

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-4-13-26

УДК 616.314-089.23

## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРТОДОНТИИ (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

Иванов А. Е., Брагин А. В., Лебедев А. В., Куратова Л. М., Куратов И. А., Биктимиров А. С.

Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия

### Аннотация

**Актуальность.** Использование искусственного интеллекта (ИИ) в ортодонтии стало важным технологическим достижением в ортодонтии. Нейросетевые алгоритмы успешно автоматизируют комплексную диагностику, эффективно сегментируют костные структуры, прогнозируют результаты лечения. В ортогнатической хирургии ИИ не только определяет показания к операциям, но и предоставляет точное их 3D-планирование. Визуализация результатов формирует новую парадигму взаимодействия с пациентами.

**Предмет.** Предметом исследования являются алгоритмы искусственного интеллекта для автоматизации диагностики, планирования ортодонтического лечения и прогнозирования его результатов.

**Цель.** Провести анализ литературы, посвященной применению технологий искусственного интеллекта в ортодонтической практике, для определения ключевых векторов цифровой трансформации.

**Материалы и методы.** Проведен обзор литературы с 2019 по 2025 гг., посвященной применению искусственного интеллекта в ортодонтии на основе анализа баз данных eLIBRARY, Scopus, Google Scholar, PubMed/MEDLINE, ResearchGate и MDPI. В результате анализа было отобрано и детально изучено 110 научных исследований.

**Результаты.** Внедрение нейросетевых моделей обеспечило заметный прогресс в цифровой трансформации ортодонтии. ИИ помогает определять и классифицировать зубочелюстные аномалии по фотографиям, устанавливать стадии скелетного возраста, проводить комплексную диагностику включая выявление причин аномалий, цефалометрический анализ, 3D-моделирование, оценку состояния височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС). Эти системы оптимизируют работу клиницистов: ускоряют анализ данных, предоставляют «второе мнение» в сложных случаях, минимизируют диагностические ошибки и создают наглядные результаты лечения.

### Выводы.

1. Современные технологии открывают новые возможности для повышения качества оказания ортодонтической помощи.
2. Однако для успешной интеграции ИИ необходимо решить системные проблемы: улучшение качества входных данных, предотвращение переобучения моделей и проведение полноценной клинической валидации алгоритмов.
3. На текущем этапе происходит переход от экспериментальных разработок к практическому применению, где ведущая роль сохраняется за врачом, а ИИ служит инструментом поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, машинное обучение, нейросети, ортодонтия, ортодонтическое лечение, автоматизация

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Александр Евгеньевич ИВАНОВ ORCID ID 0009-0000-8922-338X

ассистент кафедры ортопедической стоматологии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия  
aleksandr-9001@bk.ru

Александр Витальевич БРАГИН ORCID ID 0000-0002-8019-1075

д.м.н., профессор, заведующий кафедрой ортопедической стоматологии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия  
bragin-1963@yandex.ru

Алексей Валерьевич ЛЕБЕДЕВ ORCID ID 0000-0002-1251-6819

к.м.н., доцент кафедры ортопедической стоматологии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия  
dralexlebedev@mail.ru

Луиза Миниакиевна КУРАТОВА ORCID ID 0000-0002-5791-583X

к.м.н., доцент кафедры ортопедической стоматологии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия  
luizonchik@mail.ru

Илья Александрович КУРАТОВ ORCID ID 0000-0002-2469-8103

к.м.н., доцент кафедры ортопедической стоматологии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия  
alliance-med@mail.ru

Айдар Сантович БИКТИМИРОВ ORCID ID 0009-0002-5750-8510

ассистент кафедры ортопедической стоматологии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, Россия  
doc.biktimirov@yandex.ru

Адрес для переписки: Александр Евгеньевич ИВАНОВ

625014, г. Тюмень, ул. Казачьи Луга, д. 10

+7 (912) 381-36-14

aleksandr-9001@bk.ru

### Образец цитирования:

Иванов А. Е., Брагин А. В., Лебедев А. В., Куратова Л. М., Куратов И. А., Биктимиров А. С.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРТОДОНТИИ (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР). Проблемы стоматологии. 2025; 4: 13-26.

© Иванов А. Е. и др., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-4-13-26

Поступила 01.12.2025. Принята к печати 28.12.2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-4-13-26

## DIGITAL TRANSFORMATION IN ORTHODONTICS (LITERATURE REVIEW)

Ivanov A.E., Bragin A.V., Lebedev A.V., Kuratova L.M., Kuratov I.A., Biktimirov A.S.

*Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia*

### Abstract

**Relevance.** Artificial intelligence (AI) has become a key technological advancement in orthodontics. Neural network algorithms successfully automate comprehensive diagnostics, effectively segment bone structures, and predict treatment outcomes based on individual patient characteristics. In orthognathic surgery, AI not only determines the indications for surgery but also provides precise 3D surgical planning. The visualization of treatment outcomes is forging a new paradigm for doctor-patient communication.

**Subject.** The subject of this research is artificial intelligence algorithms for the automation of diagnosis, orthodontic treatment planning, and the prediction of its results.

**Aim.** To conduct an analysis of the literature dedicated to the application of artificial intelligence technologies in orthodontic practice, in order to identify the key vectors of the digital transformation in this field of dentistry.

**Materials and Methods.** A literature review from 2019 to 2025 on the application of artificial intelligence in orthodontics was conducted based on an analysis of the eLIBRARY, Scopus, Google Scholar, PubMed/MEDLINE, and MDPI databases. As a result of the analysis, 110 scientific studies were selected and examined in detail.

**Results.** To date, the digital transformation of orthodontics has demonstrated significant progress through the implementation of neural network models. AI assists in identifying and classifying dentofacial anomalies from photographs, determining skeletal maturity stages, and performing comprehensive diagnosis, including identifying the causes of anomalies, cephalometric analysis, 3D modeling, assessment of temporomandibular joint (TMJ) condition, and facial scanning. These systems optimize clinicians' work: they speed up data analysis, provide a "second opinion" in complex cases, minimize diagnostic errors, and create clear visualizations of potential treatment outcomes.

### Conclusions

1. Modern technologies open up new possibilities for improving the quality of orthodontic care.
2. However, for the successful integration of AI, systemic challenges must be addressed: improving the quality of input data, preventing model overfitting, and conducting comprehensive clinical validation of the algorithms.
3. At the current stage, the field is transitioning from experimental developments to practical application, where the leading role remains with the clinician, and AI serves as a decision-support tool.

**Keywords:** *artificial intelligence, machine learning, neural networks, orthodontics, orthodontic treatment, automation*

The authors declare no conflict of interest

**Alexander E. IVANOV** ORCID ID 0009-0000-8922-338X

Assistant, Department of Prosthodontics, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia  
aleksandr-9001@bk.ru

**Alexander V. BRAGIN** ORCID ID 0000-0002-8019-1075

Grand PhD in Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Prosthodontics, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia  
bragin-1963@yandex.ru

**Alexey V. LEBEDEV** ORCID ID 0000-0002-1251-6819

PhD in Medical Sciences, Associate Professor, Department of Prosthodontics, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia  
dralexlebedev@mail.ru

**Luiza M. KURATOVA** ORCID ID 0000-0002-5791-583X

PhD in Medical Sciences, Associate Professor, Department of Prosthodontics, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia  
luizonchik@mail.ru

**Ilya A. KURATOV** ORCID ID 0000-0002-2469-8103

PhD in Medical Sciences, Associate Professor, Department of Prosthodontics, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia  
alliance-med@mail.ru

**Aidar S. BIKTIMIROV** ORCID ID 0009-0002-5750-8510

Assistant of the Department of Prosthodontics, Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia  
doc.biktimirov@yandex.ru

**Correspondence address: Alexander E. IVANOV**

10 Kazach'i Luga St., Tyumen, 625014, Russia  
+7 (912) 381-36-14  
aleksandr-9001@bk.ru

### For citation:

Ivanov A.E., Bragin A.V., Lebedev A.V., Kuratova L.M., Kuratov I.A., Biktimirov A.S.

DIGITAL TRANSFORMATION IN ORTHODONTICS (LITERATURE REVIEW). *Actual problems in dentistry*. 2025; 43: 13-26. (In Russ.)

© Ivanov A.E. et al., 2025

DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-4-13-26

Received 01.12.2025. Accepted 28.12.2025

## Введение

Искусственный интеллект (ИИ) представляет собой раздел компьютерных технологий, основная задача которого заключается в создании вычислительных систем и программных решений. Эти системы должны обладать способностью воспринимать входные данные, анализировать их с помощью алгоритмов и преобразовывать полученную информацию в интеллектуальные действия, имитирующие человеческое мышление [16]. Искусственный интеллект как научное направление характеризуется обширностью тематики и объединяет ряд смежных областей, таких как логический вывод, обработка естественного языка, планирование и машинное обучение (МО). В настоящее время машинное обучение выступает в качестве ключевого инструмента для внедрения технологий ИИ в медицину, включая стоматологию [33].

Использование технологии глубокого обучения стало настоящим прорывом в ортодонтии, предоставив принципиально новые возможности для повышения точности диагностики, более эффективного планирования ортодонтического лечения и прогнозирования его результатов [12]. За последние несколько лет ортодонтическая практика успешно внедрила эти технологии, что позволило достичь ряда улучшений: уменьшить расходы, повысить производительность труда и сократить число ошибок [98].

**Актуальность.** Цифровая трансформация ортодонтической практики за последние десятилетия стала ключевым фактором прогресса в данной отрасли. Переход от аналоговых методов к цифровым рабочим процессам, таким как внутриротовое сканирование, 3D-визуализация и автоматическое планирование лечения, радикально меняет стандарты диагностики, повышает точность и предсказуемость результатов [90].

Особую актуальность в последние годы придает стремительный рост числа разработок, основанных на искусственном интеллекте (ИИ) и нейросетевых моделях [6]. Их внедрение свидетельствует о переходе от этапа «цифровизации» (то есть элементарного перевода данных в цифровой формат) к этапу «интеллектуализации» в сфере ортодонтической помощи. При этом важно понимать, что ИИ служит лишь вспомогательным инструментом и не заменяет клиническое мышление врача [96].

Цифровая ортодонтия стремится повысить точность и эффективность автоматизированного анализа цефалометрических данных [34]. Применение искусственного интеллекта в позиционировании цефалометрических точек (ЦТ) продемонстрировало высокую точность в диапазоне 88–95 % при анализе 500–1200 телерентгенограмм, что убедительно подтверждает перспективность использования [1, 3, 7, 22, 25, 36, 46, 55, 56, 61, 64]. При этом конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) обеспечивает более полное представление о краниофациальных структурах по сравнению с традиционной 2D-рентгенографией, а внедрение ИИ существенно упрощает и ускоряет процесс ее анализа.

