

DOI: 10.37988/1811-153X\_2020\_3\_72

А.А. Мураев<sup>1</sup>,

д.м.н., профессор кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии

Н.А. Гусейнов<sup>1</sup>,

ординатор кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии

П.А. Цай<sup>2</sup>,

студент

И.А. Кибардин<sup>2</sup>,

студент

Д.В. Буренчев<sup>3</sup>,

д.м.н., главный научный сотрудник

С.С. Иванов<sup>1</sup>,

ординатор кафедры челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии

Н.Ю. Оборотистов<sup>4</sup>,

к.м.н., ассистент кафедры ортодонтии

М.А. Матюта<sup>5</sup>,

аспирант кафедры стоматологии общей практики и детской стоматологии

Н.С. Грачев<sup>6</sup>,

д.м.н., зав. отделением онкологии и детской хирургии, руководитель группы хирургии головы и шеи и реконструктивно-пластической хирургии, зам. директора Института онкологии, радиологии и ядерной медицины

С.С. Ларин<sup>6</sup>,

к.б.н., зам. директора института молекулярной и экспериментальной медицины

<sup>1</sup> РУДН<sup>2</sup> МФТИ<sup>3</sup> Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ, Москва<sup>4</sup> МГМСУ им. А.И. Евдокимова<sup>5</sup> СГГМУ<sup>6</sup> Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева

## Искусственные нейронные сети в лучевой диагностике, в стоматологии и в челюстно-лицевой хирургии (обзор литературы)

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

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.

DOI: 10.37988/1811-153X\_2020\_3\_72

**Реферат.** Рентгенология — это огромная и наиболее интеллектуально емкая область медицины. Применение искусственного интеллекта (ИИ) пока далеко от полноценного анализа снимков, успешно решаются только базовые, рутинные задачи. В данной обзорной статье представлены современные возможности машинного зрения, основанного на искусственных нейронных сетях (ИНС), в лучевой диагностике, в частности в стоматологии и в челюстно-лицевой хирургии. Результат поиска статей по ключевым словам (от 12.04.2020) демонстрирует увеличение количества публикаций на порядок: с 58 статей в среднем в год в 2000—2015 гг. до 945 в 2019 г. Основное применение нейросети нашли в распознавании анатомических объектов на рентгеновских снимках: кортикального и губчатого слоя челюстных костей, канала нижней челюсти, верхнечелюстного синуса, зубов, корневых каналов; патологических образований и процессов: периапикальных воспалительных изменений, в том числе кист, опухолей, костной резорбции при пародонтите, переломов корней зубов и др. Современные нейросети обучаются и работают как с двухмерными снимками: ортопантограмма, телерентнограммы в прямой и боковой проекциях, изображения ультразвукового исследования, так и с трехмерными данными компьютерной и магниторезонансной томографии. Отдельное внимание уделено цефалометрическому анализу. В статье, кроме анализа теоретических изысканий, рассматриваются механизмы интеграции нейросети в лечебный процесс и оценка их реальной пользы для практикующих врачей, а также перспективы развития нейросетевых подходов. **Заключение.** Внедрение технологий машинного зрения на основе глубоких сверточных нейронных сетей для рентгенологической диагностики в стоматологии (и в медицине в целом) является перспективным направлением, позволяющим автоматизировать и ускорить обработку и распознавание исходных данных, и, возможно, уменьшить количество ошибок, связанных с человеческим фактором. Тем не менее сейчас ИНС не могут и не должны заменять узкоспециализированных врачей при постановке диагноза и составлении плана лечения, рекомендуется использовать их в качестве независимых экспертных систем.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, искусственная нейронная сеть, глубокое машинное обучение, рентгенология, конусно-лучевая компьютерная томография, цефалометрический анализ, ортодонтия, челюстно-лицевая хирургия, боковая телерентнограмма, фронтальная телерентнограмма

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Фонд «Сколково» и Фонд содействия инновациям.

А.А. Muraev<sup>1</sup>,

Grand PhD in Medical Sciences, professor of the Oral and maxillofacial surgery department

Н.А. Guseynov<sup>1</sup>,

resident of the Oral and maxillofacial surgery department

П.А. Tsay<sup>2</sup>,

student

## Artificial neural networks in dental and maxillofacial radiology: a review

FOR CITATION:

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 (Russia)*. — 2020; 3 (95): 72—80.

DOI: 10.37988/1811-153X\_2020\_3\_72

I.A. Kibardin<sup>2</sup>,  
student

D.V. Burenchev<sup>3</sup>,  
Grand PhD in Medical sciences, chief  
researcher

S.S. Ivanov<sup>1</sup>,  
resident of the Oral and maxillofacial surgery  
department

N.Yu. Oborotistov<sup>4</sup>,  
PhD in Medical sciences, assistant of the  
Orthodontics department

M.A. Matuta<sup>5</sup>,  
postgraduate student of the General and  
pediatric dentistry department

N.S. Grachev<sup>6</sup>,  
Grand PhD in Medical Sciences, Head of the  
Oncology and pediatric surgery department,  
general manager of the Head and neck  
surgery and reconstructive plastic surgery  
team, vice-director of the Oncology, radiology  
and nuclear medicine Institute

S.S. Larin<sup>6</sup>,  
PhD in Biology, vice-director of the  
of Molecular and experimental medicine  
Institute

<sup>1</sup> RUDN University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology,  
Dolgoprudny, Moscow region, Russia

<sup>3</sup> Center for Diagnostics and Telemedicine,  
Moscow, Russia

<sup>4</sup> Moscow State University of Medicine and  
Dentistry, Moscow, Russia

<sup>5</sup> Stavropol State Medical University, Stavropol,  
Russia

<sup>6</sup> Dmitry Rogachev National Medical Research  
Center of Pediatric Hematology, Oncology  
and Immunology, Moscow, Russia

**Abstract.** Radiology is a huge and most intellectually intensive field of medicine, so the use of artificial intelligence (AI) is still too far from the full analysis of images and successfully solved only basic, routine tasks. This review article presents modern possibilities of machine vision based on artificial neural networks (ANS) in radiation diagnostics, in particular in dentistry and maxillofacial surgery. The result of searching for articles by keywords (from 12.04.2020) shows an increase in the number of publications by an order of magnitude: from 58 articles per year on average in 2000—2015 to 945 in 2019. The main application of the neural network was found in the recognition of anatomical objects on X-rays: cortical and spongy layer of the jaw bones, the lower jaw canal, maxillary sinus, teeth, root canals; pathological formations and processes: periapical inflammatory changes, including cysts, tumors, bone resorption in periodontitis, fractures of the root of teeth, etc. The main application of the neural network is in the recognition of the anatomical objects on X-rays. Modern neural networks are trained and work with two-dimensional (2D) images: orthopantomogram, telerradiograms in forward and lateral projections, ultrasound images, and with three-dimensional (3D) data of computer tomography and magnetic resonance tomography. Special attention is paid to 2D and 3D cephalometric analysis. In addition to the analysis of theoretical research, the article also considers the mechanisms of neural network integration into the treatment process and assessment of their real benefits for practicing doctors, further prospects for the development of neural network approaches. **Conclusion.** Introduction of machine vision technologies on the basis of deep neural network convolution for radiological diagnostics in dentistry (and medicine in general) is a promising direction that allows to automate and speed up processing and recognition of initial data and, possibly, to reduce the number of errors associated with the human factor. However, at present, ANS cannot and should not replace highly specialized doctors when making a diagnosis and drawing up a treatment plan; it is recommended to use them as independent expert systems.

