавание нейронной сетью цефалометрических ориентиров, особенно при двусторонней расщелине губы и нёба [30].

Позже Y.A. Yassir и соавт. (2021) опубликовали работу, в которой сравнивалась точность цефалометрических измерений, проведенных вручную при помощи программного обеспечения AutoCAD с измерениями, проведенными при помощи программы WebCeph в двух режимах: автоматической разметки снимка с автоматическим анализом и ручной разметки снимка с автоматическим анализом. Измерения при помощи AutoCAD были

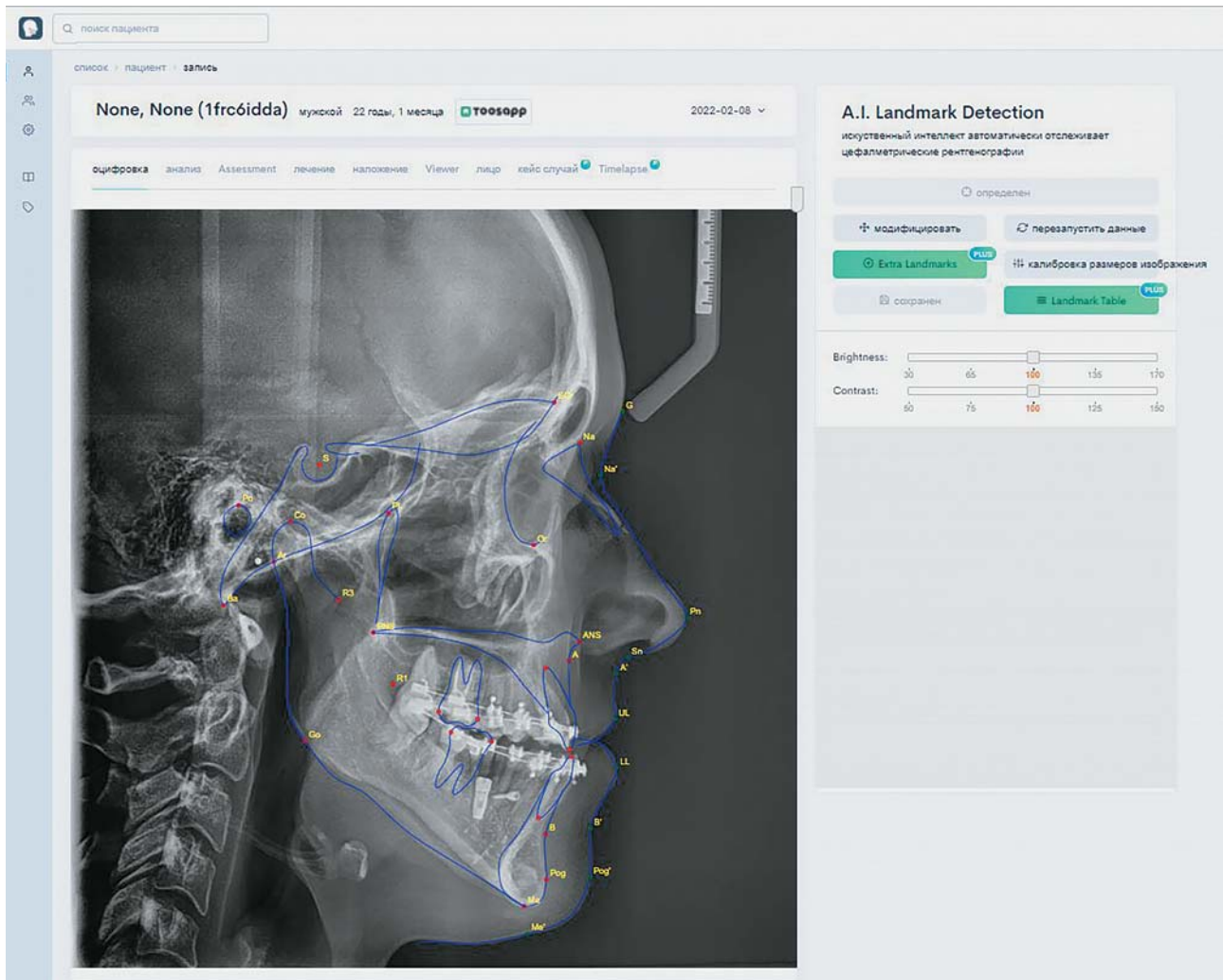


Рис. 1. Интерфейс программы WebCeph.