Несмотря на существование коммерческих программ для анализа телерентгенограмм (ТРГ), их точность зачастую уступает ручным измерениям эксперта, особенно в условиях вариабельности анатомии и качества изображений [43, 54, 76, 105]. Именно поэтому значительный объем современных научных исследований сфокусирован на разработке и валидации нейросетевых моделей, способных не просто автоматизировать, но и интеллектуализировать этот процесс.

ИИ активно применяется в определении степени зрелости костной системы пациента и даже в прогнозировании тенденции роста лицевого скелета у детей. В ортогнатической хирургии ИИ задействован для сегментации костных тканей, корректировки цефалометрических значений при проектировании остеотомических разрезов. При работе с прозрачными элайнерами методы глубокого обучения, базирующиеся на анализе обширных наборов данных, обеспечивают эффективное планирование последовательности ортодонтических перемещений [10]. Кроме того, применение искусственного интеллекта позволяет сформировать модель будущей улыбки пациента, что способствует росту уровня доверия пациента и его заинтересованности в процессе лечения. Таким образом, исследовательское сообщество сосредоточило свои усилия на устранении существующих проблем, в частности, на снижении зависимости от обширных размеченных наборов данных и на повышении надежности алгоритмов при обработке нетипичных случаев.

**Цель.** В рамках исследования был проведен анализ современных научных трудов, направленных на изучение возможностей искусственного интеллекта и создание нейросетевых моделей для решения задач в ортодонтической практике с целью определения путей ее цифровой трансформации.

**Материалы и методы.** В рамках настоящего исследования был проведен обзор научной литературы, посвященной использованию искусственного интеллекта в сфере ортодонтии. Поисковый анализ проводился в следующих научных базах данных: eLIBRARY, Scopus, Google Scholar, PubMed/MEDLINE, ResearchGate, MDPI. Критериями включения источников являлись: публикация на русском или английском языках в период с 2019 по 2025 год, а также релевантность тематике ортодонтии и искусственного интеллекта. Поисковые запросы формировались с использованием ключевых терминов, таких как «ортодонтия», «ортодонтическое лечение», «искусственный интеллект», «машинное обучение», «глубокое обучение» и «нейросетевые модели», «автоматизация», «цифровой», «программное обеспечение», «перцептрон». В результате анализа было отобрано и детально изучено 110 научных исследований. Отбор публикаций осуществлялся поэтапно: после идентификации и удаления дубликатов проводился скрининг по заголовкам и аннотациям, с последующей оценкой полноты текстов и методологического качества. Полученные данные свидетельствуют о существенном расширении возможностей ИИ в области ортодонтии.

**Результаты и их обсуждение.** Искусственный интеллект – это направление в компьютерных науках, которое сосредоточено на создании систем, способных справляться с задачами, для решения которых необходимы интеллектуальные способности.

Машинное обучение (МО) – совокупность методов, позволяющих компьютерным системам осваивать навыки на основе анализа данных. При этом системы выявляют закономерности самостоятельно, без необходимости явного программирования для каждой конкретной задачи [39]. Машинное обучение обладает способностью обучаться на существующих наборах данных, совершенствовать собственные алгоритмы при поступлении новой информации, выявлять закономерности, классифицировать данные, а также выполнять прогнозирование. В зависимости от способа обучения и целевого результата выделяют три основных типа машинного обучения: обучение с учителем, без учителя и обучение с подкреплением. Обучение с учителем применяется для задач классификации и прогнозирования в тех случаях, когда известен ожидаемый результат. Такой тип машинного обучения применяется в определении необходимости удаления зубов и продолжительности ортодонтического лечения. Обучение без учителя направлено на обнаружение скрытых паттернов и структур в данных при отсутствии заранее известных результатов. Обучение с подкреплением, в котором агент (интеллектуальный алгоритм) обучается принимать оптимальные решения путем последовательного взаимодействия со средой. Агент постоянно оценивает свою стратегию. Действия, которые привели к высокому вознаграждению в прошлом, укрепляются и выбираются чаще («положительное подкрепление»); и в то же время действия, ведущие к штрафам (отрицательному вознаграждению), в будущем избегаются. Таким образом, алгоритм итеративно улучшает свою стратегию, основываясь на «предыдущих версиях» самого себя [58].

Искусственные нейронные сети (ИНС, ANN) – это подраздел машинного обучения, имитирующий устройство человеческого мозга. Они анализируют сложные зависимости в больших данных. Базовая архитектура ИНС состоит из трех слоев: входного, выходного и хотя бы одного скрытого. Нейроны в каждом слое связаны, образуя сеть. ИНС с множеством скрытых слоев относят к глубокому обучению; они особенно эффективны в компьютерном зрении – например, при классификации и сегментации изображений [44].

Глубокое обучение (ГО) – это направление в рамках машинного обучения, при котором система автономно выявляет и вычисляет значимые признаки непосредственно из входных данных. Интенсивное развитие ГО обусловлено ростом вычислительных мощностей и постоянным совершенствованием технологических решений. Благодаря этому исследователи получили возможность разрабатывать более сложные, многоуровневые нейронные сети, способные справляться с задачами повышенной сложности. Глубокое обучение набирает популярность благодаря высокой практической

пользе. Его главное отличие от традиционных методов машинного обучения – автоматическая обработка данных без ручного вмешательства, что позволяет извлекать из них максимум информации. В ортодонтии технологии глубокого обучения применяются для автоматического определения цефалометрических точек на телерентгенограммах, сегментации зубов и анатомических структур, а также используются в системах дистанционного мониторинга. К архитектурам глубокого обучения относятся и генеративно-состязательные сети. Они позволяют прогнозировать изменения в мягких тканях лица после перемещения зубов или проведения ортогнатической операции [84].

Сверточные нейронные сети (СНС, CNN) – один из самых популярных алгоритмов глубокого обучения, отлично работают с изображениями высокого разрешения. Их архитектура отличается от классических нейронных сетей: вместо скрытых слоев используются три типа – сверточные, слои подвыборки (пулинга) и полносвязные. Сверточные слои с помощью фильтров формируют «карты признаков», упрощая структуру изображения – это помогает распознавать объекты, формы и паттерны. Слои подвыборки уменьшают размерность карт, сохраняя ключевую информацию. Затем данные попадают в полносвязные слои, где принимается окончательное решение. Такая комбинация слоев делает СНС эффективнее классических ИНС в обработке изображений [33].

### 1. Применение ИИ в определении причины зубочелюстных аномалий

Чтобы ортодонтическое лечение было успешным, необходимо, в первую очередь, установить причины аномалий. В противном случае, лечение ограничится симптоматическим воздействием, что чревато рецидивами и неустойчивостью полученных результатов. Также точная диагностика позволяет выбрать целевой метод коррекции (аппаратный, хирургический, миофункциональный).

Zhao T. et al. разработали систему автоматизированного скрининга гипертрофии аденоидов с использованием CNN. На телерентгенограммах обучена модель, определяющая ключевые ориентиры и рассчитывающая аденоидный индекс по методу Fujioka. Метод позволяет точно и эффективно выявлять риск развития ротового дыхания и обструктивного апноэ сна, что важно учитывать в определении тактики лечения [110].

Исследование Kazimierczak N. et al. показало, что искривление носовой перегородки не влияет на форму лица. Из множества цефалометрических параметров лишь угол шарнирной оси слабо коррелировал с девиацией носовой перегородки. Автоматический анализ с использованием ИИ подтвердил высокую надежность измерений, выявив расхождения только по двум показателям. Это опровергает распространенное мнение о связи девиации носовой перегородки с лицевыми аномалиями.

Модель на основе гибридной архитектуры выявила сильную корреляцию между тяжестью обструктивного апноэ сна (ОАС) и цефалометрическими параметрами,

особенно углом SNB и шириной верхней челюсти. Система позволяет стратифицировать риск ОАС и разработать персонализированное лечение у детей с зубочелюстными аномалиями [35].

## 2. Применение нейросетей в фотометрии

Первый этап ортодонтической диагностики состоит из комплексного клинического обследования с фотодокументацией, в которую входят портретная, внеротовая и внутриротовая серии снимков. CNN продемонстрировала уровень корректной классификации зубочелюстных аномалий в 98,0 % на основе анализа портретных и внутриротовых снимков [86]. В другом исследовании [87] была разработана модель на основе CNN для оценки степени скученности зубов. Модель анализирует несоответствие длины зубной дуги и определяет потребность в удалении зубов на основании стандартных внутриротовых фотографий. В научной работе Talaat S. et al. представлена первая полностью автоматизированная система на основе CNN с архитектурой You Only Look Once (YOLO) для диагностики зубочелюстных аномалий и оценки необходимости ортодонтического лечения по внутриротовым снимкам [89].

Традиционно ортодонтические изображения индексировались вручную: специалисты присваивали им метки на основе клинических особенностей, а затем сохраняли в архивах. Для автоматизации процессов классификации и архивирования ортодонтических снимков предложены методы глубокого обучения. Результаты показали, что автоматизированная система обрабатывает информацию в 236 раз быстрее, чем эксперт. Кроме того, технологии глубокого обучения позволяют эффективно отслеживать стоматологический статус пациента, существенно снижая нагрузку на врачей-стоматологов [67].

## 3. Применение искусственного интеллекта в диагностике стоматологических заболеваний

Недиагностированный кариес и скрытые патологии пульпы и периодонта повышают риск осложнений, поскольку деминерализованные ткани утрачивают устойчивость к нагрузкам, а давление ортодонтических аппаратов может спровоцировать обострение хронических заболеваний.

Алгоритмы глубокого обучения демонстрируют эффективность в автоматическом анализе рентгенологических данных. Системы компьютерной визуализации на основе ИИ способны обнаруживать кариозные поражения и заболевания пульпы и периодонта с точностью 88–90 % [2, 4, 81, 83]. В области пародонтологической диагностики ИИ-алгоритмы обеспечивают автоматическое измерение уровня костной ткани, определение степени резорбции межальвеолярных перегородок [91]. Для врача-ортодонта программное обеспечение на основе ИИ Diagnocat упрощает диагностику стоматологических заболеваний и ускоряет цефалометрический анализ за счет автоматизации обработки рентгенологических данных [11].

Перспективным направлением является создание мультимодальных систем, которые могли бы анализировать томограммы, интраоральные сканы и внутриро-

товые фотографии для комплексной оценки стоматологического здоровья пациента [73].