**Key words:** artificial intelligence, artificial neural network, deep learning, radiography, radiology, cone-beam computed tomography, cephalometric analysis, orthodontics, maxillofacial surgery, lateral ceph, frontal ceph.

**FUNDING:** ViSurgery LLC (the company-participant of innovative centre “Skolkovo”, Russia), Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE, Russia).

## ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект (ИИ) — это возможность компьютера имитировать разумное поведение человека для выполнения сложных задач, таких как принятие ситуационных решений, распознавание слов и изображений и т.п. Мы каждый день взаимодействуем с ИИ, точнее с его наиболее распространенной формой — искусственными нейронными сетями (ИНС), построенными на глубоком машинном обучении: навигационные системы в машинах, интернет-помощники Google, Siri (Apple), Алиса (Yandex), Маруся (Mail.ru) [1]. ИНС представляет собой математическую модель, а также ее программное или аппаратное воплощение, построенное

по принципу организации и функционирования биологических нейронных связей.

Современная медицина накопила огромный объем информации о пациентах и развитии заболеваний. Появилось множество методов диагностики и исследований — от анализа крови до генетических тестов, от ЭКГ и УЗИ до компьютерной томографии. Обучив ИНС на основе этих данных, мы получаем мощнейший инструмент, позволяющий лучше диагностировать злокачественные опухоли, заранее предсказать сердечную недостаточность, правильно анализировать рентгеновские снимки.

Основное применение ИИ в медицине сводится к 5 направлениям:

1. Автоматизированные системы распознавания медицинских изображений, в том числе рентгеновских снимков.
2. Системы распознавания неструктурированных медицинских записей на естественном языке.
3. Системы анализа и предсказания событий (определение риска возникновения заболеваний, прогнозирование течения болезней).
4. Системы автоматической классификации и сверки информации.
5. Автоматические боты для поддержки пациентов [2].

Рентгенология — огромная и наиболее интеллектуально емкая область медицины. Применение ИИ пока слишком далеко от полноценного анализа снимков, успешно решаются только базовые, рутинные задачи. Вместе с тем именно рентгенология является одной из наиболее подходящей сферой внедрения ИНС, так как все современные снимки, по сути, являются цифровым кодом, который легко анализируется программным продуктом и используется для ИНС и машинного обучения [3]. Для распознавания образов на изображениях наиболее успешно применяются сверточные нейронные сети. Впервые такая конфигурация была предложена Яном Лекуном в 1988 г. и представлена в публикации 1989 г. [4]. Распознавание лица сотовым телефоном — самый простой и понятный пример работы ИНС. На подобных принципах построены алгоритмы распознавания образов на рентгеновских снимках. Обучение ИНС заключается в предварительной разметке (аннотировании) специалистом различных изображений определенного объекта: например опухоли на томографических срезах. Далее ИНС «просматривает» аннотированные изображения, результатом чего становится определенная внутренняя организация нейронных слоев (веса). Такая обученная ИНС при последующем анализе компьютерной томографии способна находить характерные для опухоли графические паттерны и выявлять их, распознавая всю опухоль.

Значительный прогресс в распознавании изображений пришелся на 2011–2012 гг. — это связано с началом широкого использования графических процессоров NVidia, а в настоящее время и тензорных процессоров Google. Они позволили создавать сложные технологические архитектуры ИНС, обладающие высокой производительностью и позволяющие решать широкий спектр задач, не поддававшихся эффективному решению ранее. В 2015 г. исследователи из Microsoft [5] продемонстрировали, что обученная ими ИНС допустила меньше ошибок, чем человек при распознавании изображений на фотографиях: 4,94 против 5,1%.

Динамику внедрения ИНС в рентгенодиагностику можно оценить по научным публикациям в PubMed — крупнейшей библиографической базе статей по медицинским наукам, охватывающей около 75% мировых медицинских изданий. Результат поиска статей по ключевым словам («artificial intelligence» OR «artificial neural network» OR «deep learning» AND «radiology») демонстрирует увеличение количества публикаций на порядок — с 58,3 статей в среднем в год с 2000 по 2015 г. до 945 в 2019 г., или в 16 раз (рис. 1).

Рост числа публикаций свидетельствует как о научном потенциале метода, так и о его высокой практической значимости. Показательна работа [6], посвященная ранней диагностике рака легких по низкодозовой компьютерной томографии (КТ). Авторы обучили ИНС анализировать изображения текущих и ранее проведенных компьютерных томограмм пациентов и по их изменениям прогнозировать развитие рака легких. Построенная модель достигла очень высоких показателей (площадь под кривой при ROC-анализе составила 94,4%) и превзошла результаты оценки шестью врачами-рентгенологами, участвовавшими в исследовании. Когда ИНС анализировала только текущую томографию пациента, было получено на 11% меньше ложноположительных ответов и допущено на 5% меньше ошибок (ложноотрицательных ответов, т.е. выявила рак там, где его