Fig. 1. WebCeph program interface.

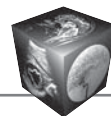
приняты за стандартные значения. Исследование проводилось на основе 50 боковых телерентгенограмм, на которых определяли 17 цефалометрических ориентиров и проводили 11 линейных и угловых измерений. Различные статистические инструменты показали несостоятельность данных, полученных при автоматической разметке снимка программой WebCeph из-за неточностей при расстановке точек, в то время как в полуавтоматическом режиме программа показала хорошие результаты [31].

CephX

CephX – это программа для цефалометрического анализа телерентгенограмм на базе web-платформы. Она позволяет автоматически расставлять

более 60 анатомических ориентиров, используя ИНС, и проводить более 100 видов анализа.

В статье Н. Alqahtani (2020) сравнивались результаты цефалометрических измерений, проведенных при помощи программ FACAD® и CephX®. Исследование проводилось на основе 30 телерентгенограмм в боковой проекции. На каждом снимке расставлялись 16 антропометрических точек, причем расстановка антропометрических точек при использовании программы FACAD® производилась вручную, тогда как в CephX® точки расставлялись автоматически искусственной нейронной сетью. Далее проводился анализ телерентгенограмм по 16 измерениям. Автор указывает на незначительные статистические различия в 3 измерениях, которые не имеют клинической значи-



мости. В совокупности с удобством онлайн-платформы CephX® и скоростью обработки снимков высокая точность измерений делает данную программу удобной для практической работы врача-ортодонта [32].

С другой стороны, в работе P. Meriç и J. Naoumova (2020), в которой авторы сравнивали программы Dolphin Imaging 13.01, CephNinja 3.51 и CephX на основе телерентгенограмм 40 пациентов, указывается на значительные статистические и клинические различия в анализе, проведенном при помощи CephX в сравнении с двумя другими программами. Авторы утверждают, что автоматическая расстановка анатомических ориентиров без ручной коррекции в программе CephX пока не может использоваться, как достоверный метод исследования [33].

Cefbot

Программа позволяет в автоматическом режиме при помощи ИНС разметить 66 анатомических ориентира и провести анализ по Arnett. В работе T.P. Silva и соавт. (2021) сравнили измерения, полученные при помощи данной программы, с результатами, полученными человеком. По данным авторов, в 9 из 10 измерений не было статистически значимых различий [34].

Planmeca Romexis® Cephalometric Analysis

Программа для операционных систем Windows и MacOS позволяет автоматически расставить антропометрические точки на телерентгенограмме и провести цефалометрический анализ. Включает в себя модули для планирования ортогнатической операции, наложения снимка на фотографию пациента. Исследования, направленные на определение точности работы ИНС данной программы, не проводились [35].

AudaxCeph

Еще одна программа, позволяющая в автоматическом режиме установить антропометрические точки на телерентгенограмме [36]. Ее достоинствами так же являются возможности наложения фотографии пациента в профиль на снимок и планирование внешнего вида пациента после ортодонтического или хирургического лечения и возможность создания нестандартного цефалометрического анализа под нужды врача. На настоящее время не проводились исследования, изучающие точность работы ИНС программы AudaxCeph.

Anatomage

Коммерчески доступная программа, позволяющая производить трехмерный цефалометрический анализ на компьютерной томограмме, а также традиционный двумерный анализ с автоматической расстановкой анатомических ориентиров. Anatomage имеет большое количество модулей, в том числе модуль для планирования ортогнатических операций с автоматической установкой линий остеотомии.

В исследовании, проведенном D. Sawchuk и соавт. (2014), программа Anatomage сравнивалась с программой 3DCeph в рамках проведения трехмерного анализа. Точность измерений в двух программах была статистически одинаковой, но работа с Anatomage была удобнее и в 4 раза быстрее в сравнении с 3DCeph. Однако точность работы ИНС при оценке телерентгенограмм не исследовалась [37].

ViSurgery

Программа для операционной системы Windows, имеющая web-интерфейс, позволяет проводить цефалометрический анализ телерентгенограмм и компьютерных томограмм в автоматическом режиме благодаря встроенной ИНС, которая устанавливает цефалометрические точки на снимке. Интерфейс программы ViSurgery представлен на рис. 2.