## 4. Применение ИИ в цефалометрическом анализе

Традиционный цефалометрический анализ является «золотым стандартом» диагностики в ортодонтии, но при этом остается трудоемким процессом, подверженным субъективным ошибкам. Опубликовано большое количество исследований, в которых в качестве основы были использованы архитектуры глубокого обучения, обученные на обширном массиве рентгенограмм. Наиболее точно определяемые точки  $P_{rn}$ ,  $U1$  и  $P_g$ , так как находятся на краях анатомических структур с четкими границами на изображениях. Ошибки в позиционировании точек  $U1$  и  $L1$  могут быть связаны с нечеткими контурами корней резцов, например, из-за скученности фронтальной группы зубов [104]. Причиной значительных погрешностей в точках  $G_o$ ,  $M_e$  и  $P$ , вероятно, является асимметричное строение нижнего края нижней челюсти и наружного слухового прохода, которое сильно варьируется. Для преодоления этих проблем предложен трехэтапный каскадный алгоритм на основе CNN. На первом этапе система выявляет типовые характеристики челюстно-лицевой области, что помогает определить зону анализа и учесть индивидуальные анатомические особенности пациентов. На втором этапе алгоритм определяет координаты всех ориентиров на предварительно выровненном изображении. На финальном этапе происходит детальная корректировка положения каждого ориентира. Тестирование алгоритма на наборах цефалометрических данных подтвердило его эффективность и демонстрирует конкурентоспособные результаты [109].

Инновационная онлайн-платформа ViSurgery позволяет автоматически проводить расчет ТРГ в боковой и прямой проекциях. Такой метод в разы быстрее традиционного «ручного» подхода, а точность расстановки достигает 98 % [16].

В исследованиях [62, 106] проводилось сравнение эффективности работы ИИ и специалистов. Врач-ортодонт в среднем тратит 15 минут на изучение цефалогаммы, что зависит от ее качества, квалификации специалиста и числа анализируемых параметров. Полностью автоматизированные системы определяют цефалометрические точки с меньшим количеством ошибок, связанных с субъективностью человеческого фактора. В целом, точность цефалометрических измерений с помощью ИИ находится на приемлемом уровне [1, 3, 7, 22, 25, 36, 46, 55, 56, 61, 64], учитывая, что этот метод почти в 80 раз быстрее ручного цефалометрического анализа [36]. Однако полностью заменить ручной анализ автоматическая цефалометрия не способна, поэтому необходим дополнительный ручной контроль с корректировкой полученных данных.

Исследование автоматизированной фронтальной цефалометрии показало, что нейронные сети демонстрируют точность, сопоставимую с человеческой, а в отдельных случаях алгоритмы превосходят по точности результаты, полученные неопытными специалистами (студентами, ординаторами, аспирантами) [75].

Особый интерес представляют веб-сервисы, которые предлагают провести цефалометрическое исследование [43, 54, 76, 105]. Проблемы, такие как неправильное определение ориентиров, трассировка контуров мягких тканей, а также нестабильность измерений являются характерными недостатками автоматизированной системы WebCeph. Полуавтоматический режим этой системы позволяет частично преодолеть эти ограничения, но его использование требует особой осторожности. Тем не менее, Mahto, R.K. et al. пришли к выводу, что автоматизированные цефалометрические измерения с помощью WebCeph достаточно точны по сравнению с ручными измерениями [72]. Авторы отмечают, что WebCeph обладает не только возможностью быстрого цефалометрического анализа и интерпретации, но и такими функциями, как облачное хранение данных и моделирование лечения. Благодаря этим характеристикам он становится эффективным и многообещающим решением для повседневного применения в клинической практике.

Автоматизированный анализ с использованием CephX не обеспечивает достаточной надежности. Однако применение CephX с последующей ручной корректировкой представляет собой перспективное направление для клинической практики. Такой подход позволяет добиваться результатов, сопоставимых с CephNinja и Dolphin, при существенно более коротком времени анализа [54].

### 5. Применение ИИ в сканировании лица

В ортодонтии 3D-сканирование лица позволяет создать трехмерную модель лицевого скелета и мягких тканей, что, несомненно, представляет важный элемент современной диагностики. Методика дает возможность проанализировать антропометрические параметры (симметрию в трех плоскостях, пропорции третей лица, характеристики профиля) и объединить данные фотоработы, интраорального сканирования и цефалометрического анализа в единую виртуальную модель пациента.

Машинное обучение открывает возможности для интеграции в клиническую практику, предлагая эффективные инструменты для оценки асимметрии и определения срединной линии, что позволяет усовершенствовать традиционные диагностические протоколы [69, 108]. В исследовании Lin H. et al. для анализа 3D-свойств компьютерные томограммы конвертировались в контурные карты. При обучении использовались аугментация данных (100-кратное увеличение, случайные деформации) и метод исключения для предотвращения переобучения. Сравнение архитектур показало, что доработанная модель Xception достигает точности 90 %, подтверждая ее потенциал для помощи в планировании лечения [69].

Сравнение профессиональной системы 3dMDtrio и мобильных приложений (Bellus3D, Capture) при 3D-сканировании лиц показало сопоставимую точность ( $\approx 80\%$  точек в пределах 1 мм), однако профессиональное оборудование значительно превосходит по скорости. Таким образом, выбор системы зависит от задач: 3dMDtrio оптимальна для производительности,

а мобильные решения – для доступности и портативности [32].

Rousseau M., Retrouvey J. M. провели автоматизированный анализ сканов лица и разработали программу для определения лиц и расчета вертикальных параметров. Сравнение точности предложенной модели с ручной разметкой цифровых изображений показало их высокое соответствие [85].

Cassi D. et al представили метод, позволяющий провести точный топографический анализ асимметрии лица у пациентов с врожденной зубочелюстной аномалией [27].

### 6. Применение ИИ в сегментации и 3D-моделировании

Сегментация необходима для создания 3D-моделей зубных рядов, которые используются при цифровом планировании ортодонтического лечения и имплантации, а также при изготовлении кап и элайнеров.

Ряд исследований подтверждает возможность клинического применения нейросетевых моделей для точной сегментации и определения зубов на компьютерных томограммах даже при наличии брекет-систем [21, 70, 71]. Разработанные алгоритмы последнего поколения успешно преодолевают помехи от металлических конструкций, демонстрируя высокие показатели точности [45].

Трехмерная визуализация позиции корней зубов является необходимым условием при планировании ортодонтического лечения. Интегрированные модели зубов, созданные на основе комбинации данных интраорального сканирования и томограмм, обеспечивают точное отображение положения корней. Проведенное исследование сравнивало точность автоматизированного метода на основе глубокого обучения с традиционным ручным подходом. Несмотря на меньшие расхождения ручного метода (0,02–0,03 мм против 0,07–0,08 мм), статистически значимые различия были выявлены лишь по трем клинически значимым параметрам, тогда как метод глубокого обучения продемонстрировал сопоставимую клиническую точность при существенном преимуществе в эффективности [65].

Chung M. et al. предложили новый метод автоматического совмещения компьютерных томограмм челюстей с цифровой моделью зубов. Трехэтапный процесс включает: предварительное позиционирование с помощью нейросети, кластерную точную подгонку и фильтрацию ошибок на основе консенсуса. Модель работает полностью автоматически и превосходит аналоги по точности, устойчива к артефактам от металлических конструкций, пломбировочного материала и отличается высокой вычислительной эффективностью [30].

### 7. Применение ИИ в определении скелетной зрелости и прогнозировании роста зубочелюстной системы

Искусственный интеллект все чаще применяется в оценке скелетной зрелости. Стадии развития шейных позвонков, определяемые по телерентгенограммам, позволяют оценить динамику роста пациента. Выявление

наиболее благоприятного периода для лечения представляет собой важную задачу, но устоявшиеся методики (например, стадирование созревания шейных позвонков, SVM) обладают высокой вариабельностью результатов при оценке разными специалистами. Искусственный интеллект обладает потенциалом для автоматизации оценки SVM.

В работе Atici S. F. [20] предложена параллельная архитектура сверточной нейронной сети для определения скелетной зрелости. На размеченных цефалограммах реализована предобработка: разделение снимков по полу, автоматическое кадрирование области шейных позвонков и аугментация данных. Модель AggregateNet с направленными фильтрами усиления краев анализирует изображение, после чего визуальные признаки объединяются с возрастными данными. Такой подход обеспечил высокую точность диагностики без переобучения при компактной архитектуре сети.

Kök H., соавт. [59] на шейных позвонках C2–C4 разместили 19 точек и провели 20 линейных измерений. Сравнение семи алгоритмов ИИ показало, что наилучшие результаты для определения стадий развития позвонков (CVS) демонстрируют методы SVM, случайный лес, деревья решений и наивный Байес.

Наивысшую точность классификации показали искусственные нейронные сети (ИНС), что позволяет рекомендовать их как основной метод для данной задачи. К такому же выводу пришли исследователи Amasya H. et al. [18].

В целом другие научные работы заявляют о высокой точности результатов [25, 107]

В мета-анализе Sadeghi, T.S., et al. продемонстрирована превосходная эффективность моделей ИИ в классификации стадии CS1 по сравнению с другими стадиями [88]. Высокая точность распознавания стадии CS1 объясняется простой морфологией позвонков с плоскими контурами без вогнутостей. В отличие от этого, стадия CS3 демонстрирует наименьшую точность в определении из-за морфологического сходства с соседними стадиями CS2 и CS4, а также вариабельности формы третьего шейного позвонка.

Внедренная в исследование гибридная система автоматической оценки скелетного возраста на основе метода SMI Фишмана (1981 г.) показала высокую клиническую достоверность с минимальной погрешностью. Данная система позволяет точно определять стадии скелетного созревания и может быть успешно интегрирована в практику, обеспечивая объективную оценку, сопоставимую с анализом эксперта [53].

Jun-Ho Moon et al. проанализировали продольные цефалограммы пациентов до ортодонтического лечения с использованием регрессии PLS и нейросети TabNet для прогнозирования роста лицевых структур. ИИ показал меньшую ошибку и превзошел PLS в прогнозировании роста, особенно на верхней и нижней челюсти. Точность прогнозирования роста мягких тканей и нижней челюсти оказалась низкой [74].

В другой научной работе [102] авторы использовали методы машинного обучения с учителем для ана-

лиза механизмов пубертатного роста нижней челюсти на основе лонгитюдных данных. Исследование сфокусировано на мальчиках 11–16 лет – периоде активного роста, когда формируется окончательное положение нижней челюсти. Для создания точного нормативного референса в выборку включены только пациенты без выраженных скелетных аномалий, поскольку при II и III классах характер роста существенно отличается. Полученные данные формируют базовый алгоритм для будущих ИИ-моделей, которые смогут учитывать различные типы зубочелюстных аномалий.

## 8. Применение ИИ в определении патологий ВНЧС

Целью ортодонтического лечения является не только исправление положения зубов, но и формирование стабильной окклюзионной системы, в которой ключевую роль играет височно-нижнечелюстной сустав (ВНЧС). Патологии ВНЧС представляют собой важный фактор, требующий особого внимания при разработке плана лечения. Несвоевременное выявление патологий ВНЧС (таких как переднее смещение суставного диска, остеоартроз и др.) может стать причиной серьезных осложнений во время лечения, включая рецидивы, болевые ощущения и деструкцию элементов сустава.