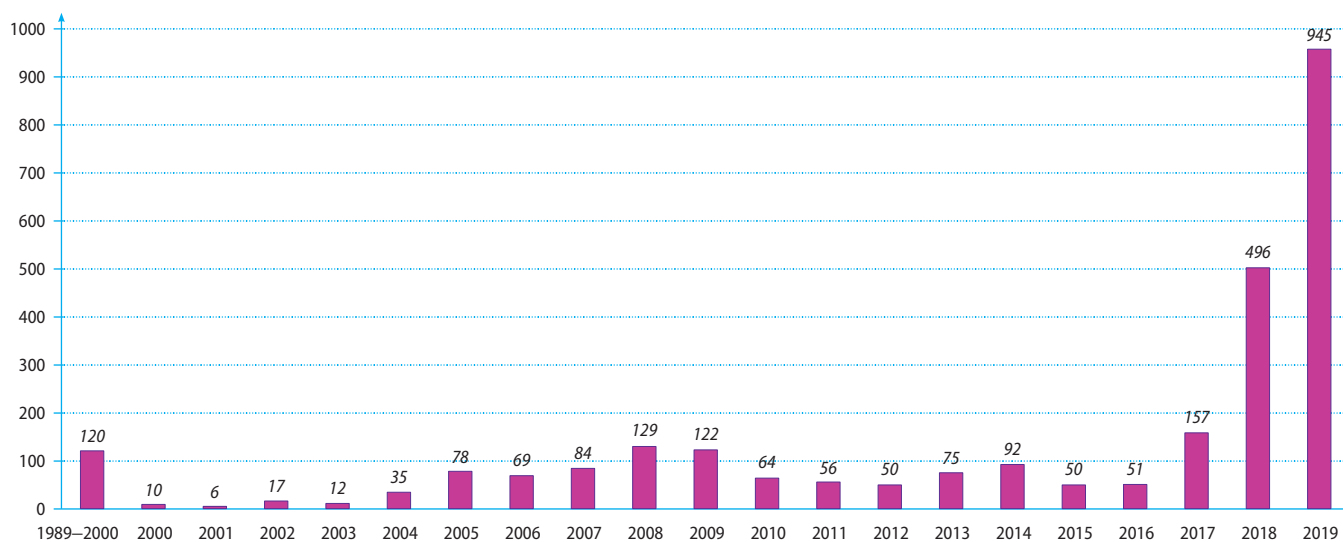


Рис. 1. Количество публикаций в PubMed с 1989 по 2020 г. по ключевым словам

не видели специалисты). В случаях, где были доступны текущие и ранее проанализированные томограммы пациентов, характеристики модели были на уровне врачей-рентгенологов. Практическая ценность данной работы заключается в готовом и высокоэффективном решении для скрининга рака легких во всем мире [6].

### **ИНС В РЕНТГЕНОДИАГНОСТИКЕ В СТОМАТОЛОГИИ И В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ХИРУРГИИ**

По данным поиска в PubMed (12.04.2020) с ключевыми словами «artificial intelligence» OR «artificial neural network» OR «deep learning» AND «dentistry» за все года было найдено 216, а с 01.01.2015 — 146 статей. При добавлении к поисковым словам дополнительного «radiology» — всего 40 статей. В российских медицинских базах данных НЭБ (elibrary.ru) и в электронном каталоге «Российская медицина» Центральной научной медицинской библиотеки (scsml.rssi.ru) представлены единичные публикации по рассматриваемой тематике [2, 7].

На сегодняшний день можно выделить следующие направления использования ИНС в стоматологической и челюстно-лицевой рентгенодиагностике:

1. Автоматическая сегментация нормальных анатомических образований.
2. Индикация патологических состояний:
  - a) выявление воспалительных изменений костной ткани;
  - b) диагностика опухолевых заболеваний;
  - c) диагностика различных заболеваний челюстно-лицевой области.
3. Повышение качества изображений, редуцирование шумов.
4. Цефалометрический анализ.

#### **Сегментация нормальных анатомических образований**

В рамках данного направления активно разрабатываются подходы по автоматическому выделению нормальных анатомических образований на снимках. Например, определение зубов мудрости и оценка возраста подростков по стадии развития зачатков зубов по ортопантомограмме [8, 9]. Продемонстрирована возможность автоматической сегментации зубов на ортопантомограммах [10, 11]. Полезная функция определения морфологии каналов зубов реализована Т. Hiraiwa и соавт. [12]. Автоматическое распознавание на оцифрованных изображениях канала нижней челюсти позволяет снизить вероятность ошибки и экономит время специалиста [13].

#### **Диагностика патологических состояний**

Возможности применения ИНС для диагностики продемонстрированы на примере эффективного выявления воспалительных изменений костной ткани челюстей, в частности периапикальных воспалительных очагов по данным конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) [14]. Показана возможность автоматического выделения кистозных образований челюстей по данным

ортопантомограмм) и КЛКТ [15, 16]. ИНС способны распознавать периапикальные воспалительные процессы на нижней челюсти по результатам компьютерного анализа ОПТГ [17], аналогично показано успешное выявление периапикальных процессов на рентгеновских снимках [18]. Важная клиническая задача быстрой автоматической диагностики переломов корней зубов по результатам анализа ОПТГ была решена еще в 2013 г. [19]. Автоматизированное компьютерное определение уровня резорбции костной ткани вокруг зубов при пародонтите в будущем позволит точнее и объективнее определять объем повреждения и степень тяжести процесса, проводить оценку стадии и эффективности лечения [18]. Уже описан опыт успешного применения ИНС для скрининга остеопороза по ортопантомограммам [20, 21]. Характерная рентгенологическая картина верхнечелюстного синусита может быть с легкостью выявлена в результате использования ИНС для анализа данных ОПТГ [22]. Описан успешный опыт диагностики синдрома Шегрена по ультрасонографии слюнных желез [23].

Отдельного внимания заслуживают методики фильтрации и обработки цифровых данных с использованием ИИ и нейронных сетей для повышения качества изображений, получаемых с использованием различных методов визуализации тканей и органов, в частности редуцирование шумов, удаление помех и артефактов на КЛКТ [24, 25].

Цефалометрический анализ может проводиться на двухмерных изображениях и в объеме. В результате происходит автоматическая расстановка цефалометрических точек ИНС [26—33].

Помимо отдельных публикаций, в недавних обзорах [25, 34, 35] более подробно рассматриваются успехи машинного обучения в рентгенодиагностике в стоматологии и в челюстно-лицевой хирургии.

### **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЦЕФАЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНС**

Цефалометрический анализ лицевого отдела черепа и мягких тканей лица широко используется в ортодонтии и в челюстно-лицевой хирургии, являясь одним из основных диагностических инструментов при постановке диагноза и выборе плана лечения [36—39]. Расстановка цефалометрических точек (ЦТ) и анализ боковых телерентгенограмм (ТРГ) занимает значительное время врача, в том числе из-за проекционных искажений и наложений анатомических структур на плоских снимках.

За последние 40 лет было предложено множество подходов для автоматической идентификации цефалометрических точек на основе обработки изображений и распознавания образов [29, 30—32, 40—49]. Чисто математические подходы, без использования ИНС, применяемые к обработке изображений, сталкивались с трудностями в достижении надежного и точного результата, были хуже ручного метода [49]. Прежде всего это связано с ограничениями и сложностями в одновременном учете локальных и глобальных геометрических сигналов [30].