В работе A.A. Muraev и соавт. (2020) изучалась точность работы нейросети в сравнении с измерениями, проведенными врачами. Было использовано 330 телерентгенограмм, предварительно размеченных студентами, а после проверенными и скорректированными врачами-ортодонтами совместно с челюстно-лицевыми хирургами для достижения максимальной точности определения цефалометрических ориентиров, 300 снимков применялись для обучения ИНС, остальные 30 для анализа результатов. Результаты работы нейросети сравнивались с работой трех групп врачей: экспертов, обычных врачей и студентов. Для статистической оценки данных использовалась средняя абсолютная ошибка (MAE). MAE для ИНС была 2,87 мм, для группы обычных врачей – 2,85 мм, для экспертов – 2,47 мм, для неопытных – 3,61 мм. Данные свидетельствуют о том, что точность ИНС сопоставима с точностью расстановки точек обычными врачами и даже выше, чем у неопытных врачей. Также авторы отмечают, что для повышения точности работы ИНС, применяемой в данной статье, необходимо увеличить объем обучающей выборки [14, 15].

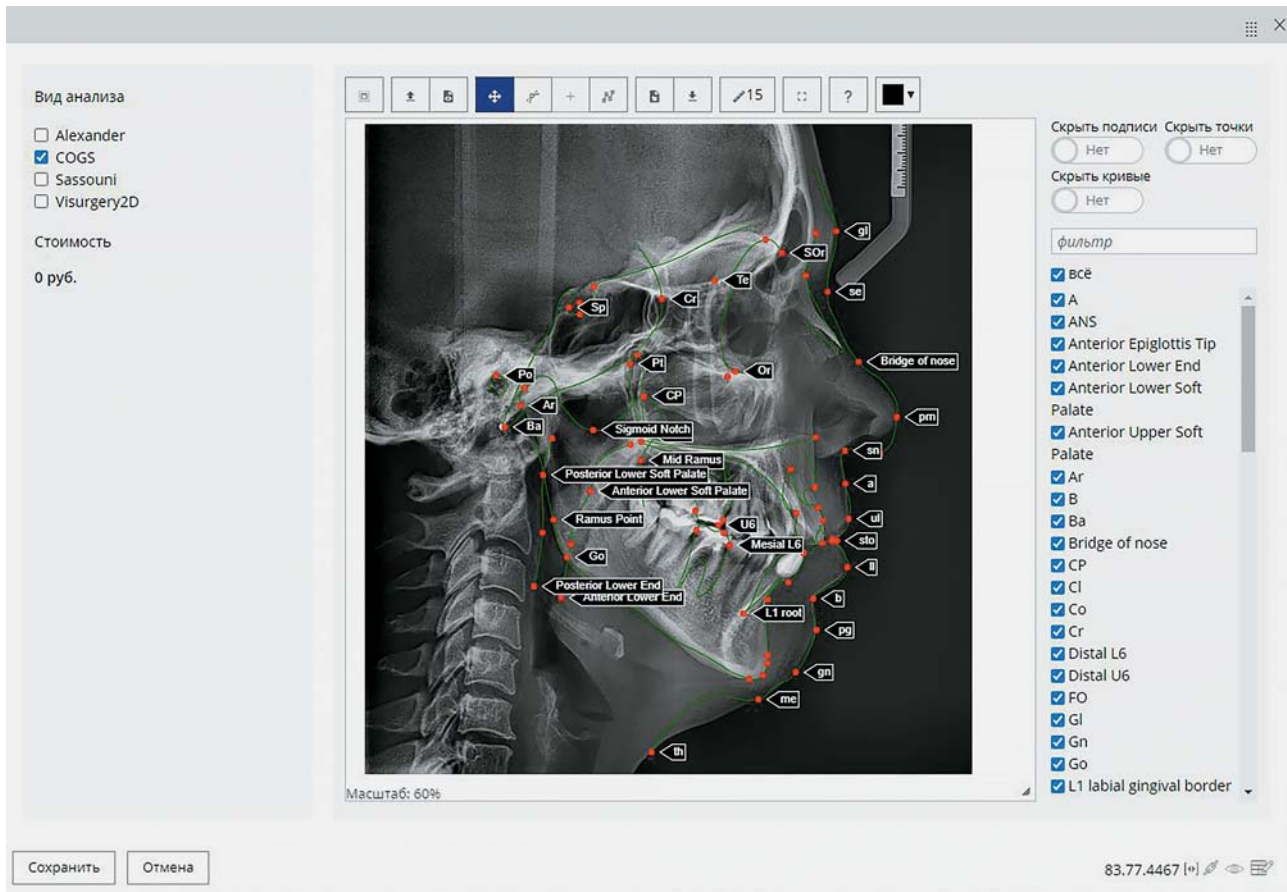


Рис. 2. Интерфейс программы ViSurgery.