Наиболее надежным методом визуализации мягких тканей сустава считается магнитно-резонансная томография (МРТ). Однако интерпретация томограмм требует высокой профессиональной компетенции рентгенолога и носит субъективный характер. Алгоритмы ИИ способны обнаруживать едва заметные изменения в структуре суставного диска и начальные деструктивные процессы в костной ткани. Это дает ортодонту возможность заранее оценить риски и подобрать оптимальную тактику лечения.

Разработана автоматизированная система [47] для выявления и сегментации суставного диска ВНЧС на МРТ-снимках с использованием глубокого обучения. Сравнение трех архитектур показало высокую эффективность 3DiscNet и SegNet-Basic по метрикам Dice, чувствительности и точности. Результаты подтверждают возможность клинического применения системы для автоматической диагностики патологий ВНЧС.

В исследованиях [17, 48, 103] архитектура U-Net стала золотым стандартом в сегментации ВНЧС, тогда как SegNet применялась реже, но обладает значительным потенциалом. В целом, можно наблюдать смену парадигмы: для остеоартрита ВНЧС стандартом становятся методы глубокого обучения, в то время как диагностика дисфункции ВНЧС пока в основном опирается на классические подходы – SVM, Random Forest, логистическую регрессию и k-ближайших соседей. Перспективным направлением считается адаптация современных архитектур Xception и Inception.

В другом исследовании разработан автоматизированный алгоритм TMJSeg для веб-сервиса, выполняющий 3D-сегментацию томограмм ВНЧС и преобразующий их в объемные 3D-модели мышечка. Данный подход позволяет проводить точную оценку морфологии суставных структур [23].

В исследовании Bianchi J. et al. применены методы анализа данных для изучения 52 клинических и радиомических маркеров остеоартроза ВНЧС. Протестированные модели машинного обучения выявили ключевые предикторы: головные боли, ограничение открытия рта, радиомические параметры и взаимодействия биомаркеров. Комбинированная модель XGBoost + LightGBM продемонстрировала высокую диагностическую точность, что подтверждает ее потенциал для раннего выявления заболеваний ВНЧС [24].

Использование технологий искусственного интеллекта для диагностики заболеваний височно-нижнечелюстного сустава сопряжено с двумя существенными проблемами. Первая и наиболее значимая – это «проблема черного ящика» в работе нейросетей, которая требует разработки и внедрения технологий объяснимого ИИ (xAI). Это необходимо для того, чтобы врачи могли понимать логику принимаемых системой решений. Другая же проблема заключается в отсутствии обширного размеченного набора данных, которые необходимы для обучения моделей, способных генерировать клинически достоверные результаты [77].

## 9. Применение ИИ в планировании ортодонтического лечения

Клиническое принятие решений в стоматологической практике характеризуется необходимостью учета многочисленных переменных. В условиях информационной неопределенности врачи часто применяют эвристические стратегии, что часто приводит к ошибкам [97]. Данная проблема актуализирует разработку высокоточных экспертных систем, основанных на технологиях искусственного интеллекта [2, 49]. Такие системы могут выполнять функцию вспомогательного диагностического инструмента, способствующего повышению обоснованности клинических решений. При этом важно понимать, что не существует идеального и универсального плана лечения [52].

Колсанов А. В. и др. разработали программное обеспечение, которое работает на основе ИНС, которые были обучены для автоматического распознавания и анализа диагностических данных (рентгенограмм, включая телерентгенограммы и компьютерные томограммы, а также фотографий и моделей челюстей) с целью выявления различных зубочелюстных аномалий. Процесс начинается с загрузки данных в систему и их последующего автоматического анализа. Затем программа на основе обнаруженных точек и контуров рассчитывает стандартные цефалометрические показатели, сравнивает их с нормативами и формирует заключение о типе аномалии (сагиттальной, вертикальной или трансверзальной) [4].

В исследовании Woo H. et al. проверили, насколько точно три компьютерные системы для планирования ортодонтического лечения (Autolign, Outcome Simulator Pro, Ortho Simulation) определяют будущее положение зубов по сравнению с ручным моделированием. На диагностических моделях измеряли шесть параметров: три линейных и три угловых. Автоматизированные системы демонстрируют общую работоспособность, однако их

применение имеет существенные ограничения, в частности из-за валидации на упрощенных клинических случаях без удаления зубов. Вторым ключевым недостатком является игнорирование индивидуальных особенностей перемещения зубов, поэтому данные системы следует рассматривать исключительно как вспомогательные инструменты, а не как самостоятельное основание для принятия решений [101].

В масштабном исследовании, проведенном Gaonkar P. и соавторами, было установлено, что применение ИИ-расширенной диагностики обеспечивает существенно более высокую точность планирования лечения в сравнении с традиционными методами диагностики. У пациентов, для которых использовались ИИ-технологии, наблюдались заметно сокращенные сроки ортодонтического лечения. Это обусловлено тем, что планы лечения, сформированные с помощью искусственного интеллекта, отличались повышенной точностью, и в результате потребность в их корректировке в ходе лечения существенно снижалась [42].

В исследовании Prasad J. и соавт. впервые протестирована модель на основе машинного обучения для постановки диагноза и составления плана лечения. Полученные результаты показали, что результаты модели совпадают с планами, разработанными квалифицированными ортодонтами, на 84 %. Данное исследование открывает возможности для создания эффективной системы поддержки клинических решений. Стоит заметить, что данная модель не может учитывать функции мягких тканей и сложные случаи с наличием скелетных деформаций, нестандартных схем удаления зубов и т. д. [82].

Рыбаков А. на основе цифрового биотипирования слизистой оболочки полости рта, прогноза нейронной сети, биомеханического анализа предложил протокол выбора типа обрезки элайнеров (фестончатой для тонкого; прямой для толстого биотипа десны) с усилением в зонах активного перемещения зубов, обеспечивающий полную цифровизацию ортодонтического лечения для изготовления элайнеров с оптимизированными физико-механическими и эстетическими свойствами [10].

Удаление зубов – важная часть ортодонтического лечения. Экспертная система, которая формирует оптимальный план лечения, способна стать ценным инструментом для врачей: она поможет осуществлять самоконтроль, снижать вероятность ошибок и может быть использована в обучении врачей-ортодонтот [50].

Разработана каскадная архитектура из ИНС для планирования ортодонтического лечения [66]. Первичный классификатор определяет показания к удалению зубов, а последующие специализированные сети конкретизируют схему удаления и тип опоры. Для оценки значимости диагностических параметров в условиях неполного клинического обследования применен метод PaD<sup>25</sup>, позволивший установить иерархию клинически значимых показателей. При принятии решения об удалении зубов наибольший вклад внесли три признака: «скученность в верхнем зубном ряду», «скученность

в нижнем зубном ряду» и «U1-NA». Для прогнозирования схемы удаления наиболее значимыми оказались показатели «ANB», «глубина перекрытия». Определение типа опоры в наибольшей степени зависело от «кривой Шпее», «носогубного угла» и «UL-EP». Исследование показывает, что модели принимают решения, опираясь на разные наборы ключевых факторов.

В другом исследовании предложена сравнительная платформа с использованием множества моделей машинного обучения, включая логистическую регрессию, метод опорных векторов, случайный лес и нейронные сети, для принятия ортодонтических решений относительно удаления зубов и стратегий фиксации. Нейросетевая модель показала точность 93 % в решениях об удалении и 89 % в определении схем удаления, превзойдя конкурентов [93].

В машинном обучении принято считать, что чем больше параметров учитывает модель, тем точнее должны быть ее результаты. Однако в исследовании Etemad L. et al. [37] показано, что увеличение числа анализируемых параметров с 22 до 117 не улучшило работу алгоритмов. Это было объяснено тем, что в расширенном наборе данных оказались малозначимые параметры, которые лишь создавали «информационный шум». Ключевыми значимыми параметрами оказались скученность зубных рядов и угол наклона нижних резцов, что согласуется с общепринятыми ортодонтическими критериями планирования экстракции.

В исследовании Konstantonis D. в обучении ИИ использовалось небольшое количество входных данных, в отличие от исследования Jung SK и соавт. [50] Konstantonis D. выявил четыре ключевых параметра, влияющих на решение об удалении: скученность нижних зубов, положение нижней губы относительно Е-плоскости, скученность верхних зубов и величина горизонтального перекрытия. Модель на основе этих параметров предлагает быстрый способ определения тактики лечения при I классе окклюзии [49].

Evangelista K. et al., применив автоматизированную систему Auto-WEKA, достигли наивысшей точности определения необходимости удаления зубов (93,9 %) при комбинировании данных диагностических моделей и ТРГ-анализа. Использование только диагностических моделей обеспечило точность 87,4 %, тогда как применение исключительно цефалометрических данных позволило достичь 72,7 % точности. Полученные данные демонстрируют повышение точности при интеграции различных типов диагностической информации [38].

В исследовании Del Real A. et al. анализ был целенаправленно ограничен узкими возрастными группами (подростки и молодые взрослые), поскольку широкий возрастной диапазон выборки мог привести к значительному анатомическому разнообразию, способному скомпрометировать точность модели [31].

#### 10. Применение ИИ в ортогнатической хирургии

Ортогнатическая хирургия применяется для коррекции тяжелых нарушений зубочелюстной системы.

В данном исследовании [29] разработана модель искусственного интеллекта для поддержки принятия решений о необходимости хирургического вмешательства. На основе анализа 12 цефалометрических параметров и 6 дополнительных индексов создана двухуровневая нейронная сеть. Модель продемонстрировала точность 96 % в определении показаний к операции и 91 % в детализации типа вмешательства и необходимости удаления зубов. Полученные результаты подтверждают перспективность применения ИИ для повышения точности диагностики в ортогнатической хирургии.

В ходе исследования Chaiprasittikul N. et al. разработали автоматизированный протокол скрининга пациентов для определения необходимости в ортогнатическом оперативном вмешательстве. Протокол базируется на интеграции двух ИИ-технологий. На первом этапе модель R-CNN осуществляет точное определение ключевых анатомических точек на рентгенологических изображениях. На втором этапе ИНС выполняет финальную классификацию, устанавливая необходимость хирургического лечения. Ключевой результат исследования – совпадение диагнозов, поставленных автоматизированной системой и врачами-экспертами, в 96,3 % случаев.

В другой работе разработана сверточная нейронная сеть для автоматического определения показаний к ортогнатической операции на основе телерентгенограмм. Исследование включило рентгенологические изображения с различными нарушениями зубочелюстных аномалий. После обучения на размеченных данных модель достигла точности 95,4 % на тестовой выборке, продемонстрировав высокую специфичность (99,3 %) [92].