**Таблица 1. Результаты автоматической трассировки цефалометрических точек ИНС на телерентгенограммах в боковой проекции**

Автор, год	Количество ЦТ, достигнутая точность работы ИНС
R. Leonardi и соавт., 2009 [32]	10 ЦТ, 0,59 мм
S.Ö. Arık и соавт., 2017 [50]	19 ЦТ, 1–2% или 2 мм
A.A. Мураев и соавт., 2018 [51]	62 ЦТ, 1,5–2 мм
F. Kunz и соавт., 2019 [28]	20 ЦТ, отсутствие статистических различий в точности позиционирования ЦТ и точности измерений между ИНС и врачами

Использование сверточных нейронных сетей для расстановки ЦТ позволило преодолеть указанные ограничения [28, 29, 40, 48, 50]. Ряд независимых научных команд продемонстрировали, что обученные нейросети способны достигать точности, приближенной к ручной разметке (табл. 1). Однако сравнение этих результатов между собой затрудняется тем, что в работах используются различные метрики и статистические методы обработки. Следует помнить, что ЦТ могут

иметь четкие анатомические ориентиры (положение этих ЦТ всегда легко определить на ТРГ, например N, S, B, Pr), сложные анатомические ориентиры (ЦТ имеют проекционные наложения анатомических структур, например Or, Ar, Ba, PNS) и нечеткие анатомические ориентиры (ЦТ имеют проекционные наложения или вообще невозможно определить их положение, например U6, L6, Fo, RO). Поэтому сравнение точности работы ИНС может зависеть от количества используемых ЦТ и от их качества.

Участниками научной группы в составе сотрудников РУДН, МФТИ и МГМСУ, резидента «Сколково» компании «Цифровые технологии в хирургии» разработан интерфейс ViSurgery (научные разработки велись при поддержке «Фонда содействия инновациям»), позволяющий автоматически размечать ТРГ в боковой и в прямой проекциях. В программу заложены 18 расчетов боковых ТРГ и 2 расчета фронтальных ТРГ. Результаты расчета в графическом и цифровом виде экспортируются в PDF-файл. Достигнутая точность расстановки ЦТ составляет  $1 \pm 0,5$  мм. Программный интерфейс ViSurgery представлен на рис. 2.

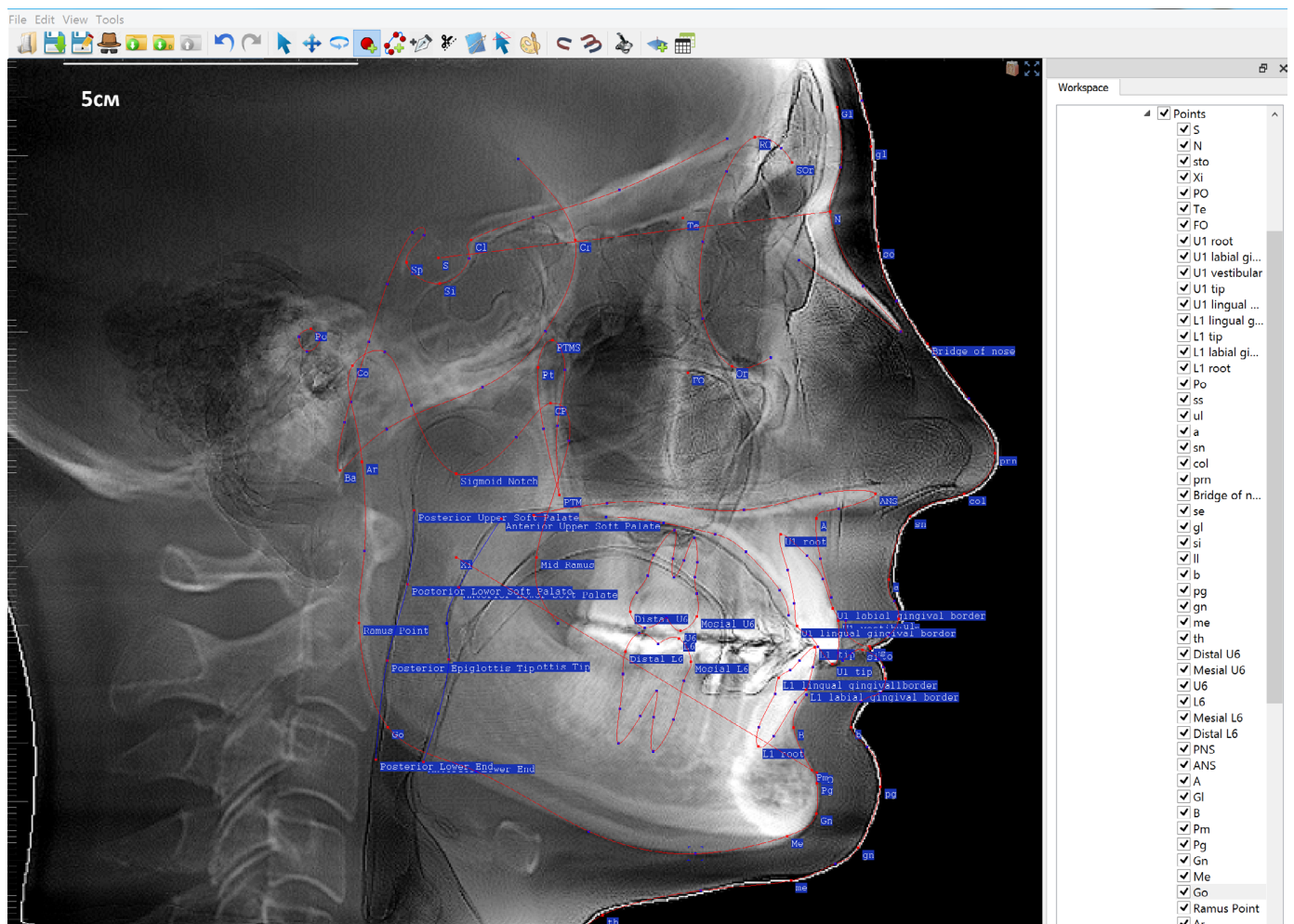


Рис. 2. Интерфейс программы ViSurgery. В центральной части расположено окно с телерентгенограммой в боковой проекции, размеченной цефалометрическими точками и анатомическими контурами. Справа на панели Workspace (рабочее пространство) расположен список точек. На верхней панели — инструменты для работы в программе

С появлением КЛКТ начал развиваться и трехмерный цефалометрический анализ. Расчеты в трехмерном пространстве основываются на точной идентификации ЦТ, что предотвращает геометрические искажения сложных черепных структур и позволяет оценивать параметры не только твердых и мягких тканей по отдельности, но и их взаимоотношение. Рядом авторов показано качественное отличие трехмерного антропометрического анализа от традиционных плоскостных методик: отсутствуют проекционные наложения правой и левой сторон, так как измерения проводятся на точках обеих сторон черепа, появляется возможность точной оценки асимметрии правой и левой половин лица и черепа, можно измерять абсолютные размеры, а не анатомические проекции [7, 52–54].