Fig. 2. ViSurgery program interface.

Заключение

В настоящее время существует большое количество ортодонтических приложений для разных операционных систем. Однако лишь несколько из них используют ИНС для автоматической разметки и анализа снимков. И только для четырех программ из найденных опубликованы результаты оценки точности работы нейросети. Почти во всех исследованиях с экспертной группой контроля говорится о положительных результатах в виде высокой точности расстановки цефалометрических точек, а также высокой скорости работы.

Только в веб-сервисах ViSurgery, WebCeph, Anatomage, CephX продемонстрированы цифровые значения материалов и методов, а также результатов исследований, что говорит о достоверности, а также доказательности работы данных программ.

На данный момент только для платформы ViSurgery проведено исследование с группой контроля разного направления: студенты, врачи,

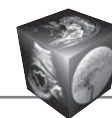
рентгенологи, что позволяет взять во внимание такие факторы, как опыт, человеческий фактор.

Учитывая сложность определения анатомических ориентиров на снимке, особенно для неопытных врачей, и многообещающие результаты исследований, можно говорить, что в будущем системы автоматического анализа телерентгенограмм станут неотъемлемой частью планирования ортодонтического лечения и ортогнатических операций. Однако стоит учитывать тот факт, что ИНС не является заменой врача, а лишь помогает достичь идеального результата как инструмент медицинского назначения.

Участие авторов

Мокренко М.Е. – проведение исследования, сбор и обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных, подготовка, создание опубликованной работы, утверждение окончательного варианта статьи.

Гусейнов Н.А. – концепция и дизайн исследования, написание текста.



Аль Хаффар Ж. – написание текста, участие в научном дизайне.

Тутуров Н.С. – участие в научном дизайне.

Саркисян М.С. – ответственность за целостность всех частей статьи.

Authors' participation

Mokrenko M.E. – conducting research, collection and analysis of data, analysis and interpretation of the obtained data, preparation and creation of the published work, approval of the final version of the article.

Guseynov N.A. – concept and design of the study, writing text.

Alhaffar J. – writing text, participation in scientific design.

Tuturov N.S. – participation in scientific design.

Sarkisyan M.S. – responsibility for the integrity of all parts of the article.

Список литературы [References]