Исследование Lee H. подтвердило, что модели RF и LR определяют потребность ортогнатического оперативного вмешательства с точностью до 90 %, используя клинически обоснованные параметры (overjet, Wits-анализ и др.) [63].

Сравнительный анализ выявил, что традиционная множественная регрессия (MLR) является наименее точным предиктором [78].

Исследование Lin G. et al. направлено на выявление цефалометрических параметров, позволяющих прогнозировать необходимость ортогнатической операции у пациентов с односторонней расщелиной губы и неба. Модель XGBoost с селекцией признаков методом Boruta выявила четыре ключевых предиктора в раннем возрасте: угол ANB, угол PP-FH, комбинаторный фактор (интегральный параметр, состоящий из оценки высоты нижней трети лица, положения челюстей относительно основания черепа) и угол выпуклости лица. Модель демонстрирует точность 87,4 %, позволяя уже в 6-летнем возрасте прогнозировать необходимость будущего хирургического вмешательства [68].

Другое исследование направлено на анализ взаимосвязи между цефалометрическими параметрами и клиническими показаниями к проведению ортогнатической хирургии. Ключевой задачей является разработка и оценка метода, позволяющего повысить точность

определения потребности оперативного вмешательства за счет оптимизации глубины архитектуры нейронных сетей. В качестве моделей искусственного интеллекта применялись сверточные нейронные сети ResNet различной глубины (архитектуры 18, 34, 50 и 101 слоя). Результаты исследования свидетельствуют о том, что для решения данной диагностической задачи наиболее эффективными оказались менее глубокие сетевые архитектуры [57].

### 11. Применение ИИ в прогнозе результата ортодонтического лечения

Оценка результатов ортодонтического лечения остается важным аспектом практики, где модели искусственного интеллекта демонстрируют значительный потенциал для прогнозирования исходов и оптимизации планирования. Однако необходимость всесторонней валидации их диагностической точности остается обязательным условием внедрения.

Рахимбердиев Р. А. и соавт. разработали систему на основе алгоритмов МО, которые были обучены на ретроспективных клинических данных. Входными параметрами являются исходные диагностические данные пациента (цефалометрические показатели, модели челюстей, возраст, клиническая картина). Обработав эти данные, искусственный интеллект сравнивает их с аналогичными случаями из базы знаний и генерирует прогноз: оптимальную тактику лечения, ожидаемый эстетический и функциональный результат, а также вероятную продолжительность коррекции аномалии [8]. Нейросетевая модель показала умеренную точность так же, как и в другом исследовании [15].

Tanikawa C., et.al. разработали две системы прогнозирования 3D-изменений лица на основе глубокого обучения и гауссовых смесей распределений. Система для ортогнатической хирургии показала точность  $0,89 \pm 0,30$  мм, превосходя коммерческие аналоги, особенно в зоне верхней губы и носа. Метод выявил новые закономерности изменений лицевых структур и демонстрирует потенциал для клинического применения [99].

На основе парных наборов данных томограмм разработана модель на основе CGAN для прогнозирования 3D-изменений лица после ортодонтического лечения с учетом пола, возраста и перемещения резцов. Модель показала среднюю ошибку  $1,2 \pm 1,01$  мм с точностью 80,8 %, причем более половины опытных ортодонтот не смогли отличить синтезированные изображения от реальных [80].

Модифицированная небная пластина (МСРР) представляет собой эффективный безэкстракционный метод лечения аномалий II класса, обеспечивающий дистализацию моляров, ретропозицию резцов и ретракцию губ. Разработанная на основе сверточных нейронных сетей система ИИ прогнозирует цефалометрические изменения по латеральным телерентгенограммам пациентов старше 18 лет, визуализируя ожидаемые скелетные, дентальные и мягкотканые изменения. Прошедшая валидацию на пациентах технология предоставляет ортодонтам объективный инструмент для планирования лечения [79].

В работе Volovic J. et al. все примененные модели машинного обучения показали клинически значимую точность прогнозирования длительности ортодонтического лечения. Наибольшую эффективность продемонстрировали линейные модели и Random Forest, в то время как SVR и Гауссова процессная регрессия оказались менее результативными. Среди ключевых факторов, влияющих на длительность ортодонтического лечения, выделены: план экстракции зубов, соотношение челюстей, расположение нижних резцов, а также применение дополнительной ортодонтической аппаратуры [100].

### 12. Применение ИИ в мониторинге ортодонтического лечения

Телемониторинг в ортодонтии активно развивается благодаря цифровым технологиям и наличию потребности в более гибких, удобных и эффективных методах наблюдения за ходом лечения. Пациентам больше не нужно регулярно посещать клинику для промежуточных осмотров – многие этапы контроля можно проводить удаленно с помощью телемедицинских платформ. Это экономит время и снижает логистические барьеры для жителей отдаленных районов. Кроме того, телемониторинг позволяет оперативно реагировать на отклонения от плана лечения, фиксировать промежуточные результаты и корректировать лечение в режиме реального времени.

Исследование показывает, что телемониторинг прочно вошел в ортодонтическую практику и получил широкое признание. Подавляющее большинство врачей (96,25 %) воспринимают телемониторинг как элемент высокотехнологичного лечения. При этом все без исключения специалисты (100 %) отмечают, что данная технология может сократить количество визитов пациентов [95].

Клиническая эффективность ускоренных протоколов лечения была подтверждена в работе Caruso et al [26]. Исследователи установили, что переход на 7-дневный режим смены элайнеров в сочетании с системой адаптивного контроля позволяет значительно сократить общие сроки ортодонтического лечения. При этом важным условием является применение специального алгоритма динамического наблюдения, обеспечивающего своевременную корректировку лечения.

Рузиев С. и соавт. разработали алгоритмическую модель, которая анализирует диагностические данные пациентов. Далее ИИ оценивает динамику изменений в зубочелюстной системе в процессе лечения, сравнивая начальные и промежуточные данные. На основе анализа система формирует количественную оценку эффективности лечения, выявляя степень коррекции аномалии и возможные отклонения от плана [9].

Кроме того, отмечается положительное влияние мониторинга на гигиеническое состояние полости рта. Всего за один месяц регулярного дистанционного наблюдения у пациентов зафиксировано статистически значимое улучшение показателей индивидуальной гигиены [94].

Интеграция ИИ в мобильные приложения позволяет пациентам самостоятельно контролировать ортодонтическое лечение через сканирование зубных рядов смартфоном [40]. Несмотря на простой принцип работы с бинарными командами «GO»/»NO-GO», алгоритм демонстрирует недостаточную объективность. Отмечались случаи ложноположительных решений, когда пациенты с существенными отклонениями получали разрешение на переход к следующему этапу, и ложно-отрицательные решения, когда лечение необоснованно приостанавливалось при достижении целевой позиции зубов, поэтому на нынешнем этапе развития подобные ИИ-системы не способны полностью заменить профессиональный контроль ортодонта. Их целесообразно использовать лишь как вспомогательный инструмент для регулярного, но ориентировочного мониторинга, при этом ключевые решения о смене элайнера должен принимать врач.

**Заключение, выводы.** На сегодняшний день цифровая трансформация ортодонтии демонстрирует значительные успехи, в первую очередь благодаря созданию нейросетевых моделей с высокой диагностической точностью. Эти системы существенно оптимизируют работу клиницистов: ускоряют анализ данных, предоставляют «второе мнение» при изучении сложных случаев, минимизируют риски диагностических ошибок и создают

наглядные прогнозы результатов лечения. Визуализация ожидаемых изменений не только улучшает точность планирования, но и усиливает доверие пациентов за счет прозрачности и ясности предложенного плана лечения.

Современные технологии, такие как искусственный интеллект, робототехника [13] и дополненная реальность, предоставляют новые возможности для повышения качества оказания стоматологической помощи, в частности в ортодонтии. Тем не менее для успешной и безопасной интеграции ИИ необходимо решить ряд существующих проблем: обеспечить защиту персональных данных пациентов и придерживаться этических стандартов [41]. Кроме того, остаются системные вызовы, которые нужно преодолеть: низкое качество входных данных, риски переобучения моделей при работе с ограниченными наборами данных, недостаточная клиническая проверка алгоритмов в реальных условиях, а также сложности интеграции. Эти факторы пока сдерживают широкое внедрение ИИ-решений.

На современном этапе цифровой трансформации наблюдается переход от стадии экспериментальных разработок к их практическому применению. Основное внимание уделяется их надежности и клиническому обоснованию, при этом окончательное решение всегда остается за врачом.