Автоматическая расстановка ЦТ на данных компьютерной томографии начиналась с эталонных моделей [47, 48, 55], а их эффективность была ограничена уникальными структурными вариациями разных людей. Это указывает на ограничения в работе со сложной трехмерной черепно-лицевой моделью и в ее преобразовании в четко определенную математическую формулу. По аналогии с успешной работой ИНС с 2D-телерентгенограммами решения, основывающиеся на ИНС, быстро превзошли традиционные математические методы как по точности, так и по стабильности и обобщающей способности моделей (табл. 2).

**Таблица 2. Результаты позиционирования цефалометрических точек ИНС по данным конусно-лучевой компьютерной томографии**

Автор, год	Достигнутая точность
A. Gupta и соавт., 2015 [46]	Средняя точность — 2,01 мм, 64,67% всех точек имели точность в пределах 0–2 мм. Максимальная средняя ошибка — 2,63 мм
S. Shahidi и соавт., 2014 [56]	63,57% точек имели среднюю ошибку 3 мм
M. Makram, H. Kamel, 2014 [47]	90% точек позиционировались в пределах 2 мм
M. Codari и соавт., 2017 [29]	1,99 мм
J. Montúfar и соавт., 2018 [48]	2,51±1,60 мм

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что точность позиционирования ЦТ в трехмерном пространстве обученной для этого ИНС вплотную приблизилось к аналогичным плоскостным задачам по ТРГ, и в ближайшее время можно ожидать качественно новых достижений в современной цефалометрии.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНС В КЛИНИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ**

На основе представленных данных можно с уверенностью сказать, что внедрение технологий на основе ИНС в медицину, в частности в рентген-диагностику, — это уже свершившийся факт. Дальнейшее развитие будет идти по пути повышения точности работы самих ИНС,

разработки программного обеспечения для интерпретации данных ИНС и расширения их сфер применения.

С 2015 г. основу всех современных систем машинного зрения составляют глубокие сверточные нейронные сети. Точность работы ИНС в основном зависит от объема и качества аннотирования обучающей выборки и мощности оборудования, на котором проводится обучение, поэтому развитием ИНС в рентгенодиагностике будут заниматься крупные рентгенологические центры, накопившие большой набор достоверных аннотированных данных. Конфигурации самих сетей также развиваются, адаптируясь под конкретные задачи.

Интеграция ИНС будет активно продолжаться и расширяться во все медицинские отрасли. Однако следует понимать, что обученная ИНС (для распознавания рентгеновских снимков или клинических фотографий) — это только алгоритм, его нельзя использовать в сыром виде. Для того чтобы ИНС стала эффективным клиническим инструментом в руках практикующего врача, а не только теоретической научной разработкой, параллельно должны разрабатываться программные комплексы, которые смогут интегрировать в себе ИНС и представлять врачам готовую диагностическую информацию. Основным требованием к такому программному обеспечению, кроме его диагностической ценности, является наличие интуитивно понятного интерфейса (от англ. user friendly interface). Удобство и эргономичность в работе — вот основные условия, при которых врачи будут пользоваться новыми технологиями. Самые лучшие и удобные, с точки зрения разработчиков и администрации, программы на практике могут усложнять работу и жизнь врачей. В статье «Почему врачи ненавидят компьютеры» об этом подробно описано [57]. Какой бы точной ни была работа ИНС, при отсутствии удобства в получении итоговой информации при минимально затраченном на это времени она не будет востребована. Оптимальным решением для этого является технология веб-интерфейса, когда пользователь получает информацию через браузер с любого мобильного или стационарного устройства и такое решение является кросс-платформенным, не затрагивает производительность устройства пользователя, а главное условие его работы — наличие доступа к сети Интернет.

На основе описанного алгоритма взаимодействия пользователя (врача или пациента) с ИНС будут сформированы отдельные направления телемедицины: удаленная автоматизированная диагностика и, возможно, распределение пациентов по нозологическому профилю к соответствующему специалисту.

Другим механизмом внедрения ИНС в работу врачей лучевой диагностики (УЗИ, МРТ, КТ) является их интеграция в программное обеспечение диагностического оборудования — аппаратов УЗИ, МРТ и КТ. Так как врачи уже знакомы с интерфейсом, на котором они работают, его дополнение функциями автоматической сегментации изображений нейронными сетями позволит оптимизировать их работу: прежде всего ускорить и опять же выполнить профилактику банальных ошибок, связанных с человеческим фактором.

Наряду с врачами-рентгенологами стоматологи и челюстно-лицевые хирурги активно пользуются программным обеспечением для диагностики и планирования консервативного и оперативного лечения. Примером такого решения является программа Dicagnocat [14]. Так как стоматология находится в авангарде внедрения новых медицинских технологий, можно прогнозировать, что именно в этой области мы раньше всего увидим внедрение в клиническую практику научных разработок, основанных на ИНС.

В заключение следует отметить, что врачи любых специальностей несут юридическую ответственность за постановку неправильного диагноза и эту ответственность невозможно переложить на ИИ. Примером является система Watson (IBM) — инструмент, который был внедрен во многих больницах США, чтобы дополнить способность медицинского работника составить план лечения. Однако был выявлен ряд системных недостатков в ее работе, прежде всего связанных с большим дополнительным количеством неструктурированных данных, которыми пользуются врачи, но которые не были заложены в обучение системы [58].