- Steimann F. On the use and usefulness of fuzzy sets in medical AI. *Artif. Intell. Med.* 2001; 21 (1–3): 131–137. [http://doi.org/10.1016/s0933-3657\(00\)00077-4](http://doi.org/10.1016/s0933-3657(00)00077-4)
- McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.* 1943; 5: 115–133.
- Poulton M.M. Computational neural networks for geophysical data processing: Elsevier, 2001. 10 p.
- Newell A., Simon H.A. Computer science as empirical inquiry: Symbols and search. *Commun. ACM.* 1976; 19: 113–126.
- Nilsson N. The Quest for Artificial Intelligence. New York: Cambridge University Press, 2010.
- Rosenblatt F. The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychol. Rev.* 1958; 65: 386–408.
- Bowling M., Fürnkranz J., Graepel T., Musick R. Machine learning and games. *Mach. Learn.* 2006; 63: 211–215. <http://doi.org/10.1007/s10994-006-8919-x>
- Werbos P. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. PhD Thesis, Harvard University, 1974.
- Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1982; 79: 2554–2558.
- Park J., Sandberg I.W. Universal approximation using radial-basis-function networks. *Neural. Comput.* 1991; 3: 246–257.
- Carpenter G.A., Grossberg S. The ART of adaptive pattern recognition by a self-organizing neural network. *Computer.* 1988; 21: 77–88.
- Baxt W.G. Use of an artificial neural network for data analysis in clinical decision-making: the diagnosis of acute coronary occlusion. *Neural. Comput.* 1990; 2: 480–489.
- Boon M.E., Kok L.P. Neural network processing can provide means to catch errors that slip through human screening of pap smears. *Diagn. Cytopathol.* 1993; 9: 411–416.
- Muraev A.A., Tsai P., Kibardin I. et al. Frontal cephalometric landmarking: humans vs artificial neural networks. *Int. J. Comput. Dent.* 2020; 23 (2): 139–148.
- Muraev A.A., Kibardin I.A., Oborotistov N.Yu., Ivanov S.S. Use of neural network algorithms for the automated arrangement of cephalometric markers on lateral cefalograms. *REJR.* 2018; 8 (4): 16–22. <http://doi.org/10.21569/2222-7415-2018-8-2-16-22>
- Ezhov M., Gusarev M., Golitsyna M., et al. Clinically applicable artificial intelligence system for dental diagnosis with CBCT. *Sci. Rep.* 2021; 11 (1): 15006. <http://doi.org/10.1038/s41598-021-94093-9>
- Solovyh E.A., Obrubov A.A., Arranz I. et al. Artificial Intelligence DENTOMO: Opportunities and Prospects for Interpretation of Cone Beam CT in Dentistry. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2021; 170 (5): 686–688. <http://doi.org/10.1007/s10517-021-05133-3>
- Lee J.H., Kim D.H., Jeong S.N., Choi S.H. Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J. Dent.* 2018; 77: 106–111. <http://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.07.015>
- Kim E.Y., Lim K.O., Rhee H.S. Predictive modeling of dental pain using neural network. *Stud. Health Technol. Inform.* 2009; 146: 745–746.
- Prados-Privado M., García Villalón J., Martínez-Martínez C.H. et al. Dental Caries Diagnosis and Detection Using Neural Networks: A Systematic Review. *J. Clin. Med.* 2020; 9 (11): 3579. <http://doi.org/10.3390/jcm9113579>
- Schwendicke F., Golla T., Dreher M., Krois J. Convolutional neural networks for dental image diagnostics: A scoping review. *J. Dent.* 2019; 91: 103226. <http://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.103226>
- Orhan K., Bayrakdar I.S., Ezhov M., Kravtsov A., Özyürek T. Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *Int. Endod. J.* 2020; 53 (5): 680–689. <http://doi.org/10.1111/iej.13265>
- Orhan K., Bilgir E., Bayrakdar I.S. et al. Evaluation of artificial intelligence for detecting impacted third molars on cone-beam computed tomography scans. *J. Stomatol. Oral. Maxillofac. Surg.* 2021; 122 (4): 333–337. <http://doi.org/10.1016/j.jormas.2020.12.006>
- Bayrakdar K.S., Orhan K., Bayrakdar I.S. et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Med. Imaging.* 2021; 21 (1): 86. <http://doi.org/10.1186/s12880-021-00618-z>
- Siddiqui N.R., Hodges S., Sharif M.O. Availability of orthodontic smartphone apps. *J. Orthod.* 2019; 46 (3): 235–241. <http://doi.org/10.1177/1465312519851183>
- Мураев А.А., Гусейнов Н.А., Цай П.А., Кибардин И.А., Буренчев Д.В., Иванов С.С., Оборотистов Н.Ю., Матюта М.А., Грачев Н.С., Ларин С.С. Искусственные нейронные сети в лучевой диагностике, в стоматологии и в челюстно-лицевой хирургии (обзор литературы). *Клиническая стоматология.* 2020; 3 (95): 72–80. http://doi.org/10.37988/1811-153X_2020_3_76
Muraev A.A., Guseynov N.A., Tsay P.A., Kibardin I.A., Burenchev D.V., Ivanov S.S., Oborotistov N.Yu., Matuta M.A., Grachev N.S., Larin S.S. Artificial neural networks in dental and maxillofacial radiology: a review. *Clinical Dentistry.* 2020; 3 (95): 72–80. (In Russian)
- Broadbent B. A new X-ray technique and its application to orthodontia. *Angle Orthod.* 1931; 1: 45–66.
- Wang C.W., Huang C.T., Hsieh M.C. et al. Evaluation and Comparison of Anatomical Landmark Detection Methods for Cephalometric X-Ray Images: A Grand Challenge.