## Литература/References

1. Аюпова И. О., Морина А. В. Цифровые методы анализа в ортодонтии. В: Аввакумова Н. П. ред. Синтез наук как основа развития медицинских знаний. Сборник материалов I Межвузовской научно-практической конференции с международным участием; Самара; 18 декабря 2020 года. Самара: Самарский государственный медицинский университет; 2020. С. 482–486. [Ayupova I., Morina A. Digital methods of analysis in orthodontics. In: Avvakumova N. P. ed. Synthesis of Sciences as a Basis for the Development of Medical Knowledge. Proceedings of the First Interuniversity Scientific and Practical Conference with International Participation; Samara; December 18, 2020. Samara: Samara State Medical University; 2020. pp. 482–486. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=hbuxqx>
2. Добратулин К. С., Аюпова И. О., Гайдель А. В. Нейронные сети в диагностике и планировании ортодонтического лечения. В: Аввакумова Н. П. ред. Синтез наук как основа развития медицинских знаний. Сборник материалов I Межвузовской научно-практической конференции с международным участием; Самара; 18 декабря 2020 года. Самара: Самарский государственный медицинский университет; 2020. С. 500–505. [Dobratulin K., Ayupova I., Gaidel A. Neural Networks in the Diagnosis and Planning of Orthodontic Treatment. In: Avvakumova N. P. ed. Synthesis of Sciences as a Basis for the Development of Medical Knowledge. Proceedings of the First Interuniversity Scientific and Practical Conference with International Participation; Samara; December 18, 2020. Samara: Samara State Medical University; 2020. pp. 500–505. (In Russ.).] <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44571699>
3. Кабардова К. Х., Килова М. А., Дешев А. В. Цифровая трансформация в 3D-цефалометрии. В: Перспектива-2024. Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых; Нальчик; 26–29 апреля 2024 года. Т. 3. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова; 2024. С. 3–5. [Kabardova K. H., Kilova M. A., Deshev A. V. Digital transformation in 3D cephalometry. In: Perspektiva-2024. Proceedings of the International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists; Nalchik; April 26–29, 2024. Vol. 3. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov; 2024. pp. 3–5. (In Russ.).] <https://elibrary.ru/item.asp?id=77259865>
4. Колсанов А. В., Попов Н. В., Аюпова И. О., Добратулин К. С., Гайдель А. В., Ивлева А. И. Разработка программного комплекса диагностики зубочелюстных аномалий с применением нейронных сетей. В: Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021). Сборник трудов по материалам VII Международной конференции и молодежной школы; Самара; 20–24 сентября 2021 года. Том 3. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва; 2021. Статья 34572. [Kolsanov A. V., Popov N. V., Ayupova I. O., Dobratulin K. S., Gaidel' A. V., Ivleva A. I. Development of a Software Complex for Diagnosing Dentofacial Anomalies Using Neural Networks. In: Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2021). Proceedings of the VII International Conference and Youth School; Samara; September 20–24, 2021. Vol. 3. Samara: Samara National Research University named after academician S. P. Korolev; 2021. Article 34572. (In Russ.).] <https://elibrary.ru/bhssoy>
5. Оборотистов Н. Ю., Мураев А. А., Сенько Д. А. Инновационная онлайн-платформа ViSurgery для расчета телерентгенограмм с использованием искусственного интеллекта. Ортодонтия. 2022;(4):15–20. [Oborotistov N. Yu., Muraev A. A., Senko D. A. ViSurgery, a new online platform for 2d-cephalometric analysis using artificial intelligence. Ortodontia. 2022;(4):15–20. (In Russ.).] <https://elibrary.ru/item.asp?id=50253627>
6. Оборотистов Н. Ю., Мураев А. А. Применение искусственного интеллекта в стоматологии. Российская стоматология. 2023;16(4):70–71. [Oborotistov N. Yu., Muraev A. A. Application of Artificial Intelligence in Dentistry Russian Journal of Stomatology. 2023;16(4):70–71. (In Russ.).] <https://www.mediasphera.ru/issues/rossijskaya-stomatologiya/2023/4/1207264062023041048>
7. Рахматиев Д. И., Подуданский П. А., Зрюмов П. А. Разработка программного обеспечения для определения цефалометрических точек на телерентгенограммах. В: Современные цифровые технологии. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции; Барнаул; 03 июня 2024 года. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова; 2024. С. 265–268. [Rakhmatiev D. I., Podudanskiy P. A., Zryumov P. A. Development of Software for Determining Cephalometric Points on Lateral Cephalograms. In: Modern Digital Technologies. Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference; Barnaul; June 03, 2024. Barnaul: Altai State Technical University named after I. I. Polzunov; 2024. pp. 265–268. (In Russ.).] <https://elibrary.ru/item.asp?id=68573399>
8. Рахимбердиев Р. А., Сайфулаева А. А. Использование искусственного интеллекта для прогноза результатов лечения в ортодонтии. Journal Of New Century Innovations. 2025;78(4):101–105. [Rakhimberdiev R. A., Sayfulaeva A. A. Use of Artificial Intelligence to Predict Treatment Outcomes in Orthodontics. Journal of New Century Innovations. 2025;78(4):101–105. (In Russ.).] <https://scientific-jl.com/new/article/view/20162>
9. Рузиев Ш., Нигматов Р. Болаларда прогнатик прикусни ортодонтик даволашни такомиллаштириш ва унинг самарадорлигини суний интеллект ерламида баҳолаш (Услубий тавсиянома). In Library. 2025;1(1):2–19. [Ruziyev Sh. D., Nigmatov R. N. Improving orthodontic treatment of prognathic occlusion in children and evaluating its effectiveness using artificial intelligence. In Library. 2025;1(1):2–19. (In Uzbek.).] <https://inlibrary.uz/index.php/archive/article/view/130050>
10. Рыбаков Александр. Оптимизация ортодонтического лечения на основе нейронных сетей, анализа конечными элементами и цифровых карт слизистой полости рта: диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Санкт-Петербург; 2024. 235 с. [Rybakov Aleksandr. Orthodontic treatment optimization based on neural networks, finiteelement analysis and oral mucosa digital maps: Dissertation for the degree of candidate of medical sciences. Saint-Petersburg; 2024. 235 p. (In Russ.).] [https://disser.spbu.ru/files/2024/disser\\_rybakov\\_aleksandr.pdf](https://disser.spbu.ru/files/2024/disser_rybakov_aleksandr.pdf)

11. Салеев Р.А., Зайнутдинова А.Р., Мустакимова Р.Ф. Использование искусственного интеллекта Diagnocat в современной стоматологии. В: Актуальные вопросы стоматологии. Сборник научных трудов, посвященный основателю кафедры ортопедической стоматологии КГМУ, профессору Исаак Михайловичу Оксману. Казань: Казанский государственный медицинский университет; 2025. С. 501–506. [Saleev R.A., Zainutdinova A.R., Mustakimova R.F. The Use of Artificial Intelligence Diagnocat in Modern Dentistry. In: Current Issues in Dentistry. Collection of Scientific Works Dedicated to the Founder of the Department of Orthopedic Dentistry of KSMU, Professor Isaak Mikhailovich Oksman. Kazan: Kazan State Medical University; 2025. pp. 501–506. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82414727>
12. Симакова А.А., Горбатова М.А., Русанов Д.С., Карякин А.А., Гржибовский А.М. Применение искусственных нейронных сетей в практике врача-ортодонта: обзор российских исследований за период 2013–2023. Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2024;18(4):24–35. [Simakova A.A., Gorbatova M.A., Rusanov D.S., Karyakin A.A., Grzhibovsky A.M. Application of artificial neural networks in orthodontic practice: a review of russian studies for the period 2013–2023. Journal of New Medical Technologies. 2024;18(4):24–35. (In Russ.)]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=69158660>
13. Adel S., Zaher A., El Harouni N., Venugopal A., Premjani P., Vaid N. Robotic applications in orthodontics: changing the face of contemporary clinical care. BioMed research international. 2021;2021:9954615. <https://doi.org/10.1155/2021/9954615>
14. Akay G., Akcayol M.A., Özdem K., Güngör K. Deep convolutional neural network-the evaluation of cervical vertebrae maturation. Oral radiology. 2023;39(4):629–638. <https://doi.org/10.1007/s11282-023-00678-7>
15. Alam M.K., Alanazi D.S.A., Alruwaili S.R.F., Alderaan R.A.I. Assessment of AI models in predicting treatment outcomes in orthodontics. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences. 2024;16(Suppl 1): S540–S542. [https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs\\_852\\_23](https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_852_23)
16. Albalawi F., Abalkhail K.A. Trends and Application of Artificial Intelligence Technology in Orthodontic Diagnosis and Treatment Planning – A Review. Applied Sciences. 2022;12(22):11864. <https://doi.org/10.3390/app122211864>
17. Almăsan O., Leucuța D.C., Hedeșiu M., Mureșanu S., Popa Ș.L. Temporomandibular joint osteoarthritis diagnosis employing artificial intelligence: systematic review and meta-analysis. Journal of Clinical Medicine. 2023;12(3):942. <https://doi.org/10.3390/jcm12030942>
18. Amasya H., Yildirim D., Aydoğan T., Kemaloglu N., Orhan K. Cervical vertebral maturation assessment on lateral cephalometric radiographs using artificial intelligence: comparison of machine learning classifier models. Dento maxillo facial radiology. 2020;49(5):20190441. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20190441>
19. Arsiwala-Schepach L.T., Chaurasia A., Müller A., Krois J., Schwendicke F. Machine Learning in Dentistry: A Scoping Review. Journal of clinical medicine. 2023;12(3):937. <https://doi.org/10.3390/jcm12030937>
20. Atici S.F., Ansari R., Allareddy V., Suhaym O., Cetin A.E., Elnagar M.H. AggregateNet: A deep learning model for automated classification of cervical vertebrae maturation stages. Orthodontics & craniofacial research. 2023;26(Suppl 1):111–117. <https://doi.org/10.1111/ocr.12644>
21. Ayidh Alqahtani K., Jacobs R., Smolders A., Van Gerven A., Willems H., Shujaat S. et al. Deep convolutional neural network-based automated segmentation and classification of teeth with orthodontic brackets on cone-beam computed-tomographic images: a validation study. European journal of orthodontics. 2023;45(2):169–174. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjac047>
22. Bao H., Zhang K., Yu C., Li H., Cao D., Shu H. et al. Evaluating the accuracy of automated cephalometric analysis based on artificial intelligence. BMC Oral Health. 2023;23(1):191. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02881-8>
23. Bianchi J., Ruellas A., Prieto J.C., Li T., Sorousmehr R., Najarian K. et al. Decision support systems in temporomandibular joint osteoarthritis: a review of data science and artificial intelligence applications. Seminars in orthodontics. 2021;27(2):78–86. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2021.05.004>
24. Bianchi J., de Oliveira Ruellas A.C., Gonçalves J.R., Paniagua B., Prieto J.C., Styner M. et al. Osteoarthritis of the temporomandibular joint can be diagnosed earlier using biomarkers and machine learning. Scientific reports. 2020;10(1):8012. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64942-0>
25. Bulatova G., Kusnoto B., Grace V., Tsay T.P., Avenetti D.M., Sanchez F.J.C. Assessment of automatic cephalometric landmark identification using artificial intelligence. Orthodontics & craniofacial research. 2021;24(Suppl 2):37–42. <https://doi.org/10.1111/ocr.12542>
26. Caruso S., Caruso S., Pellegrino M., Skafi R., Nota A., Tecco S. A knowledge-based algorithm for automatic monitoring of orthodontic treatment: the dental monitoring system. Two cases. Sensors. 2021;21(5):1856. <https://doi.org/10.3390/s21051856>
27. Cassi D., Battistoni G., Magnifico M., Di Blasio C., Pedrazzi G., Di Blasio A. Three-dimensional evaluation of facial asymmetry in patients with hemifacial microsomia using stereophotogrammetry. 2019;47(1):179–184. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.11.011>
28. Chaiprasittikul N., Thanathornwong B., Pornprasertsuk-Damrongsri S., Raocharernporn S., Maponthong S., Manopatanakul S. Application of a Multi-Layer Perceptron in Preoperative Screening for Orthognathic Surgery. Healthcare Informatics Research. 2023;29(1):16–22. <https://doi.org/10.4258/hir.2023.29.1.16>
29. Choi H.I., Jung S.K., Baek S.H., Lim W.H., Ahn S.J., Yang I.H. et al. Artificial intelligent model with neural network machine learning for the diagnosis of orthognathic surgery. Journal of Craniofacial Surgery. 2019;30(7):1986–1989. <https://doi.org/10.1097/scs.00000000000005650>
30. Chung M., Lee J., Song W., Song Y., Yang I.H., Lee J. et al. Automatic registration between dental cone-beam CT and scanned surface via deep pose regression neural networks and clustered similarities. IEEE Transactions on Medical Imaging. 2020;39(12):3900–3909. <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3007520>
31. Real A.D., Real O.D., Sardina S., Oyonarte R. Use of automated artificial intelligence to predict the need for orthodontic extractions. Korean Journal of Orthodontics. 2022;52(2):102–111. <https://doi.org/10.4041/kjod.2022.52.2.102>
32. D'Ettoire G., Farronato M., Candida E., Quinzi V., Grippaudo C. A comparison between stereophotogrammetry and smartphone structured light technology for three-dimensional face scanning. The Angle orthodontist. 2022;92(3):358–363. <https://doi.org/10.2319/040921-290.1>
33. Ding H., Wu J., Zhao W., Matinlinna J.P., Burrow M.F., Tsoi J.K.H. Artificial intelligence in dentistry – A review. Frontiers in Dental Medicine. 2023;4:1085251. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2023.1085251>
34. Dpalma G., Inchingolo A.D., Inchingolo A.M., Piras F., Carpentiere V., Garofoli G. et al. Artificial Intelligence and Its Clinical Applications in Orthodontics: A Systematic Review. Diagnostics. 2023;13(24):3677. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13243677>
35. Dong H., Abdulsalam Abdullah R. Artificial intelligence prediction model for the relationship between obstructive sleep Apnea severity and maxillofacial developmental disorders in children: a prospective cohort study. Future Technology. 2025;4(3):85–96. <https://fupubco.com/futech/article/view/364>
36. Duran G.S., Gökmen Ş., Topsakal K.G., Görgülü S. Evaluation of the accuracy of fully automatic cephalometric analysis software with artificial intelligence algorithm. Orthodontics & Craniofacial Research. 2023;26(3):481–490. <https://doi.org/10.1111/ocr.12633>
37. Etemad L., Wu T.H., Heiner P., Liu J., Lee S., Chao W. et al. Machine learning from clinical data sets of a contemporary decision for orthodontic tooth extraction. Orthodontics & Craniofacial Research. 2021;24(Suppl 2):193–200. <https://doi.org/10.1111/ocr.12502>
38. Evangelista K., de Freitas Silva B.S., Yamamoto-Silva F.P., Valladares-Neto J., Silva M.A.G., Cevidanes L.H.S. et al. Accuracy of artificial intelligence for tooth extraction decision-making in orthodontics: a systematic review and meta-analysis. Clinical Oral Investigations. 2022;26(12):6893–6905. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04742-0>
39. Faber J., Faber C., Faber P. Artificial intelligence in orthodontics. APOS Trends in Orthodontics. 2019;9(4):201–205. [https://doi.org/10.25259/APOS\\_123\\_2019](https://doi.org/10.25259/APOS_123_2019)
40. Ferlito T., Hsiou D., Hargett K., Herzog C., Bachour P., Katebi N. et al. Assessment of artificial intelligence-based remote monitoring of clear aligner therapy: A prospective study. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics. 2023;164(2):194–200. <https://doi.org/10.1016/j.jado.2022.11.020>
41. Gala K.M. Ethical and Legal Considerations in AI-Driven Health Cybersecurity. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2024;10(5):682–90. <https://doi.org/10.32628/CSEIT241051059>
42. Gaonkar P., Mohammed I., Ribin M., Kumar D.C., Thomas P.A., Saini R. Assessing the Impact of AI-Enhanced Diagnostic Tools on the Treatment Planning of Orthodontic Cases: An RCT. Journal of pharmacy & bioallied sciences. 2024;16(Suppl 2): S1798–S1800. [https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs\\_1147\\_23](https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_1147_23)
43. Alqahtani H. Evaluation of an online website-based platform for cephalometric analysis. Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery. 2020;121(1):53–57. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2019.04.017>
44. Mohammad-Rahimi H., Nadimi M., Rohban M.H., Shamsoddin E., Lee V.Y., Motamedian S.R. Machine learning and orthodontics, current trends and the future opportunities: A scoping review. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2021;160(2):170–192.e4. <https://doi.org/10.1016/j.jado.2021.02.013>
45. Hu X., Zhao Y., Yang C. Evaluation of root position during orthodontic treatment via multiple intraoral scans with automated registration technology. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2023;164(2):285–292. <https://doi.org/10.1016/j.jado.2023.04.012>
46. Hwang H.W., Moon J.H., Kim M.G., Donatelli R.E., Lee S.J. Evaluation of automated cephalometric analysis based on the latest deep learning method. 2021;91(3):329–335. <https://doi.org/10.2319/021220-100.1>
47. Ito S., Mine Y., Yoshimi Y., Takeda S., Tanaka A., Onishi A. et al. Automated segmentation of articular disc of the temporomandibular joint on magnetic resonance images using deep learning. Scientific Reports. 2022;12(1):221. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04354-w>
48. Jha N., Lee K.S., Kim Y.J. Diagnosis of temporomandibular disorders using artificial intelligence technologies: A systematic review and meta-analysis. PLoS One. 2022;17(8): e0272715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272715>
49. Jihed M., Dallel I., Tobji S., Ben Amor A. The impact of artificial intelligence on contemporary orthodontic treatment planning-a systematic review and meta-analysis. Scholars Journal of Dental Sciences. 2022;9(5):70–87. <https://doi.org/10.36347/sjds.2022.v09i05.001>
50. Jung S.K., Kim T.W. New approach for the diagnosis of extractions with neural network machine learning. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics. 2016;149(1):127–33. <https://doi.org/10.1016/j.jado.2015.07.030>