Тем не менее автоматизированные системы, функцией которых является распознавание образов на рентгеновских снимках в режиме помощи, в меньшей степени подвержены указанным проблемам. Качество работы ИНС в рентгенологии зависит от объема и точности аннотированной обучающей выборки. Поэтому, на наш взгляд, именно в рентгенологии возможно создание независимых экспертных систем в помощь врачам. В работе [59] приведены данные анализа 130 тыс. судебных актов и заключений: в 1188 случаях выявлены ошибки

в рентгенологической диагностике и, как следствие, неправильная постановка диагноза. С точки зрения качества оказания медицинской помощи, контроль врачей экспертной системой на основе ИИ позволит уменьшить количество ошибок на ранних этапах диагностики и вовремя направлять пациентов к узкопрофильным специалистам. В связи с тем, что ИНС пока не имеет экспертной диагностической точности либо она юридически не валидирована, окончательное решение в постановке диагноза и выборе плана лечения будет принимать специалист соответствующего профиля. В России любое программное обеспечение, которое внедряется в практическое здравоохранение, должно пройти регистрацию изделия медицинского назначения (выписка из протокола № 3 заседания Комиссии по выдаче заключений, связанных с обращением медицинских изделий от 28.01.2020).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение технологий машинного зрения на основе глубоких сверточных нейронных сетей для рентгенологической диагностики в стоматологии (и медицине в целом) является перспективным направлением, позволяющим автоматизировать и ускорить обработку и распознавание исходных данных, а возможно, уменьшить количество ошибок, связанных с человеческим фактором. Тем не менее в настоящее время ИНС не могут и не должны заменять узкоспециализированных врачей при постановке диагноза и составлении плана лечения, их рекомендуется использовать в качестве независимых экспертных систем.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. **Ненашева Е.А., Ненашев С.С.** Искусственный интеллект — прогнозы на 2019 год. — *Информационные технологии. Проблемы и решения.* — 2019; 1 (6): 71—4 [Nenashева E.A., Nenashev S.S. Artificial intelligence — forecasts for 2019. — *Information Technology. Problems And Solutions.* — 2019; 1 (6): 71—4 (In Russ.)]. eLIBRARY ID: 38952535
2. **Гусев А.В.** Перспективы нейронных сетей и глубокого машинного обучения в создании решений для здравоохранения. — *Врач и информационные технологии.* — 2017; 3: 92—105 [Gusev A.V. Prospects for neural networks and deep machine learning in creating health solutions. — *Information Technologies for the Physician.* — 2017; 3: 92—105 (In Russ.)]. eLIBRARY ID: 30021267
3. **Leite A.F., de Faria Vasconcelos K., Willems H., Jacobs R.** Radiomics and machine learning in oral healthcare. — *Proteomics Clin Appl.* — 2020; 14 (3): e1900040. PMID: 31950592
4. **LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard R.E., Jackel L.D.** Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. — *Neural Computation.* — 1989; 1 (4): 541—51. DOI: 10.1162/neco.1989.1.4.541
5. **He K., Zhang X., Ren S., Sun J.** Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification. — *Proceedings of the 015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV).* — Santiago, 2015. — Pp. 1026—1034. DOI: 10.1109/ICCV.2015.123.
6. **Ardila D., Kiraly A.P., Bharadwaj S., Choi B., Reicher J.J., Peng L., Tse D., Etemadi M., Ye W., Corrado G., Naidich D.P., Shetty S.** End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography. — *Nat Med.* — 2019; 25 (6): 954—61. PMID: 31110349
7. **Семенов М.Г., Кудрявцева О.А., Стеценко А., Филиппова А.** Современные методики цефалометрического анализа при планировании костно-реконструктивных операций на лицевом отделе черепа в растущем организме. — *Институт стоматологии.* — 2015; 1 (66): 48—51 [Semenov M.G., Kudryavceva O.A., Stetsenko A.G., Filippova A.V. modern methods of craniometrical analysis in reconstructive surgery planning on the facial skull in the growing organism. — *The Dental Institute.* — 2015; 1 (66): 48—51]. eLIBRARY ID: 23236729
8. **Banar N., Bertels J., Laurent F., Boedi R.M., De Tobel J., Thevissen P., Vandermeulen D.** Towards fully automated third molar development staging in panoramic radiographs. — *Int J Legal Med.* — 2020; 134 (5): 1831—1841. PMID: 32239317