- IEEE Trans. Med. Imaging.* 2015; 34 (9): 1890–1900. <http://doi.org/10.1109/TMI.2015.2412951>
29. Wang C.W., Huang C.T., Lee J.H. et al. A benchmark for comparison of dental radiography analysis algorithms. *Med. Image Anal.* 2016; 31: 63–76. <http://doi.org/10.1016/j.media.2016.02.004>
30. Alam M.K., Alfawzan A.A. Dental Characteristics of Different Types of Cleft and Non-cleft Individuals. *Front. Cell. Dev. Biol.* 2020; 8: 789. <http://doi.org/10.3389/fcell.2020.00789>
31. Yassir Y.A., Salman A.R., Nabbat S.A. The accuracy and reliability of WebCeph for cephalometric analysis. *J. Taibah. Univ. Med. Sci.* 2021; 17 (1): 57–66. <http://doi.org/10.1016/j.jtumed.2021.08.010>
32. Alqahtani H. Evaluation of an online website-based platform for cephalometric analysis. *J. Stomatol. Oral. Maxillofac. Surg.* 2020; 121 (1): 53–57. <http://doi.org/10.1016/j.jormas.2019.04.017>
33. Meriç P., Naoumova J. Web-based Fully Automated Cephalometric Analysis: Comparisons between App-aided, Computerized, and Manual Tracings. *Turk. J. Orthod.* 2020; 33 (3): 142–149. Published 2020 Aug 11. <http://doi.org/10.5152/TurkJOrthod.2020.20062>
34. Silva T.P., Hughes M.M., Menezes L.D.S. et al. Artificial intelligence-based cephalometric landmark annotation and measurements according to Arnett's analysis: can we trust a bot to do that? *Dentomaxillofac Radiol.* 2021; 20200548. <http://doi.org/10.1259/dmfr.20200548>
35. Mamta J., Poojita G., Ravinder K. et al. A review on cephalometric landmark detection techniques. *Biomed. Signal Processing Control.* 2021; 66: 102486. <http://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102486>
36. Rao G.K.L., Mokhtar N., Iskandar Y.H.P., Srinivasa A.C. Learning orthodontic cephalometry through augmented reality: A conceptual machine learning validation approach. 2018 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEITICS). 2018; 133–138. <http://doi.org/10.1109/ICEITICS.2018.8548939>
37. Sawchuk D., Alhadlaq A., Alkhadra T. et al. Comparison of two three-dimensional cephalometric analysis computer software. *J. Orthod. Sci.* 2014; 3 (4): 111–117. <http://doi.org/10.4103/2278-0203.143230>

Для корреспонденции*: Мокренко Марк Евгеньевич – 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6-504. Кафедра челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов”. Тел.: +7-950-101-03-00. E-mail: markmokrenko@yandex.ru

Мокренко Марк Евгеньевич – аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-9421-600X>. E-mail: markmokrenko@yandex.ru

Гусейнов Ниджат Айдын оглы – аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-7160-2023>. E-mail: Nid.gus@mail.ru

Аль Хаффар Жаклин – аспирант кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-9429-158X>. E-mail: jacqueline.alhaffar@gmail.com

Тутуров Николай Станиславович – канд. мед. наук, доцент кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов”, Москва. <https://orcid.org/0000-0001-8048-5703>. E-mail: ntuturov@mail.ru

Саркисян Мартирос Сергеевич – доктор мед. наук, доцент кафедры ортопедической стоматологии ФГАОУ ВО “Российский университет дружбы народов”, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-4132-9377>. E-mail: sarkisyan_ms@pfur.ru

Contact*: Mark E. Mokrenko – 6-504, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117198, Russian Federation. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, The Peoples Friendship University of Russia (RUDN University). Phone: +7-950-101-03-00. E-mail: markmokrenko@yandex.ru

Mark E. Mokrenko – graduate student of The Department of Oral and Maxillofacial Surgery, The Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-9421-600X>. E-mail: markmokrenko@yandex.ru

Guseynov Nidjat A.O. – graduate student of The Department of Oral and Maxillofacial Surgery, The Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-7160-2023>. E-mail: Nid.gus@mail.ru

Jacqueline Alhaffar – graduate student of The Department of Oral and Maxillofacial Surgery, The Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-9429-158X>. E-mail: jacqueline.alhaffar@gmail.com

Nikolay S. Tuturov – Cand. of Sci (Med.), Associate Professor of the Department of Pediatric Dentistry and Orthodontics, The Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0001-8048-5703>. E-mail: ntuturov@mail.ru

Martiros S. Sarkisyan – Doct. of Sci (Med.), assistant professor of the Department of Prosthetic Dentistry, The Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-4132-9377>. E-mail: sarkisyan_ms@pfur.ru