51. Kazimierczak N., Kazimierczak W., Serafin Z., Nowicki P., Lemanowicz A., Nadolska K. et al. Correlation analysis of nasal septum deviation and results of AI-driven automated 3D cephalometric analysis. *Journal of Clinical Medicine*. 2023;12(20):6621. <https://doi.org/10.3390/jcm12206621>
52. Khanagar S.B., Al-Ehaideb A., Vishwanathaiah S., Maganur P.C., Patil S., Naik S. et al. Scope and performance of artificial intelligence technology in orthodontic diagnosis, treatment planning, and clinical decision-making: a systematic review. *Journal of dental sciences*. 2021;16(1):482–492. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.05.022>
53. Kim H., Kim C.S., Lee J.M., Lee J.J., Lee J., Kim J.S. et al. Prediction of Fishman's skeletal maturity indicators using artificial intelligence. *Scientific Reports*. 2023;13(1):5870. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33058-6>
54. Kim H., Shim E., Park J., Kim Y.J., Lee U., Kim Y. Web-based fully automated cephalometric analysis by deep learning. *Computer methods and programs in biomedicine*. 2020;194:105513. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105513>
55. Kim H.J., Kim K.D., Kim D.H. Deep convolutional neural network-based skeletal classification of cephalometric image compared with automated-tracing software. *Scientific reports*. 2022;12(1):11659. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15856-6>
56. Kim M.J., Liu Y., Oh S.H., Ahn H.W., Kim S.H., Nelson G. Evaluation of a multi-stage convolutional neural network-based fully automated landmark identification system using cone-beam computed tomography-synthesized posteroanterior cephalometric images. *Korean Journal of Orthodontics*. 2021;51(2):77–85. <https://doi.org/10.4041/kjod.2021.51.2.77>
57. Kim Y.H., Park J.B., Chang M.S., Ryu J.J., Lim W.H., Jung S.K. Influence of the Depth of the Convolutional Neural Networks on an Artificial Intelligence Model for Diagnosis of Orthognathic Surgery. *Journal of personalized medicine*. 2021;11(5):356. <https://doi.org/10.3390/jpm11050356>
58. Ko C., Tanikawa C., Wu T., Pastewait M., Jackson C.B., Kwon J.J. et al. Machine learning in orthodontics: application review. *Progress in Orthodontics*. 2021;22(1):18. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00361-9>
59. K k H., Acilar A.M., Izgi M.S. Usage and comparison of artificial intelligence algorithms for determination of growth and development by cervical vertebrae stages in orthodontics. *Progress in Orthodontics*. 2019;20(1):41. <https://doi.org/10.1186/s40510-019-0295-8>
60. Konstantonis D., Anthopoulou C., Makou M. Extraction decision and identification of treatment predictors in Class I malocclusions. *Progress in Orthodontics*. 2013;14:47. <https://doi.org/10.1186/2196-1042-14-47>
61. 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. *Journal of Orofacial Orthopedics*. 2020;81(1):52–68. <https://doi.org/10.1007/s00056-019-00203-8>
62. Le V.N.T., Kang J., Oh I.S., Kim J.H., Yang Y.M., Lee D.W. Effectiveness of human–Artificial intelligence collaboration in cephalometric landmark detection. *Journal of Personalized Medicine*. 2022;12(3):387. <https://doi.org/10.3390/jpm12030387>
63. Lee H., Ahmad S., Frazier M., Dundar M.M., Turkkahraman H. A novel machine learning model for class III surgery decision. *Journal of Orofacial Orthopedics*. 2024;85(4):239–249. <https://doi.org/10.1007/s00056-022-00421-7>
64. Lee J.H., Yu H.J., Kim M.J., Kim J.W., Choi J. Automated cephalometric landmark detection with confidence regions using Bayesian convolutional neural networks. *BMC Oral Health*. 2020;20(1):270. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01256-7>
65. Lee S.C., Hwang H.S., Lee K. Accuracy of deep learning-based integrated tooth models by merging intraoral scans and CBCT scans for 3D evaluation of root position during orthodontic treatment. *Progress in Orthodontics*. 2022;23(1):15. <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00410-x>
66. Li P., Kong D., Tang T., Su D., Yang P., Wang H. et al. Orthodontic Treatment Planning based on Artificial Neural Networks. *Scientific Reports*. 2019;9(1):2037. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38439-w>
67. Li S., Guo Z., Lin J., Ying S. Artificial intelligence for classifying and archiving orthodontic images. *BioMed Research International*. 2022;2022:1473977. <https://doi.org/10.1155/2022/1473977>
68. Lin G., Kim P.J., Baek S.H., Kim H.G., Kim S.W., Chung J.H. Early Prediction of the Need for Orthognathic Surgery in Patients With Repaired Unilateral Cleft Lip and Palate Using Machine Learning and Longitudinal Lateral Cephalometric Analysis Data. *Journal of Craniofacial Surgery*. 2021;32(2):616–620. <https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000006943>
69. Lin H.H., Chiang W.C., Yang C.T., Cheng C.T., Zhang T., Lo L.J. On construction of transfer learning for facial symmetry assessment before and after orthognathic surgery. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2021;200:105928. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.105928>
70. Liu Z., He X., Wang H., Xiong H., Zhang Y., Wang G. et al. Hierarchical self-supervised learning for 3D tooth segmentation in intra-oral mesh scans. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2023;42(2):467–480. <https://doi.org/10.1109/TMI.2022.3222388>
71. Ma Q., Kobayashi E., Fan B., Nakagawa K., Sakuma I., Masamune K. et al. Automatic 3D landmarking model using patch-based deep neural networks for CT image of oral and maxillofacial surgery. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2020;16(3): e2093. <https://doi.org/10.1002/rcs.2093>
72. Mahto R.K., Kaffe D., Giri A., Luintel S., Karki A. Evaluation of fully automated cephalometric measurements obtained from web-based artificial intelligence driven platform. *BMC Oral Health*. 2022;22(1):132. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02170-w>
73. Miloglu O., Guller M.T., Tosun Z.T. The Use of Artificial Intelligence in Dentistry Practices. *Eurasian Journal of Medicine*. 2022;54(Suppl 1):34–42. <https://doi.org/10.5152/eurasianjmed.2022.22301>
74. Moon J.H., Shin H.K., Lee J.M., Cho S.J., Park J.A., Donatelli R.E. et al. Comparison of individualized facial growth prediction models based on the partial least squares and artificial intelligence. *The Angle Orthodontist*. 2024;94(2):207–215. <https://doi.org/10.2319/031723-181.1>
75. Muraev A.A., Tsai P., Kibardin I., Oborotistov N., Shirayeva T., Ivanov S. Frontal cephalometric landmarking: humans vs artificial neural networks. *International Journal of Computerized Dentistry*. 2020;23(2):139–148.
76. Nishimoto S., Sotsuka Y., Kawai K., Ishise H., Kakibuchi M. Personal computer-based cephalometric landmark detection with deep learning, using cephalograms on the internet. *Journal of Craniofacial Surgery*. 2019;30(1):91–95. <https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000004901>
77. Ozsari S., G zel M.S., Yılmaz D., Kamburo lu K. A comprehensive review of artificial intelligence based algorithms regarding temporomandibular joint related diseases. *Diagnostics*. 2023;13(16):2700. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13162700>
78. Park J.A., Moon J.H., Lee J.M., Cho S.J., Seo B.M., Donatelli R.E. et al. Does artificial intelligence predict orthognathic surgical outcomes better than conventional linear regression methods? *The Angle Orthodontist*. 2024;94(5):549–556. <https://doi.org/10.2319/111423-756.1>
79. Park J.H., Kim Y.J., Kim J., Kim J., Kim I.-H., Kim N. et al. Use of artificial intelligence to predict outcomes of nonextraction treatment of Class II malocclusions. *Seminars in Orthodontics*. 2021;27(2):87–95. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2021.05.005>
80. Park Y.S., Choi J.H., Kim Y., Choi S.H., Lee J.H., Kim K.H. et al. Deep learning-based prediction of the 3D postorthodontic facial changes. *Journal of Dental Research*. 2022;101(11):1372–1379. <https://doi.org/10.1177/00220345221106676>
81. Prados-Privado M., Garcia Villal n J., Mart nez-Mart nez C.H., Ivorra C., Prados-Frutos J.C. Dental caries diagnosis and detection using neural networks: a systematic review. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(11):3579. <https://doi.org/10.3390/jcm9113579>
82. Prasad J., Mallikarjunaiah D.R., Shetty A., Gandedkar N., Chikkamuniswamy A.B., Shivashankar P.C. Machine Learning Predictive Model as Clinical Decision Support System in Orthodontic Treatment Planning. *Dentistry Journal*. 2022;11(1):1. <https://doi.org/10.3390/dj11010001>
83. Ramezanzade S., Laurentiu T., Bakhshandah A., Ibragimov B., Kvist T., Bj rmdal L. The efficiency of artificial intelligence methods for finding radiographic features in different endodontic treatments—a systematic review. *Acta Odontologica Scandinavica*. 2023;81(6):422–435. <https://doi.org/10.1080/00016357.2022.2158929>
84. Retrouvey J.M. The role of AI and machine learning in contemporary orthodontics. *APOS Trends in Orthodontics*. 2021;11:74–80. [https://doi.org/10.25259/APOS\\_148\\_2020](https://doi.org/10.25259/APOS_148_2020)
85. Rousseau M., Retrouvey J.M. Machine learning in orthodontics: Automated facial analysis of vertical dimension for increased precision and efficiency. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2022;161(3):445–450. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.03.017>
86. Ryu J., Lee Y.S., Mo S.P., Lim K., Jung S.K., Kim T.W. Application of deep learning artificial intelligence technique to the classification of clinical orthodontic photos. *BMC Oral Health*. 2022;22(1):454. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02466-x>
87. Ryu J., Kim Y.H., Kim T.W., Jung S.K. Evaluation of artificial intelligence model for crowding categorization and extraction diagnosis using intraoral photographs. *Scientific Reports*. 2023;13(1):5177. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32514-7>
88. Sadeghi T.S., Ourang S.A., Sohrabniya F., Sadr S., Shobeiri P., Motamedian S.R. Performance of artificial intelligence on cervical vertebral maturation assessment: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*. 2025;25(1):187. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05482-9>
89. Talaat S., Kaboudan A., Talaat W., Kusnoto B., Sanchez F., Elnagar M.H. et al. The validity of an artificial intelligence application for assessment of orthodontic treatment need from clinical images. *Seminars in Orthodontics*. 2021;27(2):164–171. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2021.05.012>
90. Schwendicke F., Golla T., Dreher M., Krois J. Convolutional neural networks for dental image diagnostics: A scoping review. *Journal of Dentistry*. 2019;91:103226. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.103226>
91. Setzer F.C., Shi K.J., Zhang Z., Yan H., Yoon H., Mupparapu M. et al. Artificial intelligence for the computer-aided detection of periapical lesions in cone-beam computed tomographic images. *Journal of Endodontics*. 2020;46(7):987–993. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.03.025>
92. Shin W., Yeom H.G., Lee G.H., Yun J.P., Jeong S.H., Lee J.H. et al. Deep learning based prediction of necessity for orthognathic surgery of skeletal malocclusion using cephalogram in Korean individuals. *BMC Oral Health*. 2021;21(1):130. <https://doi.org/10.1186/s12903-021-01513-3>
93. Shojaei H., Augusto V. Constructing Machine Learning Models for Orthodontic Treatment Planning: A Comparison of Different Methods. In: 2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data); Osaka, Japan; December 17–20, 2022. pp. 2790–2799. <https://doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10021045>