9. De Tobel J., Radesh P., Vandermeulen D., Thevissen P.W. An automated technique to stage lower third molar development on panoramic radiographs for age estimation: a pilot study. — *J Forensic Odontostomatol.* — 2017; 35 (2): 42–54. PMID: 29384736
10. Lee J.-H., Han S.-S., Kim Y.H., Lee C., Kim I. Application of a fully deep convolutional neural network to the automation of tooth segmentation on panoramic radiographs. — *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* — 2020; 129 (6): 635–42. PMID: 31992524
11. Miki Y., Muramatsu C., Hayashi T., Zhou X., Hara T., Katsumata A., Fujita H. Classification of teeth in cone-beam CT using deep convolutional neural network. — *Comput Biol Med.* — 2017; 80: 24–9. PMID: 27889430
12. Hiraiwa T., Arijii Y., Fukuda M., Kise Y., Nakata K., Katsumata A., Fujita H., Arijii E. A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. — *Dentomaxillofac Radiol.* — 2019; 48 (3): 20180218. PMID: 30379570
13. Kwak G.H., Kwak E.-J., Song J.M., Park H.R., Jung Y.-H., Cho B.-H., Hui P., Hwang J.J. Automatic mandibular canal detection using a deep convolutional neural network. — *Sci Rep.* — 2020; 10 (1): 5711. PMID: 32235882
14. 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): 680–9. PMID: 31922612
15. Lee J.-H., Kim D.-H., Jeong S.-N. Diagnosis of cystic lesions using panoramic and cone beam computed tomographic images based on deep learning neural network. — *Oral Dis.* — 2020; 26 (1): 152–8. PMID: 31677205
16. Abdolali F., Zoroofi R.A., Otake Y., Sato Y. Automated classification of maxillofacial cysts in cone beam CT images using contourlet transformation and Spherical Harmonics. — *Comput Methods Programs Biomed.* — 2017; 139: 197–207. PMID: 28187891
17. Arijii Y., Yanashita Y., Kutsuna S., Muramatsu C., Fukuda M., Kise Y., Nozawa M., Kuwada C., Fujita H., Katsumata A., Arijii E. Automatic detection and classification of radiolucent lesions in the mandible on panoramic radiographs using a deep learning object detection technique. — *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* — 2019; 128 (4): 424–430. PMID: 31320299
18. Krois J., Ekert T., Meinhold L., Golla T., Kharbot B., Wittemeier A., Dörfer C., Schwendicke F. Deep Learning for the Radiographic Detection of Periodontal Bone Loss. — *Sci Rep.* — 2019; 9 (1): 8495. PMID: 31186466
19. Kositbowornchai S., Plermkamon S., Tangkosol T. Performance of an artificial neural network for vertical root fracture detection: an ex vivo study. — *Dent Traumatol.* — 2013; 29 (2): 151–5. PMID: 22613067
20. Lee K.-S., Jung S.-K., Ryu J.-J., Shin S.-W., Choi J. Evaluation of transfer learning with deep convolutional neural networks for screening osteoporosis in dental panoramic radiographs. — *J Clin Med.* — 2020; 9 (2): 392. PMID: 32024114
21. Chu P., Bo C., Liang X., Yang J., Megalooikonomou V., Yang F., Huang B., Li X., Ling H. Using Octuplet Siamese Network For Osteoporosis Analysis On Dental Panoramic Radiographs. — *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* — 2018; 2018: 2579–82. PMID: 30440935
22. Murata M., Arijii Y., Ohashi Y., Kawai T., Fukuda M., Funakoshi T., Kise Y., Nozawa M., Katsumata A., Fujita H., Arijii E. Deep-learning classification using convolutional neural network for evaluation of maxillary sinusitis on panoramic radiography. — *Oral Radiol.* — 2019; 35 (3): 301–7. PMID: 30539342
23. Kise Y., Shimizu M., Ikeda H., Fujii T., Kuwada C., Nishiyama M., Funakoshi T., Arijii Y., Fujita H., Katsumata A., Yoshiura K., Arijii E. Usefulness of a deep learning system for diagnosing Sjögren's syndrome using ultrasonography images. — *Dentomaxillofac Radiol.* — 2020; 49 (3): 20190348. PMID: 31804146
24. Sumida I., Magome T., Kitamori H., Das I.J., Yamaguchi H., Kizaki H., Aboshi K., Yamashita K., Yamada Y., Seo Y., Isohashi F., Ogawa K. Deep convolutional neural network for reduction of contrast-enhanced region on CT images. — *J Radiat Res.* — 2019; 60 (5): 586–594. PMID: 31125068
25. Hu Z., Jiang C., Sun F., Zhang Q., Ge Y., Yang Y., Liu X., Zheng H., Liang D. Artifact correction in low-dose dental CT imaging using Wasserstein generative adversarial networks. — *Med Phys.* — 2019; 46 (4): 1686–1696. PMID: 30697765
26. Dot G., Rafflenbeul F., Arbotta M., Gajny L., Rouch P., Schouman T. Accuracy and reliability of automatic three-dimensional cephalometric landmarking. — *Int J Oral Maxillofac Surg.* — 2020; S0901–5027 (20)30083–7. PMID: 32169306
27. Yun H.S., Jang T.J., Lee S.M., Lee S.-H., Seo J.K. Learning-based local-to-global landmark annotation for automatic 3D cephalometry. — *hys Med Biol.* — 2020; 65 (8): 085018. PMID: 32101805
28. Kunz F., Stellzig-Eisenhauer A., Zeman F., Boldt J. Artificial intelligence in orthodontics : Evaluation of a fully automated cephalometric analysis using a customized convolutional neural network. — *J Orofac Orthop.* — 2020; 81 (1): 52–68. PMID: 31853586
29. Codari M., Caffini M., Tartaglia G.M., Sforza C., Baselli G. Computer-aided cephalometric landmark annotation for CBCT data. — *Int J Comput Assist Radiol Surg.* — 2017; 12 (1): 113–121. PMID: 27358080
30. Leonardi R., Giordano D., Maiorana F., Spampinato C. Automatic cephalometric analysis. — *Angle Orthod.* — 2008; 78 (1): 145–51. PMID: 18193970
31. Lindner C., Wang C.-W., Huang C.-T., Li C.-H., Chang S.-W., Cootes T.F. Fully automatic system for accurate localisation and analysis of cephalometric landmarks in lateral cephalograms. — *Sci Rep.* — 2016; 6: 33581. PMID: 27645567
32. Leonardi R., Giordano D., Maiorana F. An evaluation of cellular neural networks for the automatic identification of cephalometric landmarks on digital images. — *J Biomed Biotechnol.* — 2009; 2009: 717102. PMID: 19753320
33. Sommer T., Ciesielski R., Erbersdobler J., Orthuber W., Fischer-Brandies H. Precision of cephalometric analysis via fully and semiautomatic evaluation of digital lateral cephalograms. — *Dentomaxillofac Radiol.* — 2009; 38 (6): 401–6. PMID: 19700534
34. Hung K., Montalvao C., Tanaka R., Kawai T., Bornstein M.M. The use and performance of artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: A systematic review. — *Dentomaxillofac Radiol.* — 2020; 49 (1): 20190107. PMID: 31386555
35. Chen Y.-W., Stanley K., Att W. Artificial intelligence in dentistry: current applications and future perspectives. — *Quintessence Int.* — 2020; 51 (3): 248–57. PMID: 32020135
36. Жулев Е.Н., Богатова Е.А. Методика изучения пространственной ориентации шарнирной оси при ортогнатическом прикусе на основе компьютерной томографии височно-нижнечелюстного сустава. — *Клиническая стоматология.* — 2013; 1 (65): 70–3 [Zhulev E.N., Pavlova E.P. Methods of study of three-dimensional orientation of mandibular axis reporting to the orthognathic occlusion based on the computer tomography (CT)



- of temporomandibular joint (TMJ). — *Clinical Dentistry (Russia)*. — 2013; 1 (65): 70—3 (In Russ.)). eLIBRARY ID: 22473211
- 37. Иванов С.Ю., Короткова Н.Л., Поляма Л.В., Ямуркова Н.Ф., Мураев А.А., Фомин М.Ю., Дымников А.Б.** Комплексный подход — залог успеха в лечении пациентов с врожденными деформациями челюстей. — *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. — 2013; 1: 21—7  
[Ivanov S.Yu., Korotkova N.L., Polma L.V., Yamurkova N.F., Muraev A.A., Fomin M.Yu., Dymnikov A.B. Comprehensive approach — the formula for success in the treatment of patients with congenital mandibular deformation. — *Plastic Surgery and Aesthetic Medicine*. — 2013; 1: 21—7 (In Russ.)].
- 38. Шадлинская Р.В., Гасимова З.В., Гасымов О.Ф.** Сравнительная характеристика челюстно-лицевых параметров пациентов с большой β-талассемией и дистальной окклюзией. — *Клиническая стоматология*. — 2019; 1 (89): 46—50  
[Shadlinskaya R.V., Gasymova Z.V., Gasymov O.F. Comparative characteristics of the maxillofacial parameters of patients with β-thalassemia major and distal occlusion. — *Clinical Dentistry (Russia)*. — 2019; 1 (89): 46—50 (In Russ.)]. eLIBRARY ID: 37128728
- 39. Иванов С.Ю., Короткова Н.Л., Мураев А.А., Сафьянова Е.В., Быковская Т.В.** Оценка эффективности лечения врожденных скелетных аномалий зубочелюстной системы. — *Современные проблемы науки и образования*. — 2017; 5: 208  
[Ivanov S.Yu., Korotkova N.L., Muraev A.A., Safyanova E.V., Bykovskaya T.V. Evaluation of the effectiveness of a new surgical method for the treatment of congenital skeletal anomalies in the dentoalveolar system. — *Modern problems of science and education*. — 2017; 5: 208 (In Russ.)]. eLIBRARY ID: 30458011
- 40. Neelapu B.C., Kharbanda O.P., Sardana V., Gupta A., Vasamsetti S., Balachandran R., Sardana H.K.** Automatic localization of three-dimensional cephalometric landmarks on CBCT images by extracting symmetry features of the skull. — *Dentomaxillofac Radiol.* — 2018; 47 (2): 20170054. PMID: 28845693
- 41. Grau V., Alcañiz M., Juan M.C., Monserrat C., Knoll C.** Automatic localization of cephalometric Landmarks. — *J Biomed Inform.* — 2001; 34 (3): 146—56. PMID: 11723697
- 42. Hutton T.J., Cunningham S., Hammond P.** An evaluation of active shape models for the automatic identification of cephalometric landmarks. — *Eur J Orthod.* — 2000; 22 (5): 499—508. PMID: 11105406
- 43. Rudolph D.J., Sinclair P.M., Coggins J.M.** Automatic computerized radiographic identification of cephalometric landmarks. — *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* — 1998; 113 (2): 173—9. PMID: 9484208
- 44. Vucinić P., Trpovski Z., Šćepan I.** Automatic landmarking of cephalograms using active appearance models. — *Eur J Orthod.* — 2010; 32 (3): 233—41. PMID: 20203126
- 45. Gupta A., Kharbanda O.P., Sardana V., Balachandran R., Sardana H.K.** Accuracy of 3D cephalometric measurements based on an automatic knowledge-based landmark detection algorithm. — *Int J Comput Assist Radiol Surg.* — 2016; 11 (7): 1297—309. PMID: 26704370
- 46. Gupta A., Kharbanda O.P., Sardana V., Balachandran R., Sardana H.K.** A knowledge-based algorithm for automatic detection of cephalometric landmarks on CBCT images. — *Int J Comput Assist Radiol Surg.* — 2015; 10 (11): 1737—52. PMID: 25847662
- 47. Makram M., Kamel H.** Reeb graph for automatic 3D cephalometry. — *International Journal of Image Processing*. — 2014; 8 (2): 17—29. <https://www.researchgate.net/publication/307905310>
- 48. Montúfar J., Romero M., Scougall-Vilchis R.J.** Hybrid approach for automatic cephalometric landmark annotation on cone-beam computed tomography volumes. — *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* — 2018; 154 (1): 140—50. PMID: 29957312
- 49. Rueda S., Alcañiz M.** An approach for the automatic cephalometric landmark detection using mathematical morphology and active appearance models. — *Med Image Comput Comput Assist Interv.* — 2006; 9 (Pt 1): 159—66. PMID: 17354886
- 50. Arik S.Ö., Ibragimov B., Xing L.** Fully automated quantitative cephalometry using convolutional neural networks. — *J Med Imaging (Bellingham)*. — 2017; 4 (1): 014501. PMID: 28097213
- 51. Мураев А.А., Кибардин И.А., Оборотилов Н.Ю., Иванов С.С., Иванов С.Ю., Персин Л.С.** Использование нейросетевых алгоритмов для автоматизированной расстановки цефалометрических точек на телерентгенограммах головы в боковой проекции. — *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. — 2018; 4: 16—22  
[Muraev A.A., Kibardin I.A., Oborotistov N.Yu., Ivanov S.S., Persin L.S. Use of neural network algorithms for the automated arrangement of cephalometric markers on lateral cefalograms. — *Russian Electronic Journal of Radiology*. — 2018; 4: 16—22 (In Russ.)]. eLIBRARY ID: 36766125
- 52. Lin H.-H., Chuang Y.-F., Weng J.-L., Lo L.-J.** Comparative validity and reproducibility study of various landmark-oriented reference planes in 3-dimensional computed tomographic analysis for patients receiving orthognathic surgery. — *PLoS One*. — 2015; 10 (2): e0117604. PMID: 25668209
- 53. Vlijmen O.J.C., Maal T.J.J., Bergé S.J., Bronkhorst E.M., Katsaros C., Kuijpers-Jagtman A.M.** A comparison between two-dimensional and three-dimensional cephalometry on frontal radiographs and on cone beam computed tomography scans of human skulls. — *Eur J Oral Sci.* — 2009; 117 (3): 300—5. PMID: 19583759
- 54. Farronato G., Garagiola U., Dominici A., Periti G., de Nardi S., Carletti V., Farronato D.** “Ten-point” 3D cephalometric analysis using low-dosage cone beam computed tomography. — *Prog Orthod.* — 2010; 11 (1): 2—12. PMID: 20529623
- 55. Codari M., Caffini M., Tartaglia G.M., Sforza C., Basselli G.** Computer-aided cephalometric landmark annotation for CBCT data. — *Int J Comput Assist Radiol Surg.* — 2017; 12 (1): 113—121. PMID: 27358080
- 56. Shahidi S., Bahrampour E., Soltanimehr E., Zamani A., Oshagh M., Moattari M., Mehdizadeh A.** The accuracy of a designed software for automated localization of craniofacial landmarks on CBCT images. — *BMC Med Imaging*. — 2014; 14: 32. PMID: 25223399
- 57. Gawande A.** Why Doctors Hate Their Computers. — *The New Yorker*. — 2018; Nov, 12. <https://www.newyorker.com/magazine/2018/11/12/why-doctors-hate-their-computers>
- 58.** Network C.G.A.R. Comprehensive molecular characterization of urothelial bladder carcinoma. — *Nature*. — 2014; 507 (7492): 315—22. PMID: 24476821
- 59. Штарберг А.И., Кулеша Н.В., Бокин А.Н., Смирнова Е.А., Поляков Д.С.** Анализ ошибок при лучевой диагностике в судебно-медицинской практике. — В сб. матер. конф. «Судебная медицина: вопросы, проблемы, экспертная практика». — Новосибирск, 2018. — С. 12—16  
[Shtarberg A.I., Kulesha N.V., Bokin A.N., Smirnova E.A., Polyakov D.S. Analysis of mistakes in X-ray diagnosis in forensic medicine. — Proceedings of the “Forensic medicine: questions, problems, expert practice”. — Novosibirsk, 2018. — P. 12—16 (In Russ.)]. eLIBRARY ID: 35075147