94. Snider V., Homs K., Kusnoto B., Atsawasuwan P., Viana G., Allareddy V. et al. Effectiveness of AI-driven remote monitoring technology in improving oral hygiene during orthodontic treatment. *Orthodontics & Craniofacial Research*. 2023;26(Suppl 1):102–110. <https://doi.org/10.1111/ocr.12666>
95. Strunga M., Urban R., Surovková J., Thurzo A. Artificial intelligence systems assisting in the assessment of the course and retention of orthodontic treatment. *Healthcare*. 2023;11(5):683. <https://doi.org/10.3390/healthcare11050683>
96. Subramanian A. K., Chen Y., Almalki A., Sivamurthy G., Kafle D. Cephalometric Analysis in Orthodontics Using Artificial Intelligence-A Comprehensive Review. *BioMed Research International*. 2022;2022:1880113. <https://doi.org/10.1155/2022/1880113>
97. Suhail Y., Upadhyay M., Chhibber A., Kshitiz. Machine Learning for the Diagnosis of Orthodontic Extractions: A Computational Analysis Using Ensemble Learning. *Bioengineering*. 2020;7(2):55. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7020055>
98. Surendran A., Daigavane P., Shrivastav S., Kamble R., Sanchla A. D., Bharti L. et al. The Future of Orthodontics: Deep Learning Technologies. *Cureus*. 2024;16(6): e62045. <https://doi.org/10.7759/cureus.62045>
99. Tanikawa C., Yamashiro T. Development of novel artificial intelligence systems to predict facial morphology after orthognathic surgery and orthodontic treatment in Japanese patients. *Scientific Reports*. 2021;11(1):15853. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95002-w>
100. Volovic J., Badirli S., Ahmad S., Leavitt L., Mason T., Bhamidipalli S. S. et al. A novel machine learning model for predicting orthodontic treatment duration. *Diagnostics*. 2023;13(17):2740. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172740>
101. Woo H., Jha N., Kim Y. J., Sung S. J. Evaluating the accuracy of automated orthodontic digital setup models. *Seminars in Orthodontics*. 2023;29(1):60–67. <https://doi.org/10.1053/j.sodo.2022.12.010>
102. Wood T., Anigbo J. O., Eckert G., Stewart K. T., Dundar M. M., Turkkahraman H. Prediction of the Post-Pubertal Mandibular Length and Y Axis of Growth by Using Various Machine Learning Techniques: A Retrospective Longitudinal Study. *Diagnostics*. 2023;13(9):1553. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13091553>
103. Xu L., Chen J., Qiu K., Yang F., Wu W. Artificial intelligence for detecting temporomandibular joint osteoarthritis using radiographic image data: A systematic review and meta-analysis of diagnostic test accuracy. *PLOS ONE*. 2023;18(7): e0288631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288631>
104. Yao J., Zeng W., He T., Zhou S., Zhang Y., Guo J. et al. Automatic localization of cephalometric landmarks based on convolutional neural network. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2022;161(3): e250-e259. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.09.012>
105. Yassir Y. A., Salman A. R., Nabhat S. A. The accuracy and reliability of WebCeph for cephalometric analysis. *Journal of Taibah University Medical Sciences*. 2022;17(1):57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2021.08.010>
106. Ye H., Cheng Z., Ungvijanpunya N., Chen W., Cao L., Gou Y. Is automatic cephalometric software using artificial intelligence better than orthodontist experts in landmark identification? *BMC Oral Health*. 2023;23(1):467. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03188-4>
107. Yu H. J., Cho S. R., Kim M. J., Kim W. H., Kim J. W., Choi J. Automated skeletal classification with lateral cephalometry based on artificial intelligence. *Journal of Dental Research*. 2020;99(3):249–256. <https://doi.org/10.1177/0022034520901715>
108. Yurdakurban E., Duran G. S., Görgülü S. Evaluation of an automated approach for facial midline detection and asymmetry assessment: A preliminary study. *Orthodontics & Craniofacial Research*. 2021;24(Suppl 2):84–91. <https://doi.org/10.1111/ocr.12539>
109. Zeng M., Yan Z., Liu S., Zhou Y., Qiu L. Cascaded convolutional networks for automatic cephalometric landmark detection. *Medical Image Analysis*. 2021;68:101904. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101904>
110. Zhao T., Zhou J., Yan J., Cao L., Cao Y., Hua F. et al. Automated adenoid hypertrophy assessment with lateral cephalometry in children based on artificial intelligence. *Diagnostics*. 2021;11(8):1386. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11081